ETH zürich

ETH Library

Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen

Grundwissen für Ingenieure

Monograph

Author(s):
Schneider, Jörg; Schlatter, Hanspeter

Publication date:
2018-05

Permanent link:
https://doi.org/10.3929/ethz-a-007049874

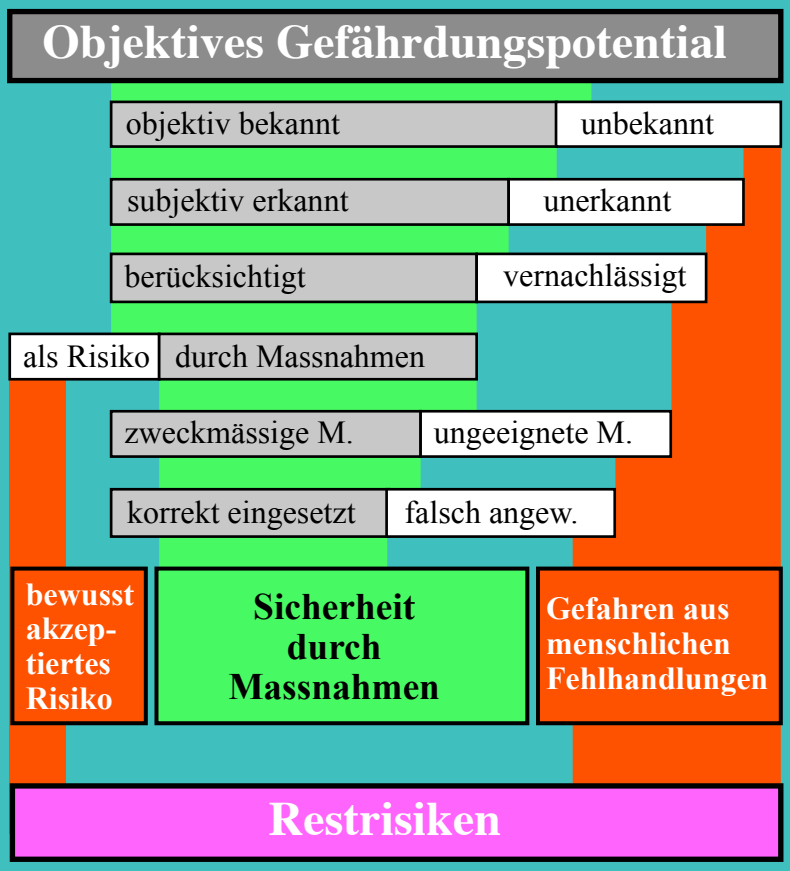
Rights / license:
Creative Commons Namensnennung - Nicht-kommerziell - Keine Bearbeitung 2.5 Schweiz

This page was generated automatically upon download from the ETH Zurich Research Collection.
For more information, please consult the Terms of use.

Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen

Grundwissen für Ingenieure

Jörg Schneider
unter Mitarbeit von Hanspeter Schlatter



vdf

Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen

Grundwissen für Ingenieure

Dieses Buch richtet sich an studierende und praktizierende Ingenieure. In grosser thematischer Breite und gleichzeitig in einfacher und verständlicher Weise werden die Konzepte und Verfahren zur Gewährleistung der Sicherheit im Bauwesen durchleuchtet.

Neben einer Einführung in das elementare Grundwissen der Statistik und Wahrscheinlichkeitslehre erhält der Leser Einblick in die Gefährdungsanalyse und in die sich darauf stützende Massnahmenplanung.

Den zentralen Teil des Buches bildet die Zuverlässigkeitstheorie in der auf kleine Versagenswahrscheinlichkeiten ausgerichteten Form. Die wesentlichen Rechenverfahren werden dargestellt und durch Beispiele – meist aus dem statisch-konstruktiven Bereich des Bauingenieurwesens – veranschaulicht. Auch die Arbeit mit logischen Bäumen, d.h. mit Ereignis-, Fehler- und Entscheidungsbäumen, wird in den Grundzügen vorgestellt.

Die Sicherheit im Bauwesen wird entscheidend durch Fehlhandlungen der beteiligten Menschen beeinträchtigt. Praxisnah und konkret zeigt dieses Buch, wie der im Bauwesen tätige Fachmann in den verschiedenen Arbeitsphasen Fehler verhüten bzw. durchgeschlüpfte Fehler noch rechtzeitig entdecken kann.

Am Schluss wird gezeigt, auf welchen Kriterien sich Entscheide stützen, um gewisse Risiken im konkreten Fall zu akzeptieren.

This work is licensed under creative commons license
CC BY-NC-ND 2.5 CH.

Hinweis:

Diese elektronische Publikation basiert auf der vergriffenen 2. Auflage von:

Schneider, Jörg
Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen:
Grundwissen für Ingenieure
Unter Mitarbeit von Hanspeter Schlatter

© 1994 vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich

ISBN 3-7281-2167-3
ISBN 3-7281-2167-7
DOI: 10.3218/2167-7

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Vorwort

Das vorliegende Buch ist in erster Linie ein Lehrbuch. Es ist entstanden aus der im Rahmen des Nachdiplom-Studiums der Abteilung für Bauingenieurwesen der ETH Zürich während mehrerer Jahre gehaltenen Vorlesung "Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken". Die zu dieser Veranstaltung entwickelten Hellraumfolien hat mein Mitarbeiter Hanspeter Schlatter als Vorlage genommen für eine erste Fassung dieses Textes. Wir haben diese Fassung gründlich überarbeitet und verbessert. Sie dient als Grundlage für die erstmals im Sommersemester 1993 im 6. Semester der Abteilung für Bauingenieurwesen obligatorisch geführten Lehrveranstaltung "Sicherheit im Bauwesen".

Ziel dieser Lehrveranstaltung – und Hoffnung zugleich – ist es, bei den Studierenden Interesse und Freude zu wecken, ihr bereits zu einem guten Teil erarbeitetes technisches Fachwissen mit den dahinter stehenden allgemeineren Fragen und Gedanken zu verbinden und dadurch tiefere Einsichten in die Denkweise des Ingenieurs zu gewinnen. Dass sich die Beispiele vorwiegend auf Tragwerke beschränken, sollte dabei nicht weiter stören, denn die Denkweise und die Methoden lassen sich unschwer auf andere Bereiche des Bauwesens übertragen.

Der vorliegende Text soll aber auch die Fachleute in der Berufspraxis ansprechen und zu einem besseren Verständnis der Hintergründe moderner statisch-konstruktiver Normen und Vorschriften führen. Der Text wird auch die Einarbeitung in Methoden und Verfahren der Zuverlässigkeitstheorie erleichtern, die in der Praxis vermehrte Beachtung und Anwendung finden.

Die meisten der zur Auflockerung des Textes eingestreuten Cartoons stammen von Otto Dicke (siehe Dicke, 1975). Für deren Abdruck hat freundlicherweise Frau Dicke, NL, ihre Zustimmung gegeben.

Bei der gründlichen Überarbeitung dieses Buches haben meine Assistenten, allen voran die Herren P. Dütschler und A. Scheiwiller, ganz kräftig mitgeholfen. Hierfür möchte ich auch an dieser Stelle herzlich danken. Zu danken ist auch dem vdf, insbesondere Frau K. Gellusch für das sorgfältige Korrekturlesen und Herrn Ch. Romanutti für die motivierende Zusammenarbeit, sowie schliesslich auch dem B.G. Teubner Verlag für die Übernahme dieser Schrift in sein Verlagsprogramm.

Zürich, im Oktober 1993 Jörg Schneider

Spätere Fassungen

Die zweite Auflage dieses Buches gab uns die Gelegenheit, eine Reihe von Fehlern zu berichtigen und an vielen Stellen den Text lesbarer zu machen oder zu ergänzen.

Zürich, im Mai 1995 Jörg Schneider

Das Buch ist vergriffen und wird von den Verlegern nicht neu aufgelegt. Ich habe die Files nun neu in eine *.pdf Fassung formatiert und dabei eine Reihe von mittlerweile aufgedeckten Fehlern korrigiert.

Zollikon, im Oktober 2011 Jörg Schneider

Eine erneute Durchsicht gab Anlass zu einigen kleineren Korrekturen. Und es erwies sich als zweckmässig, für beidseitigen Druck zu formatieren. Damit kann mit den Einstellungen *Layout 2 Seiten pro Blatt* und *beidseitigem Druck* das Buch auf weniger als 50 Blättern gedruckt werden.

Zollikerberg, im Mai 2018 Jörg Schneider

Inhaltsübersicht

		Seite
1.	**Einleitung**	**7**
2.	**Gefährdungsanalyse und Massnahmenplanung**	**19**
3.	**Verarbeitung von Information**	**29**
4.	**Basisvariablen und Modelle**	**53**
5.	**Zuverlässigkeit von Elementen und Systemen**	**69**
6.	**Tragsicherheit bestehender Bauten**	**97**
7.	**Gefährdungsanalyse mit logischen Bäumen**	**115**
8.	**Human Error im Bauprozess**	**129**
9.	**Risikovergleiche und Wertungsfragen**	**149**
10.	**Anhang**	**167**

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Inhaltsverzeichnis

Seite

1. Einleitung

1.1 Zentrale Begriffe 7
1.11 Risiko 7
1.12 Sicherheit 7
1.13 Zuverlässigkeit 8
1.2 Problemkreise und Fragestellungen 8
1.21 Die grundlegende Frage: "Wie sicher ist sicher genug?" 8
1.22 Problemkreise 9
1.3 Blick in die Wirklichkeit 10
1.4 Analyse von 800 Schadenfällen im Bauwesen 12
1.5 Gefahren und Restgefahren 15
1.51 Gefährdungspotential, Sicherheit, Restrisiken 15
1.52 "Schnee" – ein Beispiel 16
1.53 Menschliche Fehlhandlungen: Was ist zu tun? 17
1.6 Ziel und Ansatzpunkte 17

2. Gefährdungsanalyse und Massnahmenplanung

2.1 Gefahren und Gefahrenerkennung 19
2.2 Gefährdungsbilder 21
2.3 Massnahmenkategorien 23
2.4 Erarbeitung der Projektierungsunterlagen 24
2.41 Hierarchische Ordnung 24
2.42 Nutzungsplan 23
2.43 Sicherheitsplan 25
2.44 Operable Grundlagen für den Bauprozess 26
2.45 Die Reaktion der Praxis 27

3. Verarbeitung von Information

3.1 Elemente der Wahrscheinlichkeitstheorie 29
3.11 Ereignisse 29
3.12 Wahrscheinlichkeiten 29
3.13 Axiome und Rechenregeln 31
3.14 Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten 32
3.2 Auswertung von Stichproben 36
3.21 Urlisten, Strichlisten 37
3.22 Histogramme 37
3.23 Ganglinien, stochastische Prozesse 37
3.24 Parameter von Stichproben 38
3.3 Verteilungen 39
3.31 Definitionen 39
3.32 Wichtige Verteilungstypen 40
3.33 Konstruktion von Wahrscheinlichkeitspapieren 42
3.4 Parameterschätzung und Extrapolation 42
3.41 Allgemeines 42
3.42 Parameterschätzung 42
3.43 Datenaufbereitung mit Wahrscheinlichkeitspapieren 43
3.44 Extrapolationen 45
3.5 Beobachtungen in Paaren und zweidimensionale Verteilungen 46
3.51 Problemstellung 46
3.52 Korrelation 47
3.53 Regression 47
3.54 Zweidimensionale kontinuierliche Verteilungen 47

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

3.6 Funktionen von Zufallsvariablen 48
3.61 Rechenregeln 48
3.62 Der Zentrale Grenzwertsatz 49
3.63 Weitere Parameter von Funktionen von Variablen 50
3.7 Fuzzy Information 50

4. Basisvariablen und Modelle
4.1 Das Bemessungsproblem 53
4.2 Zustand, Zustandskomponenten, Basisvariablen 54
4.21 Beurteilungsbasis 54
4.22 Typen von Basisvariablen 56
4.23 Bemessungsvariablen 56
4.3 Widerstand R von Tragelementen 57
4.31 Widerstandsmodell 57
4.32 Modellunschärfen 57
4.33 Baustoffeigenschaften 58
4.34 Geometrische Grössen 59
4.4 Beanspruchung S von Tragelementen 59
4.41 Kombination von Einwirkungen 59
4.42 Beanspruchungsmodell 61
4.43 Modellunschärfen 61
4.44 Hinweise zu den Einwirkungen 62
4.5 Andere Bereiche des Bauwesens 65

5. Zuverlässigkeit von Elementen und Systemen
5.1 Vorbemerkungen 69
5.2 Die Monte-Carlo Methode 70
5.3 Das Problem G = R – S 72
5.31 Einleitung und Beispiel 72
5.32 Der klassische Ansatz 73
5.33 *Basler*, in der Schreibweise von *Cornell* 74
5.34 Darstellung als zweidimensionale Verteilungsdichte 76
5.35 Die Methode von *Hasofer* und *Lind* 77
5.4 Erweiterungen 79
5.41 Lineare Grenzzustandsgleichung mehrerer Variablen 79
5.42 Nichtlineare Grenzzustandsgleichung 81
5.43 Tail Approximation 83
5.44 Zusammenfassung 84
5.45 Unterstützung durch Computerprogramme 85
5.46 Bemerkungen zu korrelierten Variablen 85
5.5 Elementares zur Zuverlässigkeit von Systemen 86
5.51 Definitionen 86
5.52 Serie-Systeme 87
5.53 Parallel-Systeme 88
5.54 Gemischte Systeme 89
5.55 Erläuterung der Theorie an Tragwerken 89

6. Tragsicherheit bestehender Bauwerke
6.1 Einleitung 97
6.11 Auslösung und Verantwortlichkeiten 97
6.12 Bereiche der Beurteilung 98
6.13 Sicherheit: das Ergebnis einer Meinungsbildung 98
6.14 Varianten des Entscheids 99
6.2 Phasen der Beurteilung 100
6.21 Phase I: Grobe Erstbeurteilung 101
6.22 Phase II: Detaillierte Untersuchung 103
6.23 Phase III: Beratung im Experten-Kollegium 104

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

6.3 Aktualisierung von Information 104
6.31 Bereitstellung der Grundlagen 105
6.32 Einwirkungen 105
6.33 Festigkeiten und andere Baustoffeigenschaften 104
6.34 Abmessungen 107
6.35 Statische Systeme 107
6.36 Berechnungsverfahren 107
6.37 Bemessungsmethoden 108
6.38 Mängel und Schäden 108
6.39 Bauwerksgeschichte 108
6.4 Der Nachweis ausreichender Tragsicherheit 108
6.41 Sensitivitätsanalyse 108
6.42 Sicherheitsanalyse 110
6.5 Massnahmen 111
6.51 Sichernde Sofortmassnahmen 111
6.52 Administrative Massnahmen 112
6.53 Verstärken der Konstruktion 112
6.54 Abbruch und Neubau 112

7. Gefährdungsanalyse mit logischen Bäumen
7.1 Übersicht und Begriffe 115
7.2 Fehlerbäume 117
7.21 Charakteristika von Fehlerbäumen 117
7.22 Symbole 117
7.23 Ein wegleitendes Beispiel 118
7.24 Bemerkungen 119
7.3 Ereignisbäume 120
7.31 Charakteristika des Ereignisbaums 120
7.32 Ein wegleitendes Beispiel 120
7.4 Ursachen/Folgen-Diagramme 122
7.41 Charakteristika 122
7.42 Beispiel 122
7.5 Berücksichtigung von Unschärfen 123
7.6 Anwendungsgebiete 124
7.61 Schwachstellenanalyse und Ausfallszenarien 124
7.62 Lokalisieren geeigneter Sicherheitsmassnahmen 124
7.7 Entscheidungsbäume 124
7.71 Charakteristika 124
7.72 Ein wegleitendes Beispiel 125
7.73 Die "Sicherheit" des Experten 126

8. Human Error im Bauprozess
8.1 Einleitung 129
8.11 Ansatzpunkte und Ziel 129
8.12 Fehlerarten 130
8.13 Massnahmen gegen Fehler 131
8.2 Selbstkontrolle 131
8.3 Fehlerverhütung 132
8.31 Massnahmen im technischen Ablauf 133
8.32 Massnahmen im organisatorischen Bereich 135
8.33 Verhaltensorientierte Massnahmen 136
8.4 Entdecken von Fehlern und Korrektur 139
8.41 Begriffe und Zusammenhänge 136
8.42 Kontrollprinzipien 139
8.43 Planung der Kontrolle 141
8.44 Checklisten 141
8.45 Durchführung und Protokoll 142

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

8.46 Wer soll prüfen? 142
8.47 Feed-Back 143
8.5 Qualitätssicherung und Sicherheitskultur 141
8.51 Definition und Vorbemerkungen 141
8.52 Neue Bürde für die Bauwirtschaft? 141
8.53 Eine neue Grundeinstellung 142
8.54 Sicherheitskultur 143
8.55 Präsent sein ist alles 144

9. Risikovergleiche und Wertungsfragen
9.1 Sicherheit und Gefahrenumwelt des Menschen 149
9.2 Risikovergleiche 151
9.21 Vergleich von Risiken 151
9.22 Rettungseffizienz von Sicherheitsmassnahmen 154
9.23 Vergleich in Häufigkeits/Ausmass-Diagrammen 155
9.24 Risiko-Aversion 157
9.25 Ausweitung des Blickwinkels 160
9.3 Rettungskosten 160
9.31 Definition 160
9.32 Optimierungsfragen 161
9.33 Setzen von Prioritäten 163
9.34 Rettungskosten in Tragwerken 163
9.4 Gibt es einen oberen Grenzwert der Sicherheit? 164

10. Anhang
10.1 Inhaltsübersicht 167
10.2 Standard-Normalverteilung 168
10.3 Wahrscheinlichkeitspapiere 171
10.31 Eintragung einer Stichprobe 171
10.32 Ermittlung der Parameter 171
10.33 Ermittlung der Wiederkehrperiode 172
10.34 Normal-Papier 173
Log-Normal-Papier 174
Gumbel-Papier 175
10.4 Prüfungsfragen 176
10.5 Das Computerprogramm *VaP* 177
10.6 Murphy's Law 178
10.7 Abkürzungen 179
10.8 Begriffe 180
10.9 Literaturverzeichnis 185
10.91 Mathematische Grundlagen 185
10.92 Bücher zur Zuverlässigkeitstheorie 185
10.93 Zeitschriftenartikel, weitere Bücher 185
10.94 Software 189

Zu den Autoren dieser Publikation 190

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

1. Einleitung

1.1 Zentrale Begriffe

Zunächst sollen die wichtigsten Begriffe diskutiert und vor allem einheitlich definiert werden. Eine ausführliche Begriffsliste findet sich im Anhang unter 10.8.

1.11 Risiko

Mit Risiko wird allgemein die Möglichkeit bezeichnet, einen Schaden zu erleiden. Risiko ist aber ebenso ein *Mass* für die *Grösse einer Gefahr*. Man versucht, Risiken zu *quantifizieren*. Risiko ist eine Funktion der *Eintretenswahrscheinlichkeit* p_E (p für probability) eines Ereignisses und dem *Erwartungswert* des Schadens bei Eintritt dieses Ereignisses – oft mit *E(S)* bezeichnet – z.B. in Franken, Verletzten oder Toten pro Ereignis. Das führt zunächst einmal zur einfachsten Form der Quantifizierung von Risiken R durch die sog. *Produktformel*, die in vielen praktischen Fällen (z.B. im Versicherungswesen) zu brauchbaren Aussagen führt:

$$R = p_E \cdot E(S) \quad \text{beziehungsweise} \quad R = h_E \cdot E(S) \tag{1.1}$$

Wahrscheinlichkeiten p haben grundsätzlich Werte zwischen 0 und 1 und sind dimensionslos. Das Risiko hat demnach die Dimension des Schadens. Diese Formulierung gilt, wenn der zeitliche Bezug fehlt. Bezieht man Risiken auf bestimmte Zeitintervalle, z.B. auf ein Jahr, spricht man nicht von Wahrscheinlichkeiten p, sondern von Häufigkeiten h, die sich auf festgelegte Zeitintervalle beziehen (z.B. h_E = 15/Jahr). Bei kleinen Häufigkeiten wird oft in begrifflich fahrlässiger Weise die Häufigkeit eines Ereignisses mit dessen Wahrscheinlichkeit gleichgesetzt.

Schwierigkeiten stellen sich ein bei sehr kleinen Häufigkeiten bzw. Wahrscheinlichkeiten und sehr grossen Schadenerwartungswerten. Es zeigt sich, dass dann die sog. Produktformel versagt ("Null-mal-Unendlich-Dilemma"). Entscheidend wird in solchen Fällen dann oft die Betrachtung des maximal denkbaren Schadens und man wird *unmöglich* machen müssen, was man als Schaden nicht akzeptieren kann oder will. Das heisst wohl in manchen Fällen, auf die entsprechende gefährliche Aktivität zu verzichten.

Risiken müssen in vielen Fällen näher bezeichnet werden. Man spricht von akzeptiertem, freiwilligem und aufgezwungenem Risiko sowie vom (oft missverstandenen) Restrisiko. Es ist zu unterscheiden zwischen individuellem und kollektivem Risiko. Auch muss beachtet werden, dass die subjektive Risikoempfindung oft erheblich vom objektiven Risiko (was immer das ist) abweicht. Alle diese Fragen werden uns beschäftigen.

1.12 Sicherheit

Die Benützer von Bauwerken, Dritte in ihrem Einflussbereich und die Gesellschaft schlechthin fordern die Sicherheit von Menschen vor dem Versagen von Bauwerken und stützen sich dabei auf die einschlägigen Rechtsgrundlagen.

Die Norm SIA 160 (SIA Norm 160, 1989) des SIA, des Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Vereins, definiert Sicherheit wie folgt:

> *"Sicherheit gegenüber einer Gefährdung besteht dann, wenn diese Gefährdung durch geeignete Massnahmen unter Kontrolle gehalten oder*

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

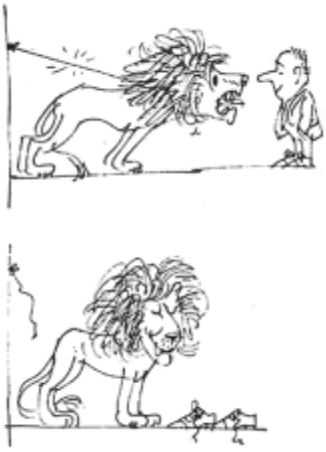
auf ein akzeptierbar kleines Mass beschränkt wird. Eine absolute Sicherheit kann nicht erreicht werden."

In der die Kommissionen des SIA in ihrer Arbeit leitenden Weisung SIA 260 (SIA 260, 1980 bzw. 1982) steht ergänzend:

"*Der Begriff Sicherheit bezieht sich in dieser Weisung und damit im Normenwerk des SIA in erster Linie auf die Sicherheit von Personen vor den Folgen des Versagens von Tragwerken.*"

Sicherheit ist demnach – im Gegensatz zu Risiko – ein *qualitativer* Begriff. Sicherheit gilt als vorhanden, wenn das Risiko für Personenschäden aus … auf vergleichbar kleine und damit akzeptierbare Werte beschränkt bleibt. Dies schliesst ein die

- Arbeitssicherheit der Ersteller des Bauwerks,
- Sicherheit der Benützer des Bauwerks,
- Sicherheit von Dritten im Einflussbereich des Bauwerks.



Es ist wesentlich, sich diesen genauen Sprachgebrauch zu merken: So ist z.B. konsequenterweise nicht ein Tragwerk als sicher zu bezeichnen, sondern vielmehr die Menschen im Einflussbereich desselben.

Sicherheitsprobleme identifiziert man mit der einfachen Frage:

"*Sind Menschen bedroht, wenn … versagt oder … eintritt?*"

Typische Sicherheitsprobleme sind also das Versagen der Tragstrukturen von Wohn- und Geschäftshäusern, von Brücken, aber auch, nun ausserhalb des Bereichs von Tragwerken, Kollisionen von Zügen auf Eisenbahnstrecken, das Sinken von Schiffen etc. So betrachtet ist dagegen der Einsturz eines Aussichtsturmes auf einem unbewohnten Hügel bei anhaltenden Stürmen und gleichzeitigem Schneetreiben kein Sicherheitsproblem, da unter den beschriebenen Umständen sich kein Mensch in der Nähe, geschweige denn auf dem Turm aufhalten wird.

1.13 Zuverlässigkeit

Zuverlässigkeit ist die Eigenschaft einer Betrachtungseinheit, eine festgelegte Funktion unter vorgegebenen Bedingungen während einer festgelegten Zeitdauer mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit zu erfüllen. Die Betrachtungseinheit kann ein Tragwerk, aber auch eine Glühbirne oder Kaffeemaschine etc. sein. Oft wird die Zuverlässigkeit Z definiert als Komplement zur Versagenswahrscheinlichkeit p_f:

$$Z = 1 - p_f \tag{1.2}$$

Im Gegensatz zu Sicherheit ist Zuverlässigkeit also messbar, quantifizierbar. Mangelnde Zuverlässigkeit äussert sich darin, dass eine Bedingung mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit nicht eingehalten ist: Ein Tragwerk stürzt ein, die vorhandene Durchbiegung ist grösser als ein als zulässig erachteter Wert, Bewehrungsstähle rosten vorzeitig, usw.

1.2 Problemkreise und Fragestellungen

1.21 Die grundlegende Frage: Wie sicher ist sicher genug?

Die Beantwortung der schon 1969 von Chauncey Starr (Starr, 1969) und 1978 von Fischhoff (Fischhoff et al. 1978) gestellten grundlegenden Frage

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

"How safe is safe enough?" setzt die Beantwortung einer Reihe von vorbereitenden Teilfragen voraus.

Sie setzt zunächst voraus, dass wir die *Gefahren erkannt* haben, die in irgendeiner Situation schlummern. Es geht in einem weiteren Schritt darum, die entsprechenden Risiken zu analysieren. "*Was kann wie passieren?*" ist die Frage, die man objektiv und wertungsfrei angehen muss. Dieser steht die Frage "*Was darf wo passieren?*" gegenüber. Ihre Beantwortung ist eine Angelegenheit der Wertung und ruft nach einem bewussten Entscheid der Verantwortlichen.

Der Vergleich der Antworten auf die beiden letzten Fragen ist eine Beurteilung: Ist das, was passieren kann, akzeptierbar? Ist die Situation sicher genug?

Für den *Ingenieur* stellen sich, wenn die Beurteilung negativ ausfällt, in der Regel weitere Fragen, nämlich nach den *geeigneten Massnahmen, um die gewünschte Sicherheit zu erzeugen*. Er ist dann auch derjenige, der die Massnahmen plant und deren Ausführung einleitet und überwacht.

1.22 Problemkreise

Es ist offensichtlich, dass wir es bei der Beantwortung der oben gestellten Fragen mit Risiken aus ganz verschiedenen Problemkreisen zu tun haben. Neben Risiken aus den *traditionellen Bereichen* Haushalt, Arbeit, Verkehr, etc. treten sog. *Wachstumsrisiken* (Schneider, Th., 1992) wie der Transport gefährlicher Güter, lange Tunnels, die Chemische Industrie etc. Hinzu kommen sog. *politisierte Risiken* beispielsweise aus der Kernenergie oder aus der Gentechnik.

Thomas Schneider gliedert den Problemkreis (siehe Schneider, J. [Hrsg.], 1991, Seite 165) in vier Problemkategorien:

- *Selbstverständliches:* Probleme, die derart in unseren Alltag integriert sind, dass man sie gar nicht als Problem wahrnimmt. Sie lösen im allgemeinen keine Diskussionen aus (z.B. statische Bemessung von Wohnbauten). In diese Kategorie gehören offensichtlich auch Probleme, die wir bewusst oder unbewusst verdrängen, wie z.B. die Problematik des Strassenverkehrs mit der grossen Zahl von Toten auf unseren Strassen.
- *Notwendiges:* Anlagen, über deren Notwendigkeit keine allgemeinen Zweifel bestehen (z.B. Sondermüll-Deponien und -Verbrennungsanlagen u.ä.). Hier entstehen oft hitzige Diskussionen, aber man ist sich im Grunde im klaren, dass eine Lösung gefunden werden *muss*. Schwierig ist es lediglich, den Weg zur Lösung zu finden.
- *Problematisches:* Hier geht es um Probleme, bei denen typischerweise auch die Aktivität selber in Frage gestellt werden muss. Zum Beispiel ist der Transport gewisser Gefahrengüter nicht unbedingt zwingend. Die Sicherheitsfrage tangiert deshalb auch Fragen des Umfangs und der Struktur der gefährlichen Aktivität. Der Konflikt zwischen Sicherheit und wirtschaftlichen Interessen hebt das Problem somit tendenziell auf die politische Ebene.
- *Kritisches:* Hier sind Aktivitäten und Technologien einzuordnen, die alle politisch-gesellschaftlichen Aspekte tangieren. Zu den aktuellsten kritischen Aktivitäten oder Technologien gehören sicher die Kernenergie und die Gentechnologie.

Diese verschiedenen Problemkategorien werfen sehr unterschiedliche Fragen auf und sind dementsprechend auf unterschiedlichen Ebenen anzugehen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

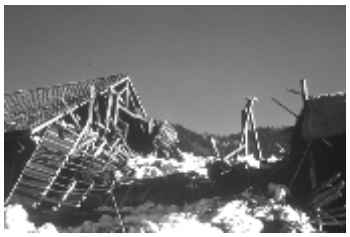
Hinzuzufügen wäre hier

- *Unbeherrschbares:* Politischer und religiöser Terrorismus und irrsinnige oder böswillige Handlungen. Beispiele sind die Bombenanschläge im World Trade Center 1993 und in Oklahoma City 1995 sowie der Nervengas-Anschlag in der Untergrundbahn von Tokyo 1995. Auch gegen Sabotageakte lässt sich in der Regel kaum etwas vorkehren, denn wer sabotieren will, findet praktisch immer ungeschützte Bereiche.

1.3 Blick in die Wirklichkeit

Obwohl sich die hier vorzustellenden Gedankengänge und Methoden auf alle genannten Problemkreise anwenden lassen, bezieht sich vieles verständlicherweise auf den Erfahrungshintergrund der Autoren. Und das sind im wesentlichen Tragsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsfragen aus dem statisch-konstruktiven Ingenieurbau.

Einige Beispiele sollen diesen Erfahrungshintergrund beleuchten und uns auf das vor uns liegende Thema einstimmen. Es sind Beispiele, die die ganze Breite des Schadengeschehens im Bauwesen deutlich machen und gleichzeitig Hinweise und Anregungen geben können auf die vielfältigen Formen der denkbaren Sicherheitsmassnahmen. Es handelt sich um Beispiele aus dem statisch-konstruktiven Bereich des Bauwesens. Beispiele aus anderen Bereichen der Technik liessen sich leicht hinzufügen.



- Man sieht hier ein landwirtschaftliches Gebäude, durch grosse Schneelasten eingedrückt: sicher irgendwo ein Fehler bei der Bemessung der Konstruktion und nur im Falle eines "Jahrhundertschnees" allenfalls als Risiko akzeptiert. Anders wäre es, wenn eine Lawine das Haus zerstört hätte: Wäre das als Risiko akzeptierbar? Im Alpenraum müssen wir solche Ereignisse wohl gelegentlich hinnehmen, doch nicht bei Wohngebäuden. Solche gehören nicht in bekannte Lawinenzüge. Die Ausscheidung von Bauverbots-Zonen ist in vorbeugendem Sinn eine vernünftige administrative Massnahme.

- Hier sieht man die Schweizerischen Bahnen (genauer, einen Wagen der SBB auf und eine Lokomotive unter der Ijollibachbrücke der BLS), also quasi zweifach auf Abwegen. Der Lokomotivführer sah sich bei der Ausfahrt aus einem Tunnel einem Lawinenkegel gegenüber. Trotz eingeleiteter Schnellbremsung entgleisten Lokomotive und Wagen. Das ist nicht völlig vermeidbar, denn die Bahnen müssen notgedrungen durch Gefahrenzonen fahren, und das auch bei grosser Lawinengefahr. Sie tun alles, um Züge rechtzeitig zu stoppen, z.B. durch automatische Lawinen-Warndienste, Wachposten während akuter Lawinengefahr, usw. Man bewältigt hier offenbar Gefahren durch Kontrollen und Warnsysteme. Auch das sind Sicherheitsmassnahmen.

- Hier liegen abgestürzte Brücken in Kalifornien nach einem Erdbeben kreuz und quer in der Landschaft, als ob Giganten damit gespielt hätten. Solche Schadenbilder sind absolut vermeidbar und lassen sich vergleichsweise leicht verhindern, z.B. durch eine ausreichende Bemessung der erforderlichen Lagerwege und die Anordnung von Anschlägen bei den Widerlagern, die extreme Bewegungen des Brückenüberbaus begrenzen. Diesmal sind es also technische Massnahmen.

- Hier sieht man umgestürzte Wohnblocks in Japan: Das Phänomen "Boden-Verflüssigung" durch Erdbeben hat den Bauwerken quasi den Boden unter den Fundamenten weggezogen. Diese Gefährdung kann man voraussehen und entsprechende Massnahmen treffen. Man muss entweder auf das Bauen an solchen Stellen verzichten oder eine andere Fundationsart wählen. Wir sehen, dass hier eine vorbeugende administrative oder eine technische Massnahme den Schaden hätte verhindern können.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

- Diese Stütze versagte unter einem mittleren Erdbeben. Ob das ein Gebäude im Friaul oder sonst irgendwo in der Welt ist, spielt keine Rolle. Es ist nicht ein Einzelfall, sondern ist nach Erdbeben an vielen Stellen zu beobachten. Der Fachmann sieht es sofort: Da fehlen die Bügel, die, ausreichend bemessen, der Stütze Duktilität verliehen und das Verhalten des Tragwerks bei einem Erdbeben wesentlich verbessert hätten! Hat man sie vergessen oder zugunsten eines billigeren Baus einfach weggelassen? War es Unwissenheit, Fahrlässigkeit oder gar eine vorsätzliche Unterlassung? Eine Untersuchung brächte es wohl an den Tag. Aber wir müssen Wege finden, solche menschlichen Fehlhandlungen zu verhindern oder wenigstens rechtzeitig zu entdecken. Wir müssen das menschliche Verhalten beeinflussen. Auch das sind Sicherheitsmassnahmen.

- Dies ist ein eingestürztes Gewächshaus: Schneelast als Ursache. Die erste Vermutung, dass nämlich das Tragwerk zu schwach und damit fehlerhaft bemessen war, ist falsch. Es ist unsinnig, ein Gewächshaus auf alle denkbaren Schneelasten zu bemessen. Tragwerk war vielmehr die Heizung, die den Schnee wegschmelzen sollte und ausgefallen war. Tragwerke müssen zuverlässig sein und gewartet werden, damit sie ihre Aufgabe erfüllen können. Dies also ein komplexes Beispiel für die Notwendigkeit eines sorgfältigen Unterhalts während der Nutzung.

- So schöne Autos, leider von einem heruntergestürzten Vordach zertrümmert – irgendwo im Kanton Zürich. Schauen Sie sich die Verankerung an. Man glaubte, mit einigen Spreizdübeln liesse sich so ein Dach im Mauerwerk verankern. Hier fehlte es am elementarsten Wissen. Ein Laie hätte den einfachen Sachverhalt erkennen können, möchte man meinen. Aber hier haben sog. Fachleute gehandelt. Dürfen wir solche Leute in unserem Beruf herumwirtschaften lassen? Nein. Und doch haben wir kaum eine Handhabe, wenn z.B. der Freund des Schwagers sich anbietet, etwas viel billiger zu machen und der Bauherr auf so etwas eingeht. Der Richter wird später wohl schon richtig urteilen, doch mittlerweile liegen vielleicht nicht nur Autos unter den Trümmern. Vernünftige Zulassungsregeln zur Berufsausübung sind, wenn auch gelegentlich diskriminierend, wohl kaum zu umgehen. Ob solche Massnahmen, z.B. staatlicher Behörden oder eines Berufsverbandes, dann auch wirklich die Situation verbessern, ist eine andere Frage.

- Hier der Schadenfall, der unter dem Ortsnamen "Valangin" bekannt ist. Ein interessantes Bauverfahren: eine Stahlbeton-Fahrbahnplatte wurde über eine Stahlkonstruktion von oben in leichtem Gefälle eingeschoben. Eine Rückhalte-Sicherung für den Fall von allzu kleiner Reibung beim Einschieben war jedoch nicht vorhanden. Letzten Endes stellte sich heraus: Es war unklar, wer wofür zuständig ist, und so unterblieb die Sicherung. Eine sorgfältige Klärung der Zuständigkeiten ist nötig, insbesondere an Nahtstellen zwischen verschiedenen Beteiligten. Das ist wieder eine organisatorische Massnahme.

- Der Absturz einer untergehängten Decke im Hallenbad Uster brachte 12 Menschen den Tod, ein Schadenfall, der weltweit Beachtung fand. Als vordergründige und bekanntgemachte Ursache gilt Chlorid-induzierte transkristalline Spannungsriss-Korrosion in den die Decke tragenden Hängern aus korrosionssicherem Chrom-Nickel-Stahl. Doch die eigentlichen Fragen liegen dahinter: War sie nötig, die schwere untergehängte Beton-Zwischendecke? Warum korrodiert korrosionssicherer Chrom-Nickel-Stahl (auch ich persönlich war bis zu diesem Einsturz der Meinung, dass solcher Stahl tatsächlich korrosionsfest ist)? Warum hat man deutliche Warnzeichen nicht ernstgenommen? Warum hat man nicht angesichts von Zweifeln Fachleute beigezogen? Die Fragen wurden vor Gericht diskutiert. Hier interessiert die Frage, was man tun muss, damit sich solche Katastrophen nicht wiederholen?

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

- Hier ein letztes Schadenbild als Beispiel dafür, dass nicht alles so spektakulär und katastrophal ist, was im Bauwesen passiert. Manches zeigt sich als Zahn der Zeit, als "nagende" Einwirkung, als die betrachtete Situation langfristig gefährdender Prozess in der Zeit. Hier sehen Sie zerstörten Beton einer Brücke. Reparatur ist in diesem Fall ein hoffnungsloses Rezept. Abbruch und Neubau ist die Devise, wie an so vielen Stellen in der Welt. Auch an den Hochschulen müssen wir umdenken und neben dem traditionellen, auf Neubauten ausgerichteten Unterricht eine solide Ausbildung für die Aufgaben der Zukunft, das Reparieren bestehender Bauten, anbieten.

Eine weitere Sensibilisierung auf Risiken unserer modernen Welt haben die Katastrophen von Bhopal, Schweizerhalle, Tschernobyl, aber auch die Unwetterkatastrophe 1987 im Urner Reusstal, der Brand im Hirschengrabentunnel der Zürcher S-Bahn und z.B. die Katastrophe des finnischen Fährschiffs Estonia bewirkt. Alle mit diesen Stichworten angesprochenen Unfälle sind nicht auf das Versagen von Tragwerken zurückzuführen, jedoch als Problemkreise im weiteren Sinn durchaus eingeschlossen.

1.4 Analyse von 800 Schadenfällen im Bauwesen

M. Matousek (Matousek/Schneider, 1976) hat 800 Schadenfälle des statisch-konstruktiven Bereichs des Bauwesens nach Ursachen und möglichen Gegenmassnahmen analysiert. Die Resultate sind sehr aufschlussreich und können bei der Suche nach geeigneten Ansatzpunkten zur Erhöhung der Sicherheit im Bauwesen wegleitend sein. Die folgenden Graphiken geben die wichtigsten Erkenntnisse wieder.

Wann wurde der Schaden entdeckt?		in Prozenten …					
		Bauwerksart					… aller 692 Fälle
		… der 362 Fälle des Hochbaus	… der 152 Fälle des Industriebaus	… der 75 Fälle der Verkehrsbauwerke	… der 51 Fälle des Wasserbaus	… der 52 restlichen Fälle	
Schadenentdeckung bei	Ausführung	58	37	69	88	77	58
	Nutzung	39	62	29	10	21	40
	Umbau/Abbruch	3	1	2	2	2	2
	Total	100	100	100	100	100	100

Figur 1/1

Figur 1/1 zeigt, dass offenbar die meisten Schäden bereits in der Ausführungsphase sichtbar werden. Sie sind also auf Einflüsse zurückzuführen, die mit der späteren Nutzung, auf die wir Ingenieure in der Regel unser ganzes Augenmerk lenken, nichts zu tun haben. Das sollte uns veranlassen, den Fragen, Problemen und Einflüssen der Ausführung mehr Aufmerksamkeit zu schenken. Im Industriebau hingegen führt die Nutzung relativ häufig zu Schäden. Man muss dort offenbar die Situation hinsichtlich Nutzungsänderungen sorgfältig im Auge behalten.

Figur 1/2 zeigt, dass offenbar Tragwerk, Hilfskonstruktionen, Baugrube und Baustelleninstallationen in der überwiegenden Zahl der Fälle und mit fast 90% der Schadensumme zu Buch stehen. Besonders zu beachten ist,

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

dass mehr als 80% aller Toten und Verletzten auf diese Komponenten zurückzuführen sind. Das soll uns veranlassen, Tragwerke besonders sorgfältig zu planen und der Berechnung, Bemessung und konstruktiven Durchbildung besonderes Gewicht beizumessen.

		in Prozenten …		
		… der Anzahl aller 692 Fälle mit Bauwerkschäden	… der Schadensumme dieser 692 Fälle	… der zugehörigen 60 Fälle mit Personenschäden
den Schaden auslösende Bauwerkskomponente	Baustellen-Installation Baugrube	12	4	14
	Hilfskonstruktionen	9	11	20
	Tragwerk	44	72	50
	Ausbau	19	3	2
	Technische Einrichtung	11	6	6
	Rest	5	4	8
	Total	100	100	100

Figur 1/2

Warum entstand der Schaden?			in Prozenten …		
			… der Anzahl aller 723 erfassten Fälle	… der Schadensumme aller 723 erfassten Fälle	… der zugehörigen 63 Fälle mit Personenschäden
Art der Berücksichtigung schädigender Einflüsse	nicht berücksichtigt	das heisst fehlerhaft berücksichtigt	22	27	22
	falsch berücksichtigt		26	25	29
	nicht und falsch		4	12	6
	ungenügend		16	8	3
	als akzeptiertes Risiko		22	8	10
	unbekannt		10	20	30
	Total		100	100	100

Figur 1/3

Figur 1/3 zeigt, dass in vielen Fällen eine fehlerhafte Berücksichtigung schädigender Einflüsse schadenauslösend ist. Man hat Einflüsse übersehen bzw. ungenügend oder falsch eingeschätzt. Dass eine Reihe von Schäden als akzeptiertes Risiko bewusst in Kauf genommen wurde, ist an sich in Ordnung. Man kann nicht bauen, ohne gewisse Risiken wohlabgewogen, d.h. bewusst zu akzeptieren. Dass allerdings 10% der Toten und Verletzten auf dieser Zeile gebucht werden müssen, gibt zu denken.

In welcher Bauphase wurden Einflüsse fehlerhaft berücksichtigt?		in Prozenten …		
		… der Anzahl aller 692 Fälle mit Bauwerkschäden	… der Schadensumme dieser 692 Fälle	… der zugehörigen 60 Fälle mit Personenschäden
Fehlerhafte Berücksichtigung von Einflüssen in der Bauphase …	Planung	37	40	20
	Ausführung	35	20	46
	Planung und Ausführung	18	22	20
	Nutzung	5	14	6
	restliche und Kombinationen	5	4	8
	Total	100	100	100

Figur 1/4

In welchen Bereichen der Planungsphase wurden Einflüsse fehlerhaft berücksichtigt?		in Prozenten …		
		… der Anzahl aller 723 erfassten Fälle	… der Schadensumme aller 723 erfassten Fälle	… der zugehörigen 63 Fälle mit Personenschäden
Fehlerhafte Berücksichtigung während der Planungsphase in …	Konzept	34	18	15
	statische Berechnung	34	49	40
	Zeichnungen, Listen, etc.	19	9	8
	Arbeitsvorbereitung	9	5	20
	Kombinationen	4	19	17
	Total	100	100	100

Figur 1/5

Figur 1/4 zeigt, dass insbesondere während der Planung und der Ausführung Einflüsse fehlerhaft berücksichtigt werden. Hier eine Verbesserung herbeizuführen, ist ganz offensichtlich eine Aufgabe der Fachleute.

Interessant wird es, wenn wir die uns Ingenieuren besonders naheliegende Planungsphase im Detail betrachten. Figur 1/5 zeigt, dass beim Konzipieren von Tragwerken sowie bei der Berechnung und Bemessung die weitaus

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

meisten Schadenfälle, aber auch der grösste Teil der Schadensumme und mehr als die Hälfte aller Verletzten und Toten verursacht werden. Es lohnt sich deshalb, diesen Phasen grosse Sorgfalt zu widmen.

	A	S	P
Bewusst akzeptiertes Risiko	25	10	15
Fehlhandlungen der Beteiligten	75	90	85
Neuralgische Komponenten:			
• Baugrube, Bauinstallationen	12	4	13
• Lehrgerüste, Hilfskonstruktionen	9	11	22
• Tragwerke	44	72	48
Wenn Fehlhandlung, dann in …			
• Planung	37	40	20
• Ausführung	35	20	46
• Planung und Ausführung	18	22	20
Wenn Fehlhandlung in der Planung, dann in …			
• Konzept	34	18	15
• Statischer Berechnung	34	49	40
• Zeichnungen, Listen	19	9	8
• Arbeitsvorbereitung	9	5	20

Figur 1/6

Die wesentlichsten Erkenntnisse aus der von Matousek vorgelegten Schadenanalyse lassen sich in Tabelle 1/6 zusammenfassen. Die Spalten enthalten die Prozentzahlen der Anzahl der Schadenfälle (A), der gesamten Schadensumme (S) und aller Personenschäden (P), die auf die entsprechende Kategorie entfallen:

Geht man den eigentlichen *Ursachen* auf den Grund, findet man, dass die Fehlhandlungen (in Prozent der Anzahl der untersuchten Schadenfälle) auf folgende Ursachen zurückzuführen sind:

37 % auf Ignoranz, Sorglosigkeit und Fahrlässigkeit,
27 % auf mangelhafte Kenntnisse,
14 % auf Unterschätzen von Einflüssen,
10 % auf Vergesslichkeit und Irrtümer,
6 % auf ein ungerechtfertigtes Verlassen auf andere,
6 % auf objektiv unbekannte Situationen.

Es zeigt sich weiter, dass von den durch Fehlhandlungen der Beteiligten in die Unterlagen eingebrachten Fehlern

32 % durch normale Aufmerksamkeit des im Bauprozess nachfolgenden Fachmannes,

55 % durch zusätzliche Kontrollen,

rechtzeitig zu entdecken gewesen wären, hätte man nur die richtigen Massnahmen ergriffen. Man sieht in der ersten Zahl den Sinn kollegialer Zusammenarbeit aller Beteiligten im Bauprozess, in der zweiten Zahl die Aufgabe einer gut konzipierten Qualitätssicherung. Schliesslich stellt Matousek fest, dass 13% aller Fehlhandlungen praktisch nicht rechtzeitig hätten entdeckt werden können.

Diese Zahlen müssen uns Ingenieure nachdenklich stimmen. Wir sind aufgefordert, die notwendigen Lehren daraus zu ziehen und unsere Erkenntnisse in die Praxis einfliessen zu lassen. Auch das hat mit Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen zu tun.

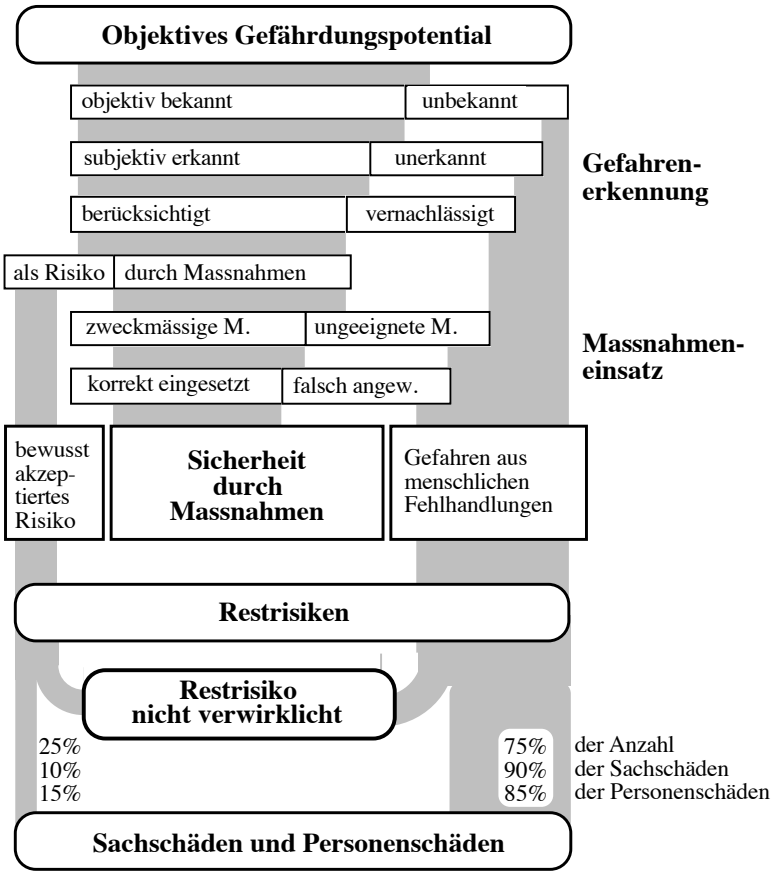
© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

1.5 Gefahren und Restgefahren

1.51 Gefährdungspotential, Sicherheit, Restrisiken

Figur 1/7 zeigt die oben beschriebenen Sachverhalte in grösserer Abstraktion. Jede Situation enthält ein objektives Gefährdungspotential, das allerdings nie vollständig bekannt sein wird. Es ist unmöglich, die Gesamtheit aller Gefahren zu kennen. Nur derjenige Teil dieses objektiven Gefährdungspotentials, der sich schon irgendwo einmal gezeigt hat, und der somit objektiv bekannt ist, kann überhaupt angegangen werden.

Es bieten sich rational zwei Möglichkeiten an: Man kann Gefahren bewusst akzeptieren oder im Sinne der angestrebten Sicherheit mit geeigneten Massnahmen abwehren. Tatsächlich entsteht jedoch eine dritte Kategorie: Bei der Gefahrenerkennung wie auch beim Massnahmeneinsatz sind Fehlhandlungen der Beteiligten nie vollständig auszuschliessen. Sie begründen die sog. Restrisiken, mit denen wir, ob wir wollen oder nicht, leben, gegen die wir aber gleichzeitig auch alles Erdenkliche vorkehren müssen.



Figur 1/7

Figur 1/7 zeigt, dass im Bereich der Gefahrenerkennung objektiv unbekannte Gefahren einen ersten Beitrag an diese Restrisiken liefern. Ein zweiter Beitrag ergibt sich aus denjenigen Gefahren, die – obwohl objektiv bekannt – subjektiv unerkannt bleiben. Was an Gefahren – aus welchen Gründen auch immer – vernachlässigt wird, bringt einen dritten Beitrag.

Gefahren lassen sich einerseits bewusst akzeptieren oder durch sicherheitserzeugende Massnahmen abwehren. Ungeeignete Massnahmen oder ein fehlerhafter Einsatz an und für sich zweckmässiger Massnahmen bringen dann zwei weitere Beiträge zu den Restrisiken.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

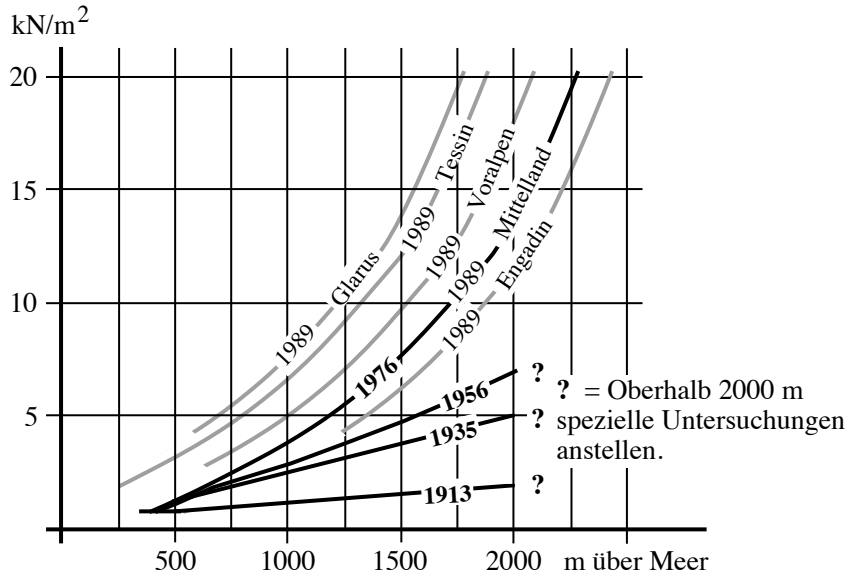
Bewusst akzeptierte Risiken bilden, zusammen mit den vielfältigen Gefahren aus menschlichen Fehlhandlungen, die sog. Restrisiken, die man nie wird auf Null reduzieren können. Ein Teil dieser Restrisiken verwirklichen sich glücklicherweise nicht. Die Tatsache, dass menschliche Fehlhandlungen an der Quelle von 75% aller Schadenfälle, von 90% der Schadensumme und von 85% aller getöteten und verletzten Menschen stehen, sollte jedoch unser besonderes Augenmerk auf diesen rechten Strang der Figur 1/7 lenken.

1.52 "Schnee" – ein Beispiel

Gefahrenerkennung: Schnee ist ohne Zweifel hier in der Schweiz eine objektiv bekannte Gefahr für Tragwerke. Subjektiv unerkannt sind eventuell die Existenz von "Schneelöchern", z.B. Glarnerland, Bedrettotal, Urserental, sowie die Möglichkeiten der Schneeverfrachtungen durch Wind, Wächtenbildung an Dachrändern und dergleichen. Die eigentliche Gefahr besteht im Vernachlässigen oder Vergessen solcher Effekte, die objektiv bekannt sind und die vor allem dem Ingenieur bekannt sein sollten.

Akzeptiertes Risiko: Die Werte, die man aus Einwirkungs-Normen herausliest (z.B. SIA 160/1989), ergeben, zusammen mit dem Lastfaktor, wohldefinierte Werte, die vielleicht einem "Jahrhundertschnee" entsprechen. Man akzeptiert dann offenbar stillschweigend, dass ein "Jahrtausendschnee" zu Schäden führen könnte. Eine Bemessung aller Bauten auf solch hohe Werte wird als unangemessen eingestuft.

Es ist in diesem Zusammenhang von Interesse, die Entwicklung der Norm-Schneelast über die Jahre hinweg zu verfolgen, das heisst in den verschiedenen Ausgaben der Norm SIA 160 nachzusehen. Figur 1/8 zeigt, dass die Norm-Schneelast schon von Anfang an von der Höhe des Bauwerks über Meer abhängig gemacht, ihr numerischer Wert jedoch bei jeder Revision angehoben wurde.



Figur 1/8

Die Reform der Norm SIA 160 von 1989 brachte dann erstmals ausdrücklich eine Regionalisierung der Schneelasten (die in früheren Ausgaben lediglich verbal umschrieben war). Man ist offenbar immer weniger bereit, Schäden aus Schnee an Tragwerken zu akzeptieren und stellt immer höhere Anforderungen an die Tragsicherheit von Bauwerken. Diese Beobachtung gilt nicht nur für Tragwerke, sondern ganz allgemein für technische Systeme wie Energie- und Transportsysteme, Produktionsverfahren, usw. Die Si-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

cherheitsansprüche sind offensichtlich im Verlauf der Zeit gestiegen, die Risikoakzeptanz gesunken.

Schliesslich ist im Sinne dieses Beispiels noch der Bereich der *Massnahmen-Anwendung* zu diskutieren: Es ist – wegen der damit verbundenen Unfallgefahr – z.B. unzweckmässig, die Schneeräumung eines Glasdachs vorzusehen, um den Einsturz des Tragwerks zu verhindern. Eine zweckmässige Massnahme ist sicher die ausreichende Bemessung der Tragkonstruktion, bei Gewächshäusern aber z.B. auch die Beheizung des Innern und damit des Glasdaches, um den fallenden Schnee fortlaufend wegzuschmelzen. Risikobehaftet ist diese Massnahme allerdings dann, wenn für Notfälle wie Stromausfälle oder Brennerdefekte keine ausreichend gewartete Notheizung vorgesehen ist.

1.53 Menschliche Fehlhandlungen: Was ist zu tun?

Menschliche Fehlhandlungen stehen offenbar an der Quelle der überwiegenden Menge aller Schäden. Sie haben ein gemeinsames Merkmal: Es handelt sich um Fehler, fehlende Aspekte, fehlende Erkenntnis, fehlendes Wissen, fehlendes Können, fehlende Einsicht, falsche oder fehlende Handlungen. Diesen Fehlern ist auf allen nur möglichen Ebenen zu begegnen und zwar

- im Bereich *objektiv unbekannter Gefahren* durch Förderung der Grundlagenforschung, durch sorgfältige Auswertung von Erfahrungen und eingehende Untersuchung "unerklärlicher" Phänomene (z.B. Tacoma-Brücke in den USA, 1943: Problem der aerodynamischen Instabilität von weitgespannten Hängebrücken),
- im Bereich der *subjektiv unerkannten Gefahren* durch Verbesserung der Ausbildung und Weiterbildung auf allen Stufen und die rückhaltlose Veröffentlichung von schlechten Erfahrungen,
- im Bereich *unberücksichtigter Gefahren* durch Schaffung klarer Verantwortungs- und Kompetenzbereiche sowie durch eine rigorose Bekämpfung aller Formen von Sorglosigkeit, Nachlässigkeit, Fahrlässigkeit und Ignoranz auf allen Stufen,
- im Bereich *unzweckmässiger Massnahmen* durch Förderung von Sachkenntnis, Sorgfalt und Übersicht bei allen denjenigen, die Massnahmen planen, und schliesslich
- im Bereich *fehlerhafter Anwendung* an sich zweckmässiger Massnahmen durch Forderung nach klaren und eindeutigen Plänen, Unterlagen und Anweisungen sowie durch Schaffung von Kontrollinstanzen und wirksamen Kontrollmechanismen.

Doch werden alle diese Strategien unseren Lebensraum nicht von Restgefahren befreien. Das objektive Gefahrenpotential ist unerschöpflich, und der Mensch ist in einem grundsätzlichen Sinne fehlbar: Sein Wissen, sein Können und seine Lernfähigkeit sind begrenzt, ebenso seine Einsicht und Einsichtigkeit, und den fehlerfrei handelnden Menschen gibt es nicht.

Das soll jedoch nicht davon abhalten, Restrisiken zu mindern, wo immer sich Ansatzpunkte zeigen. Anlass und Aufforderung zu einer grundsätzlicheren Beschäftigung mit diesem Begriff haben die kleinen und grossen Unfälle und Schäden der letzten Jahre zur Genüge gegeben.

1.6 Ziel und Ansatzpunkte

Ziel dieses Buches ist es, Studierende und Fachleute für die Problematik von Sicherheit, Zuverlässigkeit und Risiko zu sensibilisieren. Wichtig ist

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

herauszufinden, wo die Diskussion stattfinden und unser Handeln einsetzen muss. Die Ansatzpunkte ergeben sich aus Figur 1/7.

Es ist unbestritten, dass der rechte Strang in dieser Figur "dünner" werden muss und dass wir allen Formen menschlicher Fehlhandlungen den Kampf ansagen müssen. Das ist Thema des Kapitels 8 dieses Buches.

Der mittlere Teil der Figur 1/7 zeigt, dass dafür zu sorgen ist, dass alle objektiv bekannten Gefahren subjektiv erkannt und durch geeignete und zweckmässige Massnahmen abgewehrt werden. Das ist im wesentlichen Thema des Kapitels 2.

Wir müssen ausserdem dafür sorgen, dass aufgrund rationaler Entscheidungskriterien festgelegt wird, was durch Massnahmen abgedeckt werden soll, um Sicherheit zu erzeugen, und was wir als Risiken bewusst akzeptieren dürfen, können oder müssen. Dazu ist die Zuverlässigkeitstheorie in ihren verschiedenen Formen von Nutzen. Wir behandeln diese Methoden in den Kapiteln 3 bis 7.

Was als Risiko letztlich akzeptiert werden darf, ist schliesslich vor allem anderen eine politische Frage, auf die wir im abschliessenden Kapitel 9 eingehen werden.

Literatur

Fischhoff, B., Slovic, P., Lichtenstein, S. and others: "How Safe is Safe enough? A Psychometric Study of Attitudes Towards Technological Risks and Benefits"; Policy Science, 9, 1978

Matousek, M. und Schneider, J.: "Untersuchungen zur Struktur des Sicherheitsproblems bei Bauwerken"; Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht No. 59, ETH Zürich, 1976

Matousek, M. und Schneider, J.: "Gewährleistung der Sicherheit von Bauwerken – Ein alle Bereiche des Bauprozesses erfassendes Konzept"; Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht No. 140, 1983

Schneider, J.: "Gefahren, Gefährdungsbild und ein Sicherheitskonzept"; Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht No. 97, 1980

Schneider, J. (Hrsg.): "Risiko und Sicherheit technischer Systeme – auf der Suche nach neuen Ansätzen"; Birkhäuser Basel, Boston, Berlin, 1991

Schneider, Th.: in "Akzeptabilität von Risiken"; SATW–SUVA Studie, 1992

SIA Norm 160: "Einwirkungen auf Tragwerke"; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1989

SIA 260: "Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken – Weisung des SIA an seine Kommissionen für die Koordination des Normenwerks"; 5. Fassung 1980 und 11. Fassung, September 1982

Starr, Ch.: "Social Benefit versus Technological Risk"; Science, Vol. 165, No. 19, S. 1232, 1969

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

2. Gefährdungsanalyse und Massnahmenplanung

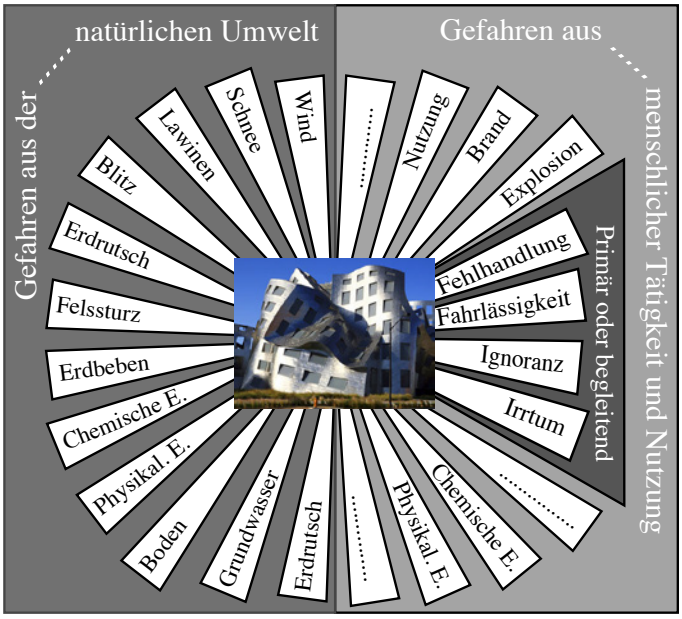
2.1 Gefahren und Gefahrenerkennung

Das Thema dieses Kapitels ist der breite Hauptstrang in Figur 1/9. Es geht um das Erkennen möglicher Gefahren, dann um die Analyse dieser erkannten Gefahren und um das Finden geeigneter Gegenmassnahmen.

Das Ziel (und auch das zentrale Problem) ist, *alle* möglichen Gefahren zu erkennen. Nur so ist eine sichere Lösung herbeizuführen. Obwohl dieses Ziel letztlich unerreichbar ist, muss es der Ingenieur doch anstreben.

Gefahrenerkennung setzt Fantasie und Kreativität des Ingenieurs voraus. Hier ist die Hauptaufgabe des Ingenieurs zu sehen, denn sind einmal die Gefahren erkannt, ist deren Abwehr meist einfach. Gefahren nicht erkannt zu haben, gehört zu den schlimmsten Erfahrungen des Ingenieurs.

Jedes Bauwerk, jede Situation ist vielfältigen Gefahren der natürlichen und der durch menschliche Aktivitäten künstlich erzeugten Umwelt ausgesetzt. Dazu gehören – begleitend oder primär – leider immer auch Irrtümer, Fehlhandlungen und Unterlassungen der beteiligten Menschen. Figur 2/1 zeigt typische Gefahren für Bauwerke. Aber Vorsicht: Jede Liste ist unvollständig!



Figur 2/1

Hilfreich im Bestreben, alle Gefahren zu erkennen, sind gewisse kreative Techniken und methodisch-gedankliche Stützen, die hier in aller Kürze vorgestellt seien:

- Chronologisches Vorausdenken: Stufe um Stufe wird vorausgedacht, was wo wann wie ablaufen wird. Man wendet diese Strategie im täglichen Leben intuitiv an. Sie ist aber gerade auch im technischen Bereich ausserordentlich wertvoll.
- Nutzungsanalyse: Es ist sinnvoll, die voraussichtlichen Nutzungsprozesse zu analysieren. Was wirkt auf eine Situation ein, welche Ereignisse kumulieren sich? Welche Einrichtungen, Maschinen und Geräte sind vorgesehen? Was könnte im vorgesehenen Betrieb schiefgehen? Was könnte ausfallen und damit gefährlich werden?

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

- Einflussanalyse: Welche Grössen beeinflussen ein bestimmtes Problem? Man kann die schädigenden Einflüsse in menschlichen Tätigkeiten und Unterlassungen ins Auge fassen, aber auch die natürliche Umwelt danach absuchen. Häufig zeigen sich die Gefahren erst im weiteren zeitlichen oder räumlichen Abstand. Oft sind vermittelnde Zustände zu beachten, die Einflüsse erst gefährlich machen. Auch können an sich ungefährliche Komponenten eines Zustandes in ihrer Kombination gefährlich werden.
- Energieanalyse: Man kann Energie-Potentialen nachgehen. Wo könnten Schwerkraft, Drücke, kinetische, chemische und thermische Energien, Elektrizität, elektrische und elektromagnetische Felder, ionisierende Strahlen usw., auf der Gefahrenseite auftreten? Oft ist auch der Ausfall gewisser Energieformen gefährlich.
- Man kann die Merkmale von Baustoffen, Betriebsmitteln, in der Nutzung vorkommenden Roh-, Zwischen- und Endprodukten zum Ausgangspunkt der Überlegung machen: Brennbarkeit, Explosivität, Toxizität, Korrosion, auch in Kombinationen.

Solche Denkansätze kommen in der Praxis unter den verschiedensten Bezeichnungen und methodischen Ausformungen zur Anwendung, z.B. als *Hazard and Operability Study (HAZOP),* als *What-if Analysis,* als *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* usw.

Hinzu kommen weitere methodische Ansätze, die gewisse kritische Situationen ins Zentrum rücken. Das führt dann zur

- Arbeit mit Logischen Bäumen: Fehlerbäume, Ereignisbäume, Ursachen/Folgendiagramme sind solche Bäume. Hiermit sollen Logik, Ordnung, Übersichtlichkeit, Folgerichtigkeit und Vollständigkeit ins Denken hineingebracht werden. Sie werden speziell in Kapitel 7 behandelt.
- Nahtstellen-, Schnittstellen- oder Ausfallanalyse: Es ist oft ergiebig, dort nach Gefahren zu suchen, wo Stoffe, Information oder Verantwortung übergeben werden oder zentrale Funktionen erfüllt werden müssen. Was passiert, wenn ... ausfällt? Die Frage nach dem "Warum" kann man durchaus noch offen lassen. So kann man die Analyse von Sicherheitsproblemen oft verkürzen.

Morphologisches Denken ist in vielen Fällen nützlich. Diese von Zwicky entwickelte und beschriebene Denkweise (Zwicky, 1989) bezweckt, vorurteilslos *alle* möglichen Probleme und Lösungen aufzuzeigen, um dann das Gefundene auf die wirklich relevanten Teile zu reduzieren. Dieser Hinweis muss hier genügen. Die Figuren 2/3 und 2/4 zeigen Beispiele: Durch geschickte Darstellung wird erreicht, dass alle möglichen Elemente des Problems erfasst werden.

Oft ist es sinnvoll, bei der Gefahrensuche im interdisziplinären Team zu arbeiten. Das nennt man oft *Brainstorming:*

- Das Problem muss vorgängig formuliert und spätestens mit der schriftlichen Einladung zum Brainstorming abgegeben werden, damit sich die Mitarbeiter gedanklich vorbereiten können.
- Für eine festgelegte Zeitspanne (z.B. 30 Minuten) sitzt man zusammen, jemand führt Protokoll, wenn möglich auf einer Wandtafel, damit alle Beteiligten laufend Einsicht in das Protokoll haben. Um den freien Gedankenfluss nicht zu behindern, ist während dieser Zeit jeder Einwand untersagt. Insbesondere das Wort *aber* ist verboten, denn es wirkt mit dem folgenden Teilsatz fast immer als Killer. Vielmehr ist jede Äusserung willkommen, insbesondere sollen Gedanken aufgegriffen, erweitert und ergänzt werden.
- Erst nach dem eigentlichen Brainstorming, wenn alle möglichen (und auch unmöglichen!) Ideen vorgebracht wurden, kommt man zur dritten

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Phase, wo in geordneter Diskussion das Protokoll durchgegangen wird. Erst jetzt sind Fragen, Einwände und Bemerkungen einzubringen.

Schliesslich soll man sich bei der Gefahrensuche auch auf vorhandene *Erfahrungen* abstützen. Zuhören ist hierzu das zentrale Stichwort, und natürlich das Beiziehen geeigneter Literatur. Ein grosser Erfahrungsschatz ist im übrigen in Normen, Vorschriften, Richtlinien und Empfehlungen, zum Beispiel des SIA, niedergelegt.

2.2 Gefährdungsbilder

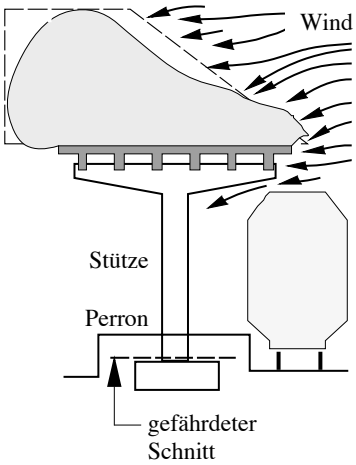
Wenn verschiedene Gefahren räumlich und zeitlich zusammen wirken, können Situationen entstehen, die u.U. erheblich gefährlicher sind, als wenn die einzelnen Gefahren jeweils nur isoliert auftreten. Bei Bauwerken ist das die Regel. In solchen Fällen spricht man von Gefährdungsbildern (engl.: Hazard Scenario). Ein solches Gefährdungsbild ist quasi ein Drehbuch, welches festlegt, welche Gefahren in welcher Rolle wie und innerhalb welchen Bühnenbildes miteinander agieren. Folgende Begriffe stehen sich gegenüber:

Bühnenbild	↔	betrachtete Situation
Hauptrolle	↔	Leitgefahr
Nebenrolle	↔	Begleitumstände

Wie der Schreiber eines Film-Skripts soll sich der Ingenieur nun mit den vielfältigen Möglichkeiten der Interaktion zwischen Haupt- und Nebenrollen auf dieser Bühne auseinandersetzen und sich überlegen, wie sich die Situation zum Schlechten wenden könnte. Das ist Denken in Gefährdungsbildern.

Wenn nun im betrachteten Bühnenbild die Rollen vertauscht werden, kristallisieren sich neue Gefährdungsbilder heraus. Vielleicht muss man in fantasievoller Weise das Bühnenbild ändern, um den Situationen einen schlechteren Ausgang zu erlauben.

Den in Gefährdungsbildern beschriebenen Gefahren-Kombinationen muss schliesslich durch angemessene Massnahmen Rechnung getragen werden.



Figur 2/2

Ein Beispiel soll diesen vielleicht etwas kompliziert klingenden Sachverhalt aufhellen: Figur 2/2 zeigt die Situation vor dem Einsturz des Perrondaches des Bahnhofs Einsiedeln, der sich 1970 ereignet hat. Als Leiteinwirkung ist *Schnee* zu betrachten. Er liegt in extremaler Grösse und Form und bewirkt eine starke Biegebeanspruchung der Stützen. Diese Situation allein war in der Bemessung erfasst. Als Begleiteinwirkung kam Wind aus einer ungünstigen Richtung hinzu. Dieser wirkt nun allerdings auf eine durch die Geometrie der Schneeablagerungen erheblich vergrösserte Angriffsfläche, was bei der Bemessung seinerzeit – da in den Normen nicht vorgesehen – auch *nicht* berücksichtigt worden war.

Die bei der seinerzeitigen Bemessung des Tragwerks gültigen Normen sahen lediglich die Superposition der Schnittkräfte aus den *gesondert betrachteten* Lastfällen Schnee und Wind vor. Für den Schnee forderte die Norm zwar die Berücksichtigung einer einseitigen Belastung, der Wind war jedoch nur auf die Angriffsfläche zu beziehen, die die Konstruktion selbst bietet, also ohne die vergrössernden Flächen aus Schneeablagerungen. Zusätzlich stand noch ein Zug in einer die Strömungsverhältnisse ungünstig beeinflussenden Stellung. Diese Kombination von Einwirkungen führte schliesslich zum Einsturz. Zum Glück befanden sich bei diesem Wetter keine Leute unter dem Dach, und es kam niemand zu Schaden. Historisch ge-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

sehen war es dieser Einsturz, der die Notwendigkeit eines Denkens in Gefährdungsbildern zeigte, den Begriff hervorbrachte und die Abkehr von der Praxis der Kombination von Lastfällen einleitete.

Ein sog. morphologischer Test kann oft hilfreich sein, d.h. die Darstellung der Fragestellung in einer Matrix (Figur 2/3). Man kann sich so ein vollständiges Bild verschaffen über die Gefahren, denen ein Bauwerk während seines Lebens ausgesetzt sein könnte. Eingetragen ist das Gefährdungsbild "Schnee" des vorhergehenden Beispiels mit Leitgefahr und Begleitumständen. Man erkennt, dass die Spalte dem Gefährdungsbild den Namen gibt, während die Zeilen Zeitpunkte bzw. Zustände darstellen.

Grundsätzlich kann jeder Kreuzungspunkt in diesem Schema Leitgefahr sein und damit ein Gefährdungsbild definieren. Auf der Zeile sind dann die denkbaren Begleitgefahren zu suchen. Nicht alle sind freilich relevant. Auch ist offensichtlich, dass nicht jeder Kreuzungspunkt ein sinnvolles Gefährdungsbild andeutet. Man wird bei der Massnahmenplanung natürlich nur die offensichtlich relevanten Gefährdungsbilder in Betracht ziehen.

		Gefahren aus ...													
		... menschl. Tätigkeit, Nutzung und gebauter Umwelt:							... natürlicher Umwelt:						
■ Leitgefahr • Begleit-umstand		.....	Nutzung	Überlastung	Kollisionen	Explosion	Brand	.....	.....	Wind	Schnee	Erdbeben	Wasser	Murgänge	.....
Erstellungs-Zustände	Aushub														
	Fundation														
	Transport														
	Montage														
	Betonieren														
	Vorspannen														
	Mauern														
	.....														
	.....														
Nutzungs-Zustände	.....														
	.....														
	normal		•					•		•	■				
	speziell														
	.....														
	Überwachung														
	Unterhalt														
	.....														
Abbruch															

Figur 2/3

Es lohnt sich, beim Aufstellen entsprechender Listen von Gefährdungsbildern auch gleich an geeignete Gegenmassnahmen zu denken und diese – wenn auch vielleicht nur provisorisch und als zu überdenkende Möglichkeit – sofort zu notieren. Man muss sich dann nicht immer wieder von neuem in die verschiedenen Gefährdungsbilder hineindenken.

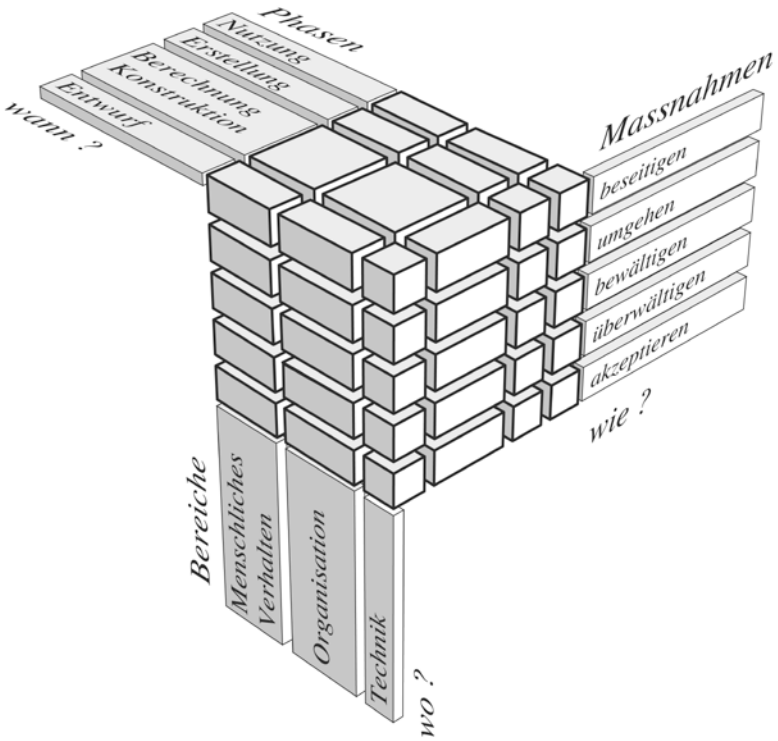
© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

2.3 Massnahmenkategorien

Die in Gefährdungsbildern charakterisierten Gefahren lassen sich grundsätzlich durch Massnahmen bekämpfen oder als Risiko bewusst akzeptieren. Fünf Kategorien von Massnahmen sind zu unterscheiden. Gefahren lassen sich:

- *beseitigen* durch Massnahmen am Gefahrenherd selbst
- *umgehen* durch Änderung der Absicht oder des Konzepts
- *bewältigen* durch Kontrolle, Warnsysteme, Überwachung etc.
- *überwältigen* durch Vorhalten ausreichender Reserven
- *bewusst akzeptieren* als unausweichlich oder als akzeptierbar kleines Risiko

Die gefahrenabwehrenden Massnahmen sind dabei im technischen und im organisatorischen Bereich einzusetzen, sowie überall dort, wo das menschliche Verhalten beeinflusst werden muss. Die Massnahmen kommen sodann im Prinzip in allen Phasen des Bauprozesses zum Einsatz, also während des Entwurfs und der Berechnung, der Erstellung und der Nutzung und des Abbruchs. Es ergibt sich ein dreidimensionales Schema, ein sog. morphologischer Kasten (siehe Figur 2/4). Das Schema gestattet die logische Einordnung aller denkbaren Möglichkeiten der Gefahrenabwehr und soll in der Folge als Sicherheitswürfel bezeichnet werden.



Figur 2/4

Zu bemerken wäre, dass wir oft nur einen kleinen Teil aller möglichen Sicherheitsmassnahmen ergreifen und damit häufig wirtschaftlich ungünstig bzw. sub-optimal arbeiten. Grundsätzlich wäre in diesem morphologischen Kasten die den Gefahren jeweils optimal entsprechende Massnahmenkombination zu suchen.

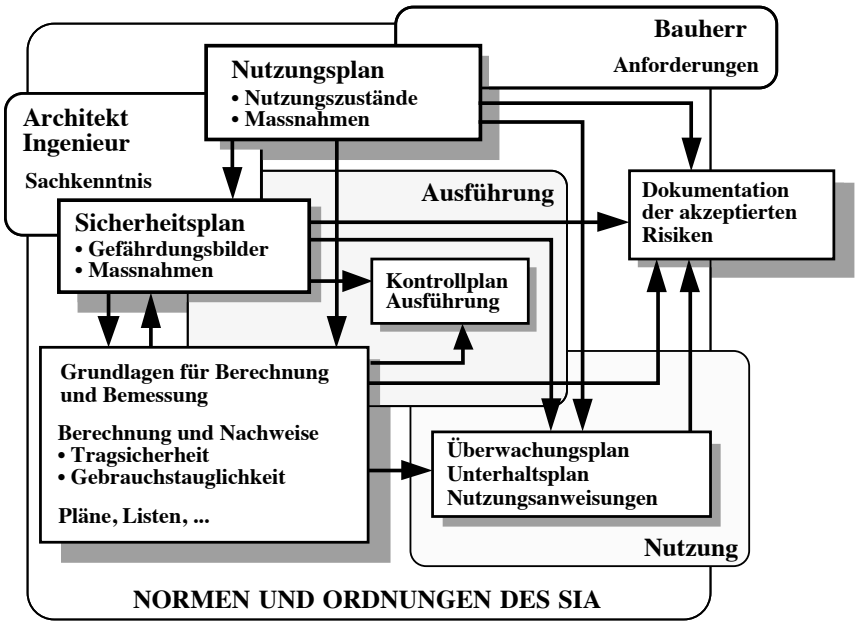
Es ist eine gute Übung, an dieser Stelle die Schadenbilder von Abschnitt 1.3 erneut anzuschauen, für jeden Fall vernünftige Gegenmassnahmen zu notieren und deren Charakter anschliessend in Figur 2/4 zu lokalisieren.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

2.4 Erarbeitung der Projektierungsunterlagen

2.41 Hierarchische Ordnung

Die Normen des Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Vereins (SIA) fordern in Übereinstimmung mit der Weisung SIA 260 (SIA Weisung 260, 1980) seit 1989 für jedes Bauwerk in den frühen Phasen der Planung die Aufstellung eines *Nutzungsplans* (Anmerkung: seit 2003 spricht das Normenwerk des SIA – siehe z.B. SIA 260 (2003) – an dieser Stelle von einer *Nutzungsvereinbarung*. Ich verzichte auf die Korrektur durch dieses ganze Buch hindurch) und eines *Sicherheitsplans* (siehe SIA, 1989). Diese Pläne sind die beiden zentralen Dokumente für die Vorbereitung und Durchführung von Bauprozessen. Sie stehen in einer hierarchischen Ordnung, die der Figur 2/5 entnommen werden kann.



Figur 2/5

Die Figur charakterisiert auf dem ordnenden Hintergrund der Normen und Ordnungen des SIA rechts oben den Bauherrn mit seinen Anforderungen und links die sachkundigen Fachleute. Bauherr und Fachleute erarbeiten zusammen den Nutzungsplan. Dieser dient als Grundlage für den – von den Fachleuten in eigener Verantwortung auszuarbeitenden – Sicherheitsplan. Dieser bildet, zusammen mit dem Nutzungsplan, die Grundlage für eine ganze Reihe von Dokumenten, die den Bauprozess vom Planungsbeginn über die Ausführung bis hin zum Ende der Nutzungsphase steuern. Zur Ausarbeitung dieser Pläne siehe auch (Schneider, J., 1989).

2.42 Nutzungsplan

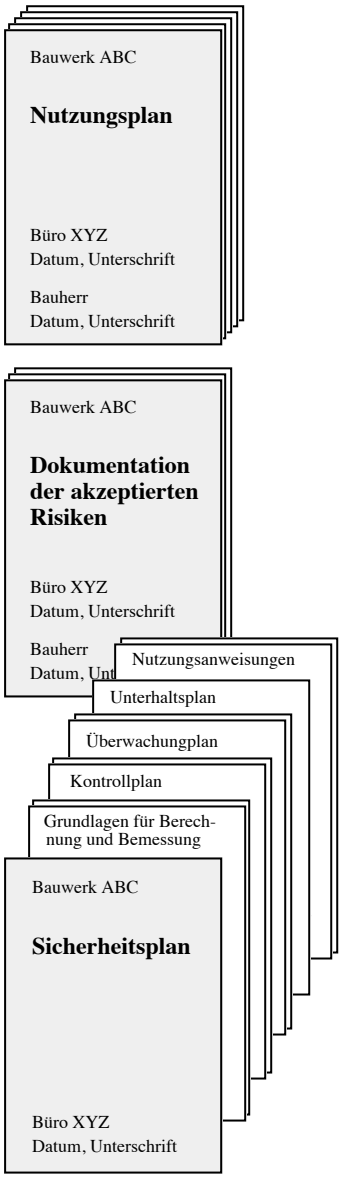
Als erstes ist in geduldigem Gespräch zwischen dem Bauherrn und den Fachleuten der Nutzungsplan zu entwickeln. Dieser hält – in der technischen Sprache der Fachleute – fest, was der Bauherr eigentlich will, aber in der Regel nicht präzis, und vor allem nicht in technischer Sprache formulieren kann.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Der Nutzungsplan enthält Antworten auf die typische Frage: "*Was ist hier geplant*", also auf Fragen der folgenden Art:

- Was will der Bauherr eigentlich genau, und zwar im Detail? Was sind seine Ziele? Was ist ihm besonders wichtig?
- Welche Ansprüche (z.B. an das Verhalten des Bauwerks in bezug auf z.B. Durchbiegung, Schwingungen, Rissebildung, Wasserdichtigkeit, etc.) stellt er?
- Sind hier besondere Einwirkungen aus der Umwelt zu erwarten?
- Wirkt das Bauwerk in beachtenswerter Weise auf die Umwelt ein?

Der Nutzungsplan ist ein ausserordentlich wichtiges Dokument. Man soll dem Dokument deshalb besondere Sorgfalt widmen. Der Bauherr wird nämlich in diesem Gespräch auch mit den Möglichkeiten und Grenzen der Fachleute konfrontiert und muss schliesslich die im gemeinsamen Gespräch formulierten Antworten gutheissen und das Dokument mitunterschreiben. Das Gespräch gibt den Fachleuten im übrigen ausdrücklich Gelegenheit, ihre Wertvorstellungen einzubringen. Der Nutzungsplan ist eine der wesentlichsten Grundlagen für alles folgende.



Figur 2/6

2.43 Sicherheitsplan

Die Benützer von Bauwerken, Dritte in ihrem Einflussbereich und die Gesellschaft schlechthin fordern die Sicherheit von Menschen im Einflussbereich von Bauwerken und stützen sich dabei auf die einschlägigen Rechtsgrundlagen. Sicherheit ist – im Gegensatz zu den Regelungen im Nutzungsplan – nicht eine Sache von Absprachen mit dem Bauherrn, sondern im Rahmen allgemeiner, ethischer und rechtlicher Normen eine zentrale Aufgabe im Verantwortungsbereich der Fachleute. Sie entwickeln, auf der Grundlage des Nutzungsplans, miteinander den Sicherheitsplan. Bei dieser Arbeit hat der Ingenieur unter den übrigen Baufachleuten eine besonders verantwortliche Stellung.

Der Sicherheitsplan stellt in Form einer Reihe von Dokumenten die als massgebend erkannten Gefährdungsbilder den zu ihrer Abwehr als geeignet befundenen Massnahmen gegenüber. Auch hier besteht die Methodik darin, geeignete Fragen zu stellen und die Antworten sachgerecht festzuhalten. Es geht darum, sowohl den Bau- als auch den Nutzungsprozess mit Fantasie für alles, was diese Prozesse gefährden könnte, in allen erkennbaren Details im voraus durchzudenken. Typische Fragen sind:

- Welche Gefahren ergeben sich aus der vorgesehenen Nutzung?
- Welche Gefahren ergeben sich aus den verschiedenen Komponenten des Bauwerks?
- Was könnte im Betrieb schiefgehen?
- Welche Gefahren drohen dem Bauwerk aus der Umwelt?
- Welche Gefahren drohen dem Bauwerk aus menschlichen Aktivitäten?

Dieser Teil des Denkprozesses ist in Abschnitt 2.1, mit geeigneten gedanklichen Hilfen, unter dem Begriff "Gefahrenerkennung" dargestellt.

Diese Gefahren wird man in kreativer Arbeit in Gefährdungsbildern zusammenfassen (siehe Abschnitt 2.2). Dabei tauchen in der Vorstellung des Ingenieurs oft gleichzeitig auch die als zweckmässig erkannten Gegenmassnahmen auf. Das ist der Beginn der Massnahmenplanung mit der hier typischen Frage:

- Was kann man zweckmässigerweise dagegen tun?

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Hierzu ist unter 2.3 manches aufgeführt. Wichtig ist, dass man die günstigste Kombination von Massnahmen aus dem ganzen Spektrum der Möglichkeiten aussucht (siehe Figur 2/4).

Allerdings sind nicht alle erkannten Gefährdungsbilder relevant. Man wird versuchen, die Fülle des Erkannten auf das für den betrachteten Fall Wesentliche und Notwendige zu reduzieren, indem man eine Bewertung der Gefahren bzw. Gefährdungsbilder anschliesst. Alles, was als akzeptierbares Risiko ohne Gegenmassnahmen stehengelassen werden kann oder muss, wird in eine Liste der akzeptierten Risiken eingetragen. Auch werden sich Gefährdungsbilder zeigen, die man im nachhinein als vernachlässigbar einstufen kann und gar nicht mehr in die Liste der akzeptierten Risiken aufnimmt.

Der Sicherheitsplan bildet, zusammen mit dem Nutzungsplan, die Grundlage für die Planung, die Ausführung und die Nutzung des Bauwerks, also für die Begleitung des ganzen Bauprozesses. Dass alles noch einer ordnenden Gliederung bedarf, ist offensichtlich.

2.44 Operable Grundlagen für den Bauprozess

Die im Nutzungsplan und im Sicherheitsplan niedergelegten Massnahmen werden zweckmässigerweise in verschiedenen, separaten, Massnahmen- oder Adressat-orientierten Dokumenten zusammengefasst (siehe Fig. 2/6). Dazu gehören, wie schon festgestellt, zunächst der vom Bauherrn mitunterschriebene

- Nutzungsplan

und der von den Fachleuten ausgearbeitete, zunächst noch ungeordnete

- Sicherheitsplan.

Aus diesen beiden Plänen lassen sich die folgenden, verschiedenen Adressaten zugeordneten Dokumente zusammenstellen:

- Grundlagen für Berechnung und Bemessung
- Kontrollplan für die Ausführung
- Überwachungsplan und Unterhaltsplan für die Nutzungsphase
- Nutzungsanweisung für den Benützer.

Der Bauherr kann zum Sicherheitsplan und zu der genannten Gruppe von Dokumenten wenig beitragen, die Richtigkeit ihres Inhalts kaum beurteilen und aus diesem Grund auch nicht verantworten. Man wird von ihm deshalb auch nicht erwarten, dass er diese Dokumente unterschreibt. Im Unterschied dazu muss jedoch der Bauherr die sich aus dem Sicherheitsplan ergebende

- Dokumentation der akzeptierten Risiken

unbedingt zur Kenntnis nehmen. Die Dokumentation der akzeptierten Risiken enthält diejenigen Risiken, die man – in der Regel aus wirtschaftlichen Gründen – eingegangen ist. Der Bauherr zieht Nutzen aus den eingesparten Kosten. Es ist deshalb gerechtfertigt, ihm auch das zugehörige finanzielle Risiko zuzuordnen. Der Bauherr muss dieser Dokumentation mit seiner Unterschrift zustimmen. Ist er zur Unterschrift nicht bereit, kann es nützlich sein, ihm zu raten, eine unabhängige zweite Meinung einzuholen. Gegebenenfalls müssen die zur Reduktion der Risiken auf das vom Bauherrn akzeptierte Mass erforderlichen Massnahmen in den übrigen Teilen des Sicherheitsplans vorgesehen werden.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Die Konfrontation des Bauherrn mit Risiken und Kosten ist sehr wichtig und ergibt sich im Grunde aus der im Obligationenrecht festgehaltenen Sorgfalts- und Rechenschaftspflicht des Ingenieurs.

Die Ansprüche an die formelle Ausgestaltung des Nutzungsplans und der verschiedenen Bestandteile des Sicherheitsplans richten sich nach der Wichtigkeit des Bauwerkes und nach dem Grad der Gefährdung von Mensch und Umwelt. In vielen einfachen Fällen der Praxis wird man sich auf das statisch-konstruktive Normenwerk des SIA beziehen können, und die entsprechenden Dokumente werden kurz bleiben können.

Alle diese Dokumente sind, zusammen mit den Plänen des Architekten, der Statischen Berechnung, den Plänen des Ingenieurs und weiterer Fachleute, aufzubewahren, um so die notwendigen Informationen für mögliche zukünftige Änderungen des Bauwerks bereitzuhalten.

2.45 Die Reaktion der Praxis

Die Forderungen des SIA nach diesen Plänen wurden zuerst in der Weisung SIA 260 erhoben (SIA 260, 1980 bzw. 1982). Sie ging später in die Honorarordnungen des SIA und in die Norm SIA 160 "Einwirkungen auf Tragwerke" ein. Die Forderung und die damit verbundenen neuen Begriffe wurden von der Praxis nur zögernd akzeptiert. Im Grunde genommen handelt es sich jedoch um Leistungen, die ein sorgfältig arbeitender Fachmann schon immer erbracht hat. Lediglich die Forderung nach einer *systematischen Erarbeitung* ist neu (siehe auch SIA Dokumentation D 041, 1989).

Es ist erfreulich, dass vor allem auch einige Ingenieure aus der Praxis die Wichtigkeit und Nützlichkeit der zu erarbeitenden Dokumente erkannt und mit eigenen, z.T. problemorientierten Beiträgen die Einführung unterstützt haben. Hier sind vor allem zu nennen W. Streich (Streich, 1992) und M. Hirt (Hirt, 1992) mit ihren eher allgemeingültigen Beiträgen, K. Huber (Huber, 1992) mit Beispielen aus dem Stahlbau sowie O. Künzle und Mitautoren mit einem solchen aus dem Stahlbeton-Brückenbau (Künzle et al., 1992).

Schliesslich hat sich auch ein juristisch ausgebildeter Bauingenieur mit der rechtlichen Seite der Forderung des SIA nach Ausarbeitung von Nutzungs- und Sicherheitsplänen auseinandergesetzt (siehe Briner, 1992).

Viele der vorstehend genannten Veröffentlichungen sind in der SIA Dokumentation D 0114 (SIA Dokumentation D 0114, 1994) erneut abgedruckt, zusammen mit weiteren Beiträgen. Insbesondere ist jedoch auf eine umfangreiche Beantwortung von aus der Praxis gestellten rechtlichen und technischen Fragen durch H. Briner, P. Matt und M. Hirt hinzuweisen als Quelle wertvoller zusätzlicher Informationen zum angesprochenen Problemkreis.

Literatur

Briner, H.: "Nutzungs-/Sicherheits-/Kontrollplan – Rechtliche Fragen und Antworten zur Norm SIA 160"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 26, 1992

Hirt, M.A.: "Nutzungs-/Sicherheits-/Kontrollplan"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 1, 1992

Huber, K.: "Nutzungs-/Sicherheits-/Kontrollplan – Beispiel Werkerweiterung eines Stahlbaubetriebes"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 1, 1992

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Künzle, O. et al.: "Nutzungs-/Sicherheits-/Kontrollplan – Beispiel Unterführung SBB-Linie und Flurwege"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 48, 1992

Schneider, J.: "Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit"; in SIA Dokumentation D 041, 1989

Schneider, J.: "Ausfälle im Bauwesen – ein geeigneter Ausgangspunkt für Sicherheitsüberlegungen"; Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht No. 120, 1981 oder "SIA, Dokumentation 51", 1981

Schneider, J.: "Gefahren, Gefährdungsbild und ein Sicherheitskonzept"; Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht No. 97, 1980

Schneider, Th.: "Grundgedanken und Methodik moderner Sicherheitsplanung"; Der Sicherheitsingenieur, 8 und 9/81, 1981

SIA Norm 160 : "Einwirkungen auf Tragwerke"; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1989

SIA Dokumentation D 041: "Einführung in die Norm SIA 160 'Einwirkungen auf Tragwerke' und in die Empfehlung SIA 168 'Erhaltung von Ingenieurbauwerken' "; Referate der Einführungstagungen 1989, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1989

SIA Dokumentation D 0114: "Einwirkungen auf Tragwerke – Anwendung der Norm SIA 160 in der Praxis"; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1994

SIA Weisung 260: "Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken – Weisung des SIA an seine Kommissionen für die Koordination des Normenwerks"; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 5. Fassung 1980 und 11. Fassung, September 1982

SIA 260: "Grundlagen der Projektierung von Tragwerken"; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 2003

Streich, W.: "Nutzungs-/Sicherheits-/Kontrollplan – Eine Hilfestellung zur Bearbeitung der Nutzungs- und Sicherheitspläne"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 1, 1992

Vollenweider, U.: "Gedanken zur Sicherheit im Grundbau"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 39, 1988

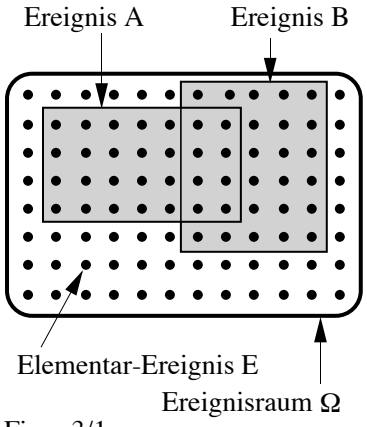
Zwicky, F.: "Entdecken Erfinden Forschen im morphologischen Weltbild"; Verlag Baeschlin, Glarus, 1989 (2. Auflage)

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

3. Verarbeitung von Information

3.1 Elemente der Wahrscheinlichkeitstheorie

Der Wahrscheinlichkeitsrechnung kommt im Umgang mit Risiken eine zentrale Bedeutung zu. Es ist hier zwar nicht die Stelle, wo die Theorie vertieft behandelt werden kann, doch müssen hier die wichtigsten Begriffe und Sätze kurz zusammengestellt werden. Ausführlicheres findet man in der Literatur (siehe z.B. Berchtold, 1991; Bernardo, 1994; Bühlmann, 1982; Castillo, 1988; Lindley, 1965; Miller, 1990; O'Hagan, 1994; Stahel, 1992).



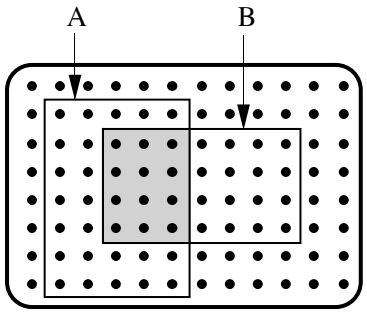
Figur 3/1

3.11 Ereignisse

Unter dem Begriff *Ereignis* verstehen wir im folgenden: ... dass eine Pumpe innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums ausfällt; ... dass die Windgeschwindigkeit innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums einen bestimmten Wert überschreitet; ... dass die Stahlfestigkeit in einer bestehenden Rohrleitung unter einem bestimmten Wert liegt; ... dass eine Gefahr rechtzeitig erkannt wird; ... dass als Folge einer Reihe von Vorkommnissen eine chemische Reaktion "durchgeht" (man spricht dann auch von einer Ereigniskette); ... dass ein Mensch in einem Verkehrsunfall stirbt; ... dass ...; usw.

Den Raum, in dem sich ein bestimmtes Ereignis sicher ereignen wird, nennt man *Ereignisraum Ω*. Ein Ereignis, das nicht weiter unterteilt werden kann, heisst *Elementarereignis E* (Figur 3/1).

Mit dem Symbol $A \cup B$ wird eine Vereinigung, eine Union der Ereignisse A und B, bezeichnet. Die Sprachregelung lautet "A und/oder B". Figur 3/1 zeigt diesen Sachverhalt in einem sog. Venn-Diagramm (John Venn, engl. Logiker, 1834–1923). Unter dem Symbol $A \cap B$ versteht man den Durchschnitt der Ereignisse A und B. Die Sprachregelung lautet "sowohl A als auch B" (Figur 3/2).



Figur 3/2

Ereignisse können voneinander unabhängig sein: z.B. A = die Unterschreitung einer gewissen Stahlfestigkeit und B = die Tatsache, dass die Rohrleitung blau gestrichen ist. Ereignisse können auch voneinander abhängig sein: z.B. die Unterschreitung einer gewissen Stahlfestigkeit in einer Rohrleitung und B = die Tatsache, dass die Rohrleitung geborsten ist. Allfällige Abhängigkeiten sind sorgfältig zu beachten.

3.12 Wahrscheinlichkeiten

Ereignisse treten mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit ein. Man unterscheidet drei grundsätzlich verschiedene Arten, den Begriff Wahrscheinlichkeit zu definieren:

- *Klassisch (Laplace):* Wahrscheinlichkeit als Anzahl der Fälle, in denen ein Ereignis eintrifft, dividiert durch die Anzahl aller möglichen Fälle.
- *Frequentistisch (Mises):* Wahrscheinlichkeit als Grenzwert der relativen Häufigkeit, mit der ein Ereignis bei vielen unabhängigen Wiederholungen unter gleichen Bedingungen beobachtet wird.
- *Subjektiv:* Wahrscheinlichkeit als Grad der Erwartung oder des Vertrauens eines Individuums in die Aussage, dass ein mögliches Ereignis eintrifft, ein umschriebener Sachverhalt zutrifft, usw.

Wahrscheinlichkeiten, auch bedingte Wahrscheinlichkeiten sind grundsätzlich dimensionslos und liegen immer zwischen Null und Eins. Bei Wahr-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

scheinlichkeiten von Ereignissen, die sich auf gewisse Zeiträume beziehen, spricht man korrekterweise von *Häufigkeiten*, also z.B. von H(A) = 5/Jahr. Da solche Eintrittshäufigkeiten oft sehr klein sind, also z.B. H = 0.25/Jahr. spricht man, wenn auch nicht korrekt, auch von Eintrittswahrscheinlichkeiten pro Jahr, also z.B. P = 0.25/Jahr. Durch Anpassen der Länge des Bezugszeitraums kann man Eintrittshäufigkeiten in diesem Sinne immer auf Eintrittswahrscheinlichkeiten zurückführen.

a) Klassische Wahrscheinlichkeit

Die klassische Wahrscheinlichkeit ist durch die einfache Beziehung

$$P = \frac{\text{Anzahl günstiger Ereignisse}}{\text{Anzahl möglicher Ereignisse}} \tag{3.1}$$

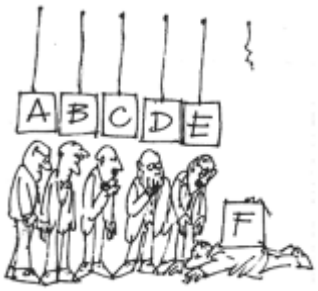
gegeben. Günstig sind jene Ereignisse, die irgendein bestimmtes Kriterium erfüllen. Beim Würfeln beispielsweise wird sich bei einer genügenden Anzahl von Würfen (theoretisch unendlich vielen), z.B. der Wert "Anzahl Fünfer durch Anzahl Würfe" immer genauer dem Wert 1/6 nähern. Grundsätzlich beträgt die Wahrscheinlichkeit, irgendeine der sechs möglichen Augenzahlen (z.B. eine Fünf) zu würfeln, bei jedem Wurf 1/6. Die übliche Schreibweise ist:

$$P(\text{Augenzahl} = 5) = {}^{1}/_{6}\,.$$

Diese Wahrscheinlichkeit ist quasi eine "in den Würfel eingebaute Eigenschaft". Man unterscheidet deshalb den idealen Würfel auch vom realen Würfel, der diese Eigenschaft nur unvollkommen besitzt. In der Tat: ein schlechter Würfel zeigt, allerdings zuverlässig erst bei sehr vielen Würfen, signifikante Abweichungen vom idealen Würfel.

b) Frequentistische Wahrscheinlichkeiten

Der Begriff der frequentistischen Wahrscheinlichkeit geht von der Tatsache aus, dass man eine Eigenschaft X einer Betrachtungseinheit, z.B. die Lebensdauer von Glühlampen, beobachten kann. Man braucht eine oder mehrere genügend grosse Stichproben und kann dann aus diesen z.B. herleiten, mit welcher empirischen Ausfallhäufigkeit eine Glühlampe während einer vorgegebenen Zeitspanne im Mittel ausfällt. Das schreibt man als



H(Ausfall Glühlampe) = 0.30/Jahr

Dass man hier oft, ungenau, da dimensionsbehaftet, auch von Ausfall- oder Eintrittswahrscheinlichkeiten redet, wurde bereits erwähnt. Es lassen sich zu solchen Aussagen auch sogenannte Vertrauensintervalle herleiten, z.B. dass man mit einem Grad des Vertrauens von 90% annehmen dürfe, dass die Ausfallhäufigkeit zwischen 0.25 und 0.35 pro Jahr liege.

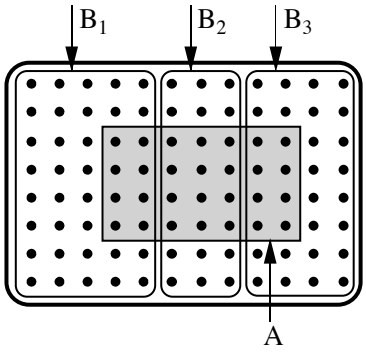
Analog kann man z.B. auch die Festigkeitswerte einer Vielzahl von Betonprobekörpern messen und aus den gewonnenen Ergebnissen auf z.B. Mittelwert, Standardabweichung, Variationskoeffizient und gegebenenfalls weitere Kenngrössen der Stichprobe schliessen. Darauf kommen wir unter Abschnitt 3.2 zu sprechen.

c) Subjektive Wahrscheinlichkeit

Der Begriff der subjektiven und wesentlich vom Informationsstand beeinflussten Wahrscheinlichkeit stützt sich auf die Umgangssprache. Diese gestattet ohne weiteres die Aussage, dass es morgen mit einer Wahrscheinlichkeit von 30 Prozent regnen wird. Die Schreibweise ist

P(morgen regnet es) = 0.30.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html



Figur 3/3

Zwar weiss jedermann, dass es ohne allen Zweifel morgen entweder regnen wird oder nicht regnen wird, also nur 100% oder 0% zutreffen kann. Es kann nicht zu 30% regnen. Trotzdem ist die Aussage in bezug auf die Frage, ob ich einen Regenschirm mitnehmen soll, unter Umständen nützlich. Ein Blick auf die Wetterkarte wird meine Einschätzung möglicherweise aber noch ändern.

Gleichermassen sinnvoll ist eine Aussage vom Typus: Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Brücke versagt, wenn dieses ganz bestimmte Fahrzeug darüberfährt, beträgt 5%. Dabei ist es offensichtlich, dass die Brücke bei der Überfahrt des spezifizierten Fahrzeugs ohne allen Zweifel entweder einstürzen wird oder eben nicht. Sie hat nur diese beiden Möglichkeiten. Sie kann nicht zu 5% einstürzen. Trotzdem ist die Aussage über die so verstandene Versagenswahrscheinlichkeit in bezug auf die Frage, ob man die Brücke weiterhin im Verkehr lassen darf, unter Umständen von grossem Wert.

Dass eine solche subjektive Wahrscheinlichkeit nicht eine in die Brücke "eingebaute" Eigenschaft ist, sondern die Meinung des zur Sicherheit der Brücke Befragten wiedergibt (die sich übrigens angesichts zusätzlicher Informationen ändern kann), dürfte einleuchtend sein. Der Befragte muss freilich Ansprüche an die fachliche Kompetenz erfüllen, soll die Aussage brauchbar sein.

3.13 Axiome und Rechenregeln

Im vorstehenden Text wurden einige Axiome, Begriffe und Schreibweisen benutzt, die hier in allgemeiner Form in aller Kürze zusammengestellt werden sollen. Die Begriffe stammen im wesentlichen aus dem Sprachschatz der klassischen und der frequentistischen Wahrscheinlichkeitslehre. Sie sind jedoch auch im Bereich der subjektiven Wahrscheinlichkeit gültig.

Die Wahrscheinlichkeitsrechnung baut auf den *Axiomen von Kolmogoroff* (1933) auf. Diese lauten:

- $0 \leq P(A) \leq 1$ (3.2)
  Die Wahrscheinlichkeit ist dimensionslos und kann nur Werte zwischen Null und Eins annehmen.
- $P(S) = 1$ (3.3)
  Das sichere Ereignis hat die Eintretenswahrscheinlichkeit Eins.
- $A \cap B = \emptyset \Leftrightarrow P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ (3.4)
  Falls der Durchschnitt von A und B die leere Menge ist, A und B also keine gemeinsamen Elemente besitzen, dann ist die Wahrscheinlichkeit der Vereinigung der beiden Ereignisse gleich der Summe der Wahrscheinlichkeiten der Einzelereignisse.

Es gelten die folgenden Rechenregeln. Auf Beweise wird hier verzichtet.

$$P(\emptyset) = 0 \tag{3.5}$$

$$P(A \cup B) = P(A) + P(B) - P(A \cap B) \tag{3.6}$$

Die *bedingte* Wahrscheinlichkeit (gelesen als "Wahrscheinlichkeit für A, gegeben, dass B eingetreten ist") beträgt:

$$P(A|B) = \frac{P(A \leftrightarrow B)}{P(B)} \tag{3.7}$$

Sind A und B voneinander unabhängige Ereignisse, gilt:

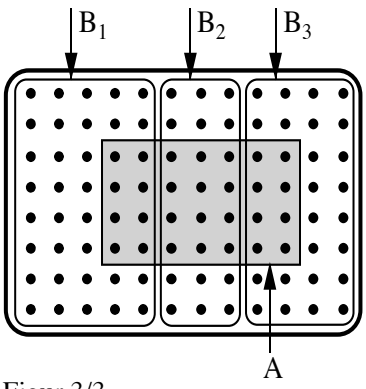
$$P(A|B) = P(A) \tag{3.8}$$

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \tag{3.9}$$

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Der Satz der totalen Wahrscheinlichkeit setzt voraus, dass die B_i paarweise unvereinbar sind mit $\Sigma P(B_i) = 1$ (siehe Figur 3/3) und lautet:

$$P(A) = \sum_{i=1}^{n} P(A \leftrightarrow B_i) = \sum_{i=1}^{n} [P(A|B_i) \cdot P(B_i)] \qquad (3.10)$$



Figur 3/3

Ein Beispiel soll das vorstehende erläutern: Eine Hochhausfassade besteht aus 3000 vorgehängten Platten. Es wird aufgrund von Erfahrungen an anderen Bauten vermutet, dass bei 20% der Platten die Aufhängung angerostet ist. Dies wird in der Folge mit R (R = Ereignis "angerosteter Anker") bezeichnet. Es ist demnach $P(R) = 0.2$. Es besteht Grund zur Vermutung, dass auf der Westseite der Prozentsatz von Platten mit angerostetem Anker doppelt so hoch ist. Eine über die ganze Fassade etwa gleichmässig verteilte Teilmenge der Platten, z.B. 1500, gefährden bei einem Absturz öffentlich zugängliches Gebiet. Diese wird hier mit Ö bezeichnet. Von den 3000 Platten hängen im übrigen 1000 auf der Westseite des Gebäudes.

Es ist $P(Ö) = 1500/3000 = 0.5$. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine Platte R, Ö oder auch beides ist, wird mit $P(R \cup Ö)$ bezeichnet (R und/oder Ö, d.h. eine der beiden Eigenschaften allein genügt). Den Durchschnitt, der beide Eigenschaften verlangt ("sowohl R als auch Ö") schreibt man als $P(R \cap Ö)$. Diese Wahrscheinlichkeit ist z.B. im Hinblick auf die Sicherheit von Personen von besonderem Interesse.

$P(R|W)$ benennt die Wahrscheinlichkeit, dass der Anker einer Platte angerostet ist, vorausgesetzt, die Platte hängt an der Westfassade. Das ist eine *bedingte* Wahrscheinlichkeit. Mit den obengenannten Zahlen ergibt sich $P(R|W) = 2 \cdot 0.2 = 0.4$.

Zwei Ereignisse A und B sind definitionsgemäss voneinander *unabhängig*, wenn $P(A|B) = P(A)$ ist. In bezug auf die Fassade sind R und Ö demnach unabhängig voneinander, weil $P(R|Ö) = P(R)$ oder auch, weil $P(Ö|R) = P(Ö)$ ist. Da $P(R|W) \neq P(R)$ ist, sind diese beiden Ereignisse nicht unabhängig voneinander.

Für die vorstehenden Beispiele gilt dann zahlenmässig

$$P(R \cup Ö) = 0.2 + 0.5 - (0.2 \cdot 0.5) = 0.60$$

$$P(R \cap Ö) = 0.2 \cdot 0.5 = 0.10$$

$$P(R|W) = 2 \cdot 0.2 = 0.40$$

$$P(R \cap Ö|W) = 0.10/0.40 = 0.25$$

3.14 Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten

a) Abschätzung subjektiver Wahrscheinlichkeiten

Subjektive Wahrscheinlichkeiten, d.h. Grade des Vertrauens in eine Aussage werden oft spontan geäussert, auch von Leuten, die mit den Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung nicht vertraut sind.

Durch geeignetes Nachfragen kann man solche spontanen Aussagen prüfen und zahlenmässig erhärten. Dieses Nachfragen lässt sich formalisieren, z.B. indem man den Befragten *wählen lässt* zwischen einem *Spiel* "Alles oder Nichts" und einer *Lotterie*.

Das Spiel bringt z.B. $F_0 = 100$ Franken, wenn die zur Diskussion stehende Aussage A zutrifft, im anderen Fall nichts, während die Lotterie einen mittleren Erwartungswert von F Franken hat, wobei natürlich $F \leq F_0$ ist.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Die Wahl fällt in der Regel leicht. Durch Variation von F lässt sich dann jedoch derjenige Wert ermitteln, bei dem der Befragte sich nicht mehr entscheiden kann, wo ihm also Spiel und Lotterie gleich attraktiv erscheinen. Für diesen Wert gilt dann

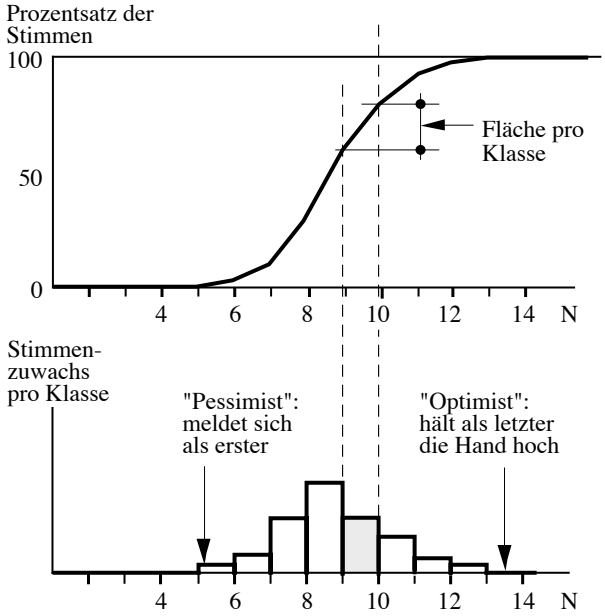
$$P(A|I) = F/F_0 = p.$$

Der Wert p entspricht dem Grad des Vertrauens des Befragten in die zur Diskussion stehende Aussage A. Dass dieser vom Informationsstand I des Befragten abhängig ist, ist durch die entsprechende bedingte Wahrscheinlichkeit P(A|I) kenntlich gemacht. Typisch ist, dass solche Wahrscheinlichkeiten von jeder befragten Person im Prinzip anders eingeschätzt werden, dass sie eben subjektiv sind.

Eine andere Methode, subjektive Wahrscheinlichkeiten zu eruieren, setzt eine Gruppe von Fachleuten voraus, z.B. eine Zuhörerschaft in einem Vortragssaal. Es gelte beispielsweise, die Traglast eines Holzstabs einzuschätzen. Der Holzstab – man durfte ihn in der Pause begutachten – macht einen guten Eindruck. Der Fachmann schätzt angesichts der Probe und aufgrund seiner Erfahrung: "sicher höher als …" oder "sicher kleiner als…". Das ist die Situation. Nun geht es darum, dieses Gremium zielgerichtet zu befragen.

Gefragt wird z.B.: "Wer der Meinung ist, dass die Traglast dieses Holzstabs kleiner als 4 N ist, soll die Hand aufhalten." Von den Anwesenden meldet sich niemand. Es wird z.B. in Einerschritten (5 N, 6, 7, ...) weitergefragt. Bei 6 hält vielleicht der erste seine Hand hoch, bei 7 N zwei weitere, etc. Der grösste Optimist billigt dem Stab vielleicht gar 13 N zu.

Trägt man den Prozentsatz der Stimmen über der Festigkeitsskala auf, entsteht ein Polygon, dem wir die Begriffe Summenhäufigkeit und Verteilungsfunktion zuordnen. Tragen wir auch den jeweiligen Stimmenzuwachs über der Festigkeitsskala auf, entsteht eine Grafik, der wir die Begriffe Histogramm und Verteilungsdichte zuordnen. In Figur 3/4 ist das Ergebnis einer solchen Befragung dargestellt.



Figur 3/4

Die so erhaltene Information über die Traglast des betrachteten Holzstabs ist natürlich ein Ausdruck der Meinung der anwesenden Experten und nicht

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

die Traglast selbst. Diese ergäbe sich erst beim Versuch und brächte einen einzigen, ganz bestimmten Zahlenwert.

b) Bayes'sches Updating

Interessant ist es auszutesten, wie sich die Meinung des vorgenannten Gremiums ändert, wenn man mitteilt, dass ein aus gleichem Holz bestehender Stab z.B. eine Traglast von 15 N hatte. Man wird sehen, dass die Verfügbarkeit zusätzlicher Information die Meinung über einen Sachverhalt verändern kann.

Diese Tatsache ist eng mit dem Namen *Thomas Bayes*, einem englischen Mathematiker, und dem nach ihm benannten Satz von Bayes (1763) verbunden. Dieser gestattet die Verarbeitung zusätzlicher Information bei der Abschätzung von Wahrscheinlichkeiten. Ausgehend von a-priori (z.B. aus Erfahrung oder subjektiver Schätzung) gegebenen Wahrscheinlichkeiten werden durch Einbau zusätzlicher Information unter Berücksichtigung eines Prädiktors a-posteriori Werte der Wahrscheinlichkeit, das heisst verbesserte Werte bestimmt. Der Bayes'sche Satz ist damit ein mathematisches Abbild der charakteristischen Eigenschaften subjektiver Wahrscheinlichkeiten und im übrigen auch ein Vermittler zwischen der subjektiven und der klassischen bzw. frequentistischen Wahrscheinlichkeitstheorie.

Die Bayes'sche Formel setzt voraus, dass die B_i paarweise unvereinbar sind mit $\Sigma P(B_i) = 1$ und lautet:

$$P(B_i \mid I) = \frac{P(I \mid B_i) \cdot P(B_i)}{\sum_{i=1}^{n} [P(I \mid B_i) \cdot P(B_i)]} \qquad (3.11)$$

Ein Beispiel soll die Anwendung dieses Satzes veranschaulichen. Mit B_i wird die Würfeldruckfestigkeit σ_c [N/mm2] des Betons einer Brücke bezeichnet, die den Verdacht erweckt hat, dass die Tragsicherheit nicht mehr gegeben sei. Es interessiert die Wahrscheinlichkeit, mit welcher der Beton dieser Brücke einer bestimmten Klasse zugeordnet werden kann. B wird in folgende Klassen unterteilt:

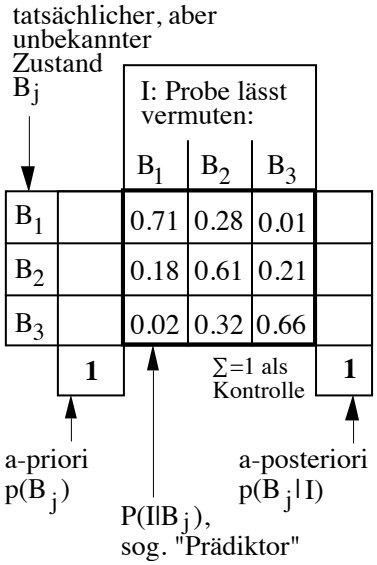
B_1: $\sigma_c < 30$

B_2: $30 \le \sigma_c < 40$ $\qquad (\sum P(B_i) = 1)$

B_3: $\sigma_c \ge 40$

Aus vielen Versuchsreihen ist die Zuverlässigkeit der Voraussage des verwendeten Prüfverfahrens bekannt. Beton der Klasse B_1 z.B. wird nur mit einer Wahrscheinlichkeit von 71% als solcher erkannt, in 28% der Fälle schliesst man (fälschlicherweise) auf die mittlere Qualität B_2, und in 1% sogar auf gute Qualität B_3 (siehe Figur 3/5). Beton mittlerer Qualität wird analog mit den Wahrscheinlichkeiten 0.18, 0.61 und 0.21 den drei Klassen zugeordnet. Diese "objektiv" bekannte *Vor*-Information wird "*Prädiktor-Verteilung*" genannt. Ein absolut treffsicheres Prüfverfahren hätte auf der nach rechts abfallenden Diagonalen jeweils die Zahl Eins und in den übrigen Feldern Nullen.

Aus der Erfahrung lassen sich natürlich gewisse Aussagen über den Beton der Brücke machen. Man wird z.B. angesichts des visuellen Eindrucks und der Entstehungsgeschichte der Brücke vermuten, dass der Beton eher von schlechter Qualität ist. Die subjektive Wahrscheinlichkeit $P(B_i=B_1)$ sei beispielsweise 0.65. Gewiss, der Experte räumt ein: mit einer Wahrscheinlich-



Figur 3/5

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

keit von 0.24 könnte es doch B_2 sein und mit 0.11 vielleicht sogar B_3. Das sind die a-priori-Wahrscheinlichkeiten, die wir in die zweite Spalte des Rechenschemas eintragen (siehe Figur 3/6). Natürlich sind die Zahlen nicht so "genau"; wir schreiben nur so viele Ziffern, dass man im Rechenschema den Gedankengang verfolgen kann.

Ein erster, aus der Brücke herausgearbeiteter Probekörper ergibt nun in der Prüfpresse z.B. den Wert $\sigma_c = 34\ N/mm^2$ und lässt damit auf mittlere Qualität (B_2) schliessen. Wie gross ist nun die Wahrscheinlichkeit, dass es sich *wirklich* um mittleren Beton handelt?

		I: Probe lässt vermuten:			
		B_1	B_2	B_3	
B_1	0.65	0.71	0.28	0.01	*0.50*
B_2	0.24	0.18	0.61	0.21	*0.40*
B_3	0.11	0.02	0.32	0.66	*0.10*
	1				***1***

Figur 3/6

Die Bayes'sche Formel liefert:

$$P(B_2|I) = \frac{P(I|B_2)\cdot P(B_2)}{P(I|B_1)\cdot P(B_1) + P(I|B_2)\cdot P(B_2) + P(I|B_3)\cdot P(B_3)}$$

$$= \frac{0.61 \cdot 0.24}{0.28 \cdot 0.65 + 0.61 \cdot 0.24 + 0.32 \cdot 0.11} \cong 0.40$$

Offensichtlich ist die Wahrscheinlichkeit, dass es sich wirklich um B_2 handelt, von 0.24 auf 0.40 gestiegen. Analog sind die Wahrscheinlichkeiten für B_1 und B_3 auf 0.50 und 0.10 gesunken. Als Übung sei der Nachvollzug dieser Berechnungen empfohlen.

	Fall a)	Fall b)	Fall c)
$P(B_1\|I)$	69 %	20 %	2 %
$P(B_2\|I)$	31 %	75 %	70 %
$P(B_3\|I)$	≈ 0 %	5 %	28 %

Diese Zahlen treten nun für die nächste Verbesserung an die Stelle der a-priori-Wahrscheinlichkeiten, also in die linke Spalte. Ein weiterer Probekörper, der z.B. wiederum auf mittlere Qualität schliessen lässt, wird diese verbesserte Schätzung wieder beeinflussen. A-priori stehen dann die Werte 0.34, 0.59 und 0.08. Und so fort. Die nebenstehende Tabelle gibt die Wahrscheinlichkeiten für den Fall, dass die nächste, also die dritte Probe an der Prüfpresse a) 28 N/mm^2, b) 36 N/mm^2 und c) 42 N/mm^2 ergibt.

Im Laufe der weiteren Prüfung verliert die erste Schätzung immer mehr an Gewicht und langsam nähert man sich den Zahlenwerten, die sich aus der frequentistischen Definition der Wahrscheinlichkeiten ergeben.

Nicht diskutiert wurde hier allerdings eine wichtige Frage, nämlich diejenige nach dem Gewicht der ursprünglichen Einschätzung des Experten im Vergleich zu demjenigen einer einzigen Betonprobe. Die Antwort auf diese Frage hängt natürlich von der Erfahrung des Experten ab. Den einen mag man als äquivalent zu drei Betonproben, einen andern, erfahreneren, vielleicht auf das Zehnfache einschätzen. Und das beeinflusst natürlich das Verfahren sowie die Ergebnisse. Hier liegt die Problematik der praktischen Anwendung der Bayes'schen Formel.

c) Frequentistische Wahrscheinlichkeiten

Der Ermittlung frequentistischer Wahrscheinlichkeiten liegt eindeutig das *Beobachten* von Realisationen interessierender Eigenschaften zugrunde. Als Beispiel gelte die Beobachtung der Festigkeiten von Betonprobekörpern über ein ganzes Jahr. Aus der sich so ergebenden Reihe von Werten schliesst man dann auf Mittelwert, Standardabweichung und weitere Parameter der Stichprobe und z.B. auch auf die Wahrscheinlichkeit, dass die Festigkeit X einen bestimmten Wert x_0 unterschreitet.

Das hat mit beschreibender Statistik zu tun und soll im folgenden Abschnitt ausführlicher diskutiert werden.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

3.2 Auswertung von Stichproben

In der Statistik nennt man eine Gesamtheit von Beobachtungen oder Versuchen unter gleichen Bedingungen *Grundgesamtheit,* und jeder einzelne Versuch oder jede einzelne Beobachtung ist ein *Element* dieser Grundgesamtheit. Dieses Element kann hinsichtlich verschiedener *Merkmale*, die als Zufallsgrössen oder *Zufallsvariablen* aufzufassen sind, untersucht werden. Bei statistischen Untersuchungen betrachtet man notgedrungen immer nur eine Teilmenge von Elementen der Grundgesamtheit. Diese Teilmenge wird als *Stichprobe* und die Anzahl *n* der in ihr enthaltenen Elemente als *Umfang* der Stichprobe bezeichnet.

Der Beton eines Gebäudes bildet z.B. eine Grundgesamtheit. Jede willkürlich herausgegriffene Zone ist ein Element dieser Grundgesamtheit. Beobachtungen beschränken sich notgedrungen auf eine beschränkte Zahl von aus dem Beton nach zufälligen Kriterien herausgebohrten Zylindern. Das ist die Stichprobe. Das beobachtete Merkmal ist beispielsweise die Zylinderdruckfestigkeit dieser Bohrkerne.

Als Zufallsvariable wird die Skala aller Werte bezeichnet, die eine Grösse wie z.B. die Druckfestigkeit von Beton einnehmen kann. Sie werden meist mit Grossbuchstaben bezeichnet: Druckfestigkeit X, Wuchshöhe H. Einzelne Werte, die sog. Realisationen einzelner Messungen schreibt man hingegen mit Kleinbuchstaben. Sie können mit einem Index ergänzt sein: Die 3. Messung z.B. ergab: $x_3 = 34.6$ N/mm^2.

Eine Stichprobe kann, je nach Fragestellung, einen Umfang von drei, zehn, aber auch von mehreren hundert Proben haben. Je mehr Proben zur Verfügung stehen, desto vertrauenswürdiger wird die Aussage. Aber gleichzeitig steigt auch der Aufwand. Von einem gewissen Umfang der Stichproben an nimmt nur noch der Aufwand der Probenentnahme und der Auswertung zu, die Genauigkeit der aus den Ergebnissen ermittelten Parameter dagegen steigt kaum oder gar nicht mehr.

Werte einer Stichprobe
Betonprüfwürfel [N/mm2]

ungeordnet	geordnet
35.8	24.4
39.2	27.6
34.6	27.8
27.6	27.9
37.1	28.5
33.3	30.1
32.8	30.3
34.1	31.7
27.9	32.2
24.4	32.8
27.8	33.3
33.5	33.5
35.9	34.1
39.7	34.6
28.5	35.8
30.3	35.9
31.7	36.8
32.2	37.1
36.8	39.2
30.1	39.7

Figur 3/7

3.21 Urlisten, Strichlisten

Zunächst werden die interessierenden Werte, z.B. die Festigkeiten eingelieferter Betonproben, in einer Liste festgehalten (siehe Figur 3/7). Die Werte erscheinen ungeordnet, meist in der Reihenfolge ihrer Erhebung. Es kann sinnvoll sein, sie zu ordnen, z.B. nach ihrer Grösse. Das sind sog. Urlisten.

Als weitere Stufe der Auswertung können die Werte der Urliste mittels einer Strichliste (Figur 3/8) definierten Intervallen zugeordnet werden. Dabei geht Information verloren, man gewinnt jedoch Übersicht und kann die Daten besser weiterverarbeiten.

Klassen-mitte	Intervall	Strichliste	relative Häufigkeit	Summen-Häufigkeit
				0.00
24.5	23 – 26			
27.5	26 – 29			
30.5	29 – 32			
33.5	32 – 35			
36.5	35 – 38			
39.5	38 – 41			
		Σ=		1.00

Figur 3/8

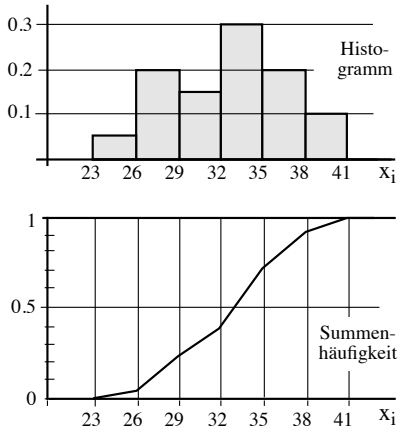
Zur Herstellung einer Strichliste geht man wie folgt vor: Zuerst wird der Bereich festgelegt, in welchem überhaupt Werte auftreten. Im Falle der in Figur 3/7 dargestellten Daten sind das min x = 24.4 und max x = 39.7. Dieser Bereich wird auf sinnvolle runde Zahlen erweitert, z.B. 24 bis 40, und dann in eine vernünftige Anzahl Klassen gleicher Breite unterteilt. Die Zahl der Klassen soll grösser als 5 sein, 25 aber nicht übersteigen. Als Anhaltspunkt mag die Wurzel aus der Zahl der Werte gelten. Man muss sich nicht sklavisch daran halten. Günstig sind "runde" Klassengrenzen.

Für das Beispiel wird der Bereich min x bis max x in 6 Klassen aufgeteilt: $23 \div 26$, $26 \div 29$, … , $38 \div 41$ (6 Klassen, Breite 3). Es wird empfohlen, die Figur 3/8 anhand der aus der geordneten Liste der Figur 3/7 entnommenen Werte zu ergänzen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

3.22 Histogramme

Die Ergebnisse von Strichlisten lassen sich als Histogramme besonders anschaulich darstellen. Über jeder Klasse wird die entsprechende Anzahl der Werte pro Klasse aus der Strichliste, oder allgemeingültiger noch, die relative Häufigkeit aufgetragen.



Figur 3/9

Noch mehr Transparenz erzielt man mit der Darstellung der Summenhäufigkeit: Dazu werden, links beginnend, laufend die Häufigkeiten aufgetragen und die Punkte linear miteinander verbunden: Es entsteht ein Polygon (Figur 3/9). Das ist natürlich nichts anderes als die Integration des Histogramms.

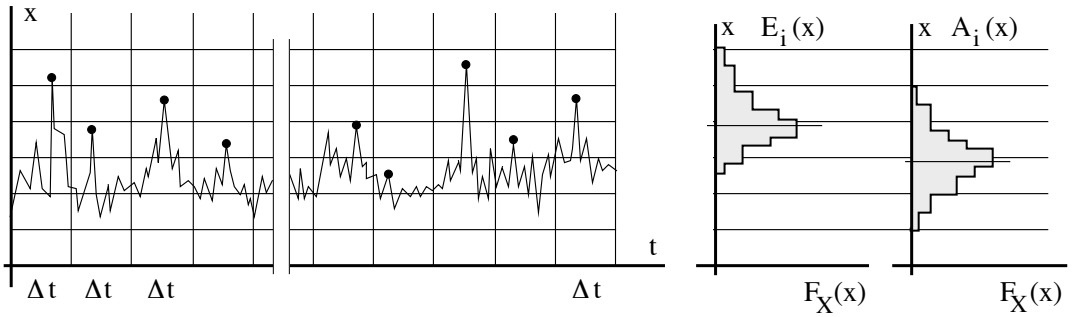
Heute lassen sich mit Computerprogrammen, wie z.B. Mystat (Hale, 1992), aber auch mit dem bekannten Tabellenkalkulationsprogramm Excel elegant und schnell Histogramme und Summenhäufigkeiten aus Zahlentabellen erstellen.

3.23 Ganglinien, stochastische Prozesse

Bei manchen Grössen interessieren nicht nur die Werte allein, sondern ebenfalls deren chronologische Reihenfolge. Man spricht dann von Ganglinien.

Klimadaten, wie beispielsweise Wasserstand, Wassertemperatur, Luftdruck etc., werden in der Regel auf einem rotierenden Papierzylinder automatisch aufgezeichnet. Es ist aber auch möglich, in regelmässigen Zeitabständen die Daten aufzunehmen, sie in eine Graphik einzutragen und nachher die Ganglinie zu ergänzen, indem die einzelnen Punkte miteinander verbunden werden. Figur 3/10 zeigt eine solche Ganglinie.

Den dieser Ganglinie zugrundeliegenden Sachverhalt nennt man einen stochastischen Prozess. Wir unterstellen in der Folge, dass die Vorgänge *stationär* sind, d.h. dass eine lineare Regression aller Werte eine horizontale Gerade liefert. Ist das nicht der Fall, hat man es mit sog. instationären stochastischen Prozessen zu tun, die hier nicht behandelt werden sollen (siehe z.B. Dracos, 1980 oder Plate, 1993).



Figur 3/10

Bei der Auswertung solcher Ganglinien interessieren in der Regel zwei Histogramme: das Histogramm der Extremwerte $E_i(x)$ in zweckmässig gewählten Zeitintervallen Δt und das Histogramm der sog. Augenblickswerte $A_i(x)$.

Betrachten wir zuerst die Augenblickswerte und nehmen wir an, es handle sich um die Ganglinie des Pegelstands eines Flusses. Der Weg zum Histogramm der Augenblickswerte $A_i(x)$ ist dann der folgende: Man liest z.B. immer um 12.00 Uhr mittags den Pegel ab und bildet aus dieser – zufälligen – Stichprobe nach den früher diskutierten Methoden das Histogramm. Es liegt dann eine Stichprobe vor, aus der die Zeit eliminiert ist.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Histogramme der Augenblickswerte sind meist mehr oder weniger symmetrisch. Bei Temperatur-Ganglinien, Wasserständen eines Flusses oder Sees leuchtet dies intuitiv ein, da Abweichungen vom mittleren Wert nach unten und oben etwa gleich wahrscheinlich sein dürften. Ganglinien anderer stochastischer Prozesse sind oft komplizierter, z.B. die Ganglinie von Schneehöhen x, da hier über die Sommermonate hinweg $x = 0$ ist. Es kann dann zweckmässig sein, solche Ganglinien unter der Bedingung zu untersuchen, dass $x > 0$ ist.

Von oft weit grösserem Interesse ist das Histogramm der Extremwerte $E_i(x)$, also z.B. der Abflussmenge bei Hochwasser, der Temperaturhöchstwerte, der Schneehöhen-Maxima etc. Das Vorgehen ist einfach: Man teilt zunächst den Beobachtungszeitraum in gleichlange Zeitintervalle Δt ein. Die Wahl von Δt hängt vom Typ des stochastischen Prozesses ab. Oft wählt man ein Jahr. Man sucht dann innerhalb jedes Zeitintervalls den Extremwert (Maximum bzw. Minimum). Aus diesen Extremwerten erstellt man das Histogramm nach den vorne beschriebenen Methoden.

Solche Histogramme werden uns später als Grundlage dienen, Zufallsvariable, die als zeitvariante stochastische Prozesse erscheinen, in normale, von der Zeit unabhängige Zufallsvariable umzuformen.

3.24 Parameter von Stichproben

Eine Reihe von Werten, also eine Stichprobe bzw. das zugehörige Histogramm kann durch wenige charakteristische Zahlenwerte, sog. *Parameter* beschrieben werden. Diese Parameter werden auch *Momente* genannt. Wir unterscheiden: *Mittelwert*, *Varianz* (resp. Standardabweichung), *Schiefe, Exzess* etc. Meist genügen die beiden erstgenannten Parameter.

Als erstes Moment einer Stichprobe wird das *arithmetische Mittel (mean)* m_X wie folgt berechnet:

$$m_X = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{3.12}$$

Als Mass für die Streuung wird das zweite Moment, die sog. *Varianz* von X, abgekürzt V(X) ermittelt:

$$V(X) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^{n} (x_i - m_X)^2 \tag{3.13}$$

Gewisse Taschenrechner sind mit "n" statt "n–1" vor dem Summenzeichen programmiert. Das führt bei kleinen n zu manchmal merklich anderen Werten. Es gibt offenbar gute Gründe für den Statistiker, "n–1" zu schreiben, und wir wollen hier diesen die Erklärung überlassen. Auf dem weiteren Weg von den Daten zur Zuverlässigkeitstheorie verschwinden die Unterschiede ohnehin.

Die sog. *Standardabweichung (Standard Deviation)* s_X ermittelt man als Wurzel aus der Varianz, also

$$s_X = \sqrt{V(X)} \tag{3.14}$$

Die Standardabweichung hat dieselbe Dimension wie das Merkmal selbst.

Der Variationskoeffizient beträgt

$$v_X = \frac{s_X}{m_X} \tag{3.15}$$

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Im Gegensatz zur Standardabweichung und zur Varianz ist der Variationskoeffizient eine dimensionslose Grösse. Varianz und Variationskoeffizient haben ähnlichen Symbole. Vor Verwechslungen muss man sich hüten.

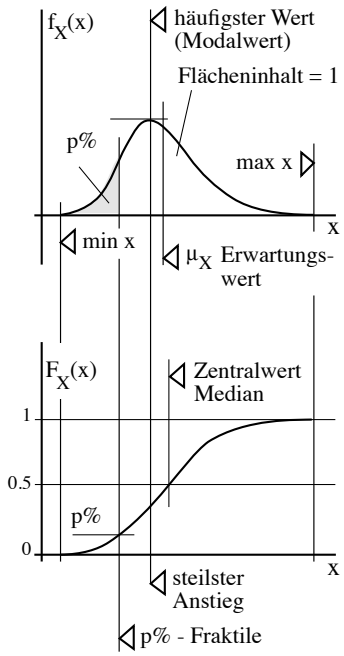
Die höheren Momente, also die *Schiefe* d_X und der *Exzess* e_X (ein Mass für die sog. Abplattung) berechnen sich wie folgt:

$$d_X = \frac{n}{(n-1)\cdot(n-2)\cdot s_X^3} \cdot \sum_{i=1}^{n}(x_i - m_X)^3 \qquad (3.16)$$

$$e_X = \frac{n^2}{(n-1)\cdot(n-2)\cdot(n-3)\cdot s_X^4} \cdot \sum_{i=1}^{n}(x_i - m_X)^4 \qquad (3.17)$$

3.3 Verteilungen

Histogramme spiegeln die Eigenschaften der ihnen zugrundeliegenden Stichprobe wider und sind nur ein mehr oder weniger genaues und zudem von den Zufälligkeiten der Stichprobenentnahme abhängiges Abbild der hinter der Stichprobe stehenden Grundgesamtheit. Im Grunde genommen sind es aber die Eigenschaften der Grundgesamtheit selber, die man in einer Zufallsvariablen erfassen möchte. Es ist einleuchtend, dass Histogramme oder Summenkurven bei steigendem Umfang der Stichprobe immer mehr ihren treppen- bzw. polygonförmigen Charakter verlieren und mehr oder weniger stetige Funktionen des Merkmals x sind.



Figur 3/11

3.31 Definitionen

Es liegt nahe, diese Funktionen durch mathematisch definierte sog. *Verteilungen* zu ersetzen, da mit letzteren wesentlich einfacher gerechnet werden kann. Man spricht dann von der *Verteilungsdichte* $f_X(x)$, die ihre Entsprechung im Histogramm hat, und von der *Verteilungsfunktion* $F_X(x)$, die der Summenkurve entspricht. Figur 3/11 zeigt oben eine Verteilungsdichte und unten die zugehörige Verteilungsfunktion einer sog. kontinuierlichen Verteilung. Sowohl die Verteilungsdichte als auch die Verteilungsfunktion beschreiben eine bestimmte Verteilung vollständig.

Oft trifft man in der Literatur die englischen Abkürzungen pdf (für **p**robability **d**ensity **f**unction) und cdf (**c**umulative **d**ensity **f**unction). Diese Begriffe sind präziser als die deutschen, wo vor allem der Begriff "Verteilungsfunktion" nicht eindeutig ist, aber definitionsgemäss wie oben beschrieben benutzt wird.

An dieser Stelle seien mit Figur 3/11 zwei weitere Parameter eingeführt: der *Median* (Zentralwert) und der *Modalwert*. Der erste trennt eine Verteilungsdichte in zwei flächengleiche Hälften (F(Median) = 0.5), der zweite markiert das Maximum der Verteilungsdichte, das heisst den häufigsten Wert. Bei symmetrischen Verteilungen fallen das arithmetische Mittel, der Median und der Modalwert zusammen. Die wichtigste symmetrische Verteilung ist die Gauss'sche Normalverteilung.

Neben den besprochenen kontinuierlichen Verteilungen existieren sog. diskrete Verteilungen für Variablen, die nur diskrete Werte, z.B. 1, 2, 3, ... annehmen können. Gute Beispiele hierfür sind ein Würfel oder die zeitlichen Abstände der Durchfahrten von Zügen an einer Schranke. Wir verzichten hier ausdrücklich auf die Besprechung solcher Verteilungen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Während empirisch aus Stichproben gewonnene Parameter mit *lateinischen* Buchstaben (m_X, s_X) bezeichnet werden, nimmt man in der Regel für die entsprechenden Parameter der kontinuierlichen Verteilungen *griechische* Buchstaben (μ_X, σ_X). Sie sind mathematisch definiert:

$$\mu_X = E(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot f_X(x)\,dx \qquad (3.18)$$

$$\sigma_X^2 = V(X) = \int_{-\infty}^{+\infty} (x-\mu_X)^2 \cdot f_X(xdx \qquad (3.19)$$

Die Momente höherer Ordnung, d.h. die Schiefe δ und der Exzess ε, sind weitere Parameter einer Verteilung. Die Definitionen ergeben sich mit Hinweis auf die Formeln (3.16) und (3.17) analog zum Vorstehenden. Für die Normalverteilung gilt $\varepsilon = 3$. Werte grösser als 3 weisen auf eine Verteilung hin, die im Bereich der Schwänze dicker ist als die Normalverteilung. Für symmetrische Verteilungen gilt $\delta = 0$. Werte grösser als 0 weisen auf eine linksschiefe Verteilung hin, deren Modalwert unter dem Mittelwert liegt.

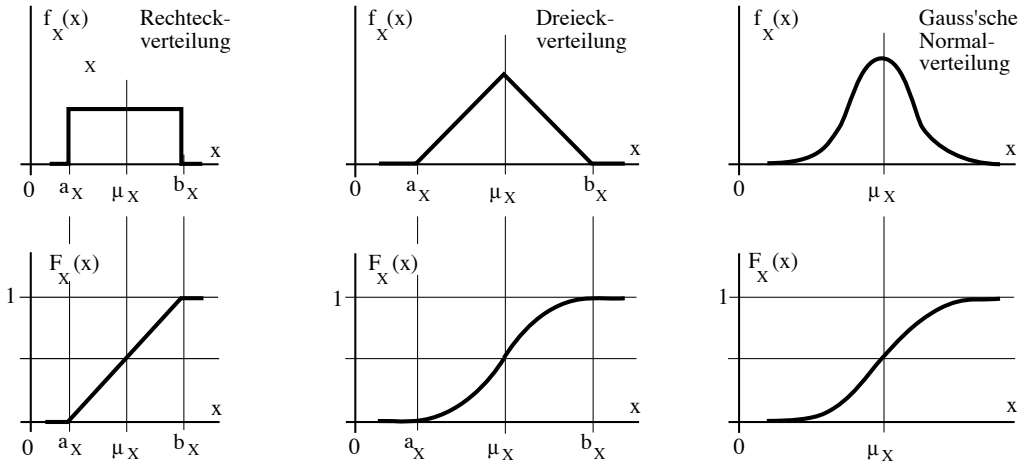
Oft werden mathematisch definierte Verteilungen abgekürzt notiert: Ein Grossbuchstabe steht für den Typ, in Klammern folgen als Parameter Mittelwert, Standardabweichung etc., jeweils durch Komma oder Strichpunkt abgetrennt. Beispiele dafür folgen weiter unten.

3.32 Wichtige Verteilungstypen

a) Symmetrische Verteilungen

Figur 3/12 zeigt schematisch für drei Verteilungstypen oben jeweils die Verteilungsdichte, unten die Verteilungsfunktion. Weitere Verteilungstypen und entsprechende Formeln finden sich im Anhang unter 10.1.

Die *Rechteckverteilung* (oder Gleichverteilung) ist die einfachste aller Verteilungen. Sie wird links durch den Kleinst-, rechts durch den Grösstwert begrenzt. Ihr Einsatz ist dort sinnvoll, wo lediglich "sicher grösser als … , sicher kleiner als …" bekannt ist. Als abgekürzte Schreibweise gilt $R(\mu;\sigma)$ oder auch R(a; b).



Figur 3/12

Die Dreieckverteilung – $D(\mu;\sigma)$ oder auch D(a; b) – muss nicht symmetrisch sein, doch setzt man sie häufig so an. Sie gibt mittleren Werten mehr Gewicht und wäre z.B. geeignet, das Histogramm der Figur 3/9 in einer ersten Näherung recht gut zu ersetzen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Sehr viele Sachverhalte aus Natur und Technik zeigen mit guter Näherung eine *Gauss'sche Normalverteilung*, $N(\mu;\sigma)$. Die Verteilungsdichte der Normalverteilung – ihrer Form wegen auch *Glockenkurve* genannt – ist:

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma_X \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}((x-\mu_X)/\sigma_X)^2} \qquad -\infty \le x \le +\infty \tag{3.20}$$

Es ist rechentechnisch oft vorteilhaft, eine Variablentransformation vorzunehmen. Die standardisierte, sog. standard-normalverteilte Variable wird hier mit u bezeichnet. Für sie gilt $\mu_U = 0$ und $\sigma_U = 1$. Die Transformationsregel schreibt sich wie folgt:

$$u = \frac{x - \mu_X}{\sigma_X} \tag{3.21}$$

Die standard-normalverteilte Variable wird mit N(0;1) abgekürzt und entspricht folgenden Formeln:

$$f_U(u) = \varphi_U(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}u^2} \qquad -\infty \le u \le +\infty \tag{3.22}$$

$$F_U(u) = \Phi_U(u) = \int_{-\infty}^{u} \varphi_U(u)\, du \qquad -\infty \le u \le +\infty \tag{3.23}$$

Die Verteilungsfunktion $F_U(u)$ gemäss Ausdruck (3.23) ist nicht geschlossen integrierbar. Die Werte der Standard-Normalverteilung sind jedoch tabelliert (siehe z.B. Anhang 10.2). Oft ist nur eine Hälfte der symmetrischen Verteilung aufgeführt. Man muss dann selbst das Komplement zu 1 bilden.

b) Asymmetrische (schiefe) Verteilungen

Viele Merkmale der Natur, so insbesondere Extremwerte, auf die schon unter Abschnitt 3.23 hingewiesen wurde, haben eine schiefe Verteilung. Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass der Modalwert nicht mit dem Mittelwert der Verteilung zusammenfällt. Beispiele für solche schiefen, mathematisch definierten Verteilungen von praktischer Bedeutung sind:

- Log-Normalverteilung
- Extremwert Typ I oder Gumbel-Verteilung
- Extremwert Typ II oder Frechet-Verteilung
- Extremwert Typ III oder Weibull-Verteilung

Die Extremwertverteilungen Typ I und II gelten für Grösstwerte (z.B. Schneehöhen), der Typ III für Kleinstwerte (z.B. Betonfestigkeiten). Auch die Log-Normalverteilung wird oft für Variablen angesetzt, bei denen Kleinstwerte von Interesse sind. Die entsprechenden Formeln finden sich im Anhang unter 10.1.

3.33 Konstruktion von Wahrscheinlichkeitspapieren

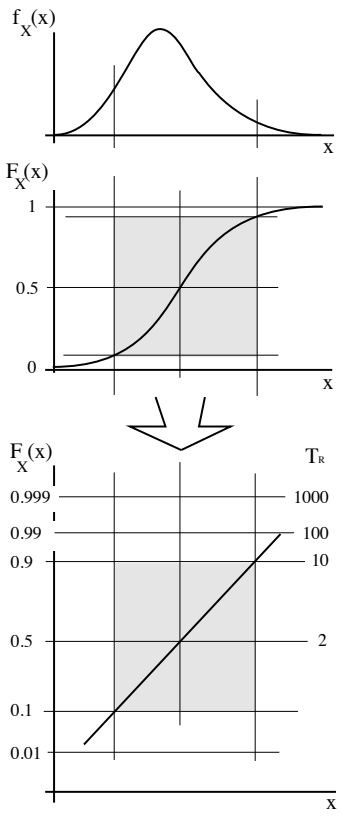
Wahrscheinlichkeitspapiere sind zur Darstellung von Verteilungsfunktionen $F_X(x)$ über der Merkmals-Achse x besonders gut geeignet. Sie sind durch Verzerrung der $F_X(x)$-Achse (und allenfalls auch der x-Achse selbst) derart konstruiert, dass die ihren Namen tragenden Verteilungsfunktionen als *Gerade* abgebildet werden (siehe Figur 3/13).

Wichtige Wahrscheinlichkeitspapiere sind das *Normal-*, das *Gumbel-* und das *Weibull*-Papier. Das *Log-Normal*-Papier ist der Einteilung der $F_X(x)$-Achse nach ein Normal-Papier, hingegen ist zusätzlich die Merkmalsachse x logarithmisch verzerrt.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Die Figur 3/15 zeigt nebeneinander ein Normal- und ein Log-Normal-Papier, Figur 3/16 ganz grob ein Gumbel-Papier. Die Genauigkeit dieser hier dargestellten Wahrscheinlichkeitspapiere reicht für eine praktische Anwendung freilich nicht aus. Papiere in anwendungsbereitem Massstab finden sich im Anhang unter 10.3.

Es ist selbstverständlich, dass bei ins Unendliche gehenden Funktionen nur ein Bereich ohne die Extrema graphisch darstellbar ist. Die Werte der $F_X(x)$-Achse (theoretisch von 0 bis 1 laufend) können deshalb "nur" von 10^{-n} (n etwa 3 bis 4) bis $\{1 - 10^{-n}\}$ erfasst werden (Figur 3/13). Das ist jedoch in praktischer Hinsicht völlig ausreichend.



Figur 3/13

3.4 Parameterschätzung und Extrapolation

3.41 Allgemeines

Die Festlegung der einem Datensatz bzw. einem Histogramm am besten entsprechenden Verteilung und die Schätzung der zugehörigen Parameter, also z.B. von μ und σ der gewählten Verteilung, bilden ein wichtiges Gebiet der Statistik, das hier praktisch vollständig übergangen werden soll.

Das hat gute Gründe, denn im Bauwesen interessieren in der Regel kleine Wahrscheinlichkeiten und damit die sog. "Schwänze" der Verteilungen, also die Form der Verteilungsdichte weit weg vom Mittelwert. Eine Verteilung, die im Bereich des Mittelwerts eine Stichprobe gut annähert, mag im Bereich der Schwänze überhaupt nicht passen.

Ein anderer Grund ist der, dass wir im Bauwesen oft vergleichen müssen. Vergleichbarkeit ist aber an übereinstimmende Grundvoraussetzungen gebunden. Wir werden deshalb oft einen bestimmten Verteilungstyp *normativ* festlegen (z.B. Log-Normal- oder Weibull-Verteilung für Festigkeiten, Gumbel-Verteilung für Extremwerte klimatischen Ursprungs, Normalverteilung für Abmessungen, Imperfektionen geometrischer Art usw.). Es kommt in der Folge gar nicht so sehr darauf an, dass der gewählte Verteilungstyp den Werten der Stichprobe möglichst gut entspricht, sondern vielmehr darauf, für einen festgelegten Verteilungstyp die der Stichprobe möglichst gut entsprechenden Parameter festzulegen.

3.42 Parameterschätzung

Die Parameter der Verteilung legen wir in erster Näherung anhand der Parameter der Stichprobe fest, also zu

$$\mu_X \approx m_X$$

$$\sigma_X \approx s_X \qquad (3.24)$$

Es gibt allerdings oft gute Gründe, den grossen bzw. den kleinen Werten in einer Stichprobe mehr Gewicht beizumessen als den Werten in der Nähe des Mittelwerts. Das führt dann dazu, dass man, ausgehend von den nach den vorstehenden Formeln ermittelten Schätzwerten, in beurteilender Weise nach oben oder unten korrigiert und so, ganz im Sinne Bayes'schen Denkens, weitere Hintergrund- bzw. Vorinformation in den Kalkül hineinbringt.

Besonders gut gelingt das mit Hilfe von Wahrscheinlichkeitspapieren, wie sofort gezeigt werden soll.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

3.43 Datenaufbereitung mit Wahrscheinlichkeitspapieren

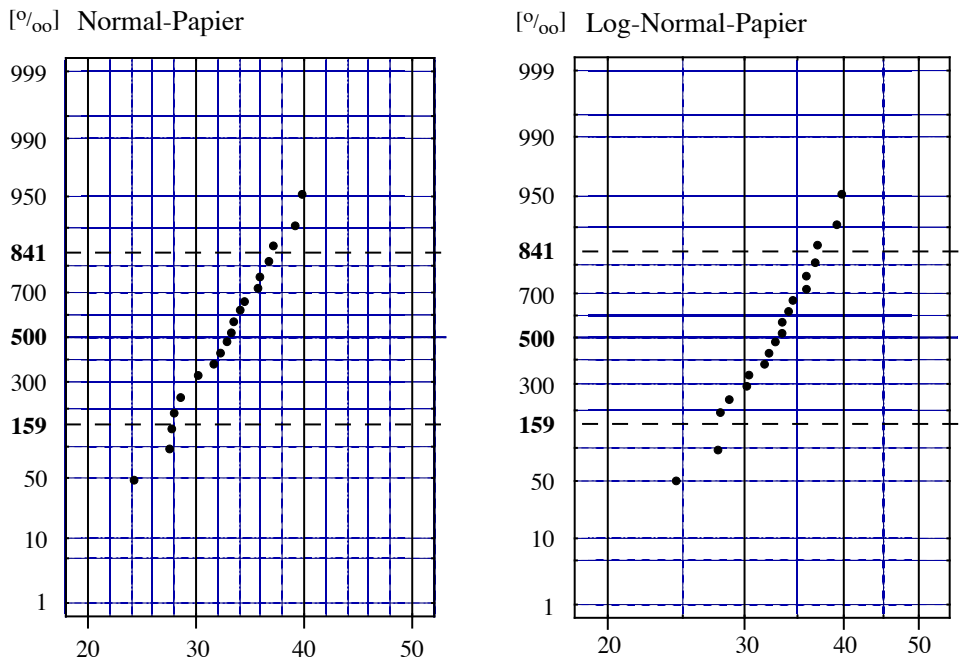
Um für einen Datensatz den Verteilungstyp und die Parameter zu gewinnen, die ihn am besten modellieren, ist die Anwendung von Wahrscheinlichkeitspapieren vorteilhaft. Man kann auf diesem Weg auch am besten allfällig vorhandene Vorinformationen berücksichtigen und damit dem Zweck der Datenaufbereitung tatsächlich Rechnung tragen.

n	x_n	$F_X(x_n)$
1	24.4	0.045
2	27.6	0.091
3	27.8	0.136
4	27.9	0.182
...	...	...
...	...	...
21	37.1	0.864
20	39.2	0.909
21	39.7	0.955

Figur 3/14

Eine Messreihe, z.B. sämtliche auf einer Baustelle gemessenen Würfeldruckfestigkeiten, aber auch die während einer gewissen Zeitdauer gemessenen Extremwerte von Windgeschwindigkeiten, Schneehöhen und dergleichen, werden als eine Punktreihe in ein Wahrscheinlichkeitspapier eingetragen. Man versucht daraufhin, von Auge eine Gerade in die Punktreihe hineinzulegen, die die Punktreihe am besten ersetzt. Man kann auch die Methode der kleinsten Quadrate einsetzen, um diese Anpassung zu optimieren. Meist ist das jedoch nicht nötig. Diese Gerade liefert dann die Parameter der Verteilung.

Figur 3/14 zeigt im Sinne eines Beispiels eine Messreihe von 21 Werten in einer nach Grösse geordneten Liste. Diese Liste erscheint in Figur 3/15 in einem Normal- und einem Log-Normal-Papier.



Figur 3/15

Die Punkte in diesen Wahrscheinlichkeitspapieren werden aus den Messwerten wie folgt ermittelt:

- Jedem Wert wird entsprechend seiner relativen Stellung n innerhalb der Stichprobe ein Wert

$$F_X(x_n) = \frac{n}{N+1} \tag{3.25}$$

zugeordnet und in einer weiteren Kolonne eingetragen. N entspricht der Anzahl Messwerte.

Sind Extremwerte von Interesse, wird die folgende Formel empfohlen:

$$F_X(x_n) = \frac{n-0.4}{N+0.2} \tag{3.25 a}$$

- Jeder Messwert wird als Punkt $(x_n; F_X(x_n))$ in das Papier eingetragen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

- Der so entstandenen Punktreihe wird nach Augenmass die bestmögliche Gerade eingepasst. Sind die Extremwerte der Verteilung von Interesse, sollen eher die extremen Werte berücksichtigt werden. Bei *starken* Abweichungen muss man vielleicht den Papiertyp wechseln und den Vorgang wiederholen, bis eine zufriedenstellende Anpassung erreicht ist.
- Die Gerade charakterisiert, zusammen mit dem Papiertyp, die passende Verteilung. Es geht dann lediglich noch darum, die Parameter der Verteilung zu ermitteln.

Das in Figur 3/15 skizzierte Beispiel zeigt, dass für diesen Datensatz Log-Normal-Papier kaum geeigneter ist als Normal-Papier. Die Messreihe lässt sich also durch beide Verteilung beschreiben. Anders wäre das zum Beispiel für meteorologische Daten wie z.B. Windgeschwindigkeiten. Hier ist natürlich ein Gumbel-Papier weit geeigneter als ein Normal-Papier.

Im übrigen zeigt sich hier auch die Notwendigkeit, bei der späteren praktischen Anwendung Konventionen zu treffen und dann auch sorgfältig zu beachten (z.B. Log-Normal-Verteilung für Festigkeiten). Sonst kann man Ergebnisse nicht mehr aussagekräftig vergleichen.

Liegen der Verteilungstyp und die Gerade fest, lassen sich die Parameter der jeweiligen Verteilung aus zwei Stützpunkten wie folgt ermitteln:

- *Normalverteilung:* man liest die Werte x_0 und x_1 ab, welche die gewählte Gerade bei $F_X(x_0) = 0.5$ und $F_X(x_1) = 0.841$ auf dem Normal-Papier markiert. Aus diesen Werten ergeben sich der Mittelwert μ und die Standardabweichung σ zu:

$$\mu = x_0$$
$$\sigma = (x_1 - x_0) \qquad (3.26)$$

- *Log-Normalverteilung:* man liest die Werte x_0 und x_1 ab, welche die gewählte Gerade bei $F_X(x_0) = 0.5$ und $F_X(x_1) = 0.841$ auf dem Log-Normal-Papier markiert. Aus diesen Werten ergeben sich die Parameter λ und ζ, aus denen sich der Mittelwert μ und die Standardabweichung σ berechnen lassen:

$$\lambda = \ln(x_0) \qquad \mu = e^{(\lambda + \zeta^2/2)}$$
$$\zeta = \ln(x_1/x_0) \qquad \sigma = \mu \cdot (e^{\zeta^2} - 1)^{1/2} \qquad (3.27)$$

- *Gumbel-Verteilung:* man liest die Werte x_0 und x_3 ab, welche die gewählte Gerade bei $F_X(x_0) = 0.368$ und $F_X(x_3) = 0.951$ auf dem Gumbel-Papier markiert. Aus diesen Werten ergeben sich die Parameter u und α:

$$u = x_0 \qquad \mu = u + 0.577/\alpha$$
$$\alpha = 3/(x_3 - x_0) \qquad \sigma = 1.283/\alpha \qquad (3.28)$$

  Ein Beispiel folgt im nächsten Abschnitt.

- *Weibull-Verteilung:* man liest die Werte x_0 und x_3 ab, welche die gewählte Gerade bei $F_X(x_0) = 0.368$ und $F_X(x_3) = 0.951$ auf dem Weibull-Papier markiert. Aus diesen Werten ergeben sich die Parameter u und k.

$$u = x_0$$
$$k = -3/[\ln(x_3 - \varepsilon) - \ln(u - \varepsilon)] \qquad (3.29)$$

  Daraus lassen sich μ und σ gemäss Anhang 10.1 ermitteln. Der dritte Parameter der Weibull-Verteilung, die untere Grenze ε, kann man als positive Werte frei wählen.

Damit sind die wichtigsten Verteilungen für die Anwendung erschlossen.

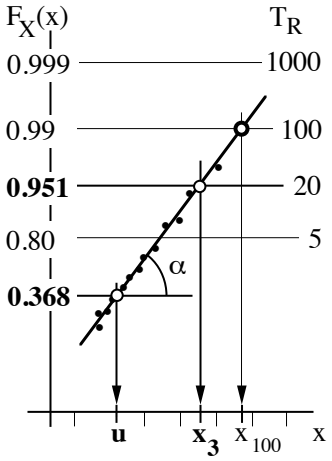
© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

3.44 Extrapolationen

Im Zuge der Analyse einer Datenmenge oder eines Histogrammes ist es u.U. erwünscht und auch sinnvoll, auf Daten zu schliessen, die ausserhalb des beobachteten Bereiches liegen. Insbesondere sind extreme Werte mit kleinen Auftretenswahrscheinlichkeiten von Interesse. Typisch ist dieses Vorgehen z.B. in der Hydrologie und der Meteorologie, wo in Ermangelung genügend langer Beobachtungsreihen durch Extrapolation z.B. auf 100- oder 1000-jährige Extremereignisse geschlossen wird. Man spricht von der Wiederkehr-Periode T_R ("Jahrhunderthochwasser" oder "Jahrtausendereignis" etc.). Die grundsätzliche Beziehung für die Wiederkehr-Periode T_R lautet:

$$T_R = \frac{\Delta t}{1 - F_X(x)} \tag{3.30}$$

Das Zeitintervall Δt ist problemspezifisch zu wählen (siehe Abschnitt 3.23). T_R kann graphisch oder analytisch ermittelt werden.



Figur 3/16

Wahrscheinlichkeitspapiere eignen sich vorzüglich für solche Extrapolationen. Ist das "richtige" Papier einmal gefunden, kann im Prinzip nach rechts oder links extrapoliert werden. An der gewählten Geraden kann direkt auch die Wiederkehrperiode abgelesen werden, die gemäss Formel (3.30) auf dem Wahrscheinlichkeitspapier angegeben ist oder einfach hineingeschrieben werden kann. Figur 3/16 zeigt die entsprechende Situation für eine Gumbel-Verteilung.

Die Genauigkeit der extrapolierten Werte bedarf natürlich einer kritischen Betrachtung. Extrapolationen in Zeitbereiche hinein, die weiter entfernt sind als etwa das Zehnfache der sie stützenden Beobachtungsreihe, sind bereits äusserst fraglich.

Die Gumbel-Verteilung gestattet im übrigen auch eine analytische Extrapolation.

- Die Parameter μ und σ werden mit den aus der Messreihe ermittelten Werten m_X und s_X abgeschätzt.
- Die für die Gumbel-Verteilung charakteristischen Parameter α und u werden nach Formel (3.28) berechnet.
- Dann wird der Wert der Verteilungsfunktion direkt beim interessierenden Wert von x ermittelt:

$$F_X(x) = e^{-\,e^{-\,\alpha(x-u)}} \tag{3.31}$$

- Der Wert $F_X(x)$, in die Formel (3.30) eingesetzt, ergibt direkt die Wiederkehrperiode.

Ein Zahlenbeispiel soll dies erläutern: Als Mittelwert der Datenreihe der jährlichen Extremwerte der Wasserführung eines Flusses seien 100 m^3/s gegeben, als Standardabweichung 10 m^3/s. Aus diesen Parametern lassen sich mit Hilfe der Formeln des Anhangs 10.1 die Werte $\alpha = 0.12826$ und $u = 95.45$ ermitteln. Es ergibt sich die folgende Wertetabelle:

x [m^3/s]	100	120	130	140	150
$F_X(x) = q$	0.570	0.958	0.988	0.997	0.9991
T_R Jahre	2.3	23.7	84.0	300	1086

Das hundertjährige Hochwasser liegt demnach knapp über 130, das tausendjährige bei 150 m^3/s.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Da die Umkehrfunktion der Gumbel-Verteilung mathematisch gegeben ist, kann damit x_{100} oder x_{1000} auch direkt berechnet werden. Das sei nachfolgend kurz gezeigt:

$$F^{-1}(q) = u - \frac{1}{\alpha} \cdot (\ln(-\ln q)) \qquad 0 \le q \le 1$$

$$x_{100} = F^{-1}(0.99) = 131 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$x_{1000} = F^{-1}(0.999) = 149 \text{ m}^3/\text{s}$$

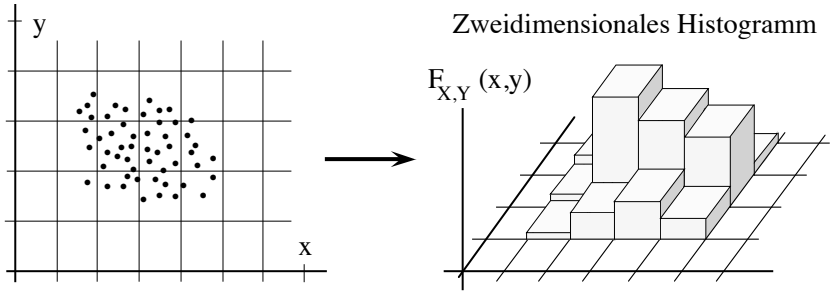
Beim Rechnen müssen die Werte genau eingetippt werden, da die (doppelte) Exponentialfunktion sehr empfindlich reagiert. Die hier verwendete Genauigkeit der Zahlen soll die Überprüfung erleichtern, ist jedoch in praktischer Hinsicht weit übertrieben.

3.5 Beobachtungen in Paaren und zweidimensionale Verteilungen

3.51 Problemstellung

Oft fallen Beobachtungen in Paaren an, beispielsweise gleichzeitig sowohl die Luftfeuchtigkeit X als auch die Lufttemperatur Y. Es stellt sich dann häufig die Frage, ob zwischen den beiden Merkmalen X und Y eine Abhängigkeit besteht und, wenn ja, in welchem Masse.

Zur Beantwortung dieser Frage ist es zweckmässig, jedes der erhobenen Wertepaare (x_i; y_i) als Punkt in das entsprechende Koordinatensystem einzutragen. Figur 3/17 zeigt ein solches Diagramm und eine isometrische Darstellung des zweidimensionalen Histogramms.



Figur 3/17

Schon dieses Bild gibt eine erste, in der Regel recht unbestechliche Antwort auf die Frage allfälliger Abhängigkeiten und zeigt unter Umständen bereits den Weg auf, auf dem man sich die bestehende Abhängigkeit zur Vereinfachung gewisser Berechnungen nutzbar machen kann.

Als Masszahlen sind zunächst die jeweils gesondert berechneten Mittelwerte m_X und m_Y sowie die Standardabweichungen s_X und s_Y zu ermitteln. Dazu sind die früher angegebenen Regeln weiterhin gültig.

Als Masszahl für die Abhängigkeit der beiden Merkmale wird die *Kovarianz* Cov(X,Y), auch mit $s_{X,Y}$ abgekürzt, definiert:

$$\text{Cov}(X,Y) \equiv s_{X,Y} = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - m_X) \cdot (y_i - m_Y) \qquad (3.32)$$

Zu beachten ist, dass $s_{X,Y}$ *nicht* die gleiche Dimension hat wie s_X und s_Y. Während s_X und s_Y in der Masszahl des Merkmals gemessen werden und

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

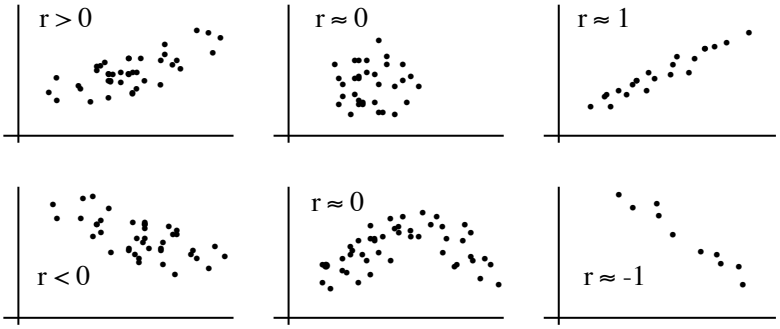
immer positiv sein müssen, kann die im Quadrat der Masszahl erscheinende Kovarianz $s_{X,Y}$ positive und negative Werte annehmen.

3.52 Korrelation

Der dimensionslose Korrelationskoeffizient $r_{X,Y}$ (oder einfach r) errechnet sich wie folgt:

$$r_{X,Y} \equiv r = \frac{s_{X,Y}}{s_X \cdot s_Y} \qquad -1 \le r \le +1 \qquad (3.33)$$

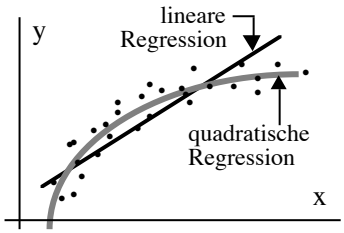
Ist r = 1, sind die beiden Merkmale vollständig korreliert. X lässt sich demnach vollständig durch Y beschreiben (und umgekehrt). Mit r = –1 ist die Steigung negativ. Man spricht von vollständig negativer Korrelation. Ergibt sich r ≈ 0, sind die Merkmale – zumindest in dieser Betrachtungsweise – unkorreliert, also unabhängig voneinander. Zwischen den beiden Extremen existiert ein Bereich, den man "teilweise korreliert" nennt.



Figur 3/18

Figur 3/18 macht allerdings – unten Mitte – darauf aufmerksam, dass der Korrelationskoeffizient nur lineare Korrelationen erkennt. Es könnten aber durchaus Korrelationen höheren Grades vorhanden sein, die nur das Auge (oder komplexere Masszahlen) entdecken.

3.53 Regression



Figur 3/19

Wenn eine (lineare) Korrelation zwischen zwei Merkmalen existiert, ist man oft daran interessiert, die eine Variable durch die andere auszudrücken: Y = h (X) ist die *lineare Regression* (Figur 3/19) nach dem Prinzip des Minimums der Quadrate der Abweichungen. In die meisten Taschenrechner ist diese Funktion fest eingebaut. Die Steigung a und der Achsenabschnitt b der Regressions-Geraden können so schnell berechnet werden. Auch Algorithmen, die Regressionen höherer Ordnung (Polynome) oder exponentielle Regressionen berechnen, liegen vor.

Mit einigem Geschick kann man aber auch von Auge eine gute Näherungsgerade in einen Punkthaufen legen und wird deshalb oft auf das mühsame Eintippen in den Rechner verzichten.

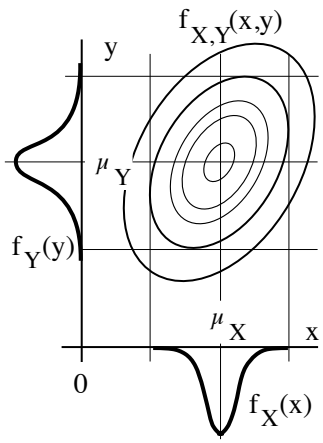
3.54 Zweidimensionale kontinuierliche Verteilungen

Wie beim Übergang von Histogrammen zu kontinuierlichen Verteilungen bei einer Variablen, können auch hier zweidimensionale Verteilungen definiert werden. Die beiden Variablen werden isoliert betrachtet und die Parameter μ_X, μ_Y, σ_X und σ_Y nach den Regeln von Kapitel 3.4 berechnet. $f_X(x)$

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

und $f_Y(y)$ heissen *Randverteilungen:* man kann sie am Rand als Verteilungsdichten darstellen.

Der Graph der gemeinsamen Dichte $f_{X,Y}(x,y)$ zeigt, analog zum zweidimensionalen Histogramm, einen mittels Höhenkurven dargestellten "Hügel". Je nach Form und Ausrichtung dieser Höhenkurven lassen sich Korrelationen erkennen. Die Figur 3/20 zeigt mit ihren schräg verlaufenden Konturen der Höhenkurven, dass die Variablen in etwa mittlerem Mass positiv korreliert sind.



Figur 3/20

Kovarianz $\sigma_{X,Y}$ und Korrelationskoeffizient $\rho_{X,Y} = \rho$ werden wie früher berechnet:

$$\sigma_{X,Y} = \iint_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_X) \cdot (y - \mu_Y) \cdot f_{X,Y}(x,y) \cdot dx \cdot dy \tag{3.34}$$

$$\rho_{X,Y} \equiv \rho = \frac{\sigma_{X,Y}}{\sigma_X \cdot \sigma_Y} \qquad -1 \le \rho_{X,Y} \le +1 \tag{3.35}$$

Für unkorrelierte Variablen gilt im übrigen

$$f_{X,Y}(x, y) = f_X(x) \cdot f_Y(y) \tag{3.36}$$

3.6 Funktionen von Zufallsvariablen

Das Dargestellte kann auf eine beliebige Anzahl von Zufallsvariablen ausgedehnt werden. Die graphische Darstellung ist im Hyperraum natürlich unmöglich, die Berechnung hingegen schon. Im folgenden werden die wichtigsten Formeln angegeben (Berchtold 1991). Wir beschränken uns dabei hier auf *unabhängige* Variable.

3.61 Rechenregeln

Für die Summe zweier Variablen X_i gilt:

$$Z = a + b \cdot X + c \cdot Y \tag{3.37}$$

$$\mu_Z = a + b \cdot \mu_X + c \cdot \mu_Y \tag{3.38}$$

$$\sigma_Z^2 = b^2 \cdot \sigma_X^2 + c^2 \cdot \sigma_Y^2 \tag{3.39}$$

Für das Produkt zweier Variablen gilt:

$$Z = a \cdot X \cdot Y \tag{3.40}$$

$$\mu_Z = a \cdot \mu_X \cdot \mu_Y \tag{3.41}$$

$$\sigma_Z^2 = a^2 \cdot (\mu_X^2 \cdot \sigma_Y^2 + \mu_Y^2 \cdot \sigma_X^2 + \sigma_X^2 \cdot \sigma_Y^2) \tag{3.42}$$

Hier existiert auch eine geschlossene Formel für die Berechnung des Variationskoeffizienten v_Z:

$$v_Z^2 = v_X^2 + v_Y^2 + v_X^2 \cdot v_Y^2 \tag{3.43}$$

Für beliebige Funktionen vieler Variablen X_i der Form $Y = G(X_1, X_2 \ldots X_n)$ lassen sich keine geschlossenen Formeln angeben. In der Regel genügen jedoch die im Bereich eines gegebenen Punktes x_i^* im Hyperraum gültigen Näherungswerte. Für die Berechnung dieser Werte wird die Funktion an dieser Stelle in eine Taylor-Reihe entwickelt, wobei man sich auf das erste Glied beschränkt und die gemischten Glieder vernachlässigt. Es gelten –

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

hier für unkorrelierte Variablen angeschrieben – die folgenden einfachen Formeln für Mittelwert und Varianz:

$$\mu_Y \approx G(x_i^*) + \sum_{i=1}^{n} (\mu_{X_i} - x_i^*) \cdot \left.\frac{\partial G}{\partial X_i}\right|_* \tag{3.44}$$

$$\sigma_Y^2 \approx \sum_{i=1}^{n} \left(\left.\frac{\partial G}{\partial X_i}\right|_*\right)^2 \cdot (\sigma_{X_i})^2 \tag{3.45}$$

Der hinter der partiellen Ableitung der Funktion nach der Variablen X_i beigefügte Vermerk besagt, dass der Wert der Ableitung an der interessierenden Stelle x_i^* genommen werden soll. Das wird später der sog. Bemessungspunkt sein. Die Werte x_i^* können natürlich auch an den Mittelwerten μ_{X_i} der einzelnen Variablen genommen werden. Man redet dann von der Taylor-Entwicklung am Mittelwert.

Ein Beispiel soll zeigen, wie einfach das ist. Gegeben sei die Funktion:

$$Y = a + b \cdot X_1 + c \cdot X_2 \cdot X_3^2$$

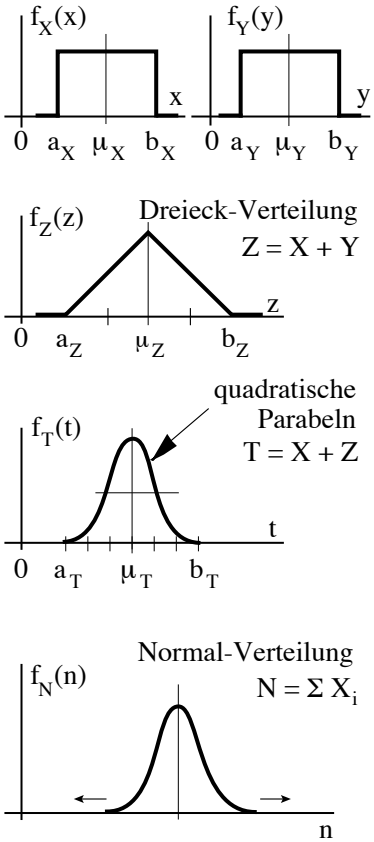
Die nötigen partiellen Ableitungen sind:

$$\frac{\partial Y}{\partial X_1} = b \qquad \frac{\partial Y}{\partial X_2} = c \cdot X_3^2 \qquad \frac{\partial Y}{\partial X_3} = 2\,c \cdot X_2 \cdot X_3$$

Daraus ergeben sich dann für unkorrelierte Variablen am Mittelwert, also im Punkt mit den Koordinaten $x_i^* = \mu_{X_i}$:

$$\mu_Y = a + b \cdot \mu_{X_1} + c \cdot \mu_{X_2} \cdot \mu_{X_3}^2$$

$$\sigma_Y^2 \approx b^2 \cdot \sigma_{X_1}^2 + (c \cdot x_3^{*2})^2 \cdot \sigma_{X_2}^2 + (2c \cdot x_2^* \cdot x_3^*)^2 \cdot \sigma_{X_3}^2$$



Figur 3/21

3.62 Der Zentrale Grenzwertsatz

Einfache Überlegungen zeigen, dass Summen symmetrischer Verteilungen symmetrisch bleiben, während Produkte symmetrischer Verteilungen eine schiefe Form annehmen. Der Zentrale Grenzwertsatz gibt einen sehr nützlichen Hinweis auf die Verteilungsform von Summen und Produkten von unabhängigen Variablen. Unabhängig vom Verteilungstyp der Variablen X_i gilt unter der Voraussetzung, dass keine der Variablen dominiert:

- Die Verteilung der Summe von n beliebigen Zufallsvariablen X_i nähert sich, unabhängig von den Verteilungstypen der Variablen, mit wachsendem n der Normalverteilung.
- Die Verteilung des Produkts von n beliebigen Zufallsvariablen X_i nähert sich, unabhängig von den Verteilungstypen der Variablen, mit wachsendem n der Log-Normalverteilung.

Es ist also nicht verwunderlich, dass in der Natur vieles als Normal- bzw. Log-Normalverteilung in Erscheinung tritt, denn viele Sachverhalte ergeben sich ganz natürlich aus der Summe oder aus dem Produkt der ihnen zugrundeliegenden Einflussgrössen.

Der erste Satz lässt sich wie folgt veranschaulichen: Zwei Rechtecksverteilungen mit gleicher Breite (Figur 3/21) ergeben summiert eine Dreiecksverteilung. Wird nun eine weitere, gleichartige Rechtecksverteilung addiert, entsteht bereits eine Glockenform, deren Verlauf aus Parabelstücken aufgebaut ist. Die Form dieser begrenzten Verteilung ähnelt schon sehr der Normalverteilung.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Mit geeigneter Software (z.B. VaP, siehe Anhang 10.5) lässt sich die Stimmigkeit der beiden Sätze unter Anwendung der Monte-Carlo-Methode anschaulich zeigen.

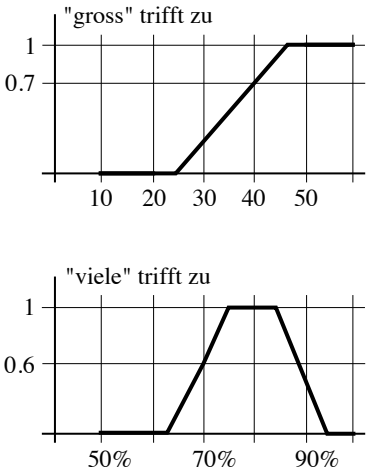
3.63 Weitere Parameter von Funktionen von Variablen

Die zentralen Momente einer Funktion von Zufallsvariablen sind, wie für die Variablen selbst, bekanntlich Mittelwert, Standardabweichung und weitere, sog. höhere Momente, wie Schiefe und Exzess. Letztere sind nicht so einfach zugänglich, können aber durch eine Integration der Funktionswerte, multipliziert mit der gemeinsamen Dichtefunktion der Variablen berechnet werden.

In der Literatur sind verschiedene Ansätze für die näherungsweise Ermittlung dieser Momente angegeben. Ein recht genaues numerisches Verfahren ist die Point-Estimate Method (siehe z.B. Evans, 1972; Zhou/Nowak 1988; Li, 1992). Es werden dabei für bestimmte Realisationen der Variablen Funktionswerte berechnet und gewichtet aufsummiert. Das Ergebnis muss, um die zentralen Momente zu erhalten, zum Mittelwert hin verschoben werden. Die detaillierte Darstellung dieser Integrationsverfahren und eine Interpretation der Ergebnisse sprengt den Rahmen dieses Buches.

3.7 Fuzzy Information

Das englische Wort "*fuzzy*" bedeutet soviel wie diffus, wenig aussagekräftig, unscharf. *Fuzzy information* sind z.B. verbale, qualifizierende Aussagen über einen Sachverhalt. Für einen Ingenieur ist das an sich alltäglich, so alltäglich, dass er oft gar nicht mehr merkt, dass er *fuzzy* redet. Dass das für einen, der alles ganz genau haben will, eher wertlos, ja sogar unerträglich sein kann, lässt sich verstehen. Zwei ganz einfache Beispiele sollen den Grundgedanken zeigen:



Figur 3/22

Jemand macht die Aussage: "Diese Windgeschwindigkeit ist sehr gross". Diese verbale qualifizierende Aussage gibt eine Meinung wieder. Derjenige, der die Aussage macht, ist sich bewusst, dass das keine sehr klare Aussage ist. Alle, die die Aussage hören, haben zwar sofort eine persönliche Vorstellung davon, wie gross "sehr gross" etwa sein könnte. In der Diskussion wird man aber Abweichungen in den Einschätzungen finden: Einige finden vielleicht 30 m/s schon als "sehr gross", andere werden z.B. erst 50 m/s als "sehr gross" und 30 m/s nur als "gross" bezeichnen.

In diesem Sinne sind "gross" und "sehr gross" eben *fuzzy,* wie im übrigen eine ganze Reihe von qualifizierenden Ausdrücken, wie z.B. gut, schlecht, wenig, wichtig, geeignet, gefährlich, heiss, usw., die wir täglich, auch in technischen Zusammenhängen, in durchaus aussagekräftigem Sinne gebrauchen und mit denen wir uns offensichtlich auch als Ingenieure gut verständigen können.

Um beim Beispiel zu bleiben: Vielleicht kann man sich darauf einigen, "gross" mit der in Figur 3/22 oben markierten sog. Zugehörigkeitsfunktion (membership function) zu definieren. Es würde sich aus dieser Definition ergeben, dass eine Windgeschwindigkeit von z.B. 40 m/s zu 70% der Untermenge der "grossen" und damit offenbar zu 30% derjenigen der "sehr grossen" Windgeschwindigkeiten zugeordnet werden sollte.

Im gleichen Sinne kann man dann z.B. "viele" als qualitative Grösse in der Reihe zwischen "keine" und "alle" durch die in Figur 3/22 gezeigte Zugehörigkeitsfunktion definieren. Damit wäre 70% zu 0.6 *viel*, zu 0.4 dann of-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

fenbar weniger als *viel*. *Viel* wäre dann eindeutig alles zwischen 75% und 85%, während 90% schon zu etwa 0.6 *fast alle* wäre.

Was soeben für *viele* ausgeführt wurde, kann natürlich beispielsweise auch für die möglichen Konsequenzen eines Ereignisses gelten. Solche Konsequenzen können im hier diskutierten Sinn z.B. durch die Reihe "sehr klein–klein–mittel–gross–sehr gross" charakterisiert werden. Möglicherweise wird man sich einer logarithmischen Merkmalsachse bedienen müssen, um den möglichen Umfang der Konsequenzen zu erfassen.

Wie man erkennt, muss man sich zuerst auf eine geeignete Qualitätsskala einigen. Dann sind die Zugehörigkeitsfunktionen zu definieren. Hat man das aber einmal getan, kann man mit dieser diffusen Abgrenzung von Teilmengen *Fuzzy Set Theory* betreiben (Zadeh, 1965; Blockley 1975; Spiess, 1989; Zimmermann, 1987, 1991). Eine leicht lesbare und instruktive Einführung mit verschiedenen Beiträgen bringt *Spektrum der Wissenschaft, 3/1993*.

Die *Fuzzy Set Theory* hat manche Anhänger gefunden. Interessierte seien auf die recht umfangreiche Literatur verwiesen. Den Verfassern scheint es, dass man auch ohne diese formale Methodik auskommen kann.

Literatur

Ang, A.H.S. and Tang, W.H.: "Probability Concepts in Engineering Planning and Design; Volume I – Basic Principles"; John Wiley & Sons, New York, 1975

Ang, A.H.S. and Tang, W.H.: "Probability Concepts in Engineering Planning and Design; Volume II – Decision, Risk, and Reliability"; John Wiley & Sons, New York, 1984

Benjamin, J.R. and Cornell, A.C.: "Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers"; MacGraw-Hill Book Company, New York, 1970

Berchtold, W.: "Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik"; Vorlesungsskript ETH Zürich, 1991

Bernardo, J. and Smith, A.F.M.: "Bayesian Theory", J. Wiley & Sons, New York, 1994

Blockley, D.I.: "Predicting the Likelihood of Structural Accidents"; Proc. of the Institution of Civil Engineers, Part 2, Vol. 59, London, 1975

Bühlmann, H.: "Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik"; AMIV-Verlag, ETH Zürich, 1982

Castillo, E.: "Extreme Value Theory in Engineering"; Academic Press Inc., 1988

Chung, K.L.: "Elementare Wahrscheinlichkeitstheorie und stochastische Prozesse"; Springer-Verlag, Berlin, 1978

Dracos, T.: "Hydrologie"; Springer-Verlag, 1980

Evans, D.H.: "An Application of Numerical Integration Techniques to Statistical Tolerancing, III - General Distributions", Technometrics 14, 23 - 35, 1972

Gottinger, H.W.: "Subjektive Wahrscheinlichkeiten"; Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1974

Hale, R.L.: "Mystat: Statistical Applications", Macintosh Edition; Course Technology Inc., 1992

Li, K.S.: "Point-Estimate Method for Calculating Statistical Moments", Journal of Engineering Mechanics 118, 1506 - 1511, 1992

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Lindley, D.V.: "Introduction to Probability and Statistics from a Bayesian Viewpoint"; Part 1: Probability, Part 2: Inference, Cambridge University Press, 1965

Miller, I. et al.: "Probability and Statistics for Engineers"; Prentice-Hall International, 1990

O'Hagan, A.: "Bayesian Inference", Kendall's Advanced Theory of Statistics, Volume 2B, J. Wiley & Sons, New York, 1994

Plate, E.J.: "Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitstheorie für Bauingenieure" Ernst & Sohn, Berlin 1993

Spaethe, G.: "Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen"; Springer-Verlag, 1992

Spektrum der Wissenschaft, 3, 1993, Diverse Aufsätze zur Fuzzy Logic

Stahel, W.: Statistische Datenanalyse"; Vieweg Lehrbuch, 1995

Turkstra, C.J.: "Theory of Structural Design Decisions"; Study No. 2, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 1972

Zadeh, L.A.: "Fuzzy Sets", Information and Control, Vol. 8, 1965

Zhou, J. and Nowak, A.S.: "Integration Formulas to Evaluate Functions of Random Variables", Structural Safety 5, 1988

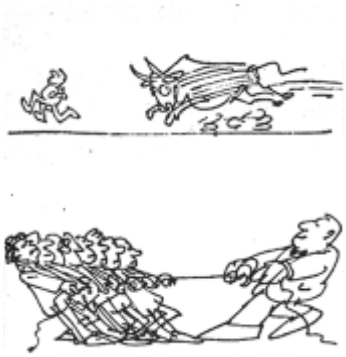
Zimmermann, H.-J.: "Fuzzy Set Theory – and Its Applications", Kluwer, Dordrecht, 1991

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

4. Basisvariablen und Modelle

4.1 Das Bemessungsproblem

Eine ganze Reihe von Problemen des Bauingenieurwesens kann durch die Gegenüberstellung zweier Grössen beschrieben werden: die eine ist eine irgendwie geartete *Beanspruchung* (engl. stress: man spricht von S-Variablen), die andere ist eine entsprechende Kapazität oder ein *Widerstand* (engl. resistance: man spricht deshalb von R-Variablen). Die folgenden Beispiele zeigen, was hiermit gemeint ist:



R	S
Fassungsvermögen eines Flussbettes	Abflussmenge des Flusses
Schluckvermögen eines Abwasserrohres	Belastung durch Haushalte/ Industrie/Regen …
Biegebruchmoment eines Balkens	aus Einwirkungen im Balken vorhandenes Biegemoment
als zulässig erachtete Durchbiegung des Balkens	aus Einwirkungen vorhandene Durchbiegung des Balkens
Kohäsion und Scherfestigkeit eines Bodens	Beanspruchung des Bodens aus äusseren Lasten
Kapazität einer Verkehrskreuzung	aufkommende Verkehrsmenge
Leistung einer Stromversorgung	Ansprüche der am Netz angeschlossenen Verbraucher

In der Regel wird gefordert, dass die linke Seite, also die R-Variable, grösser, mindestens jedoch gleich gross ist wie die rechte Seite, also die S-Variable, damit kein Versagen des Systems eintritt. Im Sinne der Beispiele: Der Fluss tritt *nicht* über die Ufer, der Balken bricht *nicht*, ein Hang beginnt *nicht* zu rutschen, der Verkehr resp. die Stromversorgung bricht *nicht* zusammen.

Die Forderung kann wie folgt formuliert werden:

$$R \geq S \tag{4.1}$$

oder umgeformt:

$$R - S \geq 0 \tag{4.2}$$

Versagen tritt demnach ein, wenn gilt:

$$R - S < 0 \tag{4.3}$$

Wir beziehen uns im folgenden auf Probleme der Bemessung oder Überprüfung von Tragwerken. Der Formalismus und die Schlussfolgerungen gelten jedoch auch für andere technische Fragestellungen.

Die heutige Tragwerksbemessung geht nach der Einführung der neuen Normen des SIA (SIA 160, 1989; SIA 161, 1990; SIA 162, 1989) wie folgt vor: Ein rechnerischer Wert des Widerstandes R eines Tragwerkteiles wird durch einen Widerstandsbeiwert γ_R dividiert. Dieser Beiwert berücksichtigt Vereinfachungen und Ungenauigkeiten auf der Widerstandsseite und die Variabilität von Werkstoffeigenschaften.

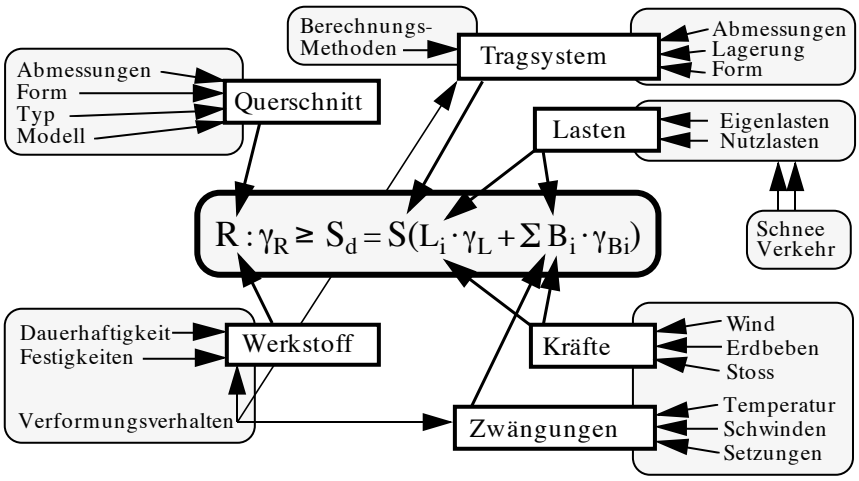
© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Auf der Belastungsseite S hingegen werden bekanntlich Leiteinwirkungen und Begleiteinwirkungen berücksichtigt, die mit charakteristischen Lastfaktoren γ_L und γ_B zu multiplizieren sind. Mit diesen wird dann die Beanspruchungsgrösse S_d ermittelt.

Das führt zu

$$\frac{R}{\gamma_R} \geq S_d = S(L \cdot \gamma_L + \Sigma B_i \cdot \gamma_{B_i}) \tag{4.4}$$

Figur 4/1 zeigt diese Formel, zusammen mit den die einzelnen Terme beeinflussenden Grössen in mehr oder weniger symbolischer Form.



Figur 4/1

Typisch ist, dass die zu behandelnden Sachverhalte in Modellen abgebildet werden, die einer mathematisch-numerischen Behandlung zugänglich sind. Fast immer setzt man dann für jede "Variable" einen einzigen Wert ein ("Variable" in Anführungszeichen deshalb, weil sie, *so* behandelt, eigentlich nicht variabel ist). Das Resultat erscheint folgerichtig in einer einzigen Zahl. Das ist auch bei diesem Bemessungsproblem in der Regel die Vorgehensweise des Ingenieurs. Seine Denkweise, und seine Arbeit, sind deterministisch.

Gelegentlich setzt ein gewissenhafter Ingenieur verschiedene Zahlenwerte ein, um die Empfindlichkeit des Ergebnisses zu testen. Das ist ein Schritt in die richtige Richtung. Nur ist das oft mühsam und wenig übersichtlich.

Hier sollen nun die das Bemessungsproblem beeinflussenden Grössen im Sinne der Zuverlässigkeitstheorie als Variable eingeführt, d.h. mit ihren Verteilungsformen und Parametern erfasst werden. Sämtliche Last- und Widerstandsfaktoren werden dann unnötig und fallen weg. Deren Funktion wird jedoch teilweise durch sog. Modellvariablen übernommen.

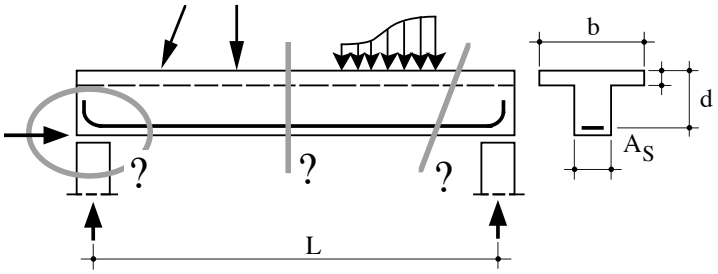
4.2 Zustand, Zustandskomponenten, Basisvariablen

4.21 Beurteilungsbasis

Als Beispiel diene das Tragsystem von Figur 4/2. In der Regel ist ein solches System auf seine Tragsicherheit und seine Gebrauchstauglichkeit zu bemessen bzw. zu untersuchen. Der Nachweis der *Tragsicherheit* bezieht sich meist auf die Biegebeanspruchung im massgebenden Schnitt und die Querkraft-Beanspruchung beim Auflager. Auch ist die Auflagerzone zu untersuchen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

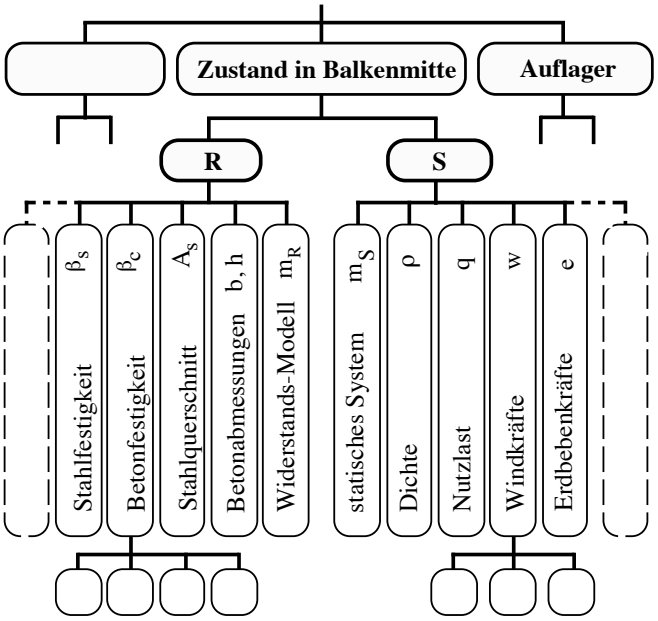
Als gebrauchstauglich gilt der Balken, wenn er sich unter normaler Belastung nicht allzu stark verformt, nicht unangenehm schwingt und – beim Stahlbeton beispielsweise – die Rissbreiten in akzeptablen Grenzen bleiben.



Figur 4/2

Der Zustand in der Balkenmitte beispielsweise lässt sich auf der Basis eines Vergleichs von R und S beurteilen. Selbstverständlich sind R und S von verschiedenen Grössen abhängig. Figur 4/3 gibt im Sinne von Beispielen einige dieser Grössen. Man kann den Zustand anhand der verfeinerten Basis natürlich besser und präziser beurteilen. Statt zwei Variablen sind dann aber bereits etwa ein Dutzend in die Berechnungen hineinzunehmen.

Freilich sind auch diese Grössen wieder von anderen abhängig. Die Betonfestigkeit β_c z.B. könnte weiter unterteilt werden: Sie ist eine Funktion der Qualitäten von Kies und Zement, des Wasser-Zement-Faktors, aber auch der Arbeitsqualität (Verdichten etc.), der Aussentemperatur beim Erhärtungsvorgang etc. Eine Untersuchung auf dieser Beurteilungsbasis enthält dann sehr viele Variable und die Berechnung würde ausserordentlich und wahrscheinlich unnötig komplex.



Figur 4/3

Irgendwo wird man diese Verästelung abbrechen. Ein Vergleich bei R und S ist in manchen Fällen vielleicht allzu grob. Eine feine Aufteilung in viele Basisvariablen ist "genauer", aber auch komplizierter.

Der Übersichtlichkeit halber soll die Beurteilungsbasis so gewählt werden, dass nicht zu viele Variablen erscheinen. Diese Variablen der schliesslich gewählten Beurteilungsbasis werden *Basisvariablen* genannt. Sie erscheinen bereits in Figur 4/1 an der Peripherie.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

4.22 Typen von Basisvariablen

Es sind drei Typen von Basisvariablen zu unterscheiden:

- *Umweltvariablen:* Wind, Schnee, Eis, Erdbeben, Temperatur etc. sind stationäre stochastische Prozesse in der Zeit. Sie sind vom Menschen nicht oder kaum kontrollierbar. Auch durch menschliche Tätigkeiten induzierte Gefahren wie Feuer und Explosionen gehören in diese Gruppe. Das Festlegen von Bemessungswerten heisst hier letztlich, gewisse Risiken zu akzeptieren.
- *Bauwerksvariablen:* Bauwerksabmessungen, Baustoffeigenschaften etc. sind geplant, also gezielt erzeugbar. Sie lassen sich überprüfen und können notfalls durch Ersatz verbessert werden. Fehlerhafte Bauteile lassen sich ausscheiden. In der Regel sind die Bauwerksvariablen nicht oder nur wenig variabel in der Zeit, sondern, abgesehen von Korrosionsprozessen, weitgehend feste Grössen. Die Voraussage dieser mehr oder weniger festen Grössen ist allerdings schwierig. Das ist der Grund, weswegen wir sie hier als variabel, d.h. als *unscharfe* Grössen einführen.
- *Nutzungsvariablen:* Nutzlasten, Verkehrslasten, Kranlasten etc. sind begrenzbar durch Überwachung. Sie sind in der Regel stochastische Prozesse in der Zeit. Grenzwerte der Nutzungsvariablen sind gelegentlich vereinbarte Grössen. Dass wir sie auch dann als variable Grössen einführen, liegt daran, dass in der praktischen Einhaltung solcher Vereinbarungen Unsicherheiten stecken. Nutzungs*änderungen* schliesslich sind sorgfältig zu beachten und erfordern gegebenenfalls eine neue Untersuchung.

Die Variablen lassen sich in R-Variablen und S-Variablen unterteilen:

- *R-Variablen* treten normalerweise auf der Widerstandsseite auf: Abmessungen, Festigkeiten, Speichervolumen, Reibungskoeffizienten, Kohäsion. In der Regel sind Abweichungen vom Mittelwert nach *unten* bei R-Variablen gefährlich.
- *S-Variablen* trifft man in der Regel auf der Belastungsseite: Lasten, Kräfte, Zuflüsse, Niederschläge. In der Regel sind Abweichungen vom Mittelwert nach *oben* bei S-Variablen gefährlich.

Eine strikte Trennung nach R- und S-Variablen ist nicht immer möglich. Bei einer Stützmauer beispielsweise kommen die Eigenschaften des Erdreichs sowohl auf der Einwirkungsseite als auch auf der Widerstandsseite vor. Eine Trennung ist im Rahmen der Zuverlässigkeitstheorie jedoch auch nicht nötig.

4.23 Bemessungsvariablen

Als Bemessungsvariablen werden schliesslich jene Basisvariablen bezeichnet, die bei der Bemessung (oder der Überprüfung) von Tragwerken effektiv als Variablen mit mindestens zwei Parametern (z.B. μ, σ) eingeführt werden. Alle übrigen werden deterministisch, das heisst als feste Werte (Nenn- oder Nominalwert, planmässiger Wert, Mittelwert, ...) eingeführt, also mit der Standardabweichung $\sigma = 0$.

Bemessungsvariablen können statistisch voneinander abhängig sein. Je grösser z.B. die statische Höhe eines Betonträgers, desto grösser wird sein Biegewiderstand; der grösseren Eigenlast des Betons wegen bedeutet das aber auch ein grösseres Biegemoment. Die Biegewiderstände eines Stahlprofils in verschiedenen Schnitten werden sehr stark korreliert sein. Geringere Korrelation wird zwischen den Eigenschaften verschiedener Profile, noch kleinere zwischen Profilen verschiedener Hersteller bestehen. Auch weiss man, dass z.B. die Festigkeiten kleinerer Stahlquerschnitte wegen des

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

intensiveren Walzprozesses höher liegen als diejenigen grosser Profile. Das gilt auch für Betonstähle, wo kleinere Durchmesser eine grössere Streckgrenze aufweisen als grosse Durchmesser.

4.3 Widerstand R von Tragelementen

Die Abkürzung R bezeichnet den Widerstand von Tragelementen in einem bestimmten Schnitt eines Tragwerkes oder steht ganz allgemein für die Kapazität des betrachteten Systems (siehe Abschnitt 4.1).

4.31 Widerstandsmodell

Das Vorgehen soll am Beispiel des Tragwiderstandes R gezeigt werden. Das Modell für R hat in der Regel folgende typische Struktur:

$$R = M \cdot F \cdot A \tag{4.5}$$

Hierin sind:

M: Modellunschärfe
F: Baustoffeigenschaften (Festigkeit, E-Modul …)
A: Abmessungen und daraus abgeleitete Grössen I, W, Z.

Den Mittelwert μ_R und den Variationskoeffizienten v_R von R ermittelt man mit den bekannten Regeln für Produkte (Kap. 3.61):

$$\mu_R = \mu_M \cdot \mu_F \cdot \mu_A \tag{4.6}$$

$$v_R = \sqrt{v_M^2 + v_F^2 + v_A^2} \tag{4.7}$$

Wie bereits an anderer Stelle erwähnt, ist dieser Widerstand tendenziell log-normalverteilt, da er als Produkt von Variablen erscheint. Im übrigen sind negative Widerstände kaum denkbar.

Detaillierte Angaben zu R-Variablen finden sich in verschiedenen Publikationen des JCSS (siehe JCSS 1981, 1991) und speziell in (Casciati et al., 1989) und (Spaethe, 1992), wo die Ergebnisse ausführlicher Datensammlungen zusammengestellt sind. Für den Stahlbau hilft (Petersen, 1977) weiter, für Betonbauten (Mirza/MacGregor, 1979). Besonders aussagekräftig sind die für die Niederländischen Baunormen erarbeiteten probabilistischen Modelle und die Parameter der zugehörigen Bemessungsvariablen, siehe (Vrouwenvelder/Siemes, 1987).

4.32 Modellunschärfen

Da beim Aufstellen des Widerstandsmodells gewisse Einflüsse bewusst oder unbewusst vernachlässigt werden, sind Abweichungen zwischen Berechnungen und Versuchen zu erwarten. Die Modellvariable M lässt sich aus Versuchen ermitteln, indem die Versuchsergebnisse r_{Exp} durch die aus dem Modell ermittelten zugehörigen Rechenergebnisse r_{Mod} dividiert werden:

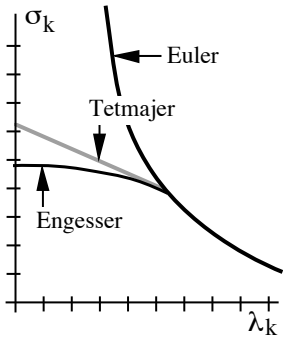
$$m = \frac{r_{Exp}}{r_{Mod}} \tag{4.8}$$

Aus vielen Versuchen gewinnt man ein Histogramm für M, daraus den Mittelwert m_M und die Standardabweichung s_M. Man wählt eine Verteilung, die das Histogramm gut approximiert und setzt in der Regel $m_M = \mu_M$ und $s_M = \sigma_M$.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Bei guten Modellen ergibt sich $\mu_M \approx 1$. Da man aber häufig konservative Modelle hat, ist oft $\mu_M > 1$. Der Wert von σ_M ist je nach Modell sehr verschieden. Bei guten Modellen (z.B. für den Biegewiderstand von Stahl- und Stahlbetonquerschnitten) sind für den Variationskoeffizienten wenige Prozente, bei schlechten Modellen (z.B. Schubwiderstand oder Durchstanzwiderstand im Stahlbetonbau) 10 bis 20 % durchaus zu erwarten.

Auch sind gelegentlich die Parameter von Modellvariablen über den Bemessungsbereich variabel. Wir betrachten z.B. die Knickspannungen eines Druckstabs und tragen diese über der Schlankheit des Stabs auf (siehe Figur 4/4). Im Bereich grosser Schlankheiten sind die zu erwartenden Abweichungen von der Euler'schen Knickkurve gering. Im Bereich kleiner Schlankheiten machen sich viele im Widerstandsmodell nicht erfasste Einflüsse (Eigenspannungen, Querschnittsform, ungewollte Exzentrizitäten, Imperfektionen) weit stärker bemerkbar. Die Modellunschärfe wird hier natürlich auch von der Wahl des Widerstandsmodells (Tetmajer, Engesser-Kármán, Engesser-Shanley, Europäische Knickkurven usw.) verstärkt beeinflusst.



Figur 4/4

Verbesserte Modelle haben in der Regel Modellvariablen mit kleinerer Standardabweichung und liegen mit ihrem Mittelwert näher bei 1.

4.33 Baustoffeigenschaften

Die Werte für Festigkeiten und andere Baustoffeigenschaften werden meist aus Zug- bzw. Druckversuchen gewonnen. Die Ergebnisse sind jedoch in der Regel nicht direkt verwendbar, da folgende Probleme bestehen:

- Übertragung der Resultate eines Laborversuchs auf die oft völlig verschiedenen Verhältnisse im Bauwerk.
- Die Streuungen der Baustoffeigenschaften im Bauwerk sind sicher grösser als diejenigen im Labor.
- Baustoffeigenschaften verändern sich unter Umständen mit der Zeit.

Der einfachste Ansatz zur Berücksichtigung dieser Einflüsse lautet:

$$F = G \cdot Ü \tag{4.9}$$

G wird als Grundvariable, Ü als Übertragungsvariable bezeichnet. Die Grundvariable G gibt wieder, was effektiv gemessen wird. In Labors wie z.B. der EMPA werden Histogramme für G sowie Parameter wie m_G und s_G ermittelt.

Die dimensionslose Übertragungsvariable Ü berücksichtigt den Quotienten aus der für den Widerstand eines Bauteils massgebenden Festigkeit und der gemessenen Grösse im Versuch. Bei Betonfestigkeiten kommen so z.B. der Unterschied zwischen Prismen- und Würfeldruckfestigkeit als auch der Quotient aus der Festigkeit am Bauwerk und derjenigen nach normgerechter Lagerung während 28 Tagen in die Übertragungsvariable hinein. Übertragungsvariablen haben in der Regel einen Mittelwert kleiner als 1 und einen Variationskoeffizienten von vielleicht 10% bis 15%.

Die Parameter von F betragen somit:

$$\mu_F = \mu_G \cdot \mu_Ü \text{ sowie} \tag{4.10}$$

$$v_F = \sqrt{v_G^2 + v_Ü^2} \tag{4.11}$$

Der Parameter μ_F darf *nicht* mit μ_G verwechselt werden. Beide entsprechen im übrigen nicht den in Normen vorgeschriebenen Rechenwerten f_{Nom}.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Diese enthalten in der Regel deterministische Korrekturen zur sicheren Seite hin.

4.34 Geometrische Grössen

Geometrische Grössen sind direkt messbar. Die Abmessungen werden durch Überwachen kontrolliert und mit entsprechenden Toleranzen verglichen. Der Mittelwert liegt meist in der Nähe des nominellen Wertes. Gelegentlich treten systematische Einflüsse auf. Zum Beispiel kann der Schalungsdruck beim Betonieren die Schalung verformen, so dass die tatsächlichen Abmessungen über den planmässigen Abmessungen liegen. Die Standardabweichungen σ_A liegen in der Grössenordnung der üblichen Abmessungstoleranzen und sind damit weitgehend unabhängig von den absoluten Abmessungen der Querschnitte. Sie fallen deshalb mit kleiner werdenden Dimensionen stärker ins Gewicht.

4.4 Beanspruchung S von Tragelementen

Die Abkürzung S bezeichnet die Beanspruchung in einem bestimmten Schnitt eines Tragwerkes oder steht ganz allgemein für die Beanspruchung des betrachteten Systems (siehe Abschnitt 4.1).

4.41 Kombination von Einwirkungen

Wir betrachten hier exemplarisch wieder die speziellen Verhältnisse bei der Bemessung von Tragwerken. In Figur 4/1 sind einige typische Einwirkungen zusammengestellt. Da sie Folgen verschiedenster Einflüsse sind, müssen sie für eine Berechnung auf eine einheitliche Masszahl gebracht werden, nämlich auf Spannungen im Tragwerk, auf Schnittkräfte oder auf Lasten. Folgende Begriffe müssen beispielsweise bei Windeinwirkungen unterschieden werden:

Einfluss	:	v_{wind} [m/s]
Einwirkung	:	w [kN/m^2]
Beanspruchung	:	M, V, N … aus Wind

Die Einwirkungen aus den wichtigsten Einflüssen sind in der Regel stochastische Prozesse in der Zeit (vergleiche Abschnitt 3.23). Typische Beispiele zeigt – über der Zeitachse aufgetragen – Figur 4/5.

Die in Figur 4/5 dargestellten Prozesse werden im folgenden kurz kommentiert:

Die *Eigenlast* darf in guter Näherung als zeitlich konstant angesehen werden.

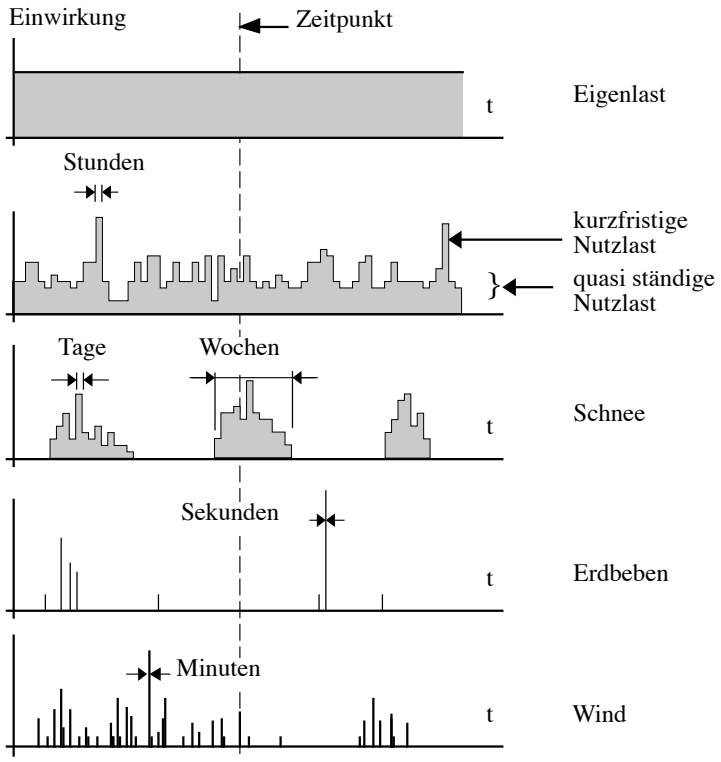
Jedes Tragwerk trägt zusätzlich zur Eigenlast *quasi ständige* Nutzlasten. Diesen sind die *kurzfristigen* Nutzlasten überlagert. Auf einer Brücke z.B. treten zu bekannten Zeiten (rush-hours) grosse Werte auf, die u.a. bei Verkehrszusammenbrüchen und Unfällen Spitzenwerte erreichen. Diese Maxima dauern einige Minuten bis Stunden.

Der *Schnee* liegt im Unterland nur während kurzer Perioden der Wintermonate. Maximale Werte sind während Tagen, durchschnittliche während Wochen und Monaten zu beobachten. In höheren Lagen liegt der Schnee länger und erlangt in gewisser Weise den Charakter längerfristiger Einflüsse.

Erdbeben treten höchst selten auf. Die Dauer liegt im Bereich einiger Sekunden. Die Intensität ist in höchstem Masse variabel.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Wind schliesslich tritt nur zeitweise auf. Starke Böen sind selten. Maxima dauern einige Sekunden bis Minuten.



Figur 4/5

Eine senkrechte Linie auf der Graphik markiert einen ganz bestimmten Zeitpunkt. An dieser Linie kann man die einzelnen, gleichzeitig vorhandenen Einwirkungen ablesen, die zugehörigen Beanspruchungen der interessierenden Stelle des Tragwerk ermitteln und diese summieren. Das Ergebnis dieser Summation ist z.B. eine Schnittgrösse. Die Linie beliebig hin- und herschiebend, findet man – auf diese Art eher zufällig – die grösste Summe und damit den Maximalwert der Beanspruchung im dargestellten Zeitausschnitt. Dieses Vorgehen ist zwar anschaulich, in der Durchführung jedoch mühsam und als Methodik so nicht akzeptierbar.

Man kann das gleiche natürlich auch systematisch machen, z.B. nach dem von *Turkstra* vorgeschlagenen Vorgehen (Turkstra, 1972). Dieses hat Einzug in die Praxis gefunden und ist heute als "Regel von Turkstra" bekannt. Man wählt eine der Einwirkungen, bezeichnet sie als *Leiteinwirkung* und sucht ihr *Maximum*. Dann schaut man, wie gross die Einwirkungen der übrigen Einflüsse zu diesem Zeitpunkt gerade sind; man nennt sie *Begleiteinwirkungen*. Leiteinwirkung und Begleiteinwirkungen definieren ein sog. *Gefährdungsbild*, wie wir es in Abschnitt 2.2 schon eingeführt haben. Jede Einwirkung wird auf diese Art einmal als Leiteinwirkung betrachtet. Es gibt demnach so viele Gefährdungsbilder, als Einwirkungen gleichzeitig wirken. Das für die betrachtete Grösse (meistens eine Schnittgrösse) ungünstigste Gefährdungsbild ist dann massgebend.

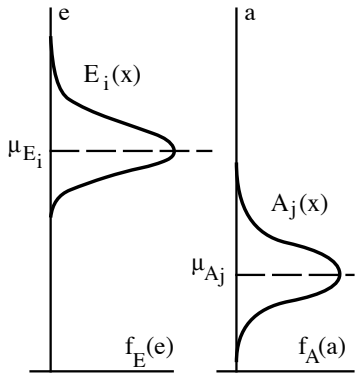
Das Konzept der neuen Norm SIA 160/1989 stützt sich mit den (in SIA 260, 1980 erstmals eingeführten) Begriffen Leiteinwirkung und Begleiteinwirkung direkt auf die Regel von Turkstra. Das Konzept ist – wie wir in Abschnitt 2.2 gesehen haben – viel allgemeiner anwendbar. Dies wird dann deutlich, wenn man den Begriff *-einwirkung* durch den Begriff *-gefahr* oder *-umstand* ersetzt und sich damit von den Vorstellungen löst, die im engeren Sinn bei der Bemessung von Tragwerken zweckmässig sind.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Die Regel von Turkstra liegt im übrigen theoretisch auf der unsicheren Seite, denn es könnte ja sein, dass die ungünstigste Situation zu einem Zeitpunkt auftritt, der nicht durch das Maximum einer der Einwirkungen charakterisiert ist. Es leuchtet jedoch ein, dass man mit dieser Regel der ungünstigsten Situation recht nahe kommt.

Oft wird anstelle der Regel von Turkstra das sog. Lastkombinationsmodell von Borges & Castanheta (Borges, 1971) verwendet. Dieses stellt die einzelnen stochastischen Prozesse in Form von Rechteckpulsen dar, deren zeitliche Länge vom Einwirkungstyp abhängig ist. Bei der Summation sind dann die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten zu beachten.

4.42 Beanspruchungsmodell



Figur 4/6

Die Beanspruchung S wird hier als Funktion der verschiedenen Einwirkungen berechnet. Das Modell baut im wesentlichen auf der Regel von Turkstra auf. Es hat, in allgemeiner Form geschrieben, die Struktur der Formel (4.4), enthält jedoch naturgemäss keine Lastfaktoren:

$$S = \{S\,(L_i + \sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}} B_j\,)\}_{max} \qquad (4.12)$$

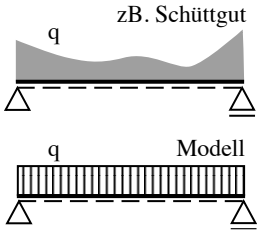
durch die Wahl von i aus 1 bis n zu suchen

Hierin sind

$L_i = M \cdot M_i \cdot E_i$ Leiteinwirkung (4.13)

$B_j = M_j \cdot A_j$ Begleiteinwirkungen (4.14)

Die Leiteinwirkung wird im wesentlichen durch den jeweils zugehörigen stochastischen Prozess E bestimmt. Dieser zeigt sich in der Regel als Extremwertverteilung. Begleiteinwirkungen haben eine mehr oder weniger symmetrische Augenblicksverteilung und werden mit A bezeichnet. Die Ermittlung dieser Verteilungen wurde in den Abschnitten 3.2 und 3.3 ausführlich gezeigt. M, M_i und M_j sind Modellvariablen, auf die gleich eingegangen wird.



Figur 4/7

4.43 Modellunschärfen

Die Modellvariable M deckt die Unschärfen ab, die durch Vereinfachungen des statischen Systems, der Lagerungsbedingungen und der Einflüsse aus Steifigkeit und Rissbildung in die Berechnung hineinkommen. Es handelt sich um eine typische Bayes'sche Variable, die in der Regel subjektiv zu schätzen ist. Für die *Gebrauchstauglichkeit* bestehen erhebliche Unschärfen. Je nach Problem, Bauweise und System sind die Parameter der Modellvariable:

$m_M \approx 1{,}0$

$v_M \approx 0.05$ bis etwa 0.3

Für die *Tragsicherheit* ist der Gleichgewichtszustand entscheidend (Grenzwertsätze der Plastizitätstheorie). Damit kürzen sich die Unschärfen sozusagen heraus. Hier kann also ohne Bedenken

$\mu_M = 1,$

$v_M = 0$

gesetzt werden. Die Modellvariable M zur Deckung der Modellunschärfen bei der Ermittlung von S wird meist der Leiteinwirkung zugeschlagen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Die Modellunschärfen M_i bzw. M_j der *Leit-* bzw. *Begleiteinwirkungen* sind lastspezifisch und mit den entsprechenden Lasten zusammen zu berücksichtigen. Es geht z.B. um Einflüsse, die in Figur 4/7 angedeutet sind.

4.44 Hinweise zu den Einwirkungen

Es würde zu weit führen, die Ergebnisse der Lastforschung hier ausführlich darzustellen. Knappe Hinweise, die im wesentlichen als Unterlagen für die Übungen zu verstehen sind, müssen an dieser Stelle genügen. Im übrigen ist zu verweisen auf die laufenden Arbeiten der Kommission W 81 des CIB (siehe CIB 1989 und 1991) sowie des JCSS.

- Die *Eigenlast* ist im wesentlichen konstant über die Lebensdauer des Bauwerks. Es besteht eine leichte Tendenz zu Übertoleranzen, Ausbauchungen der Schalung etc. Als Mittelwert wird deshalb z.B. der 1.05-fache Nominalwert angesetzt, der Variationskoeffizient zu etwa 5%. Der Ansatz einer Normalverteilung genügt. Eigenlasten eines Bauwerkes sind nur ausnahmsweise Leiteinwirkung.
- *Andere ständige Lasten* sind ebenfalls über lange Zeiträume (z.B. Jahrzehnte) weitgehend konstant. Die Standardabweichungen sind aber oft grösser als bei Eigenlasten. Erhebliche Änderungen sind möglich aus mancherlei Gründen: Aufbringen zusätzlicher Belagsschichten, dickere Beläge, schwerere Einbauten oder Entfernung von Einbauteilen. Solche Änderungen haben relativ *grosse Veränderungen der Mittelwerte* zur Folge.
- Bei *Lasten aus Aufschüttungen* ist die *Art des Aufbringens* entscheidend. Unter Umständen werden schwere Baumaschinen eingesetzt. Zudem besteht die Gefahr, dass grosse Erdmengen zunächst auf einem Haufen deponiert und erst danach auf die vorgeschriebene Dicke verteilt werden. Vorschriften zur Einbringung sind deshalb im Kontrollplan festzuhalten und bei der Ausführung durchzusetzen. Für den Variationskoeffizienten ist – je nach Kontrollintensität – ein Ansatz von 20% bis 30% durchaus realistisch. Als Verteilungstyp scheint eine Log-Normal-Verteilung vernünftig.
- *Erddrücke* sind im wesentlichen von der Dichte des Schüttmaterials und vom Winkel der inneren Reibung abhängig. Den Mittelwert der Dichte wird man entsprechenden Handbüchern entnehmen (siehe z.B. Lang/Huder, 1982) und mit einem Variationskoeffizienten von etwa 7% einsetzen. Der Winkel der inneren Reibung wird mit seinem wahrscheinlichsten Wert als Mittelwert und einem Variationskoeffizienten von etwa 10% eingesetzt. Es ist zu beachten, dass manche Geotechniker in ihren Angaben bereits Sicherheitsvorhalte berücksichtigen. Man wird sich über den Charakter der Angaben in geotechnischen Gutachten deshalb im Einzelfall unterhalten müssen.
- *Wasserdrücke* hängen eindeutig von der Lage des Wasserspiegels ab. Man wird demzufolge die Schwankungen des Wasserspiegels beobachten und in geeignete Verteilungsdichten umsetzen. Oft ist die maximale Wasserspiegelhöhe physikalisch begrenzt. Das darf nicht in dem Sinne missverstanden werden, dass darüber hinaus keine weiteren Sicherheitsüberlegungen nötig sind. Im Gegenteil: Der Sicherheitsvorhalt verschiebt sich lediglich auf die Widerstandsseite. In diesem Sinne zeigt die Zuverlässigkeitstheorie deutlich, dass bei konventioneller Bemessung auch auf nach oben begrenzten Einwirkungen Lastfaktoren angesetzt werden müssen.
- Der ständige Anteil von *Nutz- und Verkehrslasten,* resultierend aus Einrichtungsgegenständen und normalem Betrieb, ist relativ klein und wird normalerweise nur Begleiteinwirkung sein (Figur 4/5). Kurzzeitig auftre-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

tende Spitzen sind die Folge von aussergewöhnlichen Menschenansammlungen, Anhäufungen von Einrichtungsgegenständen (Renovation, Umzug) sowie versagenden Installationen (Wasserleitungsbruch etc.). Eine räumliche Variation geht über alle Stockwerke hinweg. Für die Festlegung von Lasten als Begleiteinwirkungen (Verteilung der Augenblickswerte, siehe Abschnitt 3.23) mögen die folgenden Werte gelten:

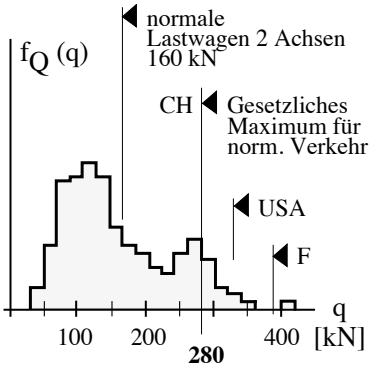
	μ_A	σ_A	in [kN/m^2]
Wohnräume	0.30	0.10	
Büroräume	0.50	0.25	
Aktenräume	1.5	0.40	
Bibliotheken	3.0	0.50	

Nutzlasten kleiner als Null sind nicht möglich. Deswegen werden Begleiteinwirkungen aus Nutzlasten oft als Log-Normal-Verteilung angesetzt.

Die Leiteinwirkung aus Nutzlasten ergibt sich aus den Spitzenwerten bei Menschengedränge:

	μ_E	σ_E	in [kN/m^2]
mit Bewegungsmöglichkeit	< 0.5	0.5	
sehr dicht, unkomfortabel	1.3	1.1	
praktisch maximal	6	≈ 0	

Diese Werte sind in der Regel als Extremwertverteilungen in die Berechnungen einzuführen.

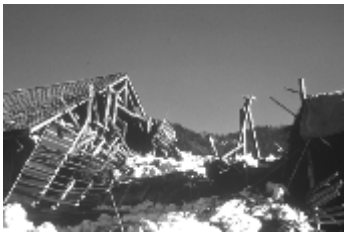


Figur 4/8

- Eine Erhebung von *Verkehrslasten auf Brücken* im Kanton Waadt (Jacquemoud, 1981) hat die interessante Verteilung von Figur 4/8 ergeben. Sie stammt aus 2340 Messungen und weist zwei Spitzen auf, die einfach zu erklären sind: Die linke Spitze wird vom durchschnittlichen Verkehr erzeugt, die zweite durch jene Lastwagen, die sich bei der Beladung möglichst genau an das gesetzliche Maximum von derzeit 28 t halten. Eine ganz kleine dritte Spitze ergibt sich bei der nächsthöheren Gewichtskategorie der 40 t-Fahrzeuge – oder durch Gesetzesübertretung.

  Die linke Spitze charakterisiert die Begleiteinwirkung, die rechte mit voller Ausnützung zulässiger Lasten offenbar die Leiteinwirkung. Letztlich ist die Belastung einer Brücke die Folge einer ganzen Reihe von Einflüssen, unter anderem der Lastverteilung auf die Achsen, des Radstands, der Position quer zur Strasse, dynamischer Wirkungen, sowie insbesondere der Verhältnisse bei einem Verkehrsstau.

- *Schnee* ist eine der wichtigsten Einwirkungen in der Schweiz. Jährlich stürzen mehrere Dächer unter Schneelasten ein. Konstruktionen mit kleiner Eigenlast (und damit *defacto* kleinen Reserven) in sog. Schneelöchern unseres Landes (siehe z.B. Abschnitt 1.52) sind besonders gefährdet.



  Schneelasten sind abhängig von klimatischen Bedingungen (Temperaturverlauf, Niederschlag, Sonneneinstrahlung), Windverfrachtung, Dachform, Beheizung etc. Starke örtliche und geographische Einflüsse sind zu berücksichtigen. Eine sehr gute Darstellung der Problematik und insbesondere ausführliche Literaturangaben finden sich in (CIB, 1991). Auch (Ghiocel/Lungu, 1975) kann weiterhelfen.

  Ein Modell für Schneelasten in Mitteleuropa ist in den Beziehungen (4.15) und (4.16) dargestellt (JCSS 1984). Die erste Beziehung legt die Schneelast auf ebenem Gelände fest. D bezeichnet darin die Schneehöhe, Γ die Schneedichte. Beide sind Zufallsvariablen. Die Dichte-Unterschiede zwischen leichtem Pulverschnee und Nassschnee sind gewaltig. Weit zuverlässiger wäre es, sich auf *Wasserwerte* des Schnees zu stützen. Die entsprechenden Messreihen sind noch nicht sehr aussagekräftig.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Die Verteilung der Schneelast in [kN/m^2] auf ebenem Gelände ergibt sich aus den folgenden Angaben:

$$S_0 = \Gamma \cdot D$$

$$\left.\begin{array}{l} \mu_D = 0.25 \cdot 1.002^{h_0} \\ 1.0 \geq v_D = \dfrac{0.3}{\mu_D} \geq 0.4 \end{array}\right\} \begin{array}{l} \text{log-normal} \\ h_0 \text{ in m} \\ \text{z.B. gemäss} \\ \text{SIA 160} \end{array}$$

$$\Gamma = [3.0 - 1.5 \cdot e^{-1.5 \cdot \mu_D}] \cdot \varepsilon_\Gamma \leftarrow \left.\begin{array}{l} \mu_{\varepsilon_\Gamma} = 1.0 \\ v_{\varepsilon_\Gamma} = 0.20 \end{array}\right\} \begin{array}{l} \text{log-} \\ \text{normal} \end{array} \qquad (4.15)$$

Die Schneelast auf Dächern unterscheidet sich aus den verschiedensten Gründen oft erheblich von denjenigen auf ebenem Gelände. Die folgende Formel gibt mit der Modellvariable β den Hinweis auf die zusätzlichen Unschärfen und zeigt die Einflüsse aus Exposition und allfälligen Schmelzvorgängen:

$$S = 0.45 \cdot E \cdot T \cdot \varepsilon_c \cdot S_0$$

$$\left\{\begin{array}{l} \mu_{\varepsilon_c} = 1.0 \\ v_{\varepsilon_c} = 0.45 \end{array}\right\} \begin{array}{l} \text{log-} \\ \text{normal} \end{array}$$

$$T = 1.0 \div 1.25 \quad \text{(geheizt, ungeheizt)}$$

$$E = 0.9 \div 1.3 \quad \text{(Exposition)} \qquad (4.16)$$

Zusätzlich sind natürlich die vielfältigen Formen der Schneeverfrachtung durch Wind und Schneeansammlungen in ungünstigen Dachbereichen zu beachten (siehe hierzu Norm SIA 160).

Messreihen von Schneehöhen sollen unter Verwendung von Log-Normal-Papier, solche von Schneewasserwerten auf Gumbel-Papier (siehe Abschnitt 3.43) ausgewertet werden.

- Auch *Wind* gilt in der Schweiz als eine wesentliche Einwirkung auf Bauwerke, dies insbesondere in Föhngebieten. Noch grössere Bedeutung hat Wind natürlich in Küstengebieten und in Gegenden der Welt, wo Wirbelstürme zu erwarten sind. Gute Hinweise finden sich in (Davenport/Dalgiesh, 1970 und Ghiocel/Lungu, 1975).

  Ein wesentliches Merkmal des Windes ist, dass kleine Werte häufig, die für die Bemessung massgebenden Spitzenwerte dagegen sehr selten auftreten. Der zeitliche Anteil der verschiedenen Windgeschwindigkeiten ist in Figur 4/9 angegeben. Es ergibt sich daraus, dass Wind als Begleiteinwirkung, mit kleinen Geschwindigkeiten allerdings, durchaus zu beachten ist.

  Als Leiteinwirkung sind natürlich die Spitzengeschwindigkeiten mit einer Dauer von einigen Sekunden bis zu etwa einer Minute, also die Böenspitzen massgebend. Diese lassen sich in einer allerersten und einfachsten Näherung unter Annahme einer Gumbel-Verteilung aus den folgenden Parametern abschätzen:

	μ_V	σ_V	
normal	35	5	[m/sec]
Föhngebiete	45	7	[m/sec]

Terrainrauhigkeit, Abschirmung von Bauteilen, aber auch geschwindigkeitserhöhende Windgassen etc. komplizieren das Bild wesentlich. Wind ist insofern vor allem auch ein dynamisches Problem, das sich nicht einfach erfassen lässt.

v [m/s]	1	2	5	10	15
Zeit %	70	50	10	1	0.1

Figur 4/9

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Liegt die zu berücksichtigende Verteilung der Windgeschwindigkeit einmal fest, lässt sich die Verteilung der Windkräfte W in [kN/m^2] aus den Geschwindigkeiten V in [m/s] nach Formel (4.17) berechnen.

$$W = C_p \cdot W_0 \qquad \text{mit } W_0 = \frac{V^2}{1600} \tag{4.17}$$

Die Winddruckbeiwerte C_p berücksichtigen die Exposition der betrachteten Fläche und sind z.B. der Norm SIA 160 zu entnehmen. Diese Norm ist, auch international gesehen, in bezug auf die Erfassung von Windbeanspruchung schon immer wegleitend gewesen. Empfohlen wird, die Winddruckbeiwerte als Mittelwerte anzusehen und mit Variationskoeffizienten von etwa 15% zu rechnen. Die Standardabweichung der Modellvariablen M_i der Windkräfte ist damit im wesentlichen auch erfasst.

Auf die Kombination Wind/Schnee sei nochmals speziell hingewiesen (siehe z.B. Figur 2/2). Die Geometrie der Schneeform kann zu wesentlich grösseren Windangriffsflächen und damit zu unerwartet grossen Tragwerksbeanspruchungen führen.

- Für *Erdbeben* schliesslich existieren Erdbeben-Risikokarten (siehe z.B. Sägesser/Mayer-Rosa, 1978). Diese geben die *Intensitäten* für die der Karte entsprechende Wiederkehrperiode an. Eine typische Karte findet sich in der SIA Norm 160 und dürfte etwa einer Wiederkehrperiode von 400 Jahren entsprechen.

  Die Lage des Herdes, die geologische Situation, der Baugrund und das Tragwerkskonzept (Schwingungsverhalten, konstruktive Details etc.) sind massgebende Grössen, wenn es darum geht, aus Intensitäten auf die *Beanspruchung* von Tragwerken zu schliessen.

  Bei der Bemessung von Tragwerken wird zwischen *Betriebserdbeben* und *Bemessungserdbeben* unterschieden. Tragwerke und auch technische Einrichtungen sollen Betriebserdbeben schadlos überstehen. Bemessungserdbeben dürfen, je nach Bauwerksart, kleinere oder grössere Schäden erzeugen, sollten jedoch nicht zum Einsturz von Gebäuden führen. Erdbebeneinwirkungen sind praktisch immer Leiteinwirkung.

Die ohnehin rudimentäre Besprechung verschiedener Einwirkungen auf Tragwerke muss hier abgebrochen werden. Es handelt sich um ein äusserst breites Gebiet, das nach ausführlicher Behandlung ruft und in einzelnen Bereichen noch intensiver Forschung bedarf. Die vorliegende kurze Darstellung kann diese Lücke nicht schliessen.

4.5 Andere Bereiche des Bauwesens

Das vorliegende Kapitel stellt Tragwerke in den Vordergrund. Das ist durchaus beabsichtigt, denn an einem bestimmten Problemkreis muss man sich schliesslich orientieren, wenn man anschaulich bleiben will. Auch ist die Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie im statisch-konstruktiven Bereich des Bauwesens vielleicht am weitesten fortgeschritten.

Es wäre allerdings wünschbar, Angaben über Modellbildung, Modelle, Modellvariablen, Basisvariablen usw. auch für *andere Bereiche des Bauwesens*, also z.B. für den Wasserbau, den Grund-, Erd- und Felsbau, das Verkehrswesen, den Baubetrieb usw. bereitzustellen. Die Methoden der Zuverlässigkeitstheorie, wie sie hier vorgestellt werden, sind durchaus auch in diesen Disziplinen anwendbar.

Die entsprechenden Daten und Modelle hier bereitzustellen, ist aus Gründen des verfügbaren Platzes nicht möglich, aber auch deswegen nicht, weil

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

sich die Verfasser in den genannten Bereichen des Bauwesens zu wenig oder gar nicht auskennen.

Manche Hinweise kann man natürlich dem normalen Schrifttum entnehmen. Für den Grundbau z.B. enthält (Lang/Huder, 1982) viele brauchbare Modelle und Daten, die man allerdings im hier diskutierten Sinne interpretieren und deuten muss. Auch in (Vollenweider, 1988) ist für Anwendungen in der Geotechnik vieles vorgespurt.

Dem Hydrologen und dem Wasserbauer ist die vorgestellte Denkweise durchaus geläufig (siehe z.B. Vischer/Huber, 1985; Dracos, 1980 und 1987; Plate, 1993). Er hat sich hingegen oft noch nicht die mittlerweile zur Verfügung stehenden Methoden der Zuverlässigkeitstheorie zunutze gemacht. Auch der Verkehrsplaner hat sich mittlerweile an Aussagen gewöhnt, die Wahrscheinlichkeitscharakter haben. Und dass im Bereich des Baubetriebs Kosten, Preise, Zeitvorgaben, Leistungen von Baumaschinen etc. keine festen Grössen sind, ist jedem klar, der sich mit dieser Materie befasst hat.

Es ist deshalb zu hoffen, dass Kollegen an den Hochschulen und in der Praxis die Methoden aufgreifen und das in diesem Kapitel für Tragwerke eingehend Dargestellte aus der Sicht anderer Disziplinen erweitern.

Literatur

Borges, F.J. and Castanheta, M.: "Structural Safety"; Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lissabon, 1971

Casciati, F., Negri, R. und Rackwitz, R.: "Geometrical Variability in Structural Members and Systems"; Working Document of the JCSS, IABSE Zürich, 1989

CIB Reports from W 81 "Actions on Structures"; Publikationen
No. 115 "Self Weight Loads", 1989
No. 116 "Live Loads in Buildings", 1989
No. 141 "Snow Loads", 1991
Erhältlich bei CIB, Rotterdam

Davenport, A.G. and Dalgiesh, W.A.: "Wind Loads"; Commentary No. 1 zum National Building Code of Canada, 1970

Dracos, T.: "Hydraulik"; Vorlesungsunterlagen, vdf Verlag der Fachvereine, Zürich, 1987

Dracos, T.: "Hydrologie"; Springer-Verlag, 1980

Ghiocel, D. and Lungu, D.: "Wind, Snow and Temperature Effects on Structures based on Probability"; Abacus Press, Turnbridge Wells, Kent, UK, 1975

Jacquemoud, J.: "Analyse du comportement à la fatigue des ponts-routes"; Thèse No. 389, EPFL Lausanne, 1981

JCSS, Joint Committee on Structural Safety (eine von den internationalen Organisationen CEB, CECM, CIB, FIP, IABSE, IASS und RILEM eingesetzte Kommission):
- "General Principles of Structural Design"
- "General Principles of Quality assurance";

In "IABSE Reports of Working Commissions"; Report No. 35, IABSE Zürich, 1981, sowie
- "Basic Notes on Strength", 1984
- "Basic Notes on Actions", 1984
- "Working Documents", 1991

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Kersken-Bradley, M. und Diamantidis, D.: "Sicherheit von Baukonstruktionen"; In: Peters, O.H. und Meyna, A. (Hrsg.): "Handbuch der Sicherheitstechnik, Band 1", C. Hanser Verlag, München, 1985

Lang, H.-J. und Huder, J.: "Bodenmechanik und Grundbau"; Springer-Verlag, 1982

Mirza, S.A. and MacGregor, J.G.: "Variations in Dimensions of Reinforced Concrete Members"; Proc. ASCE, Journal of the Structural Division, Vol. 105, No. ST 4, 1979

Petersen, Ch.: "Der wahrscheinlichkeitstheoretische Aspekt der Bauwerkssicherheit im Stahlbau"; Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Deutscher Stahlbautag, 1977

Plate, E.J.: "Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitstheorie für Bauingenieure" Ernst & Sohn, Berlin 1993

Sägesser, R. und Mayer-Rosa, D.: "Erdbebengefährdung in der Schweiz"; Schweizerische Bauzeitung, Heft 7, 1978

Schneider, J.: "Hazard Scenarios and Structural Design"; IABSE Periodica, Surveys S-33/85, IABSE Zürich, 1985

Sentler, L.: "Live Load Survey – A Review with Discussions"; Lund Institute of Technology, Report 78, Lund, Sweden, 1976

SIA 160: "Einwirkungen auf Tragwerke"; Norm. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1989

SIA 161: "Stahlbauten"; Norm. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1990

SIA 162: "Betonbauten"; Norm. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1989

SIA 260: "Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken – Weisung des SIA an seine Kommissionen für die Koordination des Normenwerks"; 5. Fassung 1980 und 11. Fassung, September 1982

Spaethe, G.: "Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen"; Springer-Verlag, 1992

Turkstra, C.J.: "Theory of Structural Design Decisions"; Study No. 2, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 1972

Vischer, D. und Huber, A.: "Wasserbau"; Springer-Verlag, 1985

Vollenweider, U.: "Gedanken zur Sicherheit im Grundbau"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 39, 1988

Vrouwenvelder, A.C.W.M. and Siemes, A.J.M.: "Probabilistic calibration procedures for the derivation of partial safety factors for the Netherlands Building Code"; HERON, Vol. 32, No. 4, Stevin-Laboratory of the Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, NL, 1987

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

5. Zuverlässigkeit von Elementen und Systemen

5.1 Vorbemerkungen

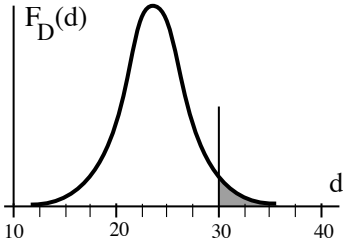
Tragwerke müssen unter anderem

- tragsicher,
- gebrauchstauglich,
- dauerhaft und
- wirtschaftlich

sein, womit hier nur die wichtigsten Ansprüche genannt sind. Ähnliche Forderungen werden auch an andere technische Systeme gestellt.

Jeder Anspruch lässt sich in der Regel in die Form einer sog. *Grenzzustandsbedingung* bringen. Diese lautet in allgemeiner Schreibweise:

$$G(a_0, X_1, X_2, \ldots X_n) \geq 0 \tag{5.1}$$



Figur 5/1

Mit X_i werden die Zufallsvariablen eingeführt, die auf einer bestimmten Beurteilungsbasis (siehe Kap. 4.21) das Problem und die Anforderungen beschreiben. Zufallsvariablen sind nicht immer materielle Werte wie Abmessungen, Festigkeiten, Lasten usw., sondern können durchaus auch Meinungen charakterisieren, z.B. die Meinung einer Gruppe von Menschen über den zulässigen Wert einer Durchbiegung. In Figur 5/1 ist z.B. eine solche Meinung in Form einer Verteilungsdichte festgehalten: nur der markierte Anteil aller Befragten wäre bereit, im untersuchten Fall eine Durchbiegung von $d \geq 30$ mm noch zu akzeptieren. Wie man zu solchen Variablen kommt, wurde in Abschnitt 3.14 beschrieben.

Die sog. *Grenzzustandsgleichung* trennt den akzeptierten Bereich von demjenigen, der als Versagen eingestuft wird:

$$G(a_0, X_1, X_2, \ldots X_n) = 0 \tag{5.2}$$

Versagen ist durch die *Versagensbedingung* definiert als:

$$G(a_0, X_1, X_2, \ldots X_n) < 0 \tag{5.3}$$

Von Interesse ist im vorliegenden Zusammenhang die *Wahrscheinlichkeit p_f des Versagens*. Dies kann wie folgt geschrieben werden:

$$p_f = P\{G(a_0, X_1, X_2, \ldots X_n) < 0\} \tag{5.4}$$

Die Methoden zur Ermittlung dieser Wahrscheinlichkeiten oder entsprechender Kennwerte werden klassiert nach dem Grad ihrer Komplexität ("levels of sophistication"):

- *Level I:* Die Bemessungsvariablen werden nur durch *einen einzigen* Wert eingeführt, z.B. durch den Mittelwert oder einen anderen charakteristischen Wert allein. Dies entspricht dem Niveau der heutigen Normen. Aussagen über die Versagenswahrscheinlichkeit sind nicht möglich. Die Normen-Kommissionen übernehmen bis zu einem gewissen Grad die Verantwortung dafür, dass diese akzeptierbar klein ist.
- *Level II:* Die Bemessungsvariablen werden mit *zwei* Kennwerten eingeführt, z.B. mit Mittelwert und Standardabweichung. Die an die Normen-Kommissionen des SIA gerichtete Weisung SIA 260 enthält Vorschläge in diesem Sinne. Auf dieser Basis gewonnene Aussagen über die Versagenswahrscheinlichkeit haben nominellen Charakter und können lediglich für Vergleiche herangezogen werden. Man darf solche Aussagen nicht als absolute Aussagen missverstehen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

- *Level III:* Werden die Bemessungsvariablen durch ihre Verteilungsfunktion eingeführt, sind die sich ergebenden Resultate im Rahmen der Genauigkeit der Ausgangsgrössen sehr gute Näherungen, denen bei nicht allzu kleinen Wahrscheinlichkeiten auch ein gewisser absoluter Charakter zugesprochen werden kann.

Die besondere Schwierigkeit gewisser Probleme des Bauwesens liegt darin, dass man sich häufig mit Werten befassen muss, die als Extrema weit weg von Mittelwerten liegen (z.B. mit Jahrhundertereignissen). In diesen Bereichen sind die Wahrscheinlichkeiten sehr klein und die ermittelten Werte stark von der Form des sog. Schwanzes der Verteilung abhängig.

Im übrigen muss daran erinnert werden, dass p_f eine subjektive Wahrscheinlichkeit ist. Im Grunde handelt es sich um den *Grad des Vertrauens* in die Aussage, dass das zu Beurteilende versagen könnte. Dass diese subjektive Wahrscheinlichkeit nicht eine – z.B. in eine Brücke – eingebaute Grösse ist, sondern vielmehr vom Informationsstand des Beurteilenden abhängt, wurde schon in Kap. 3.11 b) diskutiert. p_f ist eine bedingte Wahrscheinlichkeit, gebunden an den Stand des Wissens des Beurteilenden:

$$p_f = P\{G(a_0, X_1, X_2, \ldots X_n) < 0 \mid \text{Info}\} \tag{5.5}$$

Auf zwei Einschränkungen muss hier noch aufmerksam gemacht werden: Zum einen gehen wir in der Folge zunächst davon aus, dass die Variablen voneinander unabhängig sind. Korrelationen zwischen Variablen sind schwierig zu ermitteln und verkomplizieren die Algorithmen ganz erheblich. Mit dieser Einschränkung lässt sich leben, denn bei Unsicherheiten können beide Extremfälle – vollständige Korrelation und fehlende Korrelation – je gesondert durchgerechnet und verglichen werden.

Zum anderen sind menschliche Fehlleistungen auszuklammern. Fehlhandlungen können prinzipiell nicht durch Verkleinerung der hier diskutierten Versagenswahrscheinlichkeiten kompensiert werden. Dazu sind angepasste Strategien nötig. Diese werden in Kapitel 8 speziell behandelt.

Das vorliegende Kapitel soll die *Methoden* bereitstellen, die es braucht, um im Rahmen der vorstehenden Einschränkungen die Versagenswahrscheinlichkeiten p_f mit angemessener Genauigkeit zu berechnen.

Wir gewinnen mit solchen Aussagen *bessere Einsichten* in Problemkreise, wir können die Aussagen bei der *Herleitung bzw. Beurteilung von Normen* heranziehen und haben ein gutes Hilfsmittel für die *Beurteilung bestehender Tragwerke* in der Hand. In Ausnahmefällen können die Methoden auch direkt als Bemessungsgrundlage Verwendung finden. Auf jeden Fall suchen wir selten die absolute Aussage, sondern benutzen die Ergebnisse in der Regel als *Basis für Vergleiche* und als *bessere Masszahlen* für die Beurteilung von Situationen.

5.2 Die Monte-Carlo Methode

Keine Methode ist so leicht verständlich und Ingenieuren so leicht zugänglich wie die *Monte-Carlo* Methode. Und keine ist – vorausgesetzt, man habe einen schnellen Computer und ein geeignetes Programm – so anpassungsfähig und genau wie diese. Wir stellen die Besprechung dieser Methode deshalb an den Anfang, obwohl sie erst in den letzten Jahren mit dem Aufkommen leistungsfähiger Computer vermehrte Anwendung fand.

Beim Monte-Carlo-Verfahren (man spricht auch von einer Monte-Carlo-Simulation) werden die genaue oder näherungsweise Berechnung der Vertei-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

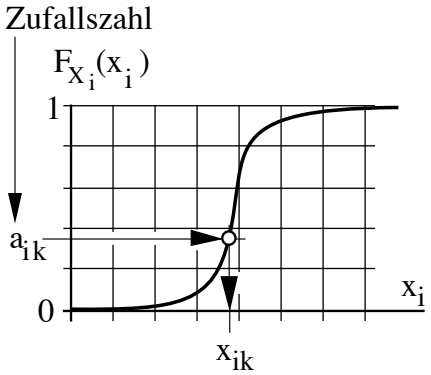
lungsdichte und der Parameter einer beliebigen Grenzzustandsfunktion von Variablen

$$G = G(a_0, X_1, X_2, \dots X_i, \dots X_n) \tag{5.6}$$

ersetzt durch eine grosse Zahl von einzelnen Auswertungen der Funktion mit zufälligen Realisationen x_{ik} der zugrundeliegenden Verteilungen X_i. Der Index "k" steht für die "k"-te Simulation (k = 1, 2 … z) eines Satzes von x_i. Jeder Satz der k Realisationen liefert einen Wert

$$g_k = G(a_0, x_{1k}, x_{2k}, \dots x_{ik}, \dots x_{nk}) \tag{5.7}$$

Die sich ergebenden z Zahlen g_k werden statistisch ausgewertet nach den Regeln von Kapitel 3.



Figur 5/2

Das Herz des Verfahrens ist ein *Zufallsgenerator:* Er erzeugt Zufallszahlen zwischen 0 und 1. Diese werden als Wert der Verteilungsfunktion $F_{Xi}(x_i)$ interpretiert und liefern bei bekannter Verteilungsfunktion oder Summenkurve der Variablen X_i die zugehörigen Realisationen x_{ik}.

Zunächst wird die Anzahl z_0 der Versagensfälle, also die Anzahl aller Realisationen mit $g_k < 0$ gezählt. Damit ist p_f nach der frequentistischen Definition der Wahrscheinlichkeit berechenbar zu:

$$p_f \approx \frac{z_0}{z} \tag{5.8}$$

Hierin ist z die Gesamtzahl aller Realisationen von G. Es ist offensichtlich, dass diese Aussage umso zuverlässiger ist, je grösser die Zahl z_0 der Versagensfälle ist. Der Variationskoeffizient der Versagenswahrscheinlichkeit p_f beträgt für kleine p_f

$$v_{pf} \approx \frac{1}{\sqrt{z \cdot p_f}} \tag{5.9}$$

Will man diesen Variationskoeffizienten unter 10% halten, muss man bei Versagenswahrscheinlichkeiten von z.B. $p_f = 10^{-4}$ bereits $z = 10^6$ Simulationen erzeugen. Bei so grossen Zahlen scheinen auch schnelle Computer bereits sehr langsam.

Man kann zusätzlich die g_k gemäss Abschnitt 3.24 laufend statistisch aufbereiten, das heisst Mittelwert m_G und Standardabweichung s_G (und gegebenenfalls auch höhere Momente) ermitteln. Aus diesen beiden Werten lässt sich der später ausführlicher diskutierte Sicherheitsindex β und daraus ein Schätzwert für die Versagenswahrscheinlichkeit p_f ermitteln gemäss

$$\beta \approx \frac{m_G}{s_G} \qquad p_f \approx \Phi(u = -\beta) \tag{5.10}$$

Wie man sieht, wird bei dieser Abschätzung angenommen, dass die Dichte von G normalverteilt ist. Diese Abschätzung ist auch bei relativ kleinen Werten von z schon recht gut.

Die anfallenden Werte g_k werden in guten Programmen zudem laufend in einem Histogramm dargestellt und geben so gleich eine Vorstellung der Verteilungsdichte der Variablen G. Dieses Bild können andere, später zu besprechende Methoden nicht liefern.

Um den Rechenaufwand weiter abzubauen, hat man im übrigen eine ganze Reihe von sog. Importance Sampling-Methoden entwickelt, mit denen die

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Realisationen g_k im eigentlich interessierenden Versagensbereich gehäuft werden. Auf solche Methoden kann hier nicht weiter eingegangen werden.

5.3 Das Problem G = R – S

5.31 Einleitung und Beispiel

Gedanklich hat man schon von allem Anfang an Wahrscheinlichkeitsprobleme im Sinne des Monte-Carlo Verfahrens durchgespielt. Tatsächlich war das allerdings bis vor etwa 15 Jahren kaum möglich, da die Computer viel zu langsam rechneten. Man begab sich deshalb auf die Suche nach Methoden, mit denen man schneller zu Ergebnissen kommen kann. Man war dabei durchaus bereit, Einbussen an Genauigkeit in Kauf zu nehmen.

Eine ganze Reihe von Wissenschaftern hat sich in diesem Jahrhundert mit der Entwicklung solcher Methoden befasst. Als erster formulierte Max Mayer im Jahre 1926 seine Gedanken zu diesem Thema, die auch heute noch interessant zu lesen sind. A.M. Freudenthal nahm sich um 1947 der Frage an. 1960 gesellte sich mit Ernst Basler der erste Schweizer in die Gruppe derjenigen, die an diesem Problem arbeiten. Julio Ferry-Borges spielt spätestens seit 1966 eine wichtige Rolle bei der Weiterentwicklung der Theorie und der Methoden, insbesondere auch durch seinen langjährigen fruchtbaren Einsatz als Präsident des *JCSS*, des *Joint Committee on Structural Safety*. Andere Wissenschafter seien nur noch namentlich erwähnt. Wir werden den meisten weiter hinten wieder begegnen: Allin Cornell, Carl Turkstra, Niels Lind, A.M. Hasofer, Ove Ditlevsen, Rüdiger Rackwitz, Michael Baker, Robert Melchers, Henrik Madsen ... .

Die Entwicklung solcher Methoden der Zuverlässigkeitstheorie soll hier am Beispiel der nicht nur technisch, sondern auch historisch wichtigen Grenzzustandsfunktion G = R – S eingehender diskutiert werden.

In fast allen Zahlenbeispielen werden wir uns dabei auf die folgenden Variablen beziehen, die wir z.B. als Biegemomente auffassen und damit beispielsweise in der Dimension [kNm] lesen können:

X_i	Typ	μ_{x_i}	σ_{x_i}
S	N	90	30
R	N	150	20

Wir betrachten diese Variablen entweder als normalverteilte Grössen oder als Rechteckverteilungen (siehe auch Figur 5/4). Im letzteren Fall haben sie die folgenden Grenzen:

X_i	Typ	a_{x_i}	b_{x_i}
S	R	38.1	141.9
R	R	115.4	184.6

Anhand dieser Zahlen lassen sich zunächst die Fraktilwerte und die herkömmlichen deterministischen Sicherheitsfaktoren bestimmen.

Aus den Mittelwerten der beiden Variablen errechnet sich der "zentrale Sicherheitsfaktor γ_Z" zu:

$$\gamma_Z = \frac{\mu_R}{\mu_S} = \frac{150}{90} = 1.67$$

Die sog. Sicherheitsmarge beträgt:

$$m = \mu_R - \mu_S = 150 - 90 = 60$$

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Wenn wir Fraktilwerte berechnen, betrachten wir in der Regel ohne Ansehen des Verteilungstyps die 5% bzw. 95%-Fraktilen, die sich für eine Normalverteilung aus

$$x_{95\%} \text{ bzw. } x_{5\%} = \mu \pm 1.65\,\sigma$$

ergeben. Das führt zu

$$r_{5\%} = 150 - 1.65 \cdot 20 = 117.0$$
$$s_{95\%} = 90 + 1.65 \cdot 30 = 139.5$$

und dann zum Nennsicherheitsfaktor von

$$\gamma_N = \frac{r_{5\%}}{s_{95\%}} = \frac{117.0}{139.5} = 0.84$$

Aus dem traditionellen Denken heraus beurteilt, wäre das unakzeptabel, denn Sicherheitsfaktoren müssen grösser als eins sein. Die echten 5%-Fraktilwerte der Rechteckverteilungen liegen im übrigen bei 136.7 und 118.9. Der Nennsicherheitsfaktor bleibt also praktisch unverändert und damit immer noch unakzeptabel. Wir haben zwar Zahlen, aber es bereitet uns Mühe, Rückschlüsse daraus zu ziehen. Ist die Situation nun akzeptabel oder nicht? Aussagekräftiger ist die Versagenswahrscheinlichkeit, auf die wir in der Folge zu sprechen kommen wollen.

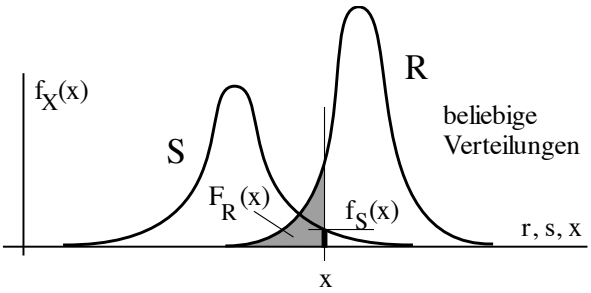
5.32 Der klassische Ansatz

Zunächst interessiert die Wahrscheinlichkeit, dass R kleiner ist als ein bestimmter Wert x. Das kann man gemäss Abschnitt 3.31 schreiben als Wert der Verteilungsfunktion an der Stelle x:

$$P(R < x) = F_R(x) \tag{5.11}$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass S = x ist, ergibt sich, ebenfalls von dort hergeholt, als Wert der Verteilungsdichte von S bei x:

$$P(S = x) = f_S(x) \tag{5.12}$$



Figur 5/3

Die Wahrscheinlichkeit, dass sowohl das eine als auch das andere gilt, ergibt sich gemäss Gleichung 3.9 als Produkt dieser beiden Grössen. Da x grundsätzlich jeden Wert zwischen $-\infty$ und $+\infty$ annehmen kann, muss zwischen diesen beiden Grenzen über alle x integriert werden:

$$p_f = \int_{-\infty}^{+\infty} f_S(x) \cdot F_R(x)\, dx \tag{5.13}$$

Das ist – wie man leicht einsehen kann – gleichbedeutend mit

$$p_f = 1 - \int_{-\infty}^{+\infty} F_S(x) \cdot f_R(x)\, dx \tag{5.14}$$

Dieses Integral, als "Faltungs-" oder "Konvolutionsintegral" bekannt, sieht simpel aus (und ist es formal auch), ist aber nur in einfachen Fällen ge-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

schlossen lösbar. Mit Computer-Programmen (z.B. VaP, siehe Anhang 10.5) liegen aber Methoden für die numerische Integration vor.

Für die Rechteckverteilungen des vorne eingeführten Zahlenbeispiels können wir hingegen geschlossen integrieren. Figur 5/4 zeigt, dass der Integrationsbereich im vorliegenden Fall nicht von $-\infty$ bis $+\infty$ läuft, sondern auf den kurzen Bereich von 115.4 bis 141.9 beschränkt bleibt.

Es ergibt sich damit:

$$f_S(x) = \frac{1}{141.9 - 38.1} = 9.63 \cdot 10^{-3} \qquad [38.1 \le x \le 141.9]$$

$$F_R(x) = \frac{1}{184.6 - 115.4}\ x - 1.67$$

$$= 14.45 \cdot 10^{-3}\ x - 1.67 \qquad [115.4 \le x \le 184.6]$$

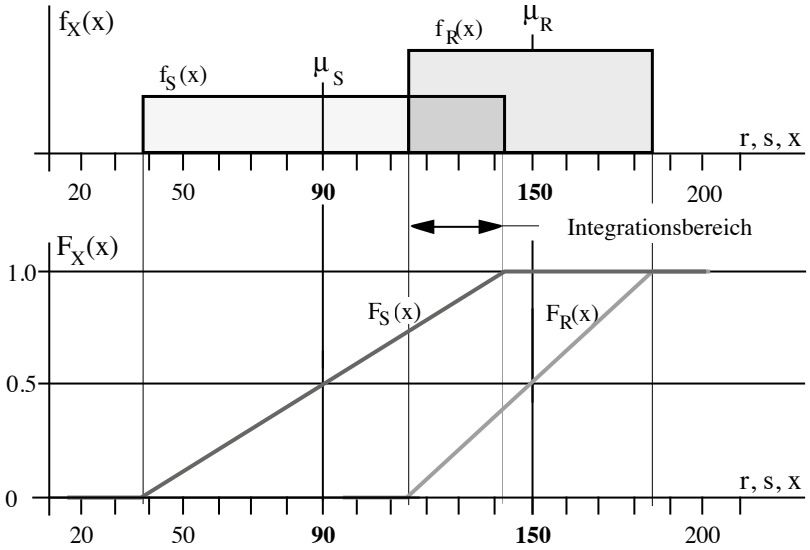
Die Integration ist einfach und verläuft gemäss Formel (5.13) wie folgt:

$$p_f = \int_{115.4}^{141.9} 9.63 \cdot 10^{-3} \cdot (14.45 \cdot 10^{-3}\ x - 1.67)\, dx$$

$$= (9.63 \cdot 10^{-3}) \cdot (14.45 \cdot 10^{-3}) \cdot [0.5 \cdot x^2] \Big|_{115.4}^{141.9} - (9.63 \cdot 10^{-3}) \cdot 1.67 \cdot x \Big|_{115.4}^{141.9}$$

$$= 0.0483 = 4.8\%$$

Dies ist die Wahrscheinlichkeit, mit der $G = R - S < 0$ ist. Dieser Wert wäre für Tragsicherheitsprobleme sicher unakzeptierbar gross. Hier strebt man Werte im Bereich von 10^{-4} bis 10^{-6} an. Für Gebrauchstauglichkeitsprobleme ist das jedoch eine denkbare Grössenordnung.



Figur 5/4

5.33 *Basler,* in der Schreibweise von *Cornell*

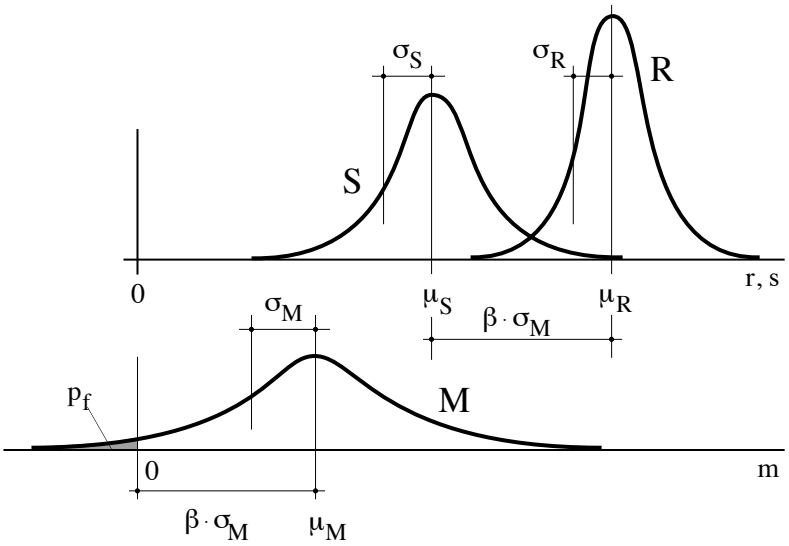
Ernst Basler entwickelte 1960 ein Verfahren, das wir hier in der von Cornell 1967 gewählten Umformulierung vorstellen. Das Verfahren geht von der Grenzzustandsgleichung $G = R - S$ aus und führt die beiden Variablen mit Mittelwert und Standardabweichung in die Berechnung ein.

Zur Beschreibung des Problems wird die sog. Sicherheitsmarge $M = R - S$ eingeführt. Diese Marge ist als Summe von zwei Variablen natürlich auch

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

b	F (– b)
.0	.500 00
.1	.460 17
.2	.420 74
.3	.382 09
.4	.344 58
.5	.308 54
.6	.274 25
.7	.241 96
.8	.211 86
.9	.184 06
1.0	.158 66
1.1	.135 67
1.2	.115 07
1.3	.096 80
1.4	.080 76
1.5	.066 81
1.6	.054 80
1.7	.044 57
1.8	.035 93
1.9	.028 72
2.0	.022 75
2.1	.017 86
2.2	.013 90
2.3	.010 72
2.4	.008 20
2.5	.006 21
2.6	.004 661
2.7	.003 467
2.8	.002 555
2.9	.001 866
3.0	.001 499
3.1	.000 968
3.2	.000 687
3.3	.000 483
3.4	.000 337
3.5	.000 233
3.6	.000 159 1
3.7	.000 107 8
3.8	.000 072 3
3.9	.000 048 1
4.0	.000 031 7
4.1	.000 020 7
4.2	.000 013 3
4.3	.000 008 5
4.4	.000 005 4
4.5	.000 003 4
4.6	.000 002 1
4.7	.000 001 3
4.8	.000 000 8
4.9	.000 000 5

wieder eine Variable und normalverteilt, wenn die Variablen R und S normalverteilt sind.



Figur 5/5

Mit den Regeln von Kapitel 3.61 sind die Parameter von M schnell ermittelt. Es ist:

$$\mu_M = \mu_R - \mu_S; \tag{5.15}$$

$$\sigma_M = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \tag{5.16}$$

Figur 5/5 zeigt die Variablem R, S und M. Aus dieser Figur ist auch der sog. *Sicherheitsindex* β ersichtlich. Er lässt sich aus

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} \tag{5.17}$$

einfach berechnen. In Worte gefasst: β sagt aus, wie oft die Standardabweichung der Zufallsvariablen M zwischen Nullpunkt und Mittelwert Platz hat. Die Versagenswahrscheinlichkeit ist natürlich gleich der Wahrscheinlichkeit, dass M kleiner als Null wird: $p_f = P(M = R - S < 0)$. Aus nebenstehender Tabelle (oder der Tabelle für die Standardnormalverteilung, siehe Anhang 10.2, bei $u = -\beta$) lässt sich diese Wahrscheinlichkeit ablesen zu

$$p_f = \Phi(-\beta) \tag{5.18}$$

Von Interesse sind noch die sog. Wichtungsfaktoren α_i, die anzeigen, mit welchem Gewicht die entsprechende Variable am Wert der Versagenswahrscheinlichkeit beteiligt ist. Diese errechnen sich aus

$$\alpha_R = \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

$$\alpha_S = \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \tag{5.19}$$

Es gilt offensichtlich

$$\alpha_R^2 + \alpha_S^2 = 1 \tag{5.20}$$

Als Zahlenbeispiel werden die unter 5.31 eingeführten Variablen herbeigeholt.

Die Zahlenrechnung liefert:

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

$$\mu_M = 150 - 90 = 60$$

$$\sigma_M = \sqrt{20^2 + 30^2} = 36.1$$

$$\beta = \frac{60}{36.1} = 1.66$$

$$p_f = \Phi(-1.66) = 0.049 = 4.9\%$$

$$\alpha_R = \frac{20}{\sqrt{20^2 + 30^2}} = 0.555$$

$$\alpha_S = \frac{30}{\sqrt{20^2 + 30^2}} = 0.832$$

Die Ergebnisse sind genau für normalverteilte Variablen. Für Rechteckverteilungen ist das Ergebnis nur eine Näherung. Der Vergleich mit den Ergebnissen der geschlossenen Integration unter Abschnitt 5.32 zeigt jedoch (zufällig?) keinen Unterschied. An den α-Werten erkennt man, dass die Variable S wegen ihres grösseren Variationskoeffizienten grösseren Einfluss auf das Ergebnis hat als die Variable R.

Das Vorgehen nach Basler/Cornell lässt sich leicht in eine Bemessungsgleichung weiterentwickeln. Die Forderung lautet $\beta \geq \beta_0$, wobei β_0 das z.B. in einer Norm vorgeschriebene "Sicherheitsniveau" ist. Dieses wird im Bereich von $\beta \approx 4$ bis 5 liegen. Mit reiner Algebra ergibt sich:

$$\begin{aligned} \mu_R - \mu_S &\geq \beta_0 \cdot \sigma_M \\ &\geq \beta_0 \cdot \frac{\sigma_R}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \cdot \sigma_R + \beta_0 \cdot \frac{\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \cdot \sigma_S \\ &\geq \beta_0 \cdot \alpha_R \cdot \sigma_R + \beta_0 \cdot \alpha_S \cdot \sigma_S \end{aligned}$$

Ordnen der Terme nach R und S führt zu:

$$\begin{aligned} \mu_R - \alpha_R \cdot \beta_0 \cdot \sigma_R &\geq \mu_S + \alpha_S \cdot \beta_0 \cdot \sigma_S \\ \mu_R (1 - \alpha_R \cdot \beta_0 \cdot v_R) &\geq \mu_S (1 + \alpha_S \cdot \beta_0 \cdot v_S) \end{aligned}$$

Diese Bedingung lässt sich wie folgt abkürzen:

$$r^* \geq s^* \tag{5.21}$$

Sie besagt nichts anderes, als dass der Bemessungswert r* des Widerstandes grösser sein muss als der Bemessungswert s* der Beanspruchung. Diese *Bemessungswerte* sind im allgemeinen Fall die Koordinaten des sog. *Bemessungspunkts*.

Der Ausdruck $(1 - \alpha_R \cdot \beta_0 \cdot v_R)$ ist, wie auch derjenige auf der rechten Seite, im Prinzip ein Sicherheitsfaktor. Er unterscheidet sich allerdings von traditionellen Faktoren durch seinen transparenten Aufbau. Der Ausdruck ist, wie das sein muss, eine Funktion des angestrebten Sicherheitsniveaus β_0, er reagiert auf die Grösse der Standardabweichung σ_X der Variablen X und gewichtet die Einflüsse mittels der sog. Wichtungsfaktoren α_X.

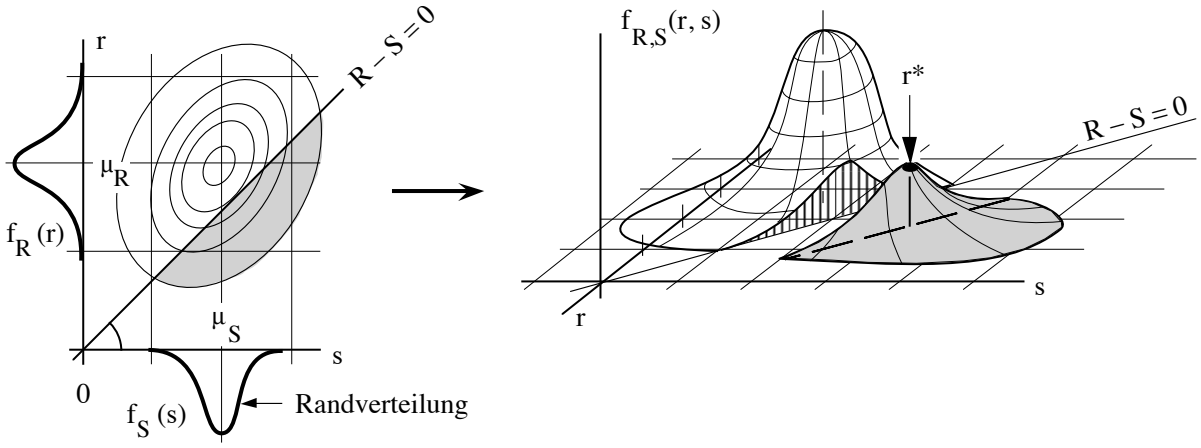
5.34 Darstellung als zweidimensionale Verteilungsdichte

Eine andere Darstellung des soeben diskutierten Sachverhalts zeigt Figur 5/6: Die zweidimensionale Verteilungs-Dichte wird, wie in Kapitel 3.5 gezeigt, als "Hügel" dargestellt. Dessen Volumeninhalt ist 1, die Höhenschichtlinien sind konzentrische Ellipsen.

R und S werden als Randverteilungen über der r- resp. der s-Achse aufgetragen. Die Gleichung G = R – S = 0 trennt den sicheren vom unsicheren

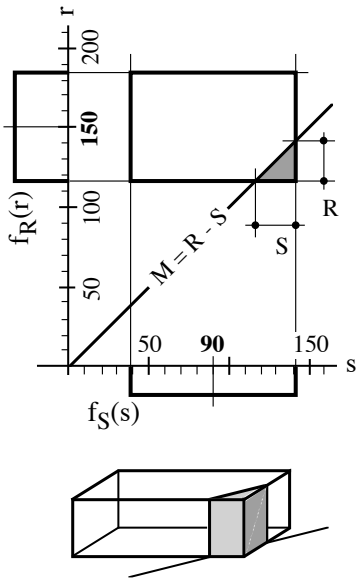
© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Bereich und den Hügel in zwei Volumenteile. Das Volumen des abgeschnittenen Teils entspricht der Versagenswahrscheinlichkeit. Der Bemessungspunkt r* liegt auf dieser Geraden, und zwar dort, wo die Wahrscheinlichkeitsdichte am grössten ist. Wenn Versagen eintritt, dann am ehesten dort.



Figur 5/6

Wir greifen das Zahlenbeispiel von Abschnitt 5.32 nochmals auf, und zwar nun in der eben vorgestellten Darstellung (siehe Figur 5/7). Es handelt sich um Rechtecksverteilungen. Das hat zur Folge, dass die gemeinsame Dichtefunktion kistenförmig ist. Die gemeinsame Verteilungsdichte $f_{X,Y}$ ist konstant im Definitionsbereich. Ihr Wert, d.h. die Höhe der "Kiste", lässt sich leicht ermitteln, da der Volumeninhalt der Dichtefunktion gleich 1 ist.



Figur 5/7

Es ergibt sich:

$$f_{X,Y} = \frac{1}{(141.9 - 38.1)} \cdot \frac{1}{(184.6 - 115.4)} = \frac{1}{7183} = 139 \cdot 10^{-6}$$

Das durch die Versagensbedingung $R - S \leq 0$ abgeschnittene, der Versagenswahrscheinlichkeit p_f entsprechende Teilvolumen lässt sich dann einfach berechnen. Es entspricht der abgeschnittenen Dreiecks-Fläche, multipliziert mit $f_{X,Y}$:

$$p_f = V = \Delta S \cdot \Delta R \cdot 0.5 \cdot f_{X,Y} =$$

$$= (141.9 - 115.4)^2 \cdot 139 \cdot 10^{-6} \cdot 0.5 = 0.0488$$

Dieses Ergebnis haben wir auch unter Kap. 5.32 schon gefunden.

5.35 Die Methode von *Hasofer* und *Lind*

Einen entscheidenden methodischen Fortschritt erzielten der Australier Hasofer zusammen mit dem Kanadier Lind 1974 mit der Transformation der Grenzzustandsfunktion in den sog. Standardraum. Sie lösten damit das sog. Invarianzproblem (Ditlevsen, 1973), das darin bestand, dass das Ergebnis der Berechnung nach Basler/Cornell von der Schreibweise der Grenzzustandsfunktion abhängt.

Das Verfahren nach Hasofer/Lind in den noch zu zeigenden Erweiterungen ist in diesem Sinne invariant und bildet heute die anerkannte Grundlage für die Zuverlässigkeitstheorie im Bauwesen.

Die Zufallsvariablen R und S werden *standardisiert* auf U_1 und U_2:

$$U_1 = \frac{R - \mu_R}{\sigma_R} \quad \rightarrow \quad R = U_1 \cdot \sigma_R + \mu_R$$

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

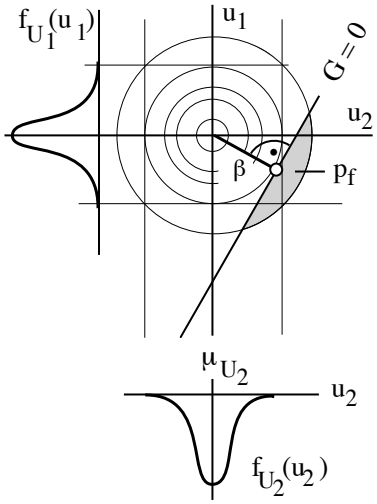
$$U_2 = \frac{S-\mu_S}{\sigma_S} \quad \rightarrow \quad S = U_2 \cdot \sigma_S + \mu_S \tag{5.22}$$

Die neuen Variablen haben damit den Mittelwert 0 und die Standardabweichung 1. Die grösste Erhebung des im vorangehenden Abschnitt besprochenen Wahrscheinlichkeitshügels fällt dann mit dem Koordinatenursprung zusammen. Dieser ist, da nun beide Randverteilungen (0,1)-verteilt sind, rotationssymmetrisch, womit alle Höhenkurven (Orte gleicher Wahrscheinlichkeit) konzentrische Kreise sind.

Allerdings geht die Gerade G = R – S im neuen Koordinatensystem nicht mehr durch den Ursprung. Sie hat vielmehr unter Anwendung der oben angegebenen Transformation die folgende Form:

$$\begin{aligned} G = R - S &= (U_1 \cdot \sigma_R + \mu_R) - (U_2 \cdot \sigma_S + \mu_S) &= 0 \\ &= (\mu_R - \mu_S) + U_1 \cdot \sigma_R - U_2 \cdot \sigma_S &= 0 \end{aligned}$$

Der Bemessungspunkt [u_1*, u_2*] liegt nach wie vor auf dem höchsten Punkt über der Geraden G. Der Abstand vom Bemessungspunkt zum Koordinatenursprung 0 (im Grundriss; Figur 5/8) ist wegen der Rotationssymmetrie des Hügels gleich dem Abstand G0 selbst. Die Senkrechte auf G durch 0 geht durch den Bemessungspunkt P. Und dieser Abstand P0 hat die Länge β. Je weiter die Gerade vom Ursprung entfernt ist, desto grösser ist β und desto kleiner das abgetrennte Volumen und damit p_f.



Figur 5/8

Ein kleines Beispiel soll den Ablauf verdeutlichen. Wir übernehmen die Grenzzustandsfunktion G = R – S und auch die Parameter der Variablen R und S. Die Transformation bringt das folgende:

$$U_1 = \frac{R-150}{20} \quad \rightarrow \quad R = 20 \cdot U_1 + 150$$

$$U_2 = \frac{S-90}{30} \quad \rightarrow \quad S = 30 \cdot U_2 + 90$$

Eingesetzt in die Grenzzustandsfunktion G ergibt sich

$$G = R - S = (20 \cdot U_1 + 150) - (30 \cdot U_2 - 90)$$

womit die Gerade

$$20 \cdot U_1 - 30 \cdot U_2 + 60 = 0$$

gegeben ist. Den Abstand dieser Geraden vom Ursprung kann man mit der Hesse'schen Normalform rasch finden. Es gilt

$$A \cdot x + B \cdot y + C = 0$$

woraus sich durch Koeffizientenvergleich

$$A = +20$$
$$B = -30$$
$$C = +60$$

ergibt und schliesslich:

$$\cos\alpha_1 = \frac{A}{\sqrt{A^2+B^2}} = \frac{-20}{\sqrt{20^2+30^2}} = +0.555 \rightarrow \alpha_1 \text{ gegenüber } u_1$$

$$\cos\alpha_2 = \frac{B}{\sqrt{A^2+B^2}} = \frac{-30}{\sqrt{20^2+30^2}} = -0.832 \rightarrow \alpha_2 \text{ gegenüber } u_2$$

$$h = \beta = \frac{-C}{\sqrt{A^2+B^2}} = \frac{-60}{\sqrt{20^2+30^2}} = -1.66$$

Daraus ergibt sich die Versagenswahrscheinlichkeit p_f wie weiter vorne zu

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

$$p_f = \Phi\,(-1.66) = 0.049 = 4.9\%$$

Dieser Wert ist richtig im Falle normalverteilter Variablen R und S bzw. U_1 und U_2 und sonst eine gute Näherung.

Die Koordinaten des Bemessungspunktes ergeben sich zu

$$u_1^* = \beta \cdot \alpha_1 = -1.66 \cdot 0.555 = -0.924$$
$$u_2^* = \beta \cdot \alpha_2 = -1.66 \cdot (-0.832) = 1.384$$

oder im r-s-Koordinatensystem:

$$r^* = 20 \cdot u_1^* + 150 = 20 \cdot (-0.924) + 150 = 131.5$$
$$s^* = 30 \cdot u_2^* + 90 = 30 \cdot 1.384 + 90 = 131.5$$

Alle diese Zahlenwerte haben wir schon im vorhergehenden Abschnitt gesehen. Insofern scheint das Verfahren nur komplizierter zu sein und keine Vorteile zu bringen. Diese Einschätzung ist voreilig. Das Verfahren erlaubt nämlich die Erweiterung auf beliebige Grenzzustandsfunktionen und beliebige Verteilungen.

5.4 Erweiterungen

Das bisher Dargestellte ist (mit Ausnahme der Monte-Carlo-Methode) streng gültig nur für lineare Grenzzustandsfunktionen und für unabhängige, normalverteilte X_i. In allen übrigen Fällen sind die Ergebnisse – oft allerdings sehr gute – Näherungen.

Die hier zu diskutierenden Erweiterungen betreffen den Übergang von

- zwei Variablen auf *viele* Variablen
- linearen Funktionen auf *nichtlineare* Funktionen
- normalverteilten Variablen auf *beliebige* Verteilungen

Der Reihe nach sollen in den folgenden Abschnitten diese Erweiterungen vorgestellt werden.

5.41 Lineare Grenzzustandsfunktion mehrerer Variablen

Eine lineare Grenzzustandsfunktion mit mehreren Variablen lautet in allgemeiner Schreibweise:

$$G = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot X_i \qquad X_i\colon \mu_i, \sigma_i \tag{5.23}$$

Eine Transformation in den u-Raum ist nicht nötig, jedoch computertechnisch oft von Vorteil. Der Algorithmus ist eigentlich eine einfache Erweiterung des zweidimensionalen Falls (siehe 5.33) und verläuft wie folgt (ohne Beweis):

$$\mu_G = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot \mu_i \tag{5.24}$$

$$\sigma_G = \left[\sum_{i=1}^{n} (a_i \cdot \sigma_i)^2\right]^{1/2} \tag{5.25}$$

woraus

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} \qquad \rightarrow p_f = \Phi\,(-\beta) \tag{5.26}$$

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

$$\alpha_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_G} \cdot a_i \qquad (\sum_{i=1}^{n} \alpha_i^2 = 1) \tag{5.27}$$

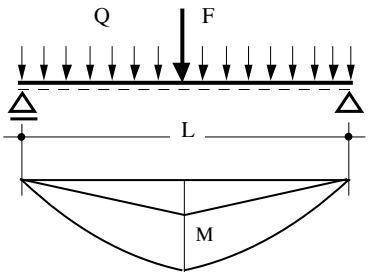
$$x_i^* = \mu_i - \alpha_i \cdot \beta \cdot \sigma_i \tag{5.28}$$

Ein Beispiel für eine lineare Grenzzustandsfunktion liefert die Berechnung der Wahrscheinlichkeit des Biegeversagens eines einfachen Balkens unter Gleichlast Q (hier gross geschrieben, da als Bemessungsvariable aufgefasst) und Einzellast F in Balkenmitte. Die Sicherheitsbedingung lautet:

$$M = F \cdot \frac{L}{4} + Q \cdot \frac{L^2}{8} \leq M_R$$

Der Biegewiderstand M_R in Balkenmitte wird der einfacheren Schreibweise zuliebe mit R bezeichnet. Die Grenzzustandsgleichung ist:

$$G(X_i) = G(R,F,Q) = R - F \cdot \frac{L}{4} - Q \cdot \frac{L^2}{8} = 0$$



Figur 5/9

G ist nicht mehr eine Gerade, sondern stellt eine Ebene dar. L sei deterministisch zu L = 20 festgelegt. Als Dimensionen wählen wir kN, m, kNm, ohne das immer mitzuschreiben:

X	X_{nom}	μ_X	σ_X	v_X
R	2100	2500	250	0.10
F	250	200	50	0.25
Q	10	10	1	0.10

Die erste Spalte enthält nominelle Werte, wie man sie z.B. einer Norm entnehmen könnte. Sie könnten definiert sein als 5%-Fraktile für R, als 16%-Fraktile für F und als festgelegte Nutzlast ohne statistische Hintergrundinformation für Q. Damit ergäben sich die traditionellen Sicherheitskennzahlen (siehe Abschnitt 5.31), der Nennsicherheitsfaktor und der zentrale Sicherheitsfaktor zu:

$$\gamma_N = \frac{2100}{10 \cdot \frac{20^2}{8} + 250 \cdot \frac{20}{4}} = 1.20$$

$$\gamma_Z = \frac{2500}{10 \cdot \frac{20^2}{8} + 200 \cdot \frac{20}{4}} = 1.67$$

Die Berechnung des Sicherheitsindex und der Versagenswahrscheinlichkeit ist mit dem vorstehenden Algorithmus recht einfach:

$$G = R - F \cdot \frac{20}{4} - Q \cdot \frac{400}{8} = 0$$

$$G = 1 \cdot R - 5 \cdot F - 50 \cdot Q = 0$$

$$\mu_G = 1 \cdot 2500 - 5 \cdot 200 - 50 \cdot 10 = 1000$$

$$\sigma_G^2 = [(1 \cdot 250)^2 + (-5 \cdot 50)^2 + (-50 \cdot 1)^2] = 127.5 \cdot 10^3$$

$$\sigma_G = 357.1$$

$$\beta = \frac{1000}{357.1} = 2.8 \rightarrow p_f = \Phi(-2.8) = 0.0025 = 2.5\,‰$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit ist mit 2.5 ‰ für Sicherheitsprobleme sicher zu gross. Auf diese Tatsache weisen bereits die traditionellen Sicherheitsfaktoren hin.

Die Wichtungsfaktoren betragen:

$$\alpha_R = \frac{250}{357.1}(+1) = +0.70$$

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

$$\alpha_F = \frac{50}{357.1}(-5) \quad = -0.70$$
$$\alpha_Q = \frac{1}{357.1}(-50) \quad = -0.14$$

Wie man erkennt, tragen R und F in gleichem Masse zur Versagenswahrscheinlichkeit bei, während Q in diesem Sinne fast vernachlässigbar ist. Zu beachten ist auch das Vorzeichen der α-Werte: positiv sind diejenigen α, deren Variablen sichernd, also positiv wirken, während das negative Vorzeichen auf "gefährliche" Variablen hinweist.

Die Bemessungswerte der drei Variablen ergeben sich zu:

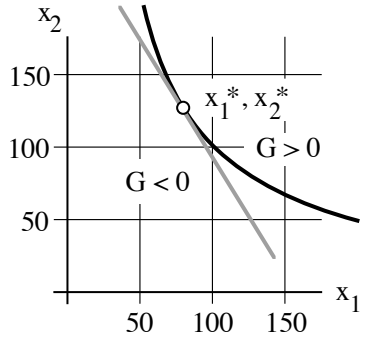
$$r^* = 2500 - 0.70 \cdot 2.8 \cdot 250 = 2010$$
$$f^* = 200 - (-0.70) \cdot 2.8 \cdot 50 = 298$$
$$q^* = 10 - (-0.14) \cdot 2.8 \cdot 1 = 10.4$$

Die Ergebnisse sind übrigens genau für normalverteilte Zufallsvariablen. Für anders verteilte Variablen sind es recht gute Näherungen.

5.42 Nichtlineare Grenzzustandsfunktion

Bei der Erweiterung des Verfahrens auf nichtlineare Grenzzustandsfunktionen orientieren wir uns an folgendem Beispiel:

$$G = X_1 \cdot X_2 - 10'000$$



Figur 5/10

Im interessierenden Bereich – d.h. im Bereich um den Bemessungspunkt herum – wird G linearisiert (siehe Figur 5/10), indem die gegebene Funktion in eine *Taylorreihe* entwickelt wird (siehe auch Kap. 3.61). Wir berücksichtigen nur die linearen Glieder, vernachlässigen also die höheren und gemischten Glieder:

$$G \approx G(x_i^*) + \sum_{i=1}^{n}(X_i - x_i^*) \cdot \frac{\partial G}{\partial X_i}\Big|_* + \ldots$$
$$\approx G(x_i^*) - \sum_{i=1}^{n} x_i^* \cdot \frac{\partial G}{\partial X_i}\Big|_* + \sum_{i=1}^{n} X_i \cdot \frac{\partial G}{\partial X_i}\Big|_* \qquad (5.29)$$

Die ersten beiden Terme entsprechen a_0, die partiellen Ableitungen am Bemessungspunkt den a_i in Gleichung (5.23). Die so linearisierte Grenzzustandsfunktion ist in Figur 5/10 als Tangente im Bemessungspunkt zu sehen. Die "*" in Formel (5.29) machen darauf aufmerksam, dass die partiellen Ableitungen am Bemessungspunkt einzuführen sind. Damit ist das Verfahren auf das unter Abschnitt 5.41 Dargestellte zurückgeführt. Es ist lediglich zu beachten, dass die Koordinaten x_i^* des Bemessungspunkts zunächst nicht bekannt sind und man sich in mehreren Iterationsschritten an diese erst herantasten muss. Der iterative Rechengang ist der folgende:

1) Gegeben ist $G(X_1, X_2 \ldots X_n)$
2) Approximation durch $G = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot X_i$
3) Ermittle $a_i = \frac{\partial G}{\partial X_i}\Big|_*$ und $a_0 = G(x_i^*) - \sum_{i=1}^{n} a_i \cdot x_i^*$
4) Schätze x_i^* (z.B. starten mit μ_i)
5) Berechne $\mu_G =$, $\sigma_G =$ | Gemäss Formeln (5.24) bis (5.28)

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

β =
α_i =
x_i^* =

für lineare Grenzzustandsfunktion

6) Vergleiche x_i^* mit den Werten unter 4):

- ist die Näherung gut genug → 7),
- wenn nicht befriedigend → 4) mit den zuletzt ermittelten x_i^*

7) Berechne $p_f = \Phi(-\beta)$.

Die Ergebnisse sind natürlich Näherungen, auch im Falle normalverteilter Variablen, da die Grenzzustandsfunktion nichtlinear ist.

Das in Figur 5/10 dargestellte Beispiel zeigt den Weg mit den Variablen $X_1 = N(150; 20)$ und $X_2 = N(90; 30)$.

1) Gegeben ist $G = X_1 \cdot X_2 - 10'000$

2) Approximation durch $G = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2$

3) $a_1 = \frac{\partial G}{\partial X_1}\Big|_* = X_2|_* = x_2^*$

$a_2 = \frac{\partial G}{\partial X_2}\Big|_* = X_1|_* = x_1^*$

$a_0 = x_1^* \cdot x_2^* - 10'000 - 2 \cdot x_1^* \cdot x_2^* = -10'000 - x_1^* \cdot x_2^*$

$G \approx -10'000 - x_1^* \cdot x_2^* + x_2^* \cdot X_1 + x_1^* \cdot X_2$

4) 1. Schätzung z.B. mit den Mittelwerten:

$x_1^* = 150$

$x_2^* = 90$

5) $\mu_G = -10'000 - 13'500 + 90 \cdot 150 + 150 \cdot 90 = 3500$

$\sigma_G = \sqrt{(90 \cdot 20)^2 + (150 \cdot 30)^2} = 4847 \rightarrow \beta = \frac{3500}{4847} = 0.722$

$\alpha_1 = \frac{20}{4847} \cdot 90 = 0.371$

$\alpha_2 = \frac{30}{4847} \cdot 150 = 0.928$

$x_1^* = 150 - 0.371 \cdot 0.722 \cdot 20 = 144.6$

$x_2^* = 90 - 0.928 \cdot 0.722 \cdot 30 = 69.9$

Die Unterschiede zu den Ausgangsgrössen sind noch beträchtlich, und ein weiterer Durchgang mit den soeben berechneten Werten als Ausgangsgrössen scheint nötig. Dieser zweite Durchgang sei dem Leser überlassen. Das Endergebnis lautet:

$\beta = 0.744$

$x_1^* = 145.5$

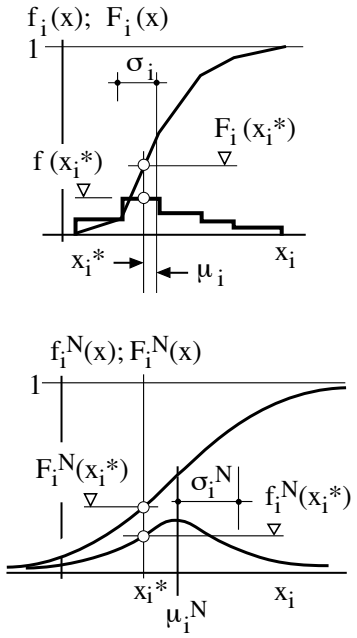
$x_2^* = 68.7$

Aus β lässt sich dann (offensichtlich unter der Annahme, dass G normalverteilt sei) die Versagenswahrscheinlichkeit entsprechend 7) ermitteln zu

$$p_f = \Phi(-\beta) = \Phi(-0.744) = 0.23$$

Beim vorstehenden Verfahren wird das *erste* Glied der Taylor-Reihe berücksichtigt. Die Verteilungen der Zufallsvariablen werden durch Mittelwert und Standardabweichung, also durch das erste und das *zweite* Moment der Verteilungen eingegeben. Man spricht deshalb von der "***First*** **O**rder ***S****econd* **M**oment" oder kurz, von der *FOSM*-Methode.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html



Figur 5/11

5.43 Tail Approximation

Die dritte und letzte hier diskutierte Erweiterung ist schliesslich der Übergang von der Normalverteilung zu beliebigen mathematisch definierten Verteilungen oder Histogrammen (Fiessler et al., 1976; Rackwitz, 1977). Diese Methode beruht auf der Idee, die beliebigen Verteilungen durch im Bemessungspunkt äquivalente Normalverteilungen zu ersetzen. Diese Äquivalenz besteht dann, wenn eine solche äquivalente Normalverteilung im Bemessungspunkt x_i^* sowohl $f_i^N(x_i^*) = f_i(x_i)$ als auch $F_i^N(x_i^*) = F_i(x_i)$ zugleich erfüllt. Nicht gleich sind hingegen Mittelwert und Standardabweichung, also $\mu_i^N \neq \mu_i$ und $\sigma_i^N \neq \sigma_i$. Diese beiden Parameter der äquivalenten Normalverteilung müssen zuerst bestimmt werden.

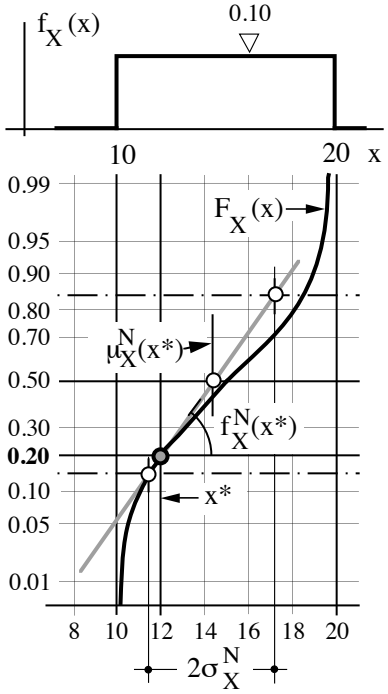
Figur 5/12 zeigt am Beispiel einer Rechteckverteilung, dass es um den "Schwanz" der Verteilung geht, der "stimmen", also möglichst gut durch die Normalverteilung approximiert werden soll. Diese Approximation wird entsprechend *Tail Approximation* genannt.

Es ist klar, dass für jeden neuen Wert x* im Verlaufe der Iteration gemäss Abschnitt 5.42 für jede Variable eine neue äquivalente Normalverteilung bestimmt werden muss. Dieser Aufwand ist bei vielen Variablen nur mit dem Computer zu bewerkstelligen. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer "***First*** **O**rder ***R****eliability* ***M****ethod*" oder kurz, von *FORM*.

Die Parameter $\mu_i^N(x_i^*)$ und $\sigma_i^N(x_i^*)$ der äquivalenten Normalverteilung erhält man analytisch aus folgenden Formeln:

$$\mu_i^N(x_i^*) = x_i^* - \sigma_i^N(x_i^*) \cdot \Phi^{-1}[F_i(x_i^*)] \tag{5.30}$$

$$\sigma_i^N(x_i^*) = \frac{1}{f_i(x_i^*)} \cdot \varphi\{\Phi^{-1}[F_i(x_i^*)]\} \tag{5.31}$$



Figur 5/12

Die grafische Ermittlung der Parameter der äquivalenten Normalverteilung stützt sich auf das Normal-Papier (siehe Kapitel 3.33). Die gegebene Verteilung $\{F_i(x_i)\}$ wird in dieses Papier eingetragen (Figur 5/12). An diese gekrümmte Kurve wird im Bemessungspunkt x_i^* die Tangente gelegt. Eine solche Tangente hat im Punkt x_i^* offensichtlich denselben Funktionswert und die gleiche Steigung wie die der gegebenen Verteilung entsprechende Kurve. Da es sich bei der Tangente um eine Gerade auf Normal-Papier handelt, entspricht diese gerade der gesuchten Normalverteilung. Den Mittelwert der äquivalenten Normalverteilung $\mu_i^N(x_i^*)$ kann man bei 0.5 sofort ablesen. Die zugehörige Standardabweichung $\sigma_i^N(x_i^*)$ bestimmt man, indem man die Werte bei 0.159 und 0.841 abliest und die Differenz halbiert.

Beispielsweise ergibt sich für die in Figur 5/12 dargestellte Rechteckverteilung R(10;20) bei z.B. x*= 12 ohne weiteres f(x*) = 0.1 und F(x*) = 0.2. Die Standardabweichung dieser Rechteckverteilung beträgt gemäss Anhang 10.1:

$$\sigma_X = \frac{20-10}{\sqrt{12}} = 2.89$$

In einer Tabelle für Standard-Normalverteilungen (z.B. Anhang 10.2) findet man für $\Phi^{-1}[0.2] = -0.842$. Direkt daneben steht bei $\varphi(-0.842)$ der Wert 0.2798. Damit ergeben sich letztlich die Parameter der äquivalenten Normalverteilung zu:

$$\sigma^N(x^*) = \frac{1}{0.10} \cdot 0.2798 = 2.798$$

$$\mu^N(x^*) = 12 - 2.8 \cdot (-0.842) = 14.36$$

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

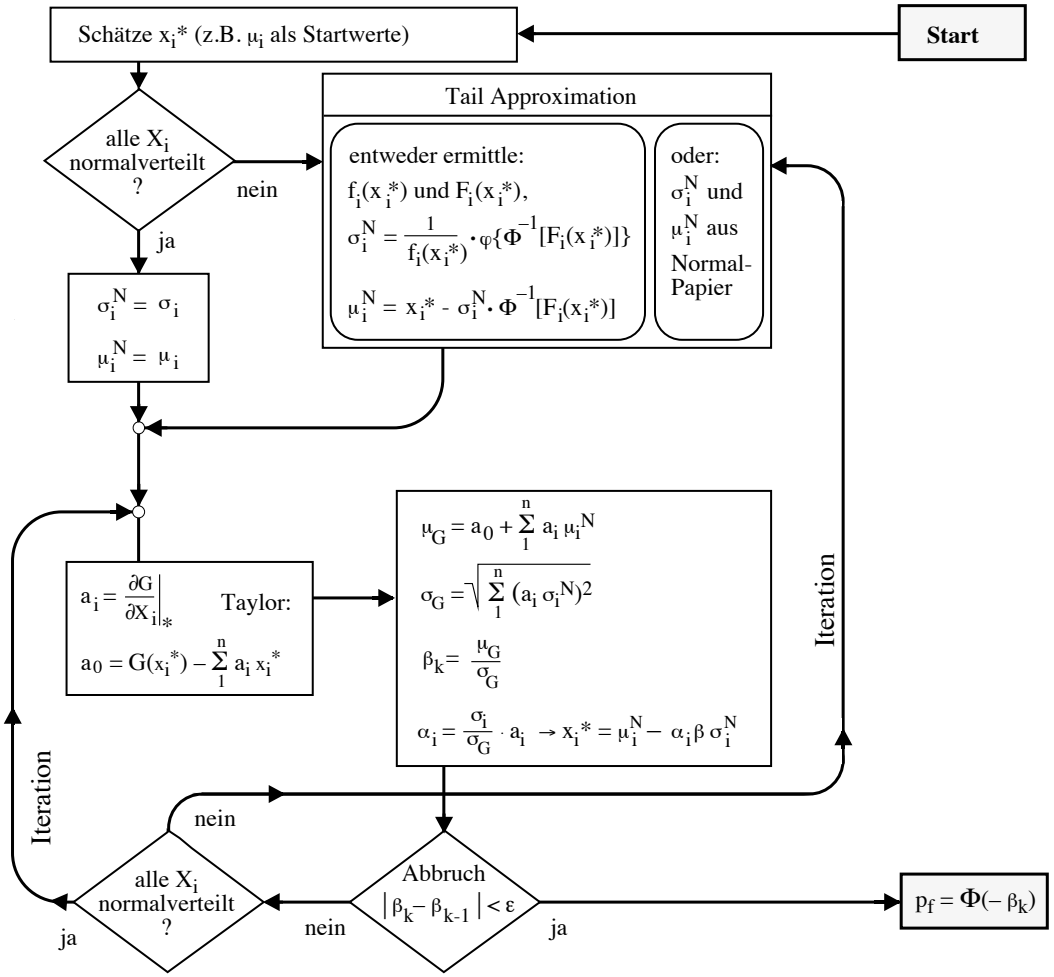
Das graphische Verfahren liefert, natürlich im Rahmen der Ablesegenauigkeit, die gleichen Werte.

5.44 Zusammenfassung

Das vollständige Rechenschema für alle vorstehend diskutierten Erweiterungen ist in Figur 5/13 dargestellt.

Diese Figur zeigt im wesentlichen die einzelnen Stationen der Berechnung, wo der Rechnende (oder der Computer) bei Iterationen verweilen muss und wo demnach grössere Rechenzeiten verursacht werden. Insbesondere wird deutlich, dass der Durchlauf für normalverteilte Variablen und lineare Grenzzustandsfunktionen rasch ist. Nichtlineare Funktionen führen über die in jedem Iterationsschritt neu zu berechnende Taylor-Approximation zu *einer* oft zu durchlaufenden Iterationsschleife.

Die bei nicht normalverteilten Variablen nötige Tail Approximation bringt schliesslich eine *zweite* Schleife in den Rechengang hinein und vergrössert so den Rechenaufwand noch einmal erheblich.



Figur 5/13

Das Abbruchkriterium für die Iterationen ist nicht notgedrungen über den Vergleich von β-Werten zu suchen. Man kann auch über den Vergleich der x_i^*-Werte oder auf der Basis anderer geeigneter Grössen den Stand der Iteration prüfen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

5.45 Unterstützung durch Computerprogramme

Es ist offensichtlich, dass Berechnungen vom Typus des Vorstehenden nicht mehr von Hand durchgeführt werden können. Es gibt deshalb Computer-Programme, z.B. das sehr leistungsfähige Programmpaket STRUREL (RCP, 1993) und das am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich von M. Petschacher entwickelte Programm VaP (**Va**riablen **P**rozessor). Dieses wurde 1990 als MacVaP für den Macintosh, 1993 unter dem Betriebssystem NeXTSTEP als NeXTVaP für den PC entwickelt (Petschacher, 1993). Es läuft seit 1995 als VaP auch unter den verschiedensten Versionen von Windows. Besonderes Gewicht wurde bei der Entwicklung auf Interaktivität und Benutzerfreundlichkeit gelegt.

Die genannten Programmpakete STRUREL und VaP sind heute in weiterentwickelten Versionen auf dem Markt.

Diese Programme nehmen praktisch jede Grenzzustandsfunktion an, gestatten die gleichzeitige Verwaltung mehrerer Funktionen und beherrschen alle zuvor beschriebenen Rechenverfahren und weitere einschlägige Methoden.

Eine Kurzbeschreibung des Programms VaP sowie der mittlerweile kostenlos erhältlichen Version FreeVap findet sich im Anhang unter 10.5.

5.46 Bemerkungen zu korrelierten Variablen

Eine allfällige Korrelation zwischen den Variablen X_i und X_j lässt sich am zugehörigen Korrelationskoeffizienten $r_{i,j}$ bzw. $\rho_{i,j}$ ablesen (siehe Abschnitt 3.52). Solche Korrelationen können die Versagenswahrscheinlichkeit p_f sowohl vergrössern als auch verkleinern.

Positiv korrelierend kann z.B. der Polier auf einer Baustelle wirken. Ist die Baustelle nicht gut geführt, werden wahrscheinlich der Beton schlecht, die obenliegenden Stähle heruntergetreten und erst noch falsch verlegt sein. Alle diese Nachlässigkeiten wirken in die gleiche Richtung und führen zu grösseren Versagenswahrscheinlichkeiten. Natürlich gilt auch das Gegenteil. Auch ein gutes oder schlechtes Arbeitsklima in einem Ingenieurbüro wirkt in diesem Sinn korrelationserzeugend.

Negativ korreliert sind z.B. Schnee und Nutzlast auf einer Brücke: falls viel Schnee liegt, ist eine grosse Nutzlast kaum möglich. Die Korrelation wirkt verkleinernd auf die Versagenswahrscheinlichkeiten.

In manchen Fällen bestehen Abhängigkeiten, die sich aber mehr oder weniger ausgleichen: die Querschnittsabmessungen kleiner Walzprofile haben grössere Variationskoeffizienten, die Festigkeiten sind – des intensiveren Walzprozesses wegen – jedoch auch grösser. Die Einflüsse heben sich gegenseitig mehr oder weniger auf.

Es ist grundsätzlich kein Problem, die vorne diskutierten Berechnungsverfahren so zu erweitern, dass sie imstande sind, auch Korrelationen zu verarbeiten. Mathematisch gesehen geht es darum, das $(X_i;X_j)$-Koordinatensystem so zu drehen, dass der Korrelationskoeffizient zwischen diesen beiden Variablen verschwindet (siehe hierzu auch Figur 5/6). Bei vielen Variablen wird das, sogar für einen Computer, zeitaufwendig.

Wir verzichten hier darauf, Korrelationen zwischen Variablen zu berücksichtigen. Das hat verschiedene Gründe:

- Die Eingabe wird insbesondere auch für den Benützer umständlicher, da er gezwungen ist, neben Grenzzustandsbedingung und Variablen mit al-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

len Parametern auch noch eine Korrelationsmatrix einzugeben, die bei vielen Variablen recht umfangreich werden kann.

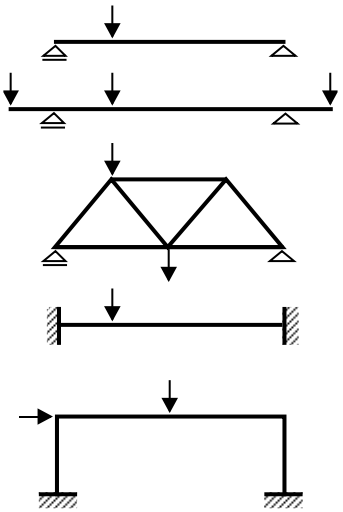
- Die Korrelationskoeffizienten sind oft nicht bekannt und schwierig zu schätzen. Es würde deshalb darauf hinauslaufen, dass der Benützer Korrelationskoeffizienten nach Gutdünken ins Programm füttert und sich über die Auswirkung keine Gedanken macht.
- Im besten Fall wird der Benützer eine Korrelationsmatrix eingeben, die im wesentlichen aus Einsen und Nullen besteht: plus Eins dort, wo er volle positive, minus Eins dort, wo er volle negative, und Null dort, wo er keine Korrelation vermutet.

Gerade das letztere kann man jedoch einfacher haben, indem man die Grenzzustandsgleichung entsprechend anpasst und den maximal möglichen Einfluss von allfälligen Korrelationen durch entsprechende Regressionsgeraden zwischen den Variablen in mehreren Durchläufen austestet. Man kann dann gleich auch noch allfällig vorhandene nichtlineare Regressionen berücksichtigen. Die Ergebnisse müssen dann natürlich verglichen, interpretiert und kommentiert werden. Dies sei hier empfohlen.

Will man diese hier sehr bewusst eingeführte Beschränkung fallenlassen, muss man sich mit der Literatur auseinandersetzen (siehe z.B. Thoft-Christensen/Baker, 1982) oder geeignete Programme einsetzen, wie z.B. VaP in der kommerziellen Version.

5.5 Elementares zur Zuverlässigkeit von Systemen

Die Versagenswahrscheinlichkeit p_f, zu der in den letzten Abschnitten Berechnungsverfahren vorgestellt worden sind, charakterisiert in der Regel lediglich die Zuverlässigkeit eines *Elements* eines ganzen *Systems*.



Figur 5/14

Jedes System, z.B. ein Tragwerk, hat in der Regel viele Elemente, deren vereinzeltes oder kombiniertes Versagen zum Einsturz führen kann. Ein einfacher Balken kann zum Beispiel auf Biegung versagen, oder auf Schub oder durch Bruch im Bereich der Auflagerzone. Bei statisch unbestimmten Systemen führen in der Regel erst Kombinationen von versagenden Elementen zum Versagen des Systems.

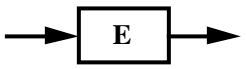
Was hier für aus Elementen aufgebaute Tragsysteme steht, gilt auch für andere Systeme, für Verkehrssysteme, Wasserversorgungssysteme, logische Folgen von Abläufen, aber auch für Organisationsstrukturen, in denen der grundsätzlich fehlbare Mensch beispielsweise die Rolle von unzuverlässigen Elementen spielt. Es ist deshalb nötig, wenigstens einen kurzen Blick auf Elementares zur Zuverlässigkeit von Systemen zu werfen.

5.51 Definitionen

In der graphischen Darstellung von Systemen werden Elemente mit Kästchen dargestellt, die mit Linien zu Systemen verknüpft werden. Input und Output sind mit Pfeilen markiert. Für ein einzelnes Element E gilt bezüglich Zuverlässigkeit bzw. Versagenswahrscheinlichkeit:

$$r = 1 - p_f \quad \text{bzw.}$$

$$p_f = 1 - r \qquad (5.32$$



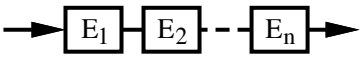
Figur 5/15

Für die Zuverlässigkeit eines ganzen Systems wird der Grossbuchstabe R, für die Versagenswahrscheinlichkeit entsprechend P_f verwendet.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Es ist zu beachten, dass die im folgenden dargestellten Diagramme keine physikalischen Schaltungen sind. Es handelt sich vielmehr um *Funktionsdiagramme*. Als Beispiele dienen die statischen Systeme in Figur (5/14).

5.52 Serie-Systeme



Figur 5/16

Man spricht von Serie-Systemen, wenn die einzelnen Elemente in ihrer Funktion hintereinander stehen (siehe Figur 5/16). Das Ausfallen eines einzigen Elementes hat den Ausfall des Gesamtsystems zur Folge.

Als einfaches Beispiel sei eine aus Gliedern zusammengesetzte Kette genannt. Wenn das schwächste Glied reisst, versagt die Kette. Das unzuverlässigste Glied bestimmt die Zuverlässigkeit der Kette.

Statisch bestimmte Systeme sind Serie-Systeme. Beim Ausfall *eines* Auflagers oder *eines* Stabes eines statisch bestimmten Gelenkfachwerks beispielsweise fällt das ganze Tragsystem zusammen.

Die Zuverlässigkeit eines Serie-Systems ist gegeben durch die Wahrscheinlichkeit, dass weder E_1 noch E_i noch E_n, dass also keines seiner Elemente versagt. Diese Wahrscheinlichkeit ist – statistische Unabhängigkeit der beteiligten Elemente vorausgesetzt – gegeben durch:

$$R = (1 - p_{f1}) \cdot (1 - p_{f2}) \cdot \ldots \cdot (1 - p_{fn}) = \prod_{i=1}^{n} (1 - p_{fi}) \tag{5.33}$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit P_f des Serie-Systems ergibt sich als Komplement der Zuverlässigkeit des Systems, beträgt also

$$P_f = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - p_{fi}) \approx \sum_{i=1}^{n} p_{fi} \tag{5.34}$$

Die Näherung über die Summe gilt für kleine Versagenswahrscheinlichkeiten p_{fi}. Die Versagenswahrscheinlichkeit P_f eines Serie-Systems ist damit offensichtlich immer grösser als diejenige seines unzuverlässigsten Elements. Je mehr Elemente, desto grösser ist im übrigen die Versagenswahrscheinlichkeit.

Hat ein Gelenkfachwerk z.B. 7 Stäbe (siehe Figur 5/15) mit je einer Versagenswahrscheinlichkeit von $p_f = 10^{-2}$ und werden keine weiteren Versagensformen in Betracht gezogen, beträgt die Versagenswahrscheinlichkeit des Fachwerks:

$$P_f = 1 - (1 - 10^{-2})^7 = 1 - (0.99)^7 \approx 7\%$$

Wenn für 6 der 7 Stäbe $p_f = 0.01$ gilt, für das siebte jedoch $p_f = 0.1$, beträgt $P_f \approx 15\%$, ist also grösser als die Versagenswahrscheinlichkeit des schwächsten Stabs und etwa in der gleichen Grössenordnung.

Falls alle Elemente eines Serie-Systems *perfekt korreliert,* also z.B. alle aus der gleichen Charge desselben Materials hergestellt sind, gilt:

$$P_f = \max [p_{fi}]. \tag{5.35}$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit P_f eines Serie-Systems liegt damit zwischen den folgenden Grenzen:

$$\max [p_{fi}] \leq P_f \leq 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - p_{fi}) < \sum_{i=1}^{n} p_{fi} \tag{5.36}$$

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Wenn man die Versagenswahrscheinlichkeit eines Serie-Systems – auf der sicheren Seite liegend – einschätzen will, setzt man demnach

$$P_f \approx \sum_{i=1}^{n} p_{fi} \tag{5.37}$$

Dabei ist bei grossen Wahrscheinlichkeiten die Möglichkeit gegeben, dass die Summe grösser als 1 wird. Das widerspricht natürlich der Definition von Wahrscheinlichkeiten. Man wird sich dann auf den genaueren Ausdruck in Gleichung (5.34) besinnen müssen.

Die vorstehenden Formeln können den Anschein erwecken, dass Serie-Systeme wenig zuverlässig seien. Das gilt für die betrachteten Funktionsdiagramme und auch für Tragwerke im speziellen, wäre jedoch im allgemeinen ein Trugschluss. Serie-Systeme sind sehr sinnvoll, wenn man z.B. sicherstellen will, dass in einem Leitungsnetz bei einem Schieberversagen *kein* Wasser kommt. Man wird dann natürlich mehrere Schieber in Serie hintereinanderschalten, um die Zuverlässigkeit des Systems zu erhöhen. Anders wäre es, wenn man den *Durchfluss* sicherstellen will. Dann wäre ein Parallelschalten der Schieber sinnvoll. Man erkennt hieraus, dass es um Funktionsdiagramme geht und nicht um physikalische Schaltungen.

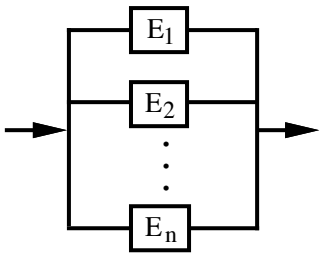
5.53 Parallel-Systeme

Man spricht von Parallel-Systemen, wenn die Elemente des Systems gemäss Figur 5/17 angeordnet sind.

Das Versagen eines solchen Parallel-Systems setzt voraus, dass *sowohl* E_1, als *auch* E_i *als auch* E_n versagen. Erst wenn *alle* Elemente des Systems versagen, versagt das System. Das ist im Sinne der Wahrscheinlichkeitsrechnung:

$$P_f = p_{f1} \cdot p_{f2} \cdot \ldots \cdot p_{fn} = \prod_{i=1}^{n} p_{fi} \tag{5.38}$$

Wiederum ist *statistische Unabhängigkeit* der Elemente vorausgesetzt.



Figur 5/17

Auch dazu ein Zahlenbeispiel: Die Trinkwasserversorgung eines Quartiers sei durch zwei unabhängige Einspeisungen sichergestellt. Jede allein kann das Gebiet mit genügend Wasser versorgen. Die Erfahrung zeigt hingegen, dass eine Zuleitung an z.B. etwa 2 Tagen pro Jahr ausfällt. Die Ausfallwahrscheinlichkeit pro Tag und Zuleitung beträgt somit:

$$p_f = \frac{2}{365} \approx 0.0055$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass eines Tages beide Zuleitungen gleichzeitig ausfallen, beträgt:

$$P_f = p_{f1} \cdot p_{f2} = 0.0055^2 = 3 \cdot 10^{-5}$$

Diese Versagenswahrscheinlichkeit ist also sehr gering. Sie ist allerdings an die Voraussetzung gebunden, dass die beiden Einspeisungen statistisch unabhängig voneinander sind und auch nicht aus einem beiden Einspeisungen gemeinsamen Grund versagen, dass also die Elemente des Systems nicht korreliert sind.

Falls alle Elemente *vollständig korreliert* sind, gilt:

$$P_f = \min\,[p_{fi}] \tag{5.39}$$

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

das heisst, dass die Versagenswahrscheinlichkeit P_f von Parallel-Systemen nicht grösser sein kann als die Versagenswahrscheinlichkeit p_f des zuverlässigsten Elementes des Systems.

Die Versagenswahrscheinlichkeit P_f von Parallel-Systemen liegt deshalb in den folgenden Grenzen:

$$\prod_{i=1}^{n} p_{fi} \leq P_f \leq \min [p_{fi}] \tag{5.40}$$

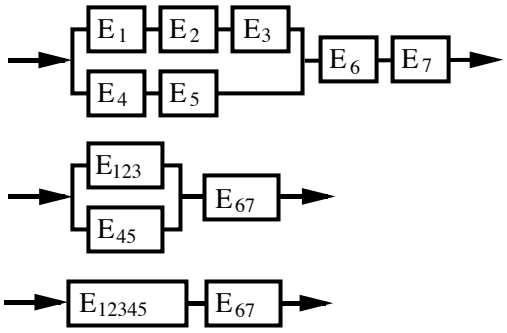
Auf der sicheren Seite dieses Ausdrucks liegt

$$P_f \approx \min [p_{fi}] \tag{5.41}$$

5.54 Gemischte Systeme

In der Regel trifft man in der Praxis auf gemischte Systeme, auf Systeme also, die auf in Serie geschalteten Ästen parallel geschaltete Elemente aufweisen. Ein Beispiel gibt Figur 5/18.

Die Zuverlässigkeit bzw. die Versagenswahrscheinlichkeit gemischter Systeme lässt sich durch schrittweise Reduktion der parallel oder in Serie geschalteten Elemente auf einfachere Systeme nach den vorne angegebenen Regeln ermitteln.



Figur 5/18

Der Leser ist aufgefordert, die Regeln anzuwenden und die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems von Figur 5/18 zu ermitteln. Zur Kontrolle: Wenn die Versagenswahrscheinlichkeiten aller Elemente statistisch voneinander unabhängig sind und mit $p_{fi} = p_f = 0.02$ eingesetzt werden, ergibt sich $P_f = 0.042$, bei vollständiger Korrelation unter Verwendung der auf der sicheren Seite liegenden Formeln der Wert $P_f = 0.08$. Welches ist der die Versagenswahrscheinlichkeit dominierende und damit unzuverlässigste Teil des Systems, der demnach im Hinblick auf Sicherheitsmassnahmen auch die grösste Beachtung verdient?

5.55 Erläuterung der Theorie an Tragwerken

Tragwerke können in der Regel in mehreren Formen versagen. Sie sind deshalb praktisch immer als Serie-Systeme von Elementen aufzufassen, die je einen Versagenspfad charakterisieren. Für statisch bestimmte Systeme gilt das generell, im wesentlichen aber auch für statisch unbestimmte Systeme. Einzelne Versagenspfade statisch unbestimmter Systeme nehmen allerdings den Charakter von Parallel-Systemen an.

Im übrigen sind die den Versagenspfaden entsprechenden Elemente mehr oder weniger korreliert, da sie gemeinsame Eigenschaften, d.h. gleiche Va-

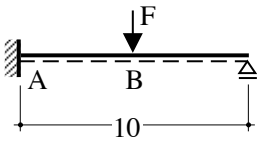
© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

riablen, enthalten. Die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit von Tragwerken ist deshalb nicht immer einfach, und in der Regel lassen sich nur Näherungswerte ermitteln.

Die folgenden Abschnitte sollen einen kleinen Einblick geben in die Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten von Tragsystemen.

a) Ein einführendes Beispiel

Wir betrachten zunächst ein einfach statisch unbestimmtes System, einen einseitig eingespannten Balken unter einer in der Mitte angreifenden Einzellast. Das System wird erst dann versagen, wenn sich bei A und bei B plastische Gelenke entwickelt haben. Wir nehmen an, dass das plastische Moment des Balkens durch die Basisvariable R = N(300,30) gegeben ist. Das plastische Moment bei A ist natürlich sehr stark korreliert mit demjenigen bei B, da es sich ja um den gleichen Stab handelt. Die Kraft F sei durch F = N(100,20) beschrieben.



Figur 5/19

Das Biegemoment bei A ist nach den Regeln der Elastizitätstheorie bei einer Spannweite von 10 m gegeben durch

$$M_A = -1.875 \cdot F$$

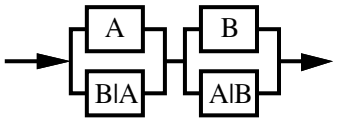
Die Versagensbedingung für das Erreichen des plastischen Moments bei A, das heisst, die Versagensbedingung für das Element A lautet

$$G_A = R - 1.875 \cdot F < 0$$

Die zugehörige Versagenswahrscheinlichkeit des Elements A beträgt dann, berechnet mit VaP oder mit Formel (5.10)

$$p_{fA} = 9.575 \cdot 10^{-3}$$

Das System selbst versagt allerdings erst dann, wenn – gegeben Versagen des Elements A – auch noch das Element B versagt. Die Elemente A und B sind demnach parallelgeschaltet, wie das die linke Seite von Figur 5/20 zeigt. Es wäre deshalb auch noch diese – bedingte – Versagenswahrscheinlichkeit $p_{fB|A}$ des Elements B zu ermitteln.



Figur 5/20

Das entsprechende Biegemoment bei B beträgt mit $M_A = -R$, wie man leicht nachprüfen kann

$$M_{B|A} = 2.5 \cdot F - 0.5 \cdot R$$

Die zugehörige Versagensbedingung lautet unter Beachtung korrekter Vorzeichen

$$G_{B|A} = R - 2.5 \cdot F + 0.5 \cdot R < 0$$

Hieraus lässt sich die zugehörige Versagenswahrscheinlichkeit des Elements B, gegeben A habe versagt, zu

$$p_{fB|A} = 1.474 \cdot 10^{-3}$$

berechnen. Die Versagenswahrscheinlichkeit eines Systems mit parallelgeschalteten Elementen ist gemäss Formel (5/41) nicht grösser als diejenige des zuverlässigsten Elements des Systems, also hier

$$p_f(A) = 1.474 \cdot 10^{-3}$$

worin (A) den Versagenspfad über das Element A kennzeichnen soll.

Der geschilderte Versagenspfad ist einer der beiden möglichen Pfade. Der andere geht von einem Versagen von Element B aus und untersucht dann in der Folge die Wahrscheinlichkeit des Versagens von A, gegeben B habe

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

versagt. Das entspricht der rechten Seite von Figur 5/20. Die zugehörigen Zahlen lauten:

$$p_{fB} = 0.455 \cdot 10^{-3}$$
$$p_{fA|B} = 1.474 \cdot 10^{-3}$$

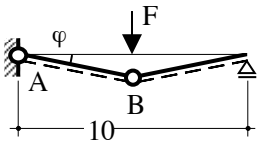
wovon wieder der kleinere Wert gilt, also

$$p_f(B) = 0.455 \cdot 10^{-3}$$

Die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems ergibt sich aus derjenigen des in Serie geschalteten Systems, d.h. als Summe der oben berechneten Werte, also

$$P_f = (1.474 + 0.455) \cdot 10^{-3} = 1.93 \cdot 10^{-3} \approx 2‰$$

Es ist von Interesse, die Versagenswahrscheinlichkeit des entsprechenden Mechanismus direkt zu ermitteln (siehe Figur 5/21). Dafür gehen wir vom kinematischen Grenzwertsatz des Traglastverfahrens aus. Es gilt bekanntlich die Versagensbedingung



Figur 5/21

$$G = A_d - A_a < 0$$

worin A_d für die Dissipationsarbeit in den plastischen Gelenken und A_a für die Arbeit der äusseren Kräfte steht. Wie man sofort einsieht, ist mit dem den Mechanismus beschreibenden Winkel $\varphi = 1$

$$A_d = R + 2 \cdot R = 3 \cdot R$$
$$A_a = 5.00 \cdot F$$

woraus sich die Versagenswahrscheinlichkeit zu $p_f = 0.001'474$ berechnen lässt. Da jedoch dieser Mechanismus nicht nur auf dem wahrscheinlicheren Weg AB, sondern auch auf dem weniger wahrscheinlichen Weg BA erreicht werden kann, ist die Versagenswahrscheinlichkeit grösser. Man ist auf der sicheren Seite, wenn man das Ergebnis unter der Annahme, beide Wege seien gleich wahrscheinlich, verdoppelt. Es ergibt sich damit

$$P_f = 2 \cdot 0.001'474 = 2.95 \cdot 10^{-3} \approx 3‰$$

Die beobachtete Differenz zum vorher berechneten Wert ist typisch für solche Berechnungen und ergibt sich im wesentlichen aus den ungünstigen Annahmen bezüglich der Korrelationen zwischen den Elementen.

b) Duktiles oder sprödes Versagen von Elementen

Beim vorstehenden Beispiel wurde stillschweigend davon ausgegangen, dass versagende Elemente weiter aktiv bleiben, also z.B. das plastische Moment $R = M_p$ weiterhin tragen. Dies ist natürlich bei einem spröden Ausfall eines Elements nicht möglich. In diesem Fall tritt dann $R = 0$ an die Stelle des versagenden Elements. Damit ändert sich das statische System beträchtlich und es ergibt sich für das obenstehende Beispiel

$$M_{B|A} = 2.5 \cdot F$$
$$M_{A|B} = -5.0 \cdot F$$

Die zugehörigen bedingten Versagenswahrscheinlichkeiten sind mit

$$p_{fB|A} = 0.196$$
$$p_{fA|B} = 0.972$$

nun im Vergleich zum duktilen Fall natürlich viel grösser. Die Versagenswahrscheinlichkeit des spröden Systems beträgt demnach mit den weiter vorne ermittelten Werten

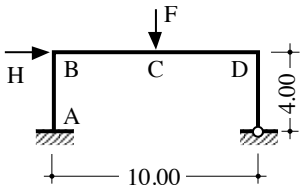
$$P_f = (9.575 + 0.455) \cdot 10^{-3} = 10.03 \cdot 10^{-3} \approx 10‰$$

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Die Versagenswahrscheinlichkeit spröder Systeme ist offensichtlich erheblich grösser als diejenige duktiler Systeme. Das sagt einem schon der gesunde Menschenverstand.

c) Ein einfaches Rahmentragwerk

Die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit soll auch noch an einem Rahmentragwerk (siehe Figur 5/22) gezeigt werden. Der Rahmen bestehe aus Stahl und damit aus einem duktilen Baustoff. Er sei mit einer horizontalen Kraft H und einer vertikalen Last F in Feldmitte belastet. Die Kräfte sind unabhängig voneinander. Das gleiche gelte zunächst auch für die plastischen Momente des Riegels M_R und der Stützen M_S.



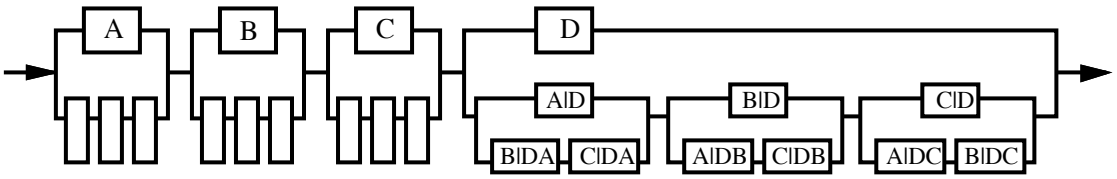
Figur 5/22

Mögliche Stellen plastischer Gelenke sind offensichtlich A, B, C und D. Das sind die Elemente des Systems. Die Schnittkräfte in diesen Schnitten sind von Interesse. Sie werden nach den Regeln elastischer Systeme in Funktion von H und F ermittelt. Als Steifigkeitsverhältnis von Riegel zu Stütze gelte in Anbetracht der gewählten Profile der Wert 5. Die Berechnung folgt den üblichen Methoden der Elastizitätstheorie.

Es ergeben sich

$$M_A = -1.70 \cdot H + 0.13 \cdot F$$
$$M_B = +1.39 \cdot H - 0.49 \cdot F$$
$$M_C = +0.24 \cdot H + 1.95 \cdot F$$
$$M_D = -0.90 \cdot H - 0.62 \cdot F$$

Die möglichen Versagenspfade laufen über die Elemente A, B, C und D. Wir haben es also mit einem Serie-System zu tun mit vier – freilich aus parallelgeschalteten Elementen bestehenden – Untersystemen. Der über D gestartete Versagenspfad ist vollständig gezeichnet (siehe Figur 5/23).



Figur 5/23

Für jeden der vier Schnitte, d.h. für jedes der vier Elemente, lässt sich eine Versagensbedingung formulieren. Diese lauten:

$$G_A = M_{SA} - [\pm M_A] < 0$$
$$G_B = M_{SB} - [\pm M_B] < 0$$
$$G_C = M_{RC} - [\pm M_C] < 0$$
$$G_D = M_{SD} - [\pm M_D] < 0$$

Das ±-Zeichen vor den Biegemomenten in den vier Schnitten des Rahmens macht darauf aufmerksam, dass unter Umständen die Vorzeichen umzukehren sind. Massgebend ist jeweils diejenige Grenzzustandsgleichung, die die grösste Versagenswahrscheinlichkeit bringt. Weiter erkennt man, dass die vier Grenzzustände mehr oder weniger voneinander abhängig sind, denn sie enthalten in den Biegemomenten die gleichen Grössen H und F. Dann ist ersichtlich, dass M_{SA} und M_{SB} zum gleichen Stab gehören. Die beiden Werte werden deshalb stark korreliert sein. Etwas abgeschwächt gilt das auch für das plastische Moment M_{SD} in der anderen Stütze.

Als Parameter der Basisvariablen gelten für dieses Beispiel

$$M_S = N(100, 10) \qquad M_R = N(325, 30)$$
$$H = N(40, 10) \qquad F = N(70, 10)$$

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Damit lassen sich die Versagenswahrscheinlichkeiten p_f für die vier Elemente A, B, C und D berechnen. Mit VaP oder anderen Programmen ergeben sich die folgenden Werte (hier in weit übertriebener Genauigkeit notiert):

$$p_{fA} = 19.313\ ‰$$
$$p_{fB} = 0.048\ ‰$$
$$p_{fC} \approx 0$$
$$p_{fD} = 84.006\ ‰$$

An dieser Stelle ergibt sich bereits ein erster, in der Regel weit auf der sicheren Seite liegender Schätzwert für die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems in Form der Summe dieser Zahlen, also in der Grössenordnung von 100 ‰. Es ist offensichtlich, dass die Elemente A und D dominieren.

Die Abschätzung lässt sich verfeinern durch Berechnung der bedingten Wahrscheinlichkeiten in den jeweils parallelgeschalteten Untersystemen in der Hoffnung, kleinere Werte zu finden, die dann für das Untersystem massgebend werden. Es ist offensichtlich, dass man zunächst den Pfad D weiter untersucht, da dort am ehesten ein Erfolg zu erwarten ist.

Tut man das, findet man die Werte

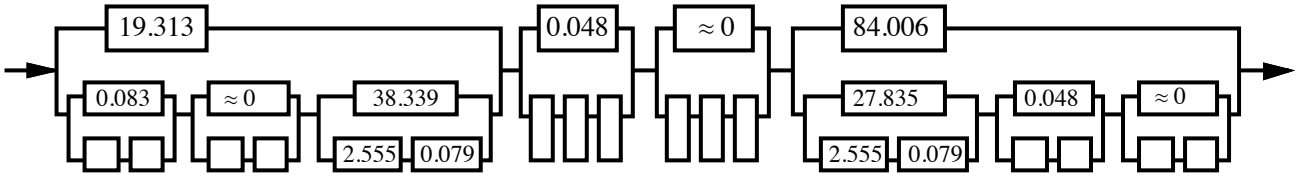
$$p_{fA|D} = 27.835\ ‰$$
$$p_{fB|D} = 0.048\ ‰$$
$$p_{fC|D} \approx 0$$

deren Summe mit 27.883‰ an die Stelle von p_{fD} = 84.006‰ tritt. Auf dem Pfad DA ist noch etwas "zu holen". Man findet dort die Werte

$$p_{fB|DA} = 2.555\ ‰$$
$$p_{fC|DA} = 0.079\ ‰$$

deren Summe mit 2.634 ‰ an die Stelle von $p_{fA|D}$ = 27.835 ‰ tritt.

Eine entsprechende Suche beim Pfad A mit der Tendenz, p_{fA} = 19.31 ‰ durch einen kleineren Wert zu ersetzen, bringt die in Figur 5/24 (in ‰) eingetragenen Grössen.



Figur 5/24

Eine weitere Suche auf den unteren Ebenen der Figur erscheint sinnlos. Nach den mittlerweile bekannten Regeln lässt sich durch Summation auf der jeweils untersten Ebene schliesslich ein sehr guter Schätzwert für die Versagenswahrscheinlichkeit des Rahmens gewinnen zu

$$P_f = 5.45‰$$

Dieser Wert enthält die Beiträge sämtlicher in Figur 5/24 gezeigter Versagensformen des Rahmens.

d) Versagensmechanismen

Fliessen an den Orten ABD entspricht einem Verschiebe-Mechanismus (VM) des Rahmens, wie er in Figur 5/25 oben dargestellt ist. Die zu diesem Mechanismus gehörende Versagenswahrscheinlichkeit lässt sich natürlich auch auf der Grundlage der kinematischen Methode der Plastizitätstheorie

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

direkt ermitteln. Als Versagensbedingung für diesen Mechanismus gilt, wie man leicht prüfen kann

$$G_{VM} = M_{SA} + M_{SB} + M_{SD} - 4.00 \cdot H < 0$$

Unter der Annahme, dass die plastischen Momente der Stützen in den drei Schnitten vollständig korreliert sind, gilt

$$G_{VM} = 3 \cdot M_S - 4.00 \cdot H < 0$$

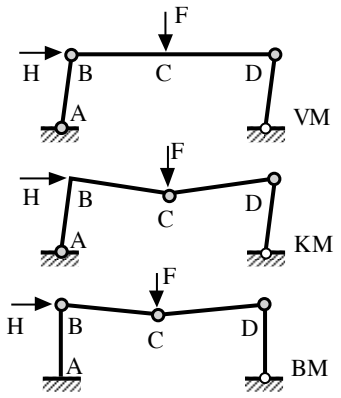
wozu sich der Wert $p_f = 2.56‰$ ermitteln lässt.

Da dieser Mechanismus jedoch auf sechs verschiedenen Pfaden erreicht werden kann, nämlich auf den Pfaden ABD, ADB, BAD, BDA, DAB und DBA, erhält man einen oberen Grenzwert der Versagenswahrscheinlichkeit des Rahmens in diesem Mechanismus durch Multiplikation mit 6 (allgemeiner gesprochen durch Multiplikation mit n!, wobei n die Anzahl der den Mechanismus bildenden plastischen Gelenke ist). Das ergibt

$$p_{fVM} \approx 15‰$$

Es wären nun noch die übrigen zwei Mechanismen zu untersuchen. Die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems ist dann gemäss Formel (5.35) die Summe der Wahrscheinlichkeiten der drei Mechanismen. Diese bleibt aber, da die Versagenswahrscheinlichkeiten des kombinierten Modus KM und des Balken-Modus BM sehr klein sind, praktisch unverändert.

Dieser Wert wäre mit dem Ergebnis des detaillierten Vorgehens zu vergleichen. Man erkennt, dass der Wert auf der sicheren Seite liegt, sieht aber gleichzeitig auch die Differenz der Ergebnisse, die auf die verwendeten Näherungen zurückgeführt werden muss. Allerdings ist der Unterschied zu 5.45‰ auch nicht allzu gross, so dass die Abschätzung auf diesem weniger aufwendigen Weg durchaus zu empfehlen ist.



Figur 5/25

e) Pragmatisches Vorgehen

Die Berechnung von Versagenswahrscheinlichkeiten von Systemen ist umständlich und bei den nötigen Näherungen auch nicht immer ganz eindeutig. Es lohnt sich deshalb, eine sinnvolle Strategie für die Beurteilung statisch unbestimmter Systeme zu entwickeln.

Es erscheint sinnvoll, zunächst die Summe der Versagenswahrscheinlichkeiten der möglichen Versagens-Mechanismen zu ermitteln, wobei die mit der entsprechenden Grenzzustandsbedingung erhaltenen Versagenswahrscheinlichkeiten jeweils mit n! multipliziert werden müssen, um einen auf der sicheren Seite liegenden Wert zu erhalten. Ist dieser Wert akzeptabel, kann man die Berechnung abschliessen.

Ist das nicht der Fall, muss man ins Detail gehen. Hierfür sind folgende Schritte zu durchlaufen:

- Ermittlung der Schnittgrössen am gegebenen System
- Ermittlung der p_{fi} der massgebenden Elemente des Systems, d.h. der am stärksten beanspruchten Schnitte
- Beurteilung eines ersten Schätzwerts für die Versagenswahrscheinlichkeit P_f des Systems, gegeben als Summe aller p_{fi}, auf Akzeptierbarkeit
- Falls P_f nicht akzeptierbar ist, dann den Ausfall des Elements mit der grössten Versagenswahrscheinlichkeit max $[p_{fi}]$ annehmen
- Ermittlung der Schnittgrössen am durch das Versagen des Elements reduzierten System, wobei zwischen duktilem, das heisst plastisch weiter

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

mitwirkendem bzw. sprödem, das heisst vollständig ausfallendem Versagen zu unterscheiden ist

- Ermittlung der bedingten Versagenswahrscheinlichkeiten $p_{fj|i}$ der Elemente des reduzierten Systems und Bildung der Summe dieser Werte
- Ermittlung eines verbesserten Schätzwertes für P_f, wobei der Wert der Summe der $p_{fj|i}$ an die Stelle von max $[p_{fi}]$ tritt, sofern sie kleiner ist
- Falls auch dieser Wert nicht akzeptierbar ist, müsste man bei der zweitgrössten Versagenswahrscheinlichkeit weiter ins Detail gehen und im Extremfall das System bis zur untersten Ebene analysieren.

Freilich stellt sich vielleicht schon früher die Frage, ob man nicht eine lokale Verstärkung des Systems oder andere Massnahmen zur Gefahrenminderung ergreifen sollte.

Literatur

Ang, A.H.S. and Tang, W.H.: "Probability Concepts in Engineering Planning and Design; Volume I – Basic Principles"; John Wiley & Sons, New York, 1975

Ang, A.H.S. and Tang, W.H.: "Probability Concepts in Engineering Planning and Design; Volume II – Decision, Risk, and Reliability"; John Wiley & Sons, New York, 1984

Basler, E.: "Untersuchungen über den Sicherheitsbegriff von Bauwerken"; Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, 4, 1961

Cornell, A.C.: "A Probability Based Structural Code"; ACI Journal No. 12, Proceedings V 66, 1969

Ditlevsen, O.: "Structural Reliability and the Invariance Problem"; Report No. 22, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Canada, 1973

Ditlevsen, O.: "Proposal for a Code for the direct Use of Reliability Methods in Structural Design"; Working Document of the JCSS, 1989, IABSE Zürich

DNV: "PROBAN – Probabilistic Analysis Program", entwickelt von Det Norske Veritas Research AS, vertrieben von Semafor Informatik & Energie AG, Basel, 1994

Evans, D.H.: "An Application of Numerical Integration Techniques to Statistical Tolerancing, III - General Distributions", Technometrics 14, 23 - 35, 1972

Ferry-Borges, J. and Castanheta, M.: "Structural Safety"; Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lissabon, 1971

Freudenthal, A.M.: "The Safety of Structures"; Transactions of the ASCE, Vol. 112, 1947

Hasofer, A.M. and Lind, N.C.: "Exact and Invariant Second-Moment Code Format"; Proc. ASCE, Journal of the Eng. Mech. Division, Vol. 100, No. EM 1, 1974

IABSE Reports: "General Principles of Structural Design" and "General Principles of Quality Assurance"; Report No. 35, IABSE Zürich, 1981

Kersken-Bradley, M. und Diamantidis, D.: "Sicherheit von Baukonstruktionen"; In: Peters, O.H. und Meyna, A. (Hrsg.): "Handbuch der Sicherheitstechnik, Band 1"; C. Hanser Verlag, München, 1985

Li, K.S.: "Point-Estimate Method for Calculating Statistical Moments", Journal of Engineering Mechanics 118, 1506 - 1511, 1992

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Mayer, M.: "Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkräften anstatt nach zulässigen Spannungen"; Verlag von J. Springer, Berlin, 1926

Melchers, R.E.: "Structural Reliability – Analysis and Prediction"; Ellis Horwood Ltd., Halsted Press, John Wiley & Sons, 1987

Nowak, A.S.: "Structural Reliability"; Notes of a Short Course, presented at the ETH Zürich in 1987

Petschacher, M.: "Zuverlässigkeit technischer Systeme – Computerunterstützte Verarbeitung von stochastischen Grössen mit dem Programm VaP; Diss. ETH Zürich, 1993

Petschacher, M.: "VaP, aktuelle Version"
siehe www.petschacher.at

Rackwitz, R.: "First Order Reliability Theories and Stochastic Models"; Proceedings, ICOSSAR '77, TU München, 1977

RCP: "STRUREL – Structural Reliability Analysis Program–System"; entwickelt und vertrieben durch RCP GmbH, München, 1993

SIA 260: "Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken – Weisung des SIA an seine Kommissionen für die Koordination des Normenwerks"; 5. Fassung 1980 und 11. Fassung, September 1982

Spaethe, G.: "Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen"; Springer Verlag, 1992

Thoft-Christensen, P. and Baker, M.: " Structural Reliability and its Applications"; Springer-Verlag, Berlin, 1982

Vrouwenvelder, A.C.W.M. und Vrijling, J.K.: "Probabilistisch Ontwerpen"; Technische Hochschule Delft, Vorlesungsautografie, 1984

Zhou, J. and Nowak, A.S.: "Integration Formulas to Evaluate Functions of Random Variables"; Structural Safety 5, 1988

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

6. Tragsicherheit bestehender Bauwerke

6.1 Einleitung

6.11 Auslösung und Verantwortlichkeiten

Die Notwendigkeit, das Tragwerk eines bestehenden Bauwerks einer Beurteilung zu unterziehen, ergibt sich

- aufgrund der Ergebnisse einer periodischen Zustandsuntersuchung,
- aufgrund des Ablaufs der anlässlich einer früheren Beurteilung der Tragsicherheit zugestandenen Restnutzungsdauer,
- bei Bekanntwerden von Bemessungs- oder Ausführungsmängeln,
- anlässlich einer geplanten Nutzungsänderung des Bauwerks,
- bei Zweifeln an der Tragsicherheit, hervorgerufen durch sichtbare Schäden,
- bei offensichtlich mangelhafter Gebrauchstauglichkeit,
- durch ausserordentliche Vorkommnisse während der Nutzung (wie z.B. Anprall von Fahrzeugen, Lawinen, Brand im Gebäude, Erdbeben etc.), die das Tragwerk möglicherweise geschädigt haben könnten,
- bei Baustoff-, Bauweisen- oder System-bedingtem Verdacht auf mögliche Beeinträchtigung der Tragsicherheit oder aber
- durch einen zunächst unbegründbaren Verdacht.

Da der Eigentümer des fraglichen Bauwerks kausal haftbar ist für Schäden, die sich aus einem Mangel des Bauwerks ergeben, ist er, allenfalls veranlasst durch Meldungen oder Absichten des Betreibers oder des Benützers, in allen diesen Fällen verantwortlich für die *Einleitung* einer Untersuchung. Er ist in einer solchen Situation gut beraten, einen erfahrenen Ingenieur beizuziehen und mit einer ersten Untersuchung zu beauftragen. Der Schwierigkeit der Aufgabe wegen erweist es sich als wichtig, dass der Eigentümer volles Vertrauen in den von ihm beauftragten Ingenieur hat.

Der Ingenieur ist im Rahmen seines Auftragsverhältnisses selbstverständlich verantwortlich für *seine Aussagen* über die Tragsicherheit des Bauwerks und für die von ihm vorgeschlagenen Massnahmen. Wie er zu seiner Aussage kommt, ist im wesentlichen seine eigene Sache. So wird er insbesondere seine Berechnungen und Untersuchungen vorwiegend für die eigene Meinungsbildung anstellen. Es gehört allerdings zu den Sorgfaltspflichten eines Auftragnehmers, zu erkennen zu geben, wenn er der Aufgabe nicht gewachsen ist.

Der Eigentümer ist schliesslich gut beraten, die Anordnungen und Ratschläge des Ingenieurs zu beachten. Ist er nicht bereit, dies zu tun, muss ihn der Ingenieur unmissverständlich auf die möglichen Konsequenzen hinweisen. Im Falle einer Gefährdung von Personen geht die strafrechtliche Verantwortung des Ingenieurs unter Umständen weiter und fordert z.B. die Meldung kritischer Sachverhalte an den Staatsanwalt.

Der Richter wird im konkreten Fall einer Gerichtsverhandlung vor allem beurteilen, ob der Ingenieur die angesichts der schwierigen Aufgabe objektiv nötige *Sorgfalt* hat walten lassen. Die Richtigkeit der Aussagen des Ingenieurs steht weniger zur Debatte, denn kein Mensch, auch der beste Fachmann nicht, kann absolut richtige Aussagen machen. Auch liegt die Beweispflicht beim allfälligen Kläger. Er muss beweisen, dass der Ingenieur seine Sorgfaltspflichten verletzt hat (siehe auch Briner, 1992).

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Angesichts eines grossen Gefährdungspotentials oder grosser Kosten für die Herstellung von Sicherheit drängt sich allerdings die Frage auf, ob ein Ingenieur allein die Verantwortung für schwerwiegende Entscheide übernehmen kann: Hat er genügend Gewicht, um die notwendigen Massnahmen auch wirklich durchzusetzen? Darf man es seinem Urteil überlassen, gewisse Risiken zu akzeptieren?

6.12 Bereiche der Beurteilung

Es zeigt sich, dass bei bestehenden Bauwerken vor allem die Beurteilung der *Tragsicherheit* das wesentliche Problem ist, und zwar deshalb, weil Aussagen über das Verhalten des Tragwerks in Extremsituationen gemacht werden müssen, die in der Regel ausserhalb des direkt erschlossenen Erfahrungsbereichs liegen. Dazu gehört oft auch die schwierige und für die Beurteilung der Tragsicherheit entscheidende Frage, in welchem Zustand sich gewisse schlecht oder gar nicht inspizierbare Tragelemente befinden.

Auch die Beurteilung des Zustands eines bestehenden Tragwerks im Hinblick auf *Ermüdung* ist eine komplexe Angelegenheit. Eine zuverlässige Entdeckung von Ermüdungsrissen im frühen Zustand ist nur mit grossem Aufwand möglich und setzt eine sachkundige, auf besonders gefährdete Tragwerksteile ausgerichtete intensive Suche voraus.

Zweifel an der *Gebrauchstauglichkeit* bestehen hingegen selten, denn entweder hat sich das Tragwerk als gebrauchstauglich erwiesen, oder die entsprechenden Mängel sind aus der vorhergehenden Nutzung bekannt. Durchbiegungen, die Rissbildung, die Charakteristik des Schwingungsverhaltens etc. zeigen sich jedenfalls unter den Umständen des normalen Gebrauchs und lassen schlüssige Aussagen ohne weiteres zu. Allenfalls stellen sich Fragen der Zumutbarkeit gewisser Erscheinungen für die Benützer von Bauwerken, wie z.B. von Schwingungen, Erschütterungen usw.

Auch die Frage der *Dauerhaftigkeit* zeigt sich bei bestehenden Bauwerken in anderem Licht. Wo es bei der Projektierung von Bauwerken vielfach an Erfahrung mangelt, lässt sich bei bestehenden Bauten anhand des angetroffenen Zustands leichter auf die zu erwartende weitere Entwicklung schliessen. Die Festlegung der zum weiteren Erhalt der Bausubstanz notwendigen Vorkehrungen ist vergleichsweise einfacher.

Bei der Projektierung und Bemessung *neuer* Tragwerke liegen die Probleme im übrigen genau umgekehrt: Die normgemässe Tragsicherheit ist mit vergleichsweise einfachen Modellen nachweisbar, während die Gebrauchstauglichkeit wegen der grossen Voraussage-Unschärfen und wegen der mangelnden Kenntnis über die Einzelheiten der späteren Nutzung auch mit "genauen" Modellen lediglich abgeschätzt werden kann. Noch schwieriger ist die Voraussage der Dauerhaftigkeit von geplanten Bauwerken.

6.13 Tragsicherheit: Das Ergebnis einer Meinungsbildung

Sicherheit bzw. Unsicherheit eines bestehenden Tragwerks sind, wie früher begründet, nicht mit dem Tragwerk quasi festverbundene Eigenschaften, sondern im vorliegenden Zusammenhang der Ausdruck eines persönlichen Vertrauens (z.B. eines Experten) in die vorgefundene Situation. Die Aussage wird beeinflusst durch die grundsätzlich messbaren, aber oft nicht hinreichend bekannten physikalischen Eigenschaften des Tragwerks, die Vorstellungen über das Verhalten des Tragwerks sowie durch die im Verlaufe der Restnutzungsdauer zu erwartenden Gefährdungsbilder. Sicherheit ist eine Frage des Entscheids (Bosshard, 1979).

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Jede Aussage über die Sicherheit eines bestehenden Tragwerks ist demnach mehr oder weniger subjektiv und spiegelt den Stand des Wissens und der Kenntnisse desjenigen, der die Aussage macht. Charakteristisch für diesen Sachverhalt ist die Tatsache, dass Expertenmeinungen oft divergieren, aber auch der Umstand, dass sich die Standpunkte von Experten im Verlaufe eines Meinungsaustausches in der Regel einander nähern und sich Experten sogar einigen können.

Tragsicherheit eines bestehenden Bauwerks ist im übrigen aber auch eine Frage – und in vielen Fällen zugleich das Ergebnis – einer sorgfältigen Analyse des Tragwerkszustandes und seines Verhaltens. Was auf den ersten Blick beispielsweise als unsicher eingestuft wird, lässt sich durch Hinzugewinnung weiterer Informationen unter Umständen als sicher bezeichnen. Die durch Beobachtung gesicherten objektiven Eigenschaften des Tragwerks beeinflussen die zunächst weitgehend subjektive Meinung über die Tragsicherheit.

Im Gegensatz zum Vorstehenden kann man die Sicherheit eines Tragwerk*projektes* durchaus als Eigenschaft des Projekts bezeichnen, denn die Aussage stützt sich in der Regel auf in den massgebenden Normen klar umschriebene Bestimmungsstücke, und der subjektive Charakter tritt zurück. Deshalb ist ja auch die Sicherheit eines projektierten Tragwerks anhand der Statischen Berechnung und der Pläne weitgehend objektiv beurteilbar.

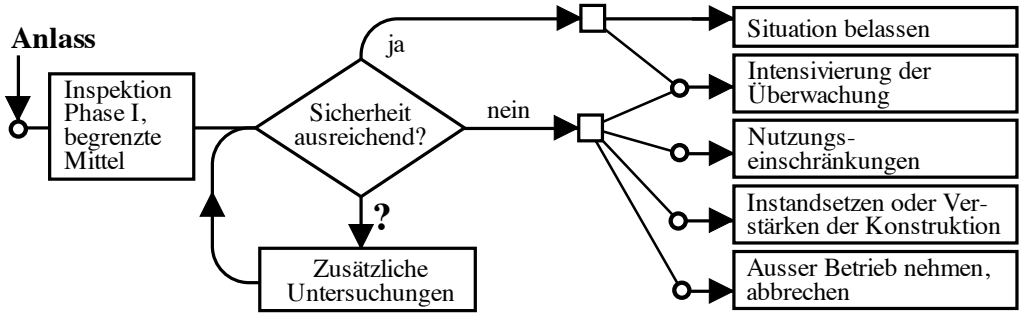
6.14 Varianten des Entscheids

Der mit der Beurteilung eines bestehenden Tragwerkes beauftragte Ingenieur muss vor allem auf die folgenden Fragen Antworten finden:

- Wie sicher ist das?
- Ist das sicher genug?
- Wer entscheidet?
- Wie kommt man zum Entscheid?
- Wie vertritt man den Entscheid?
- Wie setzt man den Entscheid durch?

Der beauftragte Ingenieur muss sich selbst zu einem eindeutigen Entscheid und damit zu einer klaren Empfehlung an den Bauherrn durchringen. Dieser Entscheid kann im Prinzip nur entweder "sicher" oder eben "nicht sicher" lauten und ist in jedem Fall von grosser Tragweite.

Im ersten Fall wird man den Beurteilungsprozess abbrechen und der Aussage des Ingenieurs voll vertrauen müssen, im zweiten ist herauszufinden, was nun weiter zu tun sei. Figur 6/1 zeigt das Entscheidungsspektrum und die möglichen Folgen schematisch.



Figur 6/1

Wie man der Figur unschwer entnehmen kann, kommt man um die Beantwortung der entscheidenden Frage "Ist das Tragwerk sicher?" nicht herum.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Von besonderem Einfluss auf den Entscheid ist die vom Eigentümer angestrebte oder vom Ingenieur aufgrund seiner Beurteilung zugestandene *Restnutzungsdauer* des Bauwerks. Darunter wird diejenige Zeitdauer verstanden, während der das Bauwerk gemäss Nutzungsplan noch in Betrieb bleiben soll bzw. darf. Sie legt gegebenenfalls auch den Zeitpunkt fest, zu dem im Hinblick auf eine weitere Nutzung eine erneute Beurteilung der Tragsicherheit erforderlich ist.

Es ist offensichtlich, dass jede der hier kurz skizzierten Varianten des Entscheids bzw. der getroffenen Massnahmen auch mit einer gewissen Gefährdung des beigezogenen Ingenieurs verbunden ist. Dieser muss entscheiden, kann sich aber mangels ausreichender Mittel oft nicht auf eine der Tragweite des Entscheids angemessene Entscheidungsbasis und ein der Verantwortung entsprechendes Honorar stützen (siehe auch Kapitel 7.63).

In der Regel treffen schlussendlich der Eigentümer bzw. der Betreiber *de jure* den Entscheid. Bei öffentlichen Bauten sind das die Baudirektion und damit die Regierung oder ähnliche Instanzen. Die häufig aus Juristen bestehenden Gremien stützen sich dabei jedoch auf den oder die beigezogenen Experten. *De facto* trifft also oft der Ingenieur den Entscheid. Das macht für ihn die Situation nicht leichter.

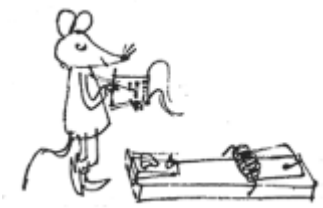
6.2 Phasen der Beurteilung

Es zeigt sich, dass eine Gliederung der Beurteilung eines bestehenden Bauwerks in drei Phasen sinnvoll ist (SIA 462, 1964). Jede dieser drei Phasen soll in sich abgeschlossen sein und dem Eigentümer nach Abschluss der Phase die Entscheidungsfreiheit zurückgeben. Figur 6/2 zeigt schematisch, wie man sich den Entscheidungsprozess vorstellen kann.

Die Entscheidungsfreiheit des Eigentümers ist freilich eingeengt durch die Bestimmungen des Obligationenrechts und des Strafgesetzbuches, sowie durch die Empfehlungen des Ingenieurs bzw. des Experten-Kollegiums, denen er kaum zuwider handeln kann.

6.21 Phase I: Grobe Erstbeurteilung

Die grobe Erstbeurteilung bezweckt, mit grundsätzlich bescheidenen, dem Problem aber angemessenen Mitteln die vorhandenen Zweifel auszuräumen oder aber – falls dies nicht gelingt – vernünftige Vorschläge für das weitere Vorgehen zu machen. Die grobe Erstbeurteilung besteht aus einem Augenschein, begleitendem Aktenstudium, einer im Gespräch mit dem Eigentümer oder Betreiber gewonnenen Aktualisierung von Nutzungsplan und Sicherheitsplan, einer überschläglichen Kontrolle der Tragsicherheit und einem abschliessenden Bericht.



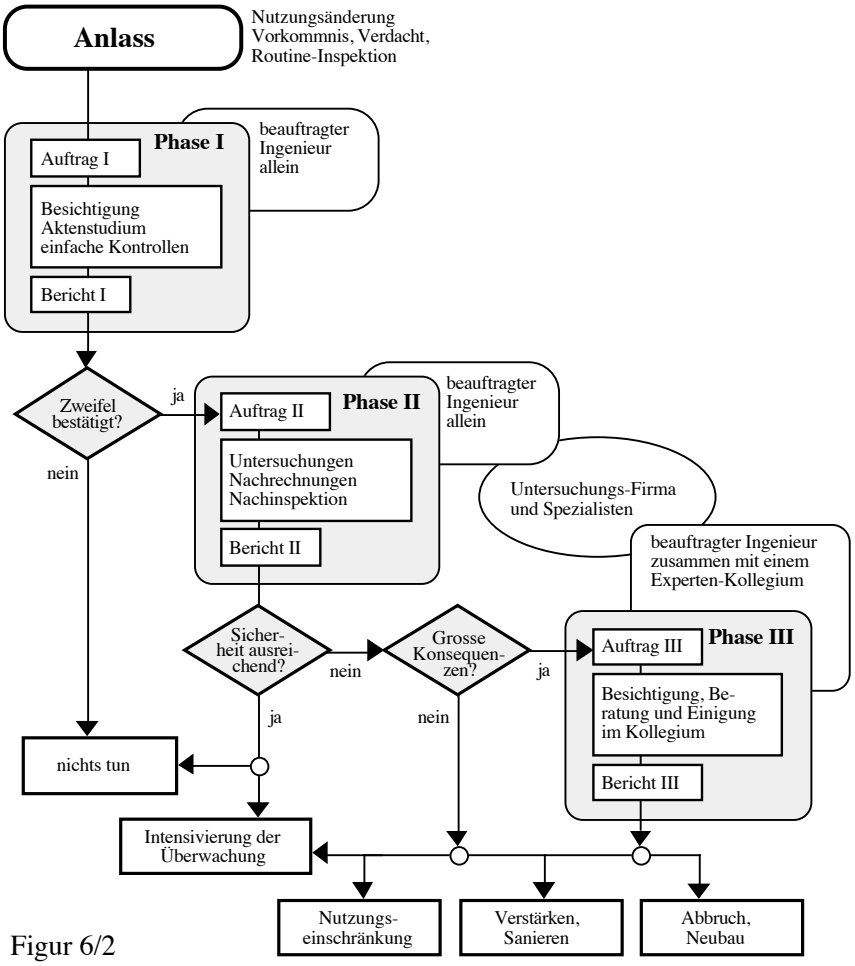
a) Besichtigung

Eine eingehende Besichtigung des fraglichen Objekts ist ausserordentlich wichtig. Ziel ist unter anderem das Erkennen von ortstypischen Gefährdungsbildern, die das Tragwerk in Zukunft bedrohen könnten. Es geht weiter darum, Mängel und Schäden und alle Zeichen von Überlastung zu erkennen. Auch soll bei dieser Besichtigung eine erste, intuitive Beurteilung der Tragsicherheit erfolgen. Falls notwendig, sind auch erste sichernde Sofortmassnahmen anzuordnen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Eine Besichtigung muss gut vorbereitet werden, ohne sich dadurch allerdings spontane Abweichungen zu verbauen. Beachtenswerte Hinweise finden sich in (IP Bau, 1992). Einige Ratschläge stichwortartig:

- Pläne vorher anschauen, Vorgehen festlegen
- Ausrüstung: Notizblock, Diktiergerät, Fotoapparat mit Blitz, Feldstecher, Lupe, Spiegel, Hammer, Doppelmeter, Senkblei, Magnet …
- zu zweit gehen: gegenseitige Hilfe bei z.B. Leiter halten etc.; vier Augen sehen mehr als zwei; Diskussionspartner
- Verhalten des Bauwerks im Betrieb beobachten, bei Sonnenschein und nach längerem Regen
- mit dem Kopf und allen Sinnen dabei sein: Ohren, Nase und Tastsinn
- vom Grossen ins Kleine gehen: die Umgebung anschauen (schräg stehende Bäume etc.), dann auf das Bauwerk zugehen
- Gefährdungsbilder erkennen: Was kann hier passieren, wenn …?
- vom ganzen Bauwerk zu den Details des Tragwerks übergehen
- Aufmerksamkeit auf Schadenindikatoren lenken; aufgepasst: Nicht alles (z.B. Lochfrass) ist von aussen erkennbar
- Charakteristiken der Nutzung abschätzen (z.B. im Hallenbad: Chlor, bei Brücken: Schwarzräumung, Ausnahmetransporte etc.)



Figur 6/2

b) Aktenstudium

Falls überhaupt auffindbar, müssen in einem zweiten Teil der Phase I die vorhandenen Bauakten studiert werden: Pläne, Statische Berechnung, Bautagebuch, Offerte, Rechnungen, Abnahme-Protokolle, Umbau-Pläne etc. Beim Studium dieser Akten muss versucht werden, die damalige Situation

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

zu erfassen: Welche Ziele wurden angestrebt, welche Bauverfahren, welche Baustoffe angewendet? Welches ökonomische und organisatorische Klima herrschte? Standen die Arbeiten unter Zeitdruck? Das sind sog. Qualitätsindikatoren.

Auch die Durchsicht der Statischen Berechnung bringt eine Fülle von Informationen über Normen, Berechnungs- und Bemessungsmethoden, die zugrundegelegten statischen Systeme und die zur Verfügung stehenden Rechenhilfsmittel. Sie zeigt gleichzeitig auf, wo aufgrund des heutigen Standes der Technik rechnerische Reserven liegen und, falls nötig, herangezogen werden könnten. Wie man mit diesen Informationen umgeht, wird in Abschnitt 63 erläutert.

c) Ergänzung und Berichtigung der Bauakten

Bei vielen bestehenden Bauwerken werden sowohl der von den Tragwerksnormen des SIA geforderte Nutzungsplan als auch der darauf aufbauende Sicherheitsplan fehlen.

Diese Pläne sind aufgrund der angestrebten Restnutzungsdauer neu zu erstellen bzw. zu berichtigen und bilden in der Folge eine wichtige Basis für die Beurteilung der Frage, unter welchen Bedingungen und Vorkehrungen ein bestehendes Bauwerk weiterhin in Betrieb bleiben darf.

Es gilt ausserdem festzuhalten, welche *Risiken akzeptiert* werden müssen. Man tut gut daran, diese aufzulisten und mit dem Eigentümer abzusprechen, damit rechtzeitig klar ist, wer im Schadenfall die finanziellen Konsequenzen trägt. Dass man Personenschäden nicht bewusst akzeptieren darf, bedarf wohl keiner weiteren Erläuterung.

Eine wesentliche Rolle kommt bei bestehenden Bauwerken den *Nutzungsanweisungen* sowie dem *Überwachungsplan* und dem *Unterhaltsplan* zu, die festlegen, wie der Bestand des Bauwerks über die verbleibende Restnutzungsdauer gesichert werden soll.

Schliesslich ist durch eine sorgfältige Zusammenstellung aller wesentlichen *Bauakten* dafür zu sorgen, dass für eine erneute Beurteilung die wichtigen Grundlagen unmissverständlich und lückenlos zur Verfügung stehen.

d) Grobe statische Beurteilung

Aufgrund des Nutzungsplans und des Sicherheitsplans sowie nach Einsicht in die Pläne und die Statische Berechnung kann in der Regel eine erste Abschätzung der vorhandenen Tragsicherheit vorgenommen werden. Wie man hier am besten vorgeht, wird unter Abschnitt 64 gezeigt.

Ein Wort ist nötig im Hinblick auf Tragwerke, die in dynamischer Hinsicht ein unbefriedigendes Verhalten zeigen. In solchen Fällen ist neben dem Tragwerkswiderstand auch die Tragwerkssteifigkeit zu beachten, die das Schwingungsverhalten entscheidend beeinflusst. Verstärkungen der Konstruktion, die in der Regel mit einer Erhöhung der Steifigkeit einhergehen, sind in solchen Fällen nicht immer das richtige Konzept.

Besonders sorgfältig muss man die dynamischen Beanspruchungen unter Erdbeben oder bei Anprallstössen angehen, denn hier besteht zwischen dem Tragwiderstand und der Duktilität des Tragwerks ein empfindliches Wechselspiel. Das Verstärken einer Konstruktion kann als Folge der damit einhergehenden Versteifung in Bezug auf Erdbeben durchaus zu einer Schwächung führen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Schliesslich sind auch ermüdungsbeanspruchte Bauteile sachgerecht zu beurteilen. Weitere Ausführungen zu diesem Thema sprengen freilich den Rahmen dieses Buches.

e) Bericht

Alle in der Phase I gewonnenen Erkenntnisse werden in einem Bericht zuhanden des Auftraggebers zusammengefasst. Falls die Zweifel, die zum Auftrag geführt hatten, im Verlauf der Phase I nicht aus dem Weg geräumt werden konnten, müssen mit der Phase II weitere Schritte eingeleitet werden.

6.22 Phase II: Detaillierte Untersuchung

Es ist sinnvoll, den gleichen Ingenieur mit den Arbeiten der Phase II zu betrauen, um so das gewonnene Vorwissen zu nutzen.

a) Untersuchungen am Bauwerk

Typisch für die Phase II sind die Untersuchungen am Bauwerk. Man nennt das *Aktualisieren* der Informationen über das Bauwerk. Hierzu müssen in der Regel spezialisierte Fachinstanzen wie z.B. die Eidg. Material-Prüfungs-Anstalt (EMPA) beigezogen werden.

Oft wird standardmässig alles nur irgendwie und möglicherweise Interessante geprüft: Menge und Zustand der Bewehrung, Karbonatisierungstiefen, Chloridgehalte, Risse und Rissweiten, Anrisse, Ermüdungsrisse, Festigkeiten, Verhalten unter Last, Durchbiegungen, Verankerungen, Injektion bei Spannkabeln etc. Ein solches undifferenziertes Vorgehen ist selten vernünftig. Auch können allzu intensive Untersuchungen, die selten völlig zerstörungsfrei sind, das Tragwerk unnötig schädigen.

Es ist vielmehr vernünftig und kostengünstig, auf der Basis der in Phase I gewonnenen Einsichten und Fragen gezielt ein geeignetes Untersuchungsprogramm aufzustellen und darin festzulegen, was zu prüfen ist. Die gründlich vorbereitete Untersuchung sollte vom beauftragten Ingenieur verantwortlich begleitet werden. Auch soll er soweit wie möglich Einfluss nehmen auf die Formulierung des Untersuchungsberichts.

b) Nachrechnung

Die aus den Untersuchungen gewonnenen Zusatzinformationen werden in die Nachrechnung einbezogen mit dem Ziel, die am Ende der Phase I noch immer bestehenden Zweifel nun endlich auszuräumen und eine ausreichende Tragsicherheit nachzuweisen. Man wird für die konventionelle Statik die aktualisierten Werte und modifizierte Rechenmodelle verwenden. Hier sei auf Abschnitt 63 verwiesen.

c) Bericht

Alle Ergebnisse der Phase II werden in einem Bericht zusammengefasst, der wiederum an den Auftraggeber geht. Der Bericht gibt insbesondere über die Frage der Tragsicherheit Auskunft. Wenn die Tragsicherheit als ungenügend eingeschätzt wird, müssen eine intensivierte Überwachung, Nutzungseinschränkungen, eine Verstärkung und allenfalls ein Abbruch und Neubau in Betracht gezogen werden.

Bei *geringer Tragweite* der Entscheidung zu einer dieser Massnahmen ist es durchaus vertretbar, die Untersuchung mit der Phase II abzuschliessen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Das ist z.B. der Fall, wenn keine Menschen gefährdet sind und allfällige erhöhte Sachschaden- oder Vermögensschadenrisiken in Kauf genommen werden können. Wenn keine Menschenleben gefährdet sind, sind auch Kosten-Nutzen-Überlegungen angebracht. Ein solcher Abschluss des Beurteilungsprozesses ist auch dann vertretbar, wenn man sich zu einer Verstärkung bzw. Sanierung der Konstruktion oder für Abbruch und Neubau entscheidet, sofern dies keine unverhältnismässig grossen finanziellen Konsequenzen zur Folge hat.

Treffen diese Kriterien jedoch nicht zu, hat man es mit einem komplexen Problem zu tun, bei dem die Entscheidung weitreichende Folgen hat. Der verantwortliche Ingenieur muss dann in seinem die Phase II abschliessenden Bericht die Einleitung der Phase III vorschlagen.

Auch der Auftraggeber sollte in einem solchen Fall an diesem Schritt interessiert sein, gewährleistet er doch eine wohlabgewogene und unvoreingenommene Urteilsfindung.

6.23 Phase III: Beratung im Experten-Kollegium

Bei Problemen von grosser Tragweite wird ein Experten-Kollegium einberufen, das die Vorschläge für den bevorstehenden Entscheid sorgfältig prüft. In das Kollegium sollen, zusätzlich zum weiterhin tätigen beauftragten Ingenieur, zwei erfahrene Fachleute einberufen werden. Der Eigentümer oder der Betreiber ist nicht Mitglied des Kollegiums, steht diesem aber für Auskünfte zur Verfügung.

Ein solches Experten-Kollegium tritt bei der Beurteilung bestehender Bauwerke gewissermassen an die Stelle der Normen, die bei der Projektierung von Neubauten ein ausgewogenes Sicherheitsniveau gewährleisten. Insbesondere das Akzeptieren erhöhter Risiken sollte im Prinzip einem solchen Experten-Kollegium vorbehalten bleiben.

Der mit den Phasen I und II beauftragte Ingenieur wird dem Kollegium alle verfügbaren Unterlagen zur Kenntnis bringen und seine Vorschläge für das weitere Vorgehen begründen. Das Kollegium wird gut daran tun, das Bauwerk gemeinsam zu besichtigen und dann gemeinsam zu beraten.

Das Kollegium kann den Entscheid vertagen, um Zeit für weitere Untersuchungen am Bauwerk zu gewinnen. Es kann vom beauftragten Ingenieur auch weitere Untersuchungen fordern, bevor es zu einem Entscheid kommt. Dieser Entscheid sollte einstimmig sein und gemeinsam vor dem Eigentümer – gegebenenfalls auch vor der Öffentlichkeit – vertreten werden. Für den Entscheid tragen die Mitglieder des Kollegiums dem Eigentümer gegenüber gemeinsam die Verantwortung.

Das Experten-Kollegium berät den Bauherrn oder Betreiber demnach in letzter Instanz über die zu treffenden Massnahmen. Es ist auch der Öffentlichkeit gegenüber verpflichtet und muss bei Gefahr für Leib und Leben alles Nötige in die Wege leiten, um allenfalls auch für den Eigentümer oder Betreiber unangenehme Massnahmen durchzusetzen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

6.3 Aktualisierung von Information

Hauptaufgabe der Phase II ist das Aktualisieren der Kenntnisse über das Tragwerk. Diese Aktualisierung bezieht sich auf mehrere Problemkreise und sollte mit aller möglichen Objektivität vorgenommen werden. Es geht im wesentlichen um die Aktualisierung

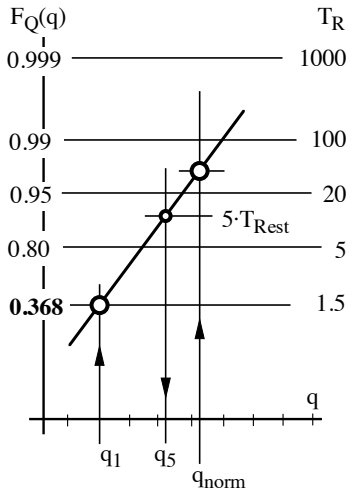
- der Einwirkungen,
- der Festigkeiten,
- der Abmessungen,
- des statischen Systems,
- der Berechnungsverfahren,
- der Bemessungsmethoden
- sowie die Untersuchung auf Mängel und Schäden.

Auf die genannten Bereiche soll in der Folge eingegangen werden. Viele wichtige Grundlagen für die Aktualisierung enthält (SIA Tragwerksnormen 1892–1956, 1994). Nicht behandelt wird allerdings, wie man Bauwerke untersucht und was man wie messen kann. Dazu sei auf ausgezeichnete Literatur verwiesen (siehe z.B. Wicke et al., 1987; Favre et al., 1987; Ladner, 1988; CEB, 1989; IP Bau, 1992; Wolfseher, 1992).

6.31 Bereitstellung der Grundlagen

Für die Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke sind *Nutzungsplan* und *Sicherheitsplan* von zentraler Bedeutung. Sie müssen, bezogen auf die angestrebte *Restnutzungsdauer*, aktualisiert werden. Wenn diese Pläne, beispielsweise bei älteren Bauwerken, fehlen, müssen sie neu erstellt werden.

Im Nutzungsplan wird unter anderem die angestrebte Restnutzungsdauer festgelegt, auf die sich Aufwand und Nutzen in angemessener Weise beziehen müssen. Es zeigt sich, dass diese Festlegung unter Umständen je nach Ergebnis der Untersuchung zu modifizieren ist. Bei der Entwicklung des Sicherheitsplans ist ein besonderes Augenmerk auf diejenigen Gefährdungsbilder zu legen, die im Verlaufe der angestrebten Restnutzungsdauer von Belang sein könnten.



Figur 6/3

6.32 Einwirkungen

Aufgrund des schon in Phase I aktualisierten Nutzungsplans und des – unter Beachtung der Restnutzungsdauer – ebenfalls aktualisierten Sicherheitsplans verfügt man über erheblich bessere Kenntnisse bezüglich der zu erwartenden Einwirkungen.

Bei der Aktualisierung der Lastannahmen muss beachtet werden, dass seit der Erstellung des fraglichen Bauwerks manche Anforderungen erheblich hinaufgesetzt wurden. So sind z.B. die Ansprüche in bezug auf die zu berücksichtigenden Schneelasten in den aufeinanderfolgenden Ausgaben der Norm SIA 160 praktisch jedesmal erhöht worden. Ähnliches gilt z.B. für Nutzlasten auf Strassenbrücken.

Es liegt nahe, bei klimatischen Einwirkungen (Schnee, Wind, Erdbeben etc.) die Wiederkehrperiode angemessen zu reduzieren und z.B. auf das 5–fache der vorgesehenen Restnutzungsdauer festzulegen.

Für solche Interpolationen stützt man sich in der Regel auf Wahrscheinlichkeits-Papiere (siehe Abschnitt 3.44), im konkreten Fall klimatischer Ein-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

wirkungen auf die Gumbel-Verteilung (siehe Figur 6/3). Man kann dabei annehmen, dass die Kennwerte der Wind- und Schneelasten gemäss SIA Norm 160 etwa einer Wiederkehrperiode zwischen 30 und 50 Jahren entsprechen. Den anderen Stützpunkt findet man beim etwa einjährigen Wert, den man in der Regel aus eigener Erfahrung gut einschätzen kann. Bei der 5-fachen Restnutzungsdauer liest man dann – im Sinne einer Interpolation – den einzuführenden aktualisierten Kennwert ab.

Während Schneelasten und Kräfte aus Erdbeben direkt interpoliert werden können, scheint es vernünftig, nicht über die Windkräfte, sondern über die Windgeschwindigkeiten zu interpolieren und diese im Anschluss an die Aktualisierung der Windgeschwindigkeit in Kräfte umzurechnen.

Auch in bezug auf Eigenlasten und ständige Lasten ist eine Aktualisierung nötig und sinnvoll. Gerade letztere geben oft zu Überraschungen Anlass (zusätzliche Beläge, unberücksichtigte Zwischenwände etc.). Allerdings sollte man nicht meinen, dass nach einer solchen Aktualisierung die entsprechenden Sicherheitsvorhalte (Lastfaktoren) wegfallen könnten. Die Aktualisierung mag angesichts ausgeräumter Unsicherheiten allerdings eine gewisse Reduktion dieser Faktoren rechtfertigen.

Auch Lasten in Lagern, Fabrikgebäuden usw. müssen aktualisiert werden. Dabei ist in der Regel durch unmissverständliche Nutzungsanweisungen und ausreichende Überwachung dafür zu sorgen, dass die berücksichtigten Lasten nicht überschritten werden. Eine Reduktion der Lastfaktoren ist hier jedoch nicht angebracht.

Auch Lasten auf Bahn- und Strassen-Brücken dürfen reduziert werden, wenn zuverlässig dafür gesorgt ist, dass festgelegte Maximalwerte nicht überschritten und Fahrvorschriften eingehalten werden. Auch hier sind jedoch in der Regel die Lastfaktoren gemäss gültigen Normen anzusetzen.

6.33 Festigkeiten und andere Baustoffeigenschaften

Bei der seinerzeitigen Bemessung des zu beurteilenden Bauwerks wurden gewisse Anforderungen an die Eigenschaften von Baustoffen gestellt. Angesichts der Möglichkeit, dass solche Anforderungen bei der Erstellung nicht erfüllt werden, hat die entsprechende Norm mit Sicherheitsvorgaben gewisse Reserven geschaffen.

Im Beurteilungszeitpunkt besitzen wir weit bessere Kenntnis über die massgebenden Baustoffeigenschaften aufgrund von aus dem Bauwerk entnommenen Proben. Es ist gerechtfertigt, diese bessere Kenntnis in die Beurteilung hineinzubringen und ausserdem gewisse Sicherheitsvorhalte abzubauen. Andererseits sind aber auch die Beobachtungen bezüglich Korrosion, Ermüdung, Abnützung, Versprödung etc. in die Beurteilung einzubeziehen. Auch im Hinblick auf allfällige Verstärkungen sind die Beobachtungen sorgfältig zu dokumentieren, z.B. bezüglich Schweisseignung bestimmter Stähle, etc.

Es ist zu beachten, dass die Aussagekraft der wenigen aus dem Bauwerk entnommenen Proben nicht sehr gross ist. Die daraus gewonnenen Zahlenwerte sind lediglich als Anhaltspunkte aufzufassen, die aufgrund von Erfahrungswerten zu ergänzen sind. So ist z.B. die Streuung der Eigenschaften von Baustoffen älterer Bauwerke sicher grösser als diejenige in heute neuerstellten Konstruktionen.

Es ist zweckmässig, die Prüfresultate kleiner Stichproben in ein geeignetes Wahrscheinlichkeitspapier (siehe Kapitel 3.43) einzutragen, um sich bei der

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Interpretation von den Zufälligkeiten der Einzelwerte zu lösen. Bei der Extrapolation auf Fraktilwerte muss der Umfang der Stichprobe beachtet werden. Man kann sich dabei z.B. an die Regeln halten, die in der Norm SIA 162 für die Kontrolle der Betonfestigkeiten angegeben sind.

Oft lässt sich z.B. die Herkunft von Stählen, z.B. anhand von Lieferscheinen, identifizieren. Liegen solche vor, lassen sich oft recht zuverlässige Werte für die Baustoffeigenschaften gewinnen, z.B. durch Nachfrage bei den entsprechenden Werken oder bei der EMPA.

Eine Aktualisierung der Baustoffeigenschaften kann entfallen, wenn letztere verlässlich aus den Bauwerksakten und den zur Zeit der Erstellung des Bauwerks gültigen Normen hervorgehen und kein Verdacht auf wesentliche Abweichungen oder Alterungserscheinungen besteht. Allfällige Zweifel darf man aber auf keinen Fall fahrlässig in den Wind schlagen.

6.34 Abmessungen

Planmässige Werte sind – sofern das von Belang ist – durch gemessene Werte zu ersetzen, und zwar im günstigen wie auch im ungünstigen Fall.

Die massgebenden Abmessungen sind insbesondere dann am Tragwerk zu kontrollieren, wenn die Bauwerksakten fehlen, wenn am Bauwerk Veränderungen vorgenommen wurden oder wenn Verdacht auf grössere Abweichungen gegenüber den planmässigen Abmessungen besteht.

6.35 Statische Systeme

Die für das Tragverhalten des Bauwerks wichtigen statischen und kinematischen Randbedingungen (Einspannungen, Lagerungsbedingungen, freie Beweglichkeit von Lagern und Fugen, u.a.) sind zu überprüfen. Sie legen die bei der Beurteilung der Tragsicherheit anzunehmenden statischen Systeme fest.

Auch die statischen Systeme waren früher angesichts der zur Verfügung stehenden Rechenhilfsmittel einfacher und damit gröber. Durch detailliertere Modelle, z.B. durch Erfassen räumlicher Tragwirkung, lassen sich oft Reserven ausnützen. Das ist jedoch nicht immer möglich, denn oft ist das, was z.B. als kreuzweise tragende Platte erscheint, rechnerisch nur in einer Richtung tragend und entsprechend bewehrt. Auch können die anschliessenden, die Auflagerkräfte weiterleitenden Konstruktionselemente zu schwach sein, um einen alternativen Kraftfluss zu ermöglichen. Es sind unter Umständen gezielte Nachinspektionen zweckmässig oder notwendig, um sich in diesem Bereich Sicherheit zu verschaffen.

Auf der anderen Seite enthalten Bauwerke oft sog. nichttragende Teile, die man in einer Nachrechnung zum Tragen heranziehen kann. Ein typisches Beispiel sind die sog. nichttragenden Wände, die oft entscheidend zur Stabilisierung bestehender Bauten beitragen. Man kann sie rechnerisch heranziehen, muss dann natürlich deren Funktion auch über die Restnutzungsdauer sicherstellen.

Ein anderes Beispiel sind de facto durchlaufende Stabtragwerke, die man jedoch seinerzeit als gelenkig verbundene Teilsysteme angesehen hat. Man kann die Durchlaufwirkung gegebenenfalls zumindest teilweise in Rechnung stellen und damit Reserven mobilisieren.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Natürlich sind auch Veränderungen aus Schäden, Schwächungen und Umbauten bei der Aktualisierung statischer Systeme zu berücksichtigen.

6.36 Berechnungsverfahren

Auch die Berechnungsverfahren haben sich im Laufe der Zeit geändert. So war es bis in die 70-er Jahre hinein üblich, sich bei der Bemessung auf die nach elastischen Verfahren ermittelten Grenzwertlinien zu stützen. Hier sind wir heute toleranter, konzentrieren uns auf kritische Belastungskonfigurationen und stützen uns in der Regel auf die statischen Methoden des Traglastverfahrens. Das gestattet, gewisse Reserven bei der Nachrechnung aufzulösen. Bei der Anwendung der kinematischen Methode ist Vorsicht am Platz, denn sie überschätzt, wie man weiss, die Traglast.

6.37 Bemessungsmethoden

Bis in die 70-er Jahre hinein wurden Tragelemente auf der Basis der sog. zulässigen Spannungen bemessen. Heute stellen wir in der Regel die als Schnittkräfte gegebenen Beanspruchungen dem entsprechenden Querschnittswiderstand gegenüber. Hier lassen sich oft Reserven mobilisieren.

Im Stahlbau wurde diese mögliche höhere Ausnutzung schon früh in Anspruch genommen, so dass die mögliche Erhöhung selten 5% übersteigt. Auch für die Biegezugbewehrung von Stahlbetonelementen ist der mögliche Gewinn eher bescheiden, während dort, wo die Begrenzung der Betonspannungen massgebend war, heute erhebliche Reserven mobilisierbar sind.

Auf der anderen Seite ist zu beachten, dass sich gewisse, in früheren Normen enthaltene Bemessungsmodelle als unsicher erwiesen haben und heute strengere Anforderungen gestellt werden. Das betrifft z.B. im Stahlbau gewisse Stabilitätsprobleme, im Stahlbetonbau speziell die Bemessungsprobleme Schub und Durchstanzen.

6.38 Mängel und Schäden

Das Tragwerk muss auf Mängel, Schäden und allfällige Alterungserscheinungen sorgfältig geprüft werden. Die beobachteten Mängel und Schäden sowie die Auswirkungen von Verschiebungen, Verformungen, Alterung, Korrosion und Ermüdung müssen bei der Beurteilung der Tragsicherheit sorgfältig beachtet werden.

Bei älteren Bauwerken sind hingegen versteckte grobe Fehler eher unwahrscheinlich, sonst wären sie kaum so alt geworden.

6.39 Bauwerksgeschichte

Weitere interessante und wertvolle Hinweise bringt das Studium der Bauwerksgeschichte: Was ist während der Lebensdauer des Bauwerks alles vorgefallen? Es lohnt sich, Erkundigungen einzuziehen. Man erfährt so z.B., dass eine ganze Reihe von mehr oder weniger starken Erdbeben über das Tragwerk hinweggegangen sind, ohne Schäden anzurichten. Solche Auskünfte sind für die Beurteilung der Erdbebensicherheit eines Bauwerks von Belang. Ähnliches gilt für andere Gefährdungsbilder, die das Tragwerk nachweislich überstanden hat.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

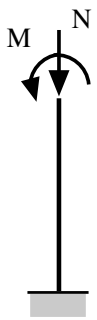
6.4 Der Nachweis ausreichender Tragsicherheit

6.41 Sensitivitätsanalyse

Es lohnt sich, die *massgebenden* Basisvariablen eines Bemessungsproblems zu suchen, um dort dann die Untersuchungen zu konkretisieren, zu intensivieren und zu verfeinern. Dieses Austesten des Problems nennt man Sensitivitätsanalyse. Diese Untersuchung kann entweder deterministisch oder aber, wie in Kapitel 5 gezeigt, probabilistisch geschehen.

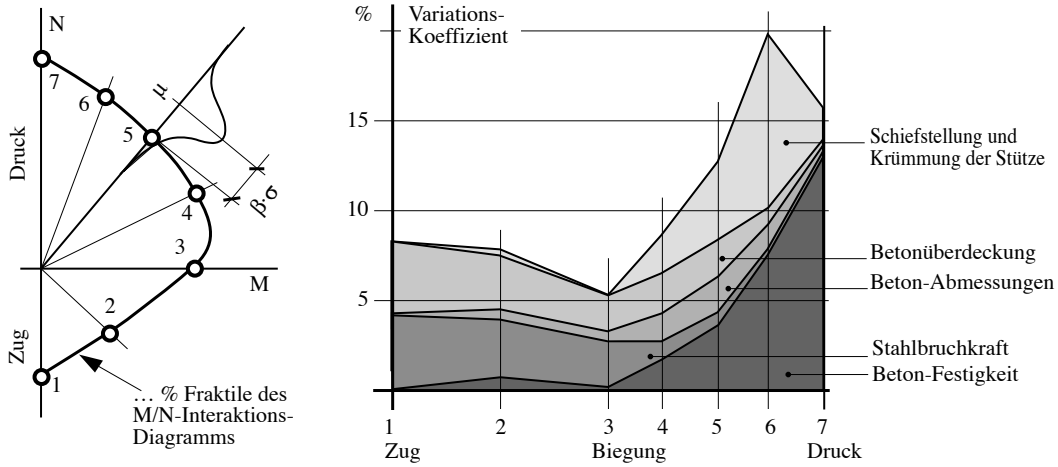
Erfahrene Ingenieure unterlassen es selten, im Rahmen von kritischen Untersuchungen je einmal mit Werten an der oberen und an der unteren Grenze zu rechnen. Sie testen das Problem auf Empfindlichkeit und gehen dann den massgebenden Grössen nach. Bei einer solchen Analyse wird zweckmässigerweise jeweils nur *ein* Wert variiert, während die übrigen konstant gehalten werden, um das Verhalten des Ergebnisses, also z.B. der Sicherheitsmarge $M = R - S$ oder des Sicherheitsfaktors $\gamma = R/S$, zu beobachten. Bei mehreren Variablen und komplexen Formeln wird dieses Verfahren allerdings schnell an seine Grenzen stossen.

Weitaus eleganter sind die probabilistischen Verfahren, die in Kapitel 5.3 und 5.4 vorgestellt wurden. Die dort hergeleiteten Wichtungsfaktoren α_i geben den Einfluss der jeweiligen Basisvariablen direkt an, und man kann sich dann der besseren Erkundung dieser Grössen gezielt widmen. Die Erfahrung zeigt, dass auch bei vielen Variablen fast immer nur zwei, allenfalls drei Variablen ein Problem dominieren.



Figur 6/4

Ein Beispiel soll diesen Sachverhalt erklären (Matousek/Schneider, 1983). Als System liegt ein schlanker, unten eingespannter, oben freier Knickstab aus Stahlbeton vor (Figur 6/4). Am oberen Stabende greifen eine Normalkraft N und ein Biegemoment M an, beide als deterministisch gegebene Grössen angenommen. Als Variablen wurden unter anderen eingeführt die Betonüberdeckung, die Querschnittsabmessungen der Stütze, die Stahlbruchkraft, die Betonfestigkeit und schliesslich die ungewollte Schiefstellung und die unbeabsichtigte Vorkrümmung der Stütze.



Figur 6/5

Aus sieben Punkten wurde das zu einem bestimmten β-Wert gehörende M/N-Interaktions-Diagramm des Einspannquerschnittes unter Beachtung der Effekte 2. Ordnung ermittelt. Punkt 1 bedeutet reiner Zug ($M = 0$), in Punkt 3 herrscht reine Biegung ($N = 0$), in Punkt 7 schliesslich ist der Stab nur auf Druck belastet (Knicken). In allen Punkten wurde der Einfluss der Variablen auf das Versagen des Stabes untersucht. Die Anteile sind in Figur 6/5 rechts dargestellt.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Wie man erkennt, sind in praktisch allen Bereichen des M/N-Diagramms lediglich zwei der fünf Variablen dominant, nämlich in Punkt 2 beispielsweise die Stahlzugkraft und die Betonüberdeckung, in Punkt 6 oder 7 die Betonfestigkeit sowie die Schiefstellung und Krümmung der Stütze. Der Beitrag aller übrigen Variablen ist jeweils vernachlässigbar.

Das Beispiel zeigt, dass es sich nicht lohnt, im konkreten Fall unwesentlichen Einflüssen nachzujagen. Es ist wichtiger, die das jeweilige Problem dominierenden Grössen genau zu untersuchen und alle Anstrengungen auf die Aktualisierung dieser Werte zu lenken.

6.42 Sicherheitsanalyse

Das Ziel einer Sicherheitsanalyse ist die Beschaffung einer Masszahl für die Tragsicherheit und einer massgebenden Vergleichsgrösse als Hilfe für die Entscheidungsfindung. Auch hier sind deterministische und probabilistische Methoden zu unterscheiden.

a) Deterministische Analyse

Deterministische Methoden, etwa die Anwendung von in Normen gegebenen Regeln und Faktoren sind wenig hilfreich, da diese auf die Bemessung von noch nicht bestehenden Bauten ausgerichtet sind. Die hier bestehenden Quellen von Unsicherheit sind bei bestehenden Tragwerken meist nicht von Belang. Andererseits sind wesentliche Einflüsse zu aktualisieren.

Es soll hier nicht ausgeschlossen werden, dass man auch auf der Basis solcher Normen und Richtlinien die Sicherheit bestehender Bauwerke überprüfen kann. Es geht ja ohnehin nicht um einen formellen Beweis, sondern weit mehr um eine intensive Beschäftigung des beauftragten Ingenieurs mit der anstehenden Frage, ob das Tragwerk sicher sei und damit um die Frage, wie er sich selbst seines Entscheides sicher wird. In solchen Fällen muss vermutlich jeder seinen eigenen Weg suchen. Eine gewisse Hilfe bei deterministischen Untersuchungen bieten die Empfehlungen der Richtlinie SIA 462 (SIA 462, 1994).

In Kenntnis der hier entwickelten probabilistischen Methoden liegt es nahe, ihre gerade hier zum Tragen kommenden Stärken zu nutzen. Auf deterministische Methoden soll deshalb nicht weiter eingegangen werden.

b) Probabilistische Methoden

Probabilistische Methoden sind auch in diesem Zusammenhang der vernünftigere Ansatz. Mit den aus Kapitel 5 bekannten Verfahren werden die Masszahlen β und p_f der kritischen Elemente berechnet und mit dem durch die gültigen Normen definierten Sicherheitsniveau verglichen. Für die weiteren Ausführungen sind zwei Sätze zu formulieren, die im Sinne von Axiomen gelten können:

- Ein zu einem bestimmten Zeitpunkt nach einem konsistenten Paket von gültigen Normen fehlerfrei bemessenes Tragwerk gilt zu diesem Zeitpunkt und im Rahmen dieser Normen als sicher. Die zu einer realistisch eingeschätzten Basisvariablen X_{i0} in einer zutreffenden Grenzzustandsgleichung $G_0(X_{i0}) = 0$ gehörige Versagenswahrscheinlichkeit entspricht der von diesem Normenpaket gerade noch akzeptierten Versagenswahrscheinlichkeit p_{f0}:

$$G_0(a_{00}, X_{10}, X_{20} \ldots X_{i0} \ldots X_{n0}) \leq 0 \rightarrow \beta_0, p_{f0}$$

- Ein bestehendes Tragwerk kann als sicher bezeichnet werden, wenn die Berücksichtigung aktualisierter Werte der Basisvariablen X_i in einer ak-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

tualisierten Grenzzustandsgleichung $G(X_i)=0$ zu einer Versagenswahrscheinlichkeit p_f führt, die nicht grösser ist als die von den gültigen Normen gerade noch akzeptierte Versagenswahrscheinlichkeit p_{f0}:

$$G(a_0, X_1, X_2 \ldots X_i \ldots X_n) \leq 0 \qquad \rightarrow \beta, p_f$$

Die Grenzzustandsfunktionen $G_0(\ldots)$ und $G(\ldots)$ sowie die Variablen X_{i0} und X_i sind nach bestem Wissen und Gewissen und unter Berücksichtigung aller Quellen von Unsicherheit an- und einzusetzen.

Entscheide werden also aufgrund des Vergleiches von p_f und p_{f0} gefällt. Wenn $p_f \leq p_{f0}$ erfüllt ist, gilt das Tragwerk als sicher. Wenn p_f etwas grösser als p_{f0} ist, sind Massnahmen nötig, die vom Baustoffverhalten und der Versagensart abhängig sind.

Ist die Versagensart duktil, so kann das Bauwerk unter Umständen weiter in Betrieb bleiben, bedarf aber einer sorgfältigen Überwachung. Bei sprödem Verhalten nützt eine Überwachung allerdings nicht. Das Bauwerk muss verstärkt oder allenfalls ersetzt werden, wenn ein Sicherheitsproblem vorliegt. Ist dies nicht der Fall, kann wie bei duktilem Versagen vorgegangen werden. Wenn p_f erheblich grösser als p_{f0} ist, muss das Bauwerk in jedem Fall verstärkt oder ersetzt werden.

c) Beschränkte Aktualisierung

Oft sind entweder nur die Einwirkungen oder nur die Widerstände eines bestehenden Tragwerks fraglich und damit zu überprüfen. Man kann sich in solchen Fällen darauf beschränken, den nicht in Frage gestellten Komplex nach den gültigen Normen zu behandeln und nur im fraglichen Teil den Aktualisierungsprozess in Gang zu setzen. Es zeigt sich, dass man mit einem derart reduzierten Beurteilungsspielraum auf der sicheren Seite liegt. Man wird in der Regel so auch grössere Akzeptanz bei den Kollegen der Praxis finden, die der Anwendung probabilistischer Methoden noch reserviert gegenüberstehen.

Ist der Widerstand eines Tragelements fraglich, wird man diesen aktualisieren und mit dem normgemässen Wert vergleichen. Formal sieht der Vergleich wie folgt aus:

$$R_0(X_{10} \ldots X_{k0}) - r_d \leq 0 \quad \rightarrow \quad \beta_{R0}, p_{fR0}$$

$$R(X_1 \ldots X_k) - r_d \leq 0 \quad \rightarrow \quad \beta_R, p_{fR}$$

Widerstands-modelle — Bemessungswert des Widerstandes nach Norm — für Unterschreitung des Bemessungswertes des Widerstands

Ist die Einwirkungsseite fraglich, wird man die aktualisierten Werte der Beanspruchung dem normgemässen Wert gegenüberstellen:

$$s_d - S_0(X_{l0} \ldots X_{n0}) \leq 0 \quad \rightarrow \quad \beta_{S0}, p_{fS0}$$

$$s_d - S(X_l \ldots X_n) \leq 0 \quad \rightarrow \quad \beta_S, p_{fS}$$

Beanspruchungs-modelle — Bemessungswert der Beanspruchung nach Norm — für Überschreitung des Bemessungswertes der Beanspruchung

Das Tragwerk gilt als sicher, wenn $p_{fR} \leq p_{fR0}$ bzw. $p_{fS} \leq p_{fS0}$ ist. In (J. Schneider, 1990) ist diese Vorgehensweise am Beispiel eines einfachen Falles beschrieben.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

6.5 Massnahmen

6.51 Sichernde Sofortmassnahmen

Sobald es der Augenschein oder andere Umstände als nötig erscheinen lassen, müssen zum Schutze von Menschen und Umwelt unverzüglich sichernde Massnahmen angeordnet werden. Dies ist spätestens dann der Fall, wenn der dringende Verdacht besteht, dass die Tragsicherheit nicht gewährleistet ist. Als sichernde Sofortmassnahmen sind in Betracht zu ziehen:

- ausreichende Beschränkung der Nutzung
- Abstützung von Bauteilen, die Menschen und Umwelt gefährden
- Absperrung von Teilen des Bauwerks
- Ausserbetriebnahme und Absperrung des Bauwerks.

6.52 Administrative Massnahmen

Sinnvoll ist oft eine *Intensivierung der Überwachung* von Bauwerken, sofern diese eine graduelle Verschlechterung der Tragsicherheit einer Konstruktion rechtzeitig aufdecken kann. Dies ist der Fall, wenn sich ein allfälliges Versagen, z.B. durch wachsende Verformungen, Risse, sukzessives Brechen von Drähten usw. vorzeitig ankündigt. Bei Konstruktionen, bei denen ein unangekündigtes Versagen möglich scheint, ist hingegen eine Intensivierung der Überwachung in der Regel kein zuverlässiges Mittel.

Oft sind auch die Verfügung von *Nutzungs- bzw. Nutzlastbeschränkungen* denkbar. Es ist wichtig, solche Massnahmen auf ihre Wirksamkeit und Durchsetzbarkeit hin zu untersuchen.

Es ist zu empfehlen, auf diesem Weg eingegangene und bewusst akzeptierte Risiken in einer Risiko-Dokumentation festzuhalten und mit dem Eigentümer bzw. Betreiber des Bauwerks abzusprechen.

6.53 Verstärken der Konstruktion

Werden Teile eines Tragwerks verstärkt, so wäre für die zu verstärkenden Tragwerksteile die Einhaltung der für Neubauten gültigen einschlägigen Normen des SIA anzustreben. Sind wesentliche Teile oder das gesamte Tragwerk zu verstärken, so sollen der Bemessung der Verstärkung diese Normen zugrunde gelegt werden. Viele Hinweise für die Verstärkung von Bauwerken enthält (IP Bau, 1994).

6.54 Abbruch und Neubau

Es sollte uns Ingenieuren bewusst sein, dass ein mit Sicherheitsmängeln begründeter Abbruch eines Bauwerks erst zuallerletzt erwogen werden darf. In gewissem Sinne misst sich die Qualität eines Ingenieurs an seiner Fähigkeit, auch auf längere Sicht vertretbare andere Wege zu finden, um diese letzte Massnahme hinauszuschieben.

Ist man unvermeidbar gezwungen, das Tragwerk zu ersetzen, wird man den Abbruch planen und den Neubau projektieren müssen. Die Projektierung des Neubaus orientiert sich dann zweifellos an den für Neubauten gültigen Normen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Literatur

Bosshard, W.: "Structural Safety – A Matter of Decision and Control"; IABSE Periodica, Surveys Series, S-9/79, IABSE Zürich, 1979

Briner, H.: "Nutzungs-/Sicherheits-/Kontrollplan – Rechtliche Fragen und Antworten zur Norm SIA 160"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 26, 1992

Casciati, F., Negri, R. und Rackwitz, R.: "Geometrical Variability in Structural Members and Systems"; Working Document of the JCSS, erhältlich bei IABSE Zürich, 1989

CEB Bulletin 192: "Diagnosis and Assessment of Concrete Structures", CEB, Lausanne, 1989

Ditlevsen, O.: "Reliability Updating of Existing Structures"; Appendix A in: "Structural Reliability of Existing Bridges"; Report No. 1, the Road Directorate, Ministry of Transport, Denmark, 1986

Favre, R., Andrey, D. et Suter, R.: "Maintenance des ouvrages d'art – Méthodologie de surveillance"; Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau, Bern, 1987

Hirt, M.A.: "Nutzungs-/Sicherheits-/Kontrollplan"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 1–2, 1992, Seiten 2 ff.

IP Bau: "Zustandsuntersuchungen an bestehenden Bauwerken – Leitfaden für Bauingenieure"; Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1992

IP Bau: "Beurteilung und Verstärkung von Tragwerken"; Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1994

Ladner, M.: "Zustandsuntersuchungen von Bauwerken"; Forschungs- und Arbeitsberichte, Abteilung 116, Massivbau, Bericht Nr. 116/3, EMPA Zürich, 1988

Matousek, M. & Schneider, J.: "Gewährleistung der Sicherheit von Bauwerken – Ein alle Bereiche des Bauprozesses erfassendes Konzept"; Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Bericht 140, 1983

Schneider, J.: "Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Tragwerke"; SIA-Heft Nr. 46, 1990

SIA 160: "Einwirkungen auf Tragwerke", Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1989

SIA 169: "Erhaltung von Ingenieur-Bauwerken"; Empfehlung, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1987

SIA 462: "Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke"; Richtlinie, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich 1994

SIA Tragwerksnormen 1892–1956: "Sammlung der in der Schweiz zwischen 1892 und 1956 erlassenen Verordnungen, Vorschriften und Normen für Tragwerke aus Stahl, Beton, Mauerwerk und Holz", faksimilierte Wiedergabe, SIA, 1994

SIA Dokumentation D 041: "Einführung in die Norm SIA 160 'Einwirkungen auf Tragwerke' und die Empfehlung SIA 169 'Erhaltung von Ingenieurbauwerken'", Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1989

Vrouwenvelder, A.C.W.M. and Siemens, T.: "Durability – A Probabilistic Approach"; IABSE Periodica, Proceedings, P-85, IABSE Zürich, 1985

Wicke, M. et al.: "Verfahren zur Vorhersage des Umfangs von Brückensanierungen"; Bundesministerium für Wirtschaftliche Angelegenheiten, Strassenforschung, Heft 338, 1987

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Wolfseher, R.: "Stahlbeton in Bau, Erhaltung und Sanierung"; sechsteilige Serie in Schweizer Baublatt, No. 19, 27, 43, 53, 81 und 93, 1992

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

7. Gefährdungsanalyse mit logischen Bäumen

7.1 Übersicht und Begriffe

Als einführendes Beispiel dient hier der nach dem Ort des Ereignisses bezeichnete *Ronan Point Accident,* der die Diskussion über das sog. fortschreitende Versagen von Tragwerken ausgelöst hat: In einem der obersten Stockwerke eines aus vorgefertigten Platten bestehenden Hochhauses bei London knipst eine ältere alleinstehende Frau eines morgens das Licht an: eine Explosion zerstört die Wohnung, die Frau findet den Tod. Eine Fassadenplatte wird weggesprengt, die darüber liegende Deckenplatte verliert ihre Stützung und stürzt ebenfalls in die Tiefe, das nächsthöhere Fassadenelement mitreissend, usw. Abstürzende Trümmer reissen schliesslich die ganze Gebäudeecke von oben bis unten weg.

Die *Ursachen?* Beim Betätigen des Lichtschalters entstand ein Funken. Dieser entzündete ausgeströmtes Gas des Kochherdes; ein Leck in der Leitung, oder aber – wahrscheinlicher – die Frau hatte am Abend vorher das Gasventil nicht richtig oder gar nicht geschlossen. Bei der Suche nach den Ursachen landet man in der Regel bei menschlichen Fehlhandlungen oder erkennt, dass sich bewusst akzeptierte Risiken ausgewirkt haben (siehe Figur 1/9). Als *Folgen* sind in der Regel Sach- und Personenschäden zu beobachten. Hier waren sie verheerend: eine kleine Ursache mit grosser Wirkung.

Auch hier wurde man erst durch Erfahrung klug! Denn erst dieser als "Ronan Point Accident" weltweit bekannt gewordene Unfall hat bewirkt, dass in allen modernen Normen ein Satz etwa des folgenden Inhalts steht:

> *"Tragwerke sind so zu konzipieren und zu bemessen, dass kleine Ursachen keine unproportional grossen Folgen haben (siehe z.B. die Norm SIA 160, Art. 2 21 3)."*

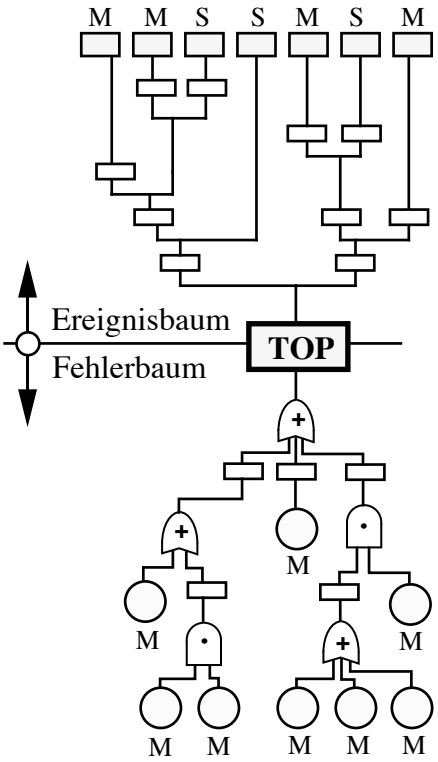
Freilich hätte man dieses Ausgangsereignis und auch die möglichen Folgen als planender Architekt und/oder Ingenieur auch *a-priori* erkennen können. Explosionen sind nicht auszuschliessen, das weiss man schon lange. Man hätte also dafür sorgen müssen, dass bei einer Explosion z.B. nur das Fenster des betroffenen Raums herausgerissen wird und nicht gleich das ganze Fassadenelement mit allen geschilderten Folgen. Das ist Gefährdungsanalyse und damit eine Frage der Fantasie und gleichzeitig Massnahmenplanung, beides Themen von Kapitel 2. Logische Bäume sind in diesem Zusammenhang ein wichtiges Hilfsmittel.

Logische Bäume verknüpfen *Ursachen* über unter Umständen viele Zwischenereignisse mit *Folgen*. Ein logischer Baum ist ein gerichteter Graph mit logischen Eigenschaften. Die wichtigsten logischen Bäume sind:

- *Fehlerbaum (Fault tree):* vergleichbar mit einem Wurzelstock: viele Eingänge, die sich zum Stamm hin bündeln; ein Ausgangsereignis, der "top event", oft kurz mit TOP bezeichnet. Ziel: Systematische deduktive Identifikation aller möglichen *Ursachen* (d.h. Ereignisse und ihrer Verknüpfungen) des TOP-Ereignisses und der Eintretenswahrscheinlichkeiten.
- *Ereignisbaum (Event tree):* vergleichbar mit einem Stamm, der sich verzweigt: ein einziges Ausgangsereignis (gelegentlich ebenfalls als TOP bezeichnet), viele mögliche Folgeereignisse. Ziel: Systematische induktive Identifikation aller möglichen *Folgen* des Ausgangsereignisses und die Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeiten dieser Folgen für das System.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

- *Ursachen/Folgen-Diagramm (Cause-Consequence Chart):* in gewisser Weise eine Kombination von Fehlerbaum und Ereignisbaum. Ja/Nein-Ausgänge vermitteln an den Verzweigungen von Ereignis zu Folgeereignis. An jeder Verzweigungen kann man einen Fehlerbaum einfügen, um die Verzweigungswahrscheinlichkeiten abzuschätzen. Ziel: Ermittlung von Ursachen für kritische Vorgänge oder Zustände, Evaluation möglicher Abläufe und Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten.
- *Entscheidungsbaum (Decision tree):* wichtiges Hilfsmittel zur Erarbeitung der Grundlagen für Entscheidungen.



Figur 7/1

Figur 7/1 zeigt schematisch die Verknüpfung eines Ereignisbaumes (den man lieber Folgenbaum nennen möchte) mit einem Fehlerbaum (den man lieber als Ursachenbaum bezeichnet sähe). M steht im Ereignisbaum für Personenschäden, S für Sachschäden. Letzte Ursachen von Schäden sind meist Fehlhandlungen von beteiligten Menschen. Sie sind mit M im Fehlerbaum markiert. Beide Bäume kann man sich verknüpft denken im Ausgangsereignis des Ereignisbaums, dem sog. TOP des Fehlerbaums.

Fehlerbäume und Ereignisbäume zeigen, wo Massnahmen ergriffen werden können, um unerwünschte Ereignisse zu verhindern oder deren Schwere zu mindern. Unterschiede sind eher in der Betrachtungsweise zu sehen. Fehlerbäume zeigen bei deduktivem Denkansatz die möglichen Ursachen grundsätzlich denkbarer unerwünschter Ausgangsereignisse auf, während Ereignisbäume in induktiver Betrachtung sich der möglichen Folgen annehmen. Man wird in vielen Fällen jedoch mit Vorteil diese unterschiedlichen Denkansätze in freier Weise mischen und kommt damit automatisch zum Ursachen/Folgen-Diagramm.

Die beiden zentralen Fragen lauten in jedem Fall:

- Wie kommt es zum TOP?
- Was wären die Folgen eines solchen Ausgangsereignisses?

Bei der Arbeit mit logischen Bäumen zeigen sich charakteristische Eigenschaften:

- Das TOP-Ereignis kann willkürlich gewählt werden ("Angenommen, dass …"). Wie beim Brainstorming ist die Frage "Aber…?" verboten. Erst wenn man rein gedanklich zulässt, dass sich das TOP ereignen könnte, kommt man weiter.
- Meist sind mehrere TOPs zu untersuchen, bis eine Situation genügend ausgeleuchtet ist. Dabei wählt man ursachennähere TOPs, um das Geäst der Folgen breiter zu sehen, oder aber folgennähere TOPs, um im Wurzelgeflecht der Ursachen genauer zu sehen. Eine graphische Darstellung ist nur in einfachen Fällen möglich. Der Computer ist oft nützlich.
- Die von System, Umwelt oder Mensch induzierten Einflüsse bzw. Ereignisse sind ohne Komplikation mischbar.
- Die Arbeit mit Bäumen ist ausserordentlich ergiebig und beliebt bei Zuverlässigkeits- und Risikoanalysen.
- Logische Bäume sind dank ihrer Übersichtlichkeit für die Kommunikation mit Laien hervorragend geeignet. Damit sind sie ein wichtiges Hilfsmittel für das Management.
- Die Arbeit mit logischen Bäumen ist sehr anregend, insbesondere bei der Massnahmenplanung.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

7.2 Fehlerbäume

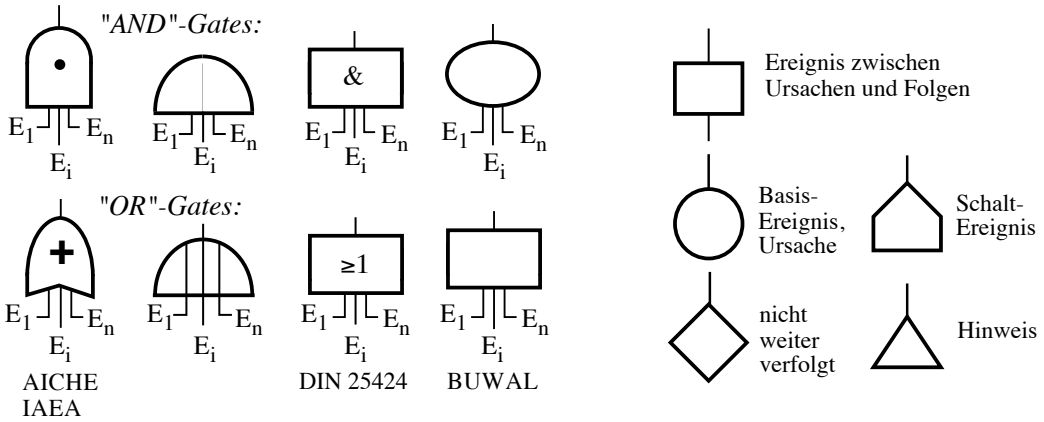
7.21 Charakteristika von Fehlerbäumen

Ziel der Fehlerbaum-Analyse (fault tree analysis, FTA) ist die systematische Erfassung möglicher Ursachen eines bestimmten unerwünschten TOP-Ereignisses. Der Fehlerbaum ist in diesem Sinn ein logisches Diagramm zur Darstellung von Ereigniskombinationen, die zum TOP führen.

Vom TOP geht man – zeitlich gesehen – rückwärts zu den Ursachen. Es sind dabei Ansprüche an die Logik der Verknüpfungen zwischen Ursachen und Folgeereignissen zu beachten. Der Fehlerbaum muss gerichtet sein. Er darf keine Zyklen aufweisen. Jedes Ereignis ist durch die zeitlich vorausgehenden Ereignisse definiert. Jedes Ereignis ohne vorangehendes Ereignis ist als unabhängige Variable zu betrachten (Meyna, 1985).

7.22 Symbole

Es ist zu unterscheiden zwischen logischen Toren, den sog. Gates, und anderen Symbolen. Verschiedene Darstellungen für die zwei wichtigsten logischen Tore zeigt Figur 7/2.



Figur 7/2

Sorgfältig zu beachten sind die Rechenregeln für die logischen Tore: Beim "AND"-Gate sind die einmündenden Komponenten E_i parallel geschaltet. Sie müssen gleichzeitig versagen, also "sowohl E_1 als auch E_2 als auch …". Das entspricht bekanntlich der Multiplikation der entsprechenden Wahrscheinlichkeiten, deshalb z.B. das Mal-Zeichen im Symbol. Die Rechenregel ist:

$$P = \prod_{i=1}^{n} p_i$$

Bei "OR"-Gates genügt es, wenn eine der einmündenden Komponenten versagt, also "entweder die erste, oder die zweite ...". Die Folge ist die Addition der Wahrscheinlichkeiten. Damit sind "OR"-Gates im Prinzip "gefährlicher" als "AND"-Gates. Die Rechenregel für "Or"-Gates ist:

$$P = \sum_{i=1}^{n} p_i \quad - \sum_{i=1}^{n} p_i \cdot p_j$$

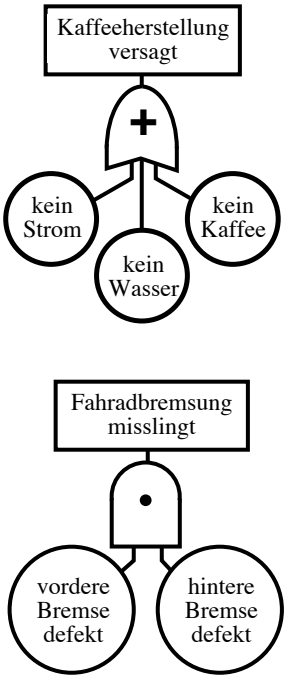
Die wichtigsten übrigen Symbole können ebenfalls Figur 2 entnommen werden. Darunter findet sich auch das Symbol für ein sog. Schaltereignis, d.h. ein Ereignis, das innerhalb des betrachteten Fehlerbaums ein anderes Ereignis auslöst, also z.B. einen Schalter dreht oder eine Pumpe anwirft.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Auch hier findet man in der Literatur verschiedene Darstellungen, doch sind die Unterschiede nicht von Belang.

Zwei kurze Beispiele zur Erläuterung (Figur 7/3): nämlich das Ziel, mit einer Kaffeemaschine Kaffee zu kochen und die Aufgabe, ein Velo zuverlässig zu bremsen. Eine Kaffeeherstellung ist nicht möglich, wenn entweder die Stromversorgung ausfällt oder kein Wasser vorhanden ist oder kein Kaffee ("OR"-Gate). Natürlich kann es noch andere Gründe geben, z.B. einen Defekt der Kaffeemaschine selber. Um solche Erweiterungen im Ursachenteil zu erkennen, zeichnet man ja den Fehlerbaum.

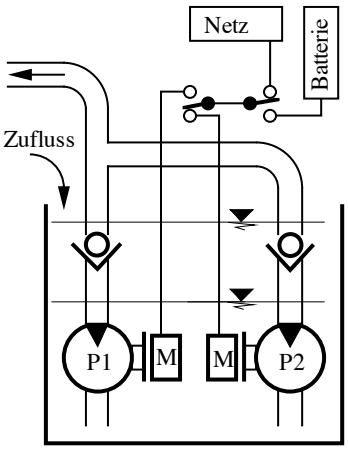
Die Bremsung eines Fahrrads misslingt nur dann, wenn sowohl die Hinter- als auch die Vorderradbremse ausfallen ("AND"-Gate). Vielleicht gibt es auch hier noch weitere Ursachen. Der Leser ist jedenfalls aufgefordert, diese kleinen Beispiele zu erweitern und dabei die logischen Zusammenhänge korrekt zu beachten.



Figur 7/3

7.23 Ein wegleitendes Beispiel

Als Beispiel dient (in Anlehnung an (Ang/Tang, 1984) das Entwässerungssystem eines Pumpensumpfes (siehe Figur 7/4). Das Kellergeschoss eines Museums, das zur Lagerung wertvoller Kunstgegenstände dient, soll damit gegen eindringendes Grundwasser gesichert werden. Im Normalbetrieb vermag eine Pumpe das anfallende Wasser problemlos wegzupumpen. An die Anlage werden jedoch hohe Anforderungen bezüglich Betriebszuverlässigkeit gestellt, weshalb man glaubt, nur mit weitgehend redundanter Anordnung auszukommen. Man ordnet also zwei Pumpen an und sorgt auch dafür, dass bei Stromausfall die Anlage über Batterien betriebsbereit bleibt. Steigt das Wasser – aus welchem Grund auch immer – bis zu einem kritischen Niveau, springt automatisch eine der beiden Pumpen an. Bei einem unteren kritischen Wert wird sie wieder ausgeschaltet und die Funktion für den nächsten Pumpbetrieb an die andere Pumpe abgegeben, um so beide umschichtig in Betrieb zu halten.



Figur 7/4

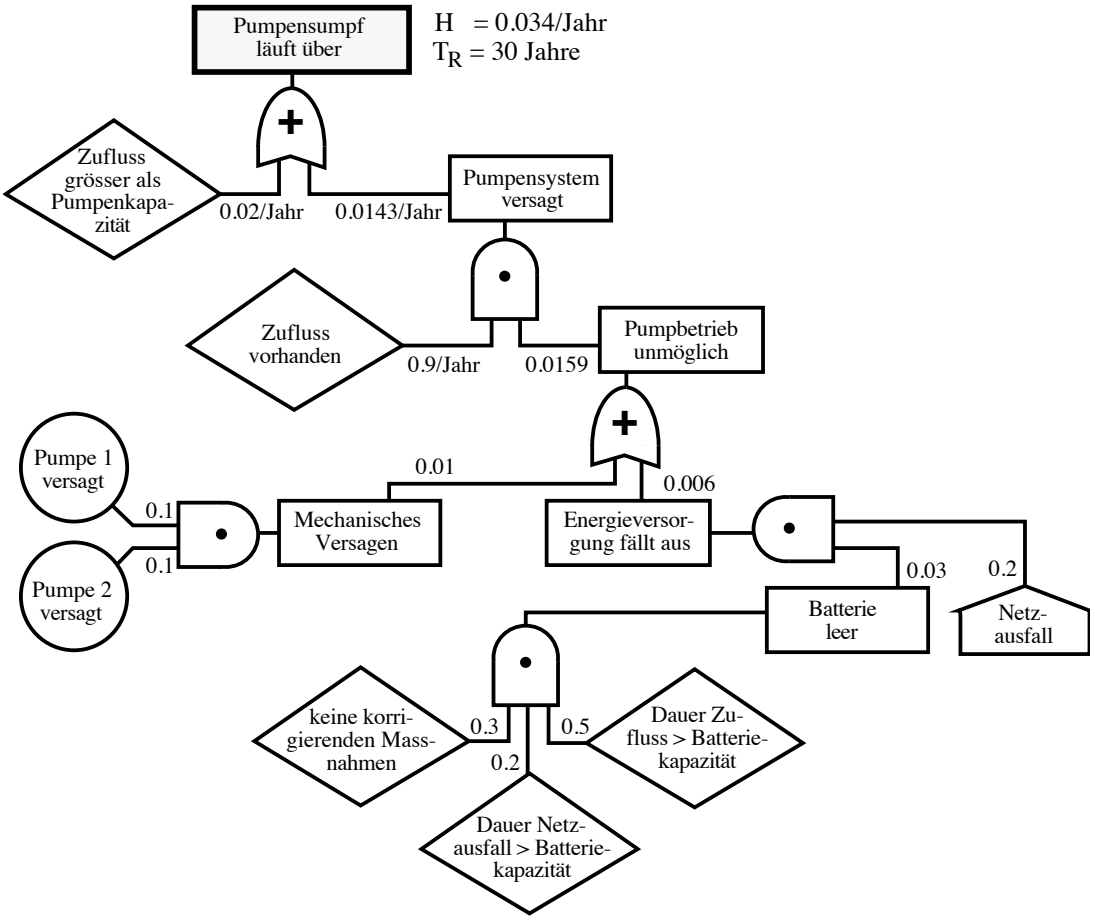
Ob die dargestellte Anlage sicherheitstechnisch verbesserbar ist, sei hier nicht untersucht. Es geht vielmehr darum, die Logik des Fehlerbaums und die Algorithmen zu zeigen. Gesucht ist eine Beurteilung der Betriebszuverlässigkeit der Anlage, also z.B. der Grad der Wahrscheinlichkeit, dass der Pumpensumpf überläuft und damit die Sammlung gefährdet. Dies ist eine Aufgabe, die mit einem Fehlerbaum einfach zu lösen ist.

In einem ersten Schritt wird man einen solchen Fehlerbaum entwerfen. In einem zweiten Schritt wird er auf Vollständigkeit und logisch korrekte Verknüpfungen sorgfältig geprüft. In Figur 7/5 ist ein Fehlerbaum für das vorliegende Problem dargestellt. Er enthält unter "Netzausfall" auch ein sog. Schaltereignis: bei Netzausfall wird automatisch auf Batteriebetrieb umgeschaltet. Wichtig ist dann natürlich die Frage, ob die Batterie betriebsbereit ist und ob bei längerem Netzausfall korrigierende Massnahmen, z.B. eine Auswechslung der Batterien, ergriffen werden.

Erst in einem dritten Schritt geht es um die Ermittlung von Wahrscheinlichkeiten. Dazu werden an der Peripherie die Wahrscheinlichkeiten bzw. Häufigkeiten erhoben bzw. geschätzt und eingetragen. So ist z.B. das Feld "Zufluss vorhanden" mit einer vergleichsweise grossen Häufigkeit von h = 0.9/Jahr versehen, da sehr oft Wasser in den Pumpensumpf einsickert. Das ist ja auch der Grund, weshalb die ganze Anlage installiert wird. Bei den übrigen Wahrscheinlichkeiten sind Zahlenwerte einzusetzen, die z.B. statistisch oder durch Befragen von Experten (d.h. subjektiv) erhärtet sind. Ziel ist dann vor allem auch die die Identifikation "kritischer Wege", das heisst

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

solcher Wege, die wesentlich zur Wahrscheinlichkeit des TOP beitragen. Auf solchen Wegen sind dann Massnahmen besonders wirksam.



Figur 7/5

Aufgrund der eingetragenen Zahlenwerte erbringt das die Regeln beachtende Durchrechnen des Fehlerbaums von unten nach oben, als Ergebnis die Häufigkeit für das Überlaufen des Pumpensumpfes, nämlich H = 0.034/Jahr oder, als Kehrwert dieser Zahl, eine Wiederkehrperiode von 30 Jahren.

7.24 Bemerkungen

Es ist ausserordentlich wichtig, die Ereignisse an der Peripherie des Fehlerbaums auf allfällige Abhängigkeiten zu prüfen. So könnte z.B. eine gemeinsame, tief unten liegende Ursache (z.B. Stromausfall, Feuer, Erdbeben, schlafendes Personal) mehrere Basis-Ereignisse erzeugen. Ist das der Fall, muss der Fehlerbaum weiterentwickelt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Wahrscheinlichkeit solcher abhängiger Ausfälle (common cause failure) nicht auf einfache Weise aus den Wahrscheinlichkeiten der Ursachen ermittelt werden kann.

Für die Berechnung von grossen Fehlerbäumen sind Computer nötig. Schon auf kleinen Personalcomputern stand schon früh mit dem Fehlerbaum-Programm FaultrEASE (FaultrEASE, 1993) für Macintosh und Windows eine gute, das Zeichnen und Rechnen unterstützende Hilfe zur Verfügung. Heute beherrschen kommerzielle Programme (z.B. VaP) das Zeichen und Berechnen von Fehlerbäumen. Schliesslich kann man auch mit Tabellen-Kalkulationsprogrammen, wie z.B. *Excel,* recht ordentlich arbeiten.

Weitere Beispiele zu Fehlerbäumen finden sich z.B. in (Ang/Tang, 1984), (AICHE, 1989), (Chakraborty/Kröger, 1990), (Vallon, 1992).

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

7.3 Ereignisbäume

7.31 Charakteristika des Ereignisbaums

Ziel der Ereignisbaum-Analyse (event tree analysis, ETA) ist die systematische induktive Erfassung möglicher Folgen eines bestimmten auslösenden Ereignisses. Typisch ist die einfache Logik: es sind keine speziellen Symbole notwendig. Auf ein Ereignis folgende, sog. Folge-Ereignisse schliessen sich jeweils gegenseitig aus. Somit addieren sich die Wahrscheinlichkeiten an den Verzweigungsstellen zu 1. Jeder Weg führt durch spezifische Ereignisse und endet separat auf der Konsequenzen-Ebene. Die Auftretens-Häufigkeiten der Konsequenzen ergeben sich als Produkt der Wahrscheinlichkeiten auf dem Weg, wobei die Häufigkeit H(A) des Ausgangsereignisses mitzuberücksichtigen ist. Es ist

$$P(C|A) = \prod_{i=1}^{n} p_i \tag{7.1}$$

Damit ergibt sich

$$H(C) = H(A) \cdot P(C|A) = H(A) \cdot \prod_{i=1}^{n} p_i \tag{7.2}$$

Wie man zu den Wahrscheinlichkeiten an den Verzweigungen des Ereignisbaums kommt, sei zunächst nicht näher betrachtet. Es könnte sich um die Ergebnisse einer Statistik über den betrachteten Sachverhalt handeln, aber auch um subjektive Schätzungen. Auf jeden Fall könnte man für jede Verzweigung einen Fehlerbaum entwerfen und damit die Verzweigungswahrscheinlichkeiten aus weiter hinten liegenden Basisereignissen herleiten. Betrachten wir also zunächst den grundsätzlichen Aufbau eines reinen Ereignisbaums.

7.32 Ein wegleitendes Beispiel

Das folgende Beispiel wurde im Rahmen eines Sicherheitsplans für die SBB erarbeitet (Pfister/Grüter, 1988). Es geht darum, die Folgen einer Verschüttung eines SBB-Gleises durch eine Lawine abzuschätzen.

Es besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die Strecke bei grosser Lawinengefahr zu sperren und Züge nach Niedergang einer Lawine zu warnen. Das Beispiel spricht zunächst für sich selbst. Die Wahrscheinlichkeiten auf dem Weg von Ereignis zu Ereignis sind aufgrund langjähriger Beobachtung geschätzte Grössen.

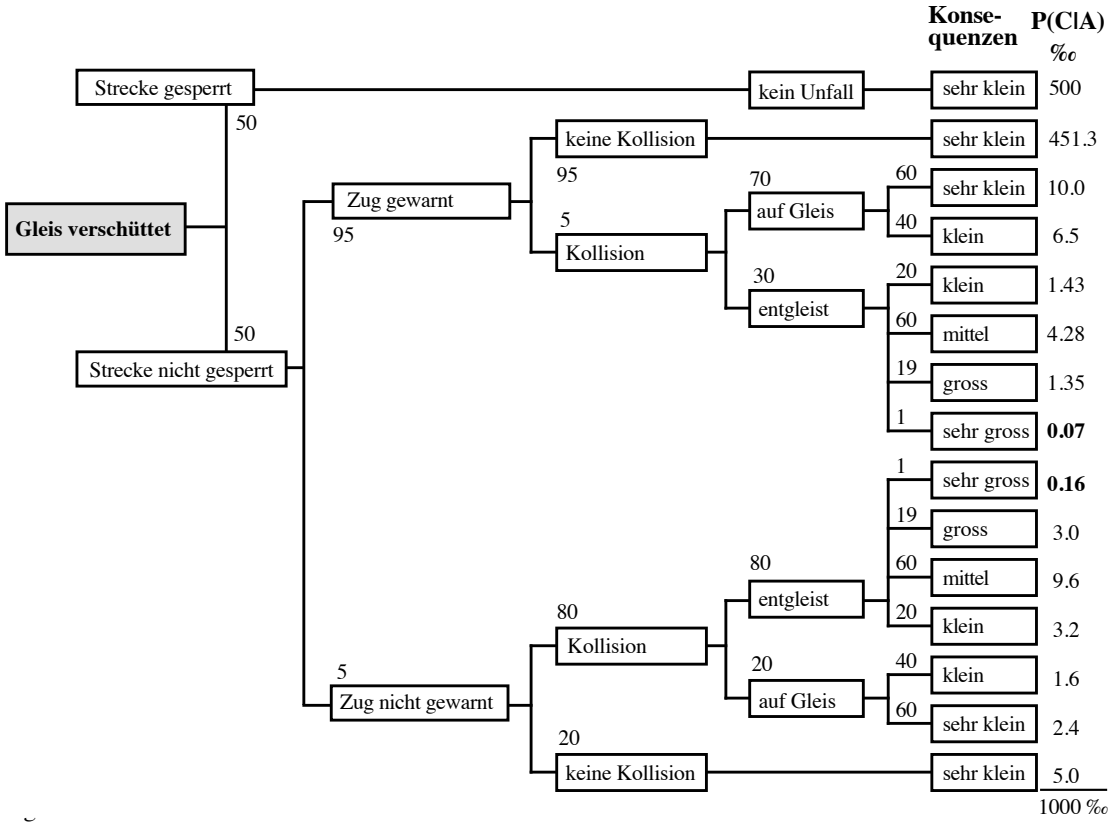
Bei den im Ereignisbaum der Figur 7/6 am Ende der Äste eingetragenen Bewertungen handelt es sich um qualitative, sog. *fuzzy* Informationen im Sinne von Kapitel 3.7. Sie lassen sich in der Reihe "sehr klein – klein – mittel – gross – sehr gross" z.B. aufgrund der Befragung von Experten durch entsprechende Zugehörigkeitsfunktionen (siehe Kapitel 3.7) definieren. Das sind dann natürlich wieder subjektive Grössen.

Die Ergebnisse sind natürlich in dieser Form noch nicht sehr aussagekräftig und müssen deshalb weiter analysiert werden. Hierzu müssen zunächst die qualitativen Merkmale quantifiziert werden. Zur übersichtlichen Darstellung werden alle Angaben des Beispiels in die Figur 7/7 eingetragen.

Die ersten beiden Spalten zeigen das Ergebnis des Ereignisbaums unter den dort getroffenen Annahmen. Die beiden nächsten Spalten zeigen Einschätzungen, die sich aus der Vorstellung der entsprechenden Unfallszenarien zungen, die sich aus der Vorstellung entsprechender Unfallszenarien erge-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

ben. Hierüber kann man diskutieren, wird sich aber einigen müssen, wenn man weiterkommen will.



Figur 7/6

Hat man das getan, kann man das "tatsächliche Personenschadenrisiko" berechnen: Es führt zu insgesamt 0.078 Toten, gegeben das Gleis werde verschüttet. Falls dies z.B. mit einer Häufigkeit von H(A) = 0.1/Jahr der Fall ist (also im Mittel einer langen Zeitperiode alle 10 Jahre), sind das "objektiv" 0.008 Tote/Jahr.

Konse-quenzen	Σ P(ClA) ‰	Anzahl betroffener Personen	Anzahl der effektiv tödlich Gefährdeten	tatsächliches Personen-schadenrisiko [10^{-3}]				
sehr klein	968.8	0	0					
klein	12.7	1	0					
mittel	13.9	5	3	42				
gross	4.4	10	6	26				
sehr gross	0.2	100	50	10				
	1000			78				

Figur 7/7

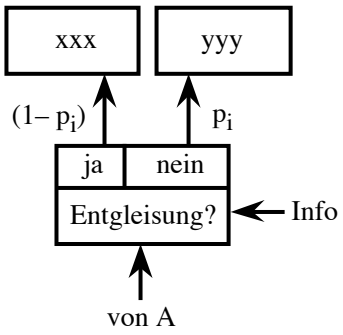
Hier setzt die Akzeptanzdiskussion ein, die sich den Fragen stellt, ob dieses Risiko tragbar sei als *individuelles Risiko* für die Benützer der Bahn und als *kollektives Risiko* für den Bahnbetreiber. Wir werden diese Fragen im Kapitel 9 und das Beispiel speziell unter 9.24 weiterdiskutieren und haben zu diesem Zweck in der Tabelle noch ein paar Spalten offengehalten.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

7.4 Ursachen/Folgen-Diagramme

7.41 Charakteristika

Die beiden bisher behandelten logischen Bäume können in einer speziellen Darstellung zusammengefasst werden. Das kombinierte Bild enthält sowohl Ursachen als auch Folgen eines bestimmten Ereignisses und wird somit als "Ursachen/Folgen-Diagramm" (Cause/Consequence-Chart) bezeichnet.



Figur 7/8

Der "Folgen-Teil" des Diagramms entspricht dem Ereignisbaum, allerdings mit einer etwas anderen Darstellung (Figur 7/8): die Fragen im rechteckigen Kästchen sind so zu formulieren, dass sie eindeutig mit "Ja" oder "Nein" beantwortet werden können. An den entsprechenden Ausgängen werden die Verzweigungswahrscheinlichkeiten angeschrieben.

Hat man Mühe, diese Verzweigungswahrscheinlichkeiten anzugeben, kann man mit Fehlerbäumen versuchen, auf dahinterliegende Informationen zurückzugreifen. Diese Fehlerbäume setzen demnach dort an, wo die Information gefragt ist. Der jeweilige TOP ist die im Kästchen gestellte Frage. Natürlich können je nach Bedürfnis TOPs und damit Fehlerbäume an mehreren Verzweigungen des Ursachen/Folgen-Diagramms einbezogen werden. Man schaut also zunächst mit induktivem Denkansatz im Sinne eines Ereignisbaums in Richtung der Konsequenzen. Aber immer dann, wenn man das als sinnvoll erachtet, geht man auch immer gleich mit deduktivem Ansatz im Sinne eines Fehlerbaums in Richtung der Ursachen. Man ist damit beweglicher und Intuition sowie Fantasie, die bei der Arbeit mit Bäumen unerlässlich sind, werden gefördert.

7.42 Beispiel

Figur 7/9 zeigt ein Ursachen/Folgen-Diagramm (in Anlehnung an Grütter, 1985). Die Figur enthält (rechts, Mitte) das Ausgangsereignis A, die Überflutung der den Sihlsee stauenden Sperre, aus was für Gründen auch immer. Von Interesse sind die möglichen Schäden entlang der Sihl bis in die tiefliegenden Regionen der Stadt Zürich hinein. Die Antwort ergibt sich aus dem über A angeordneten Ereignisbaum mit der für das Ursachen/Folgen-Diagramm typischen (Ja/Nein)-Abfrage. Ganz oben auf der "Konsequenzen-Ebene" sind in den fünf Kästchen I bis V die möglichen Konsequenzen, wieder in *fuzzy* Begriffe gepackt, zusammengestellt.

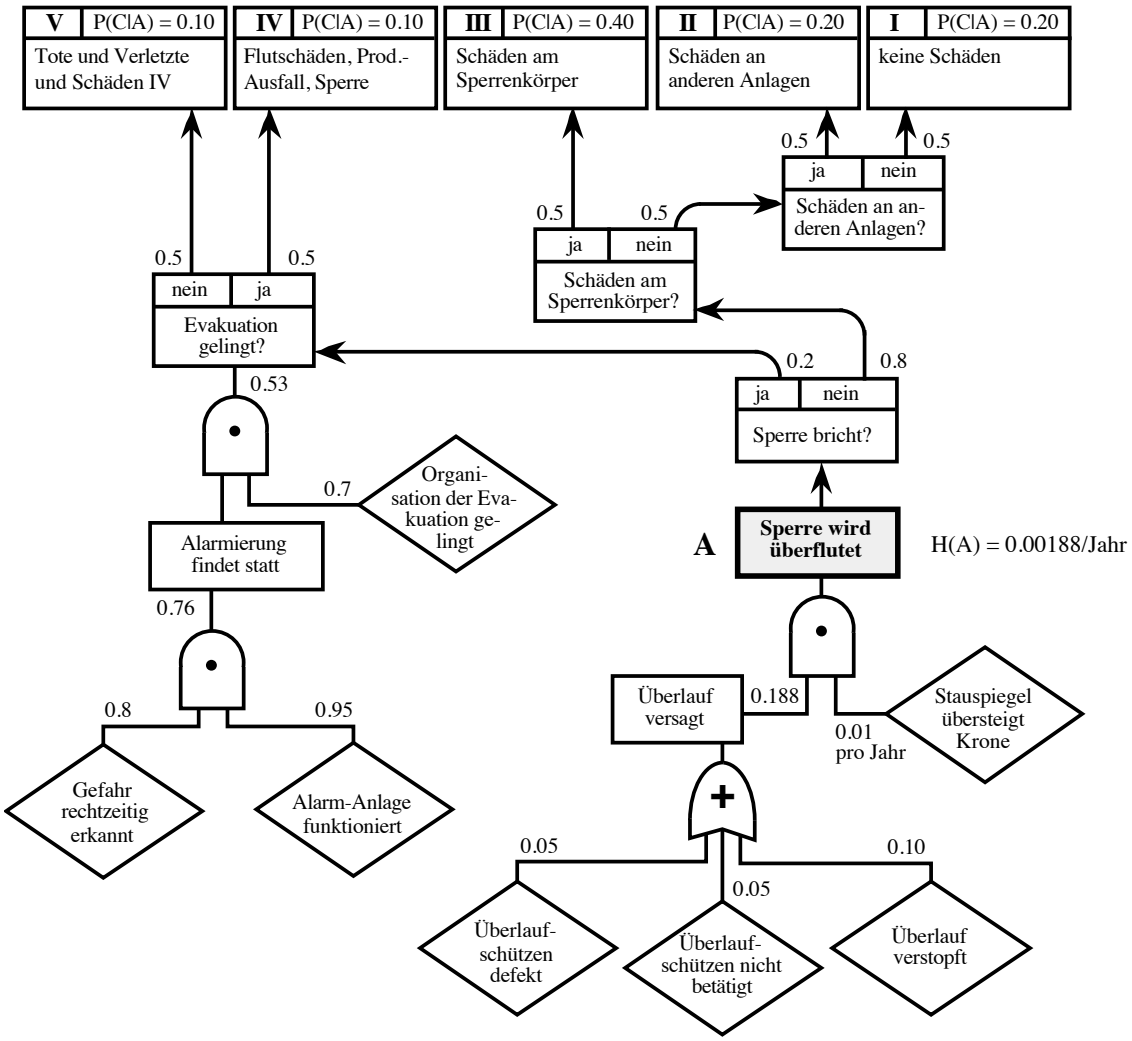
Natürlich stellt sich gleich die Frage, aufgrund welcher Ursachen und mit welcher Wahrscheinlichkeit die Sperre überflutet wird. Dies ist Anlass zur Entwicklung eines Fehlerbaums mit seiner für ihn typischen Logik. Dieser Baum ist hier nur mit ein paar charakteristischen Ereignissen angedeutet. Das Ergebnis ist die Wahrscheinlichkeit des TOP, und natürlich in der Regel eine Menge von Informationen zur Frage, wie man das TOP-Ereignis verhindern könnte. Bemerkenswert ist, wie der Zeitbezug hineinkommt: der Stauspiegel überschreitet im Mittel mit einer Häufigkeit von 0.01/Jahr die Krone. Alle übrigen Zahlen sind Wahrscheinlichkeiten.

Bemerkenswert ist weiter, dass man durchaus im Folgenteil des Diagramms arbeiten kann, ohne die Ursachen des Ausgangsereignisses zu kennen. Im Gegenteil: oft ist es sinnvoll, die Konsequenzen eines Ereignisses zu untersuchen (und durch geeignete Massnahmen zu bekämpfen), ohne sich zunächst gross um die Ursachen zu kümmern.

Eine wesentliche Frage ist im vorliegenden Fall beispielsweise, ob es bei einem Sperrenbruch gelingt, die gefährdete Bevölkerung zu evakuieren. Der sich hierzu ergebende Fehlerbaum bringt dann z.B. eine Wahrschein-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

lichkeit eines Gelingens einer solchen Evakuation von p = 0.53. Diesen Wert muss man natürlich im Folgenteil nicht sklavisch weiterziehen. Man kann durchaus, z.B. aufgrund weiterer Informationen, oder um zu runden, mit dem Wert 0.5 weiter rechnen.



Figur 7/9

7.5 Berücksichtigung von Unschärfen

Im Grunde genommen sind alle in Fehlerbäume und Ereignisbäume eingehenden Wahrscheinlichkeiten selbst wieder unscharfe Grössen. Wenn wir also dort z.B. p = 0.30 einbringen, so könnte das auch etwas mehr, oder auch etwas weniger sein. Man müsste die Grösse p also eigentlich als stochastische Grösse P auffassen und mit z.B. Mittelwert, Standardabweichung und Verteilungstyp einführen. Allerdings ist man dabei nicht ganz frei, denn es muss beachtet werden, dass Wahrscheinlichkeiten grundsätzlich nur zwischen 0 und 1 liegen. Als Verteilungstypen kommen demnach nur solche in Betracht, die lediglich positive Werte zwischen 0 und 1 zulassen, also entsprechend definierte Rechteck- und Dreieckverteilungen und z.B. Beta-Verteilungen, die ebenfalls zwischen 0 und 1 definiert sind.

Weiter muss man wissen, wie man mit Summen und Produkten solcher stochastischer Grössen umgeht. Dieser Frage sind wir in Kapitel 3.6 nachgegangen Auch gibt es dafür spezielle Programme (z.B. das Programm VaP, auf das wir unter 5.45 hingewiesen haben) oder Crystal Ball (Crystal Ball, 1993), die bekannte spezielle Erweiterung der Tabellenkalkulationsprogramme Excel und Lotus, die sich auf Monte Carlo Methoden stützt.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

7.6 Anwendungsgebiete

7.61 Schwachstellenanalyse und Ausfallszenarien

Logische Bäume sind nützlich, um etwaige Schwachstellen aufzufinden und zu beheben. Sie eignen sich auch, um Gefährdungsbilder darzustellen und auf ihre Schwere hin zu untersuchen.

Besonders typisch ist die Analyse von Ausfallszenarien (Schneider J., 1981) mit Fragen wie den folgenden: Was passiert, wenn …

… diese Stütze herausgerissen wird?
… Herr X vergisst, den Schalter A zu betätigen?
… Frau Y unterlässt, die Information B an Z weiterzuleiten?
… morgen mein Fahrrad nicht mehr vor der Haustüre steht?

In der Analyse tritt der Ausfall an die Stelle des TOPs. Wiederum ist die Frage nach dem "Warum" – zumindest vorerst – nicht interessant. Wenn man den Ausfall gedanklich einfach einmal zulässt, beschleunigt man die Analyse von Sicherheitsproblemen, denn die Beantwortung des "Warum" kann sich ewig in die Länge ziehen und das Denken lähmen.

Wenn in der Folge klar wird, dass irgendein Ausfall keine gravierenden Konsequenzen hat, dann interessiert das "Warum" ohnehin nicht mehr.

Falls aber erkannt wird, dass ein Ausfall katastrophale Folgen haben könnte, *muss* man herausfinden, ob und unter welchen Umständen sich der bestimmte Ausfall ereignen könnte. Unter Umständen müssen sogar *vor* der Beantwortung dieser Frage Sofortmassnahmen ergriffen werden!

7.62 Lokalisieren geeigneter Sicherheitsmassnahmen

Logische Bäume helfen, Sicherheitsmassnahmen abzuleiten. Ziel ist, jene Stellen zu finden, wo mit kleinem Einsatz eine grosse Wirkung erzielt werden kann. Das sind einerseits Massnahmen, die unterhalb und andererseits solche, die oberhalb des TOPs einsetzen.

Verhinderungsmassnahmen wirken im Ursachen-Teil des betrachteten Problems. Man versucht, ein bestimmtes Gefahren-Ereignis zu verhindern. Im Beispiel unter Abschnitt 7.32 wäre das z.B. eine Lawinengalerie.

Minderungsmassnahmen kommen im Folgen-Teil zum Einsatz. Solche Massnahmen sollen die Folgen des unerwünschten Ereignisses mindern. Im Beispiel unter Abschnitt 7.42 wäre das z.B. ein gut organisiertes und trainiertes Evakuierungsteam.

7.7 Entscheidungsbäume

Entscheidungsbäume (decision tree) zeigen die grundsätzlich möglichen Entscheidungsvarianten auf und geben Hinweise auf die Folgen. In der Regel sind es die finanziellen Folgen von Entscheiden, die von Interesse sind. Es lassen sich jedoch auch Personenschäden einbeziehen, ohne diese finanziell zu bewerten, da es letztlich um einen Vergleich geht.

7.71 Charakteristika

Der Entscheidungsbaum ist zentrales Hilfsmittel der Entscheidungstheorie. Typisch sind auch hier wieder die Verzweigungen an sog. Knoten.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Es sind zwei Typen von Knoten zu unterscheiden:

- Der Entscheidungsknoten: □
  An Verzweigungsstellen von Ästen, welche die möglichen Aktionen (Alternativen) des Entscheidenden darstellen, wird als Symbol ein Quadrat gesetzt (siehe Figur 7/10).
- Der Zufallspunkt: O

An Verzweigungspunkten von Ästen, welche die möglichen Aktionen des "Gegners" darstellen, wird als Symbol ein Kreis gesetzt.

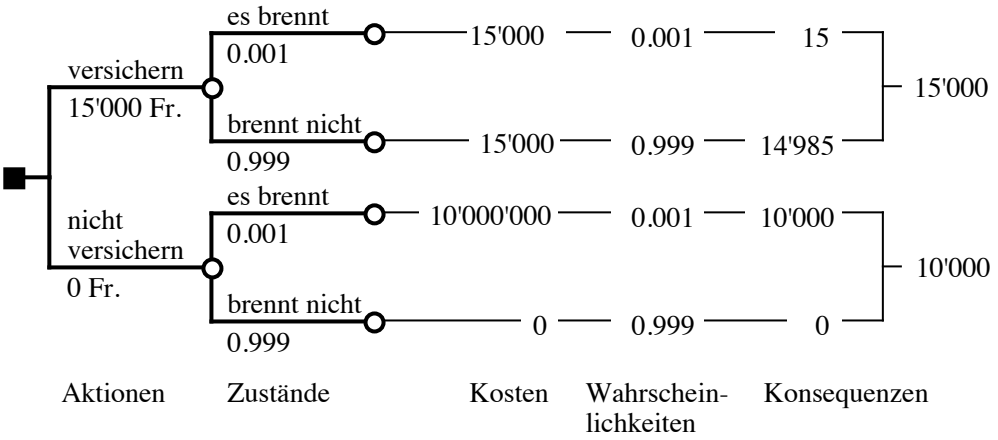
Als "Gegner" treten die Welt, die Natur etc. auf. Der Gegner ist meist neutral. Die "Aktionen des Gegners" sind nichts Kompliziertes, es sind z.B. die "Zustände der Welt". Sie zu finden, mit Fantasie und Vorstellungskraft, ist nicht immer einfach.

Die Aktionen des Entscheidenden kosten in der Regel Geld, während die "Zustände der Welt" mit Wahrscheinlichkeiten verbunden sind. Häufig sind diese subjektive Schätzungen.

Aktionen des Entscheidenden, die Zustände der Welt, die Kosten der Entscheidungen und die zugehörigen Wahrscheinlichkeiten sind auf den jeweiligen Ästen aufgetragen. Durch Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten mit den Kosten und Addition derselben am Ende der Varianten erhält man die Bewertung der Entscheidungsvarianten. Variiert man diese Wahrscheinlichkeiten, erhält man Einblicke in die Empfindlichkeit der Ergebnisse (Sensitivitätsanalyse).

7.72 Ein wegleitendes Beispiel

Als einleitende Frage: was rät man einem Fabrikinhaber? Soll er seine Anlagen (Wert 10 Mio. Fr.) gegen Feuer versichern oder nicht? Die Versicherungskosten belaufen sich auf 15'000.- Franken pro Jahr. Das Risiko eines Totalschadens durch Brand schätzt man auf 1‰ pro Jahr. Das Problem lässt sich in Figur 7/10 schön darstellen.



Figur 7/10

Der Baum ist wohl selbsterklärend. Das Resultat spricht für Nichtversichern. Die Frage ist allerdings, ob uns der Fabrikbesitzer folgen würde, oder besser, unter welchen Bedingungen er uns folgen würde.

Dieses Dilemma, nämlich die eindeutige Evidenz der Richtigkeit einer der möglichen Aktionen und die Tatsache, dass man doch oft gegen diese Evidenz handelt, ist typisch für die Anwendung von Entscheidungstheorien. Trotzdem sind sie von Nutzen, denn sie zeigen auf, was unter *rationalen* Gesichtspunkten getan werden sollte.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

7.73 Die "Sicherheit" des Experten

Ein weiteres Beispiel stammt aus der Expertentätigkeit und mag an das anschliessen, was im Kapitel 6.14 zur Verantwortung eines Ingenieurs ausgeführt wurde, der die Tragsicherheit eines bestehenden Tragwerks beurteilen soll. Die Situation sei die folgende: Ein freistehendes Dach, unter dem sich praktisch immer Personen aufhalten (z.B. eine Tankstelle oder ein Zollgebäude), gibt Anlass zur Besorgnis (Risse, Durchbiegungen etc.). Ein Ingenieur wird beauftragt, diese Besorgnis zu zerstreuen oder zu bestätigen. Seine Antwort löst entsprechende Massnahmen aus, die oft recht kostspielig sind.

Die grundsätzlich möglichen Varianten seiner Antwort sind klar: man kann *abreissen* und sicherer neu bauen, die fragliche Konstruktion *verstärken* oder einfach nichts machen und das Gebäude *in Betrieb lassen*. Was soll er dem Betreiber des Gebäudes raten?

Ein wenigstens gewisse Fragen klärender Belastungsversuch kostet z.B. 20'000 Franken, ein Abbruch und Neubau des Gebäudes 200'000 Franken, nichts zu tun vielleicht 1000 Franken, nämlich das Honorar des beauftragten Ingenieurs. Dieser Betrag ist vernachlässigbar. Welchen Rat soll der Beauftragte geben?

Es ist offensichtlich, dass er mit seinem Entscheid eine beträchtliche Verantwortung auf sich nimmt und sich in gewissem Sinne in Gefahr begibt:

- Rät er dazu, das Bauwerk in Betrieb zu lassen, und es stürzt nachher ein, wird man ihn belangen.
- Rät er dazu, abzubrechen und neu zu bauen, bleibt die Frage ungeklärt, ob das nun wirklich nötig war, und man wird ihn vielleicht sogar als übervorsichtig disqualifizieren und ihm nicht folgen.
- Rät er zum Belastungsversuch, kann es durchaus sein, dass die Sicherheit der Konstruktion bestätigt wird, und man wird ihm dann die Kosten des Versuchs als unnötig verursachte Ausgabe ankreiden. Was auch immer er rät, er gerät in Schwierigkeiten, und das für ein kleines Honorar.

Figur 7/11 zeigt den Entscheidungsbaum für die beschriebene Situation und beschreibt die Folgen jedes in Erwägung gezogenen Entscheids.

Es ist zu beachten, dass der Entscheid des "Gegners", also die unbekannte Sicherheit des Bauwerks, nicht vom Entscheid des Ingenieurs abhängt. Die Sicherheit ist von überhaupt keinem Entscheid abhängig; sie ist entweder gegeben oder eben nicht gegeben, das Tragwerk ist entweder sicher oder eben unsicher. Eine gewisse Wahrscheinlichkeit besteht allerdings, dass das Tragwerk sicher ist, auch wenn der Versuch "sicher" nicht bestätigt hat. Im Entscheidungsbaum wurde diese Wahrscheinlichkeit mit 0.1 eingesetzt. Ähnliches gilt für den gegenteiligen Ausgang des Versuchs.

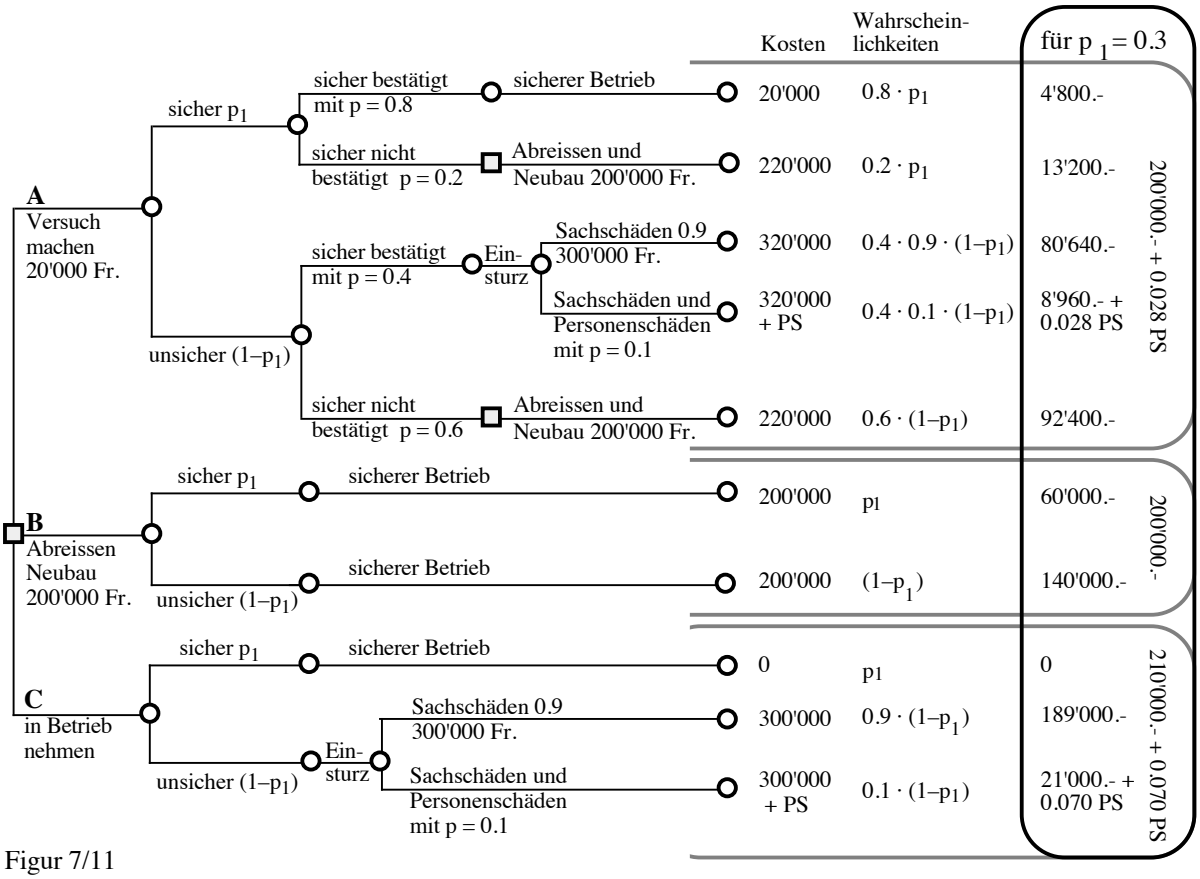
Der Entscheid A (Versuch machen) führt für $p_1 = 0.3$ zu Kosten von Franken 200'000.- plus 0.028 mal die denkbaren Personenschäden. Entscheid B (Abbruch, Neubau) kostet 200'000.- und Entscheid C (in Betrieb lassen) schliesslich 210'000.- plus 0.070 Personenschäden. Das sind *nicht* Kosten, die sofort anfallen. Es sind vielmehr die aufgrund dieser wahrscheinlichkeitstheoretischen Untersuchung zu erwartenden Kosten.

Da die Festlegung des Wertes eines Menschenlebens eine höchst problematische Frage ist, wird der Ingenieur angesichts der Ergebnisse des Beispiels am liebsten den Entscheid B fällen, also abreissen und neu bauen Diesen Entscheid wird aber der Auftraggeber nicht gerne fällen. Auch fällt dann der Beweis für die Richtigkeit des Entscheides dahin.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Der Entscheid C ist für den Ingenieur am problematischsten, denn er kann katastrophal ausgehen.

Also bleibt eigentlich nur der Entscheid A, der in der Regel auch gefällt wird, in gewissem Sinne aber das Problem nur verschiebt, denn selten sind Versuchsergebnisse ganz eindeutig.



Figur 7/11

Gerade diese unbequeme Situation erfordert jedoch Hilfsmittel für den Entscheidungsträger. Man will einerseits den Entscheid verantworten und andererseits seine Überlegungen dem Auftraggeber transparent darlegen können. Hierfür sind Entscheidungsbäume eine gute Hilfe.

Literatur

AICHE: "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis"; Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 345 East 47th Street, New York, NY 10017, 1989

Ang, A.H.S. and Tang, W.H.: "Probability Concepts in Engineering Planning and Design; Volume II – Decision, Risk, and Reliability"; John Wiley & Sons, New York, 1984

Chakraborty, S. und Kröger, W.: "Risikobestimmung – Eine Bestandesaufnahme der Methodik für Kernkraftwerke"; SIA-Heft Nr. 37, 1990

Crystal Ball: Erweiterung des Tabellenkalkulationsprogramms Excel und Lotus; Läuft auf Macintosh und unter Windows, Entwicklung und Vertrieb: Decisioneering, Inc., 1380 Lawrence Street, Suite 520, Denver, Colorado 80204-9849, 1993

FaultrEASE: Ein Programm für die Erstellung und Berechnung von Fehlerbäumen, Arthur D. Little, Inc., Cambridge, Mass., USA, 1993

Frei, R.: "MORT – Ein Sicherheitskonzept"; SUVA, Abt. Unfallverhütung, Sektion Information, 6002 Luzern, 1979

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Giannini, R., Pinto, P.E., Rackwitz, R.: "Action Scenarios and Logic Trees"; Working Document of the JCSS, 1989, erhältlich bei IABSE Zürich

Grütter, F.: "Probabilistische Sicherheits- und Risikoanalysen für Talsperren"; In: "Risikountersuchungen als Entscheidungsinstrument"; Verlag TÜV Rheinland, 1985

Meyna, A.: "Grundlagen von Sicherheitsanalyseverfahren"; In: Peters, O.H. und Meyna, A. (Hrsg.): "Handbuch der Sicherheitstechnik, Band 1"; C. Hanser Verlag, München 1985

Nielsen, D.S.: "The Cause-Consequence Diagram Method as a Basis for Quantitative Accident Analysis"; RISO-M-1374, Danish Atomic Energy Commission, 1971

Pfister, F. und Günter, R.: "Sicherheitsplanung in Schutzwaldprojekten"; Sanasilva-Teilprogramm 8, Bericht der Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, 8903 Birmensdorf, 1988

Schneider, J.: "Ausfälle im Bauwesen – ein geeigneter Ausgangspunkt für Sicherheitsüberlegungen"; Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht No. 120, 1981 oder "SIA, Dokumentation 51", 1981

Vallon, D.: "Fault Tree Analysis – Die Fehlerbaumanalyse"; Bulletin 1/92 des Brand-Verhütungs-Dienstes für Industrie und Gewerbe (BVD), 1992

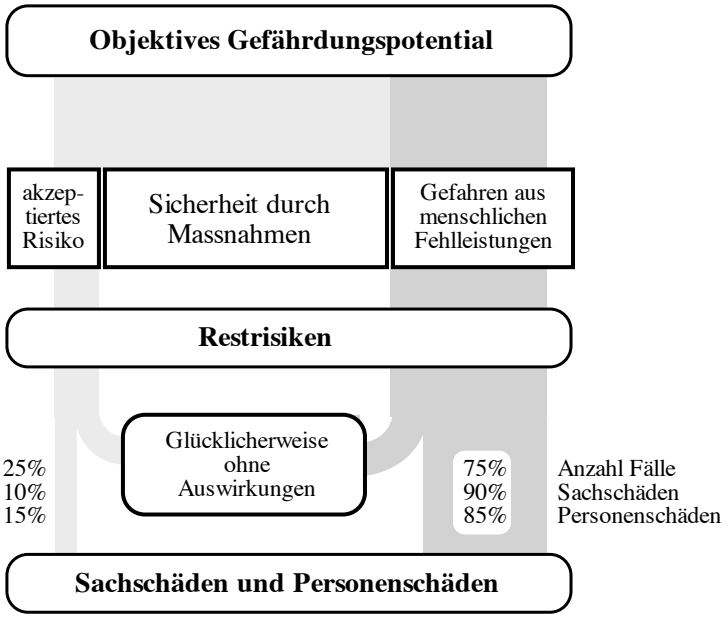
© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

8. Human Error im Bauprozess

8.1 Einleitung

8.11 Ansatzpunkte und Ziel

Es ist unbestritten, dass Fehler das Schadengeschehen im Bauwesen – und nicht nur dort – ganz entscheidend beeinflussen. Figur 8/1 zeigt den breiten, grau markierten Ast rechts, der zu über 75% aller Schadenfälle, zu 90% der Schadensumme und zu 85% aller Personenschäden führt. Es muss das klar definierte Ziel jedes im Bauprozess Beteiligten sein, diese Zahlen entscheidend zu verringern. Auf Null wird man trotz aller Anstrengungen nicht kommen! Das zeigte schon Figur 1/9, die hier mit entsprechender Markierung erneut eingefügt ist:



Figur 8/1

Der Begriff *Fehler* steht in der deutschen Sprache für etwas, das fehlt. Klarer weist der englische Fachausdruck auf den Sachverhalt hin: mit *Human Error* werden *Fehlhandlungen* des Menschen angesprochen, also Irrtümer, Unterlassungen etc., aus denen letztlich die sog. Fehler resultieren, die es zu verhindern gilt.

Auf den entscheidenden Einfluss menschlicher Fehlhandlungen auf das Schadengeschehen im Bauwesen hat, früh schon, F. Knoll in seiner Dissertation (Knoll, 1961) hingewiesen. Wieder aufgegriffen hat es Ligtenberg (Ligtenberg, 1969) in einem Beitrag, der das Interesse am gesamten Problemkreis Human Error massgebend gefördert hat. Im Detail untersucht hat den Problemkreis dann M. Matousek (Matousek, 1982). Auf seine Arbeiten und Publikationen stützen wir uns im folgenden. Auch (Nowak, 1986) und (Melchers, 1987) sind in diesem Zusammenhang zu erwähnen.

Es ist zu beachten, dass die Versagenswahrscheinlichkeit von Tragwerken, aber auch von anderen technischen Systemen, ganz wesentlich durch die Wahrscheinlichkeit p_{Gr} beeinflusst wird, mit der grobe Fehler im betrachteten Zusammenhang vorhanden sind. Diese Wahrscheinlichkeit ist in der Regel wesentlich (ein bis zwei Zehnerpotenzen) grösser als die in früheren

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Kapiteln dieses Buches diskutierten theoretischen Versagenswahrscheinlichkeiten $p_{th} \approx p_f$ (Ditlevsen, 1980).

Demnach gilt:

$$p_{total} = p_{Gr} + p_{th} \approx p_{Gr}$$

Die theoretische Versagenswahrscheinlichkeit p_{th} ist damit geeignet, rationales Verhalten im rational erfassbaren Bereich zu steuern, während p_{Gr} darauf hinweist, dass die weit wirksameren Massnahmen gegen Schäden in Strategien gegen menschliches Fehlverhalten gesehen werden müssen.

Die Erkenntnisse aus 800 Schadenfällen (Matousek/Schneider, 1976) zeigen in die gleiche Richtung (siehe Kapitel 1, Figur 1/6). Besondere Beachtung verdient die Tatsache, dass rund 80% aller Toten und Verletzten auf Fehler in Tragwerken (seien das nun die Baugrube, Hilfskonstruktionen oder die eigentlichen Tragwerke) zurückzuführen sind. Soweit das die Planungsphase betrifft, sind es Fehler in der Statischen Berechnung, in Plänen und Listen oder in der Arbeitsvorbereitung. Aber auch die Ausführung ist in der Regel mit Fehlern behaftet. Geht man der Sache auf den Grund, findet man als Fehlerursachen

- Mangelnde Kenntnisse in 25% der Fälle
- Vergessen, Irrtum, Verlass auf andere in 20% der Fälle
- Ignoranz, Sorglosigkeit, Fahrlässigkeit in 35% der Fälle
- Unterschätzen, falsche Beurteilung in 13% der Fälle

Aufgrund dieser Schadenursachen muss man schliesslich das Problem anpacken.

8.12 Fehlerarten

Die verschiedenen Fehler stammen aus ganz unterschiedlichem Fehlverhalten. Sie lassen sich z.B. wie folgt gliedern (De Bono, 1971 und 1976):

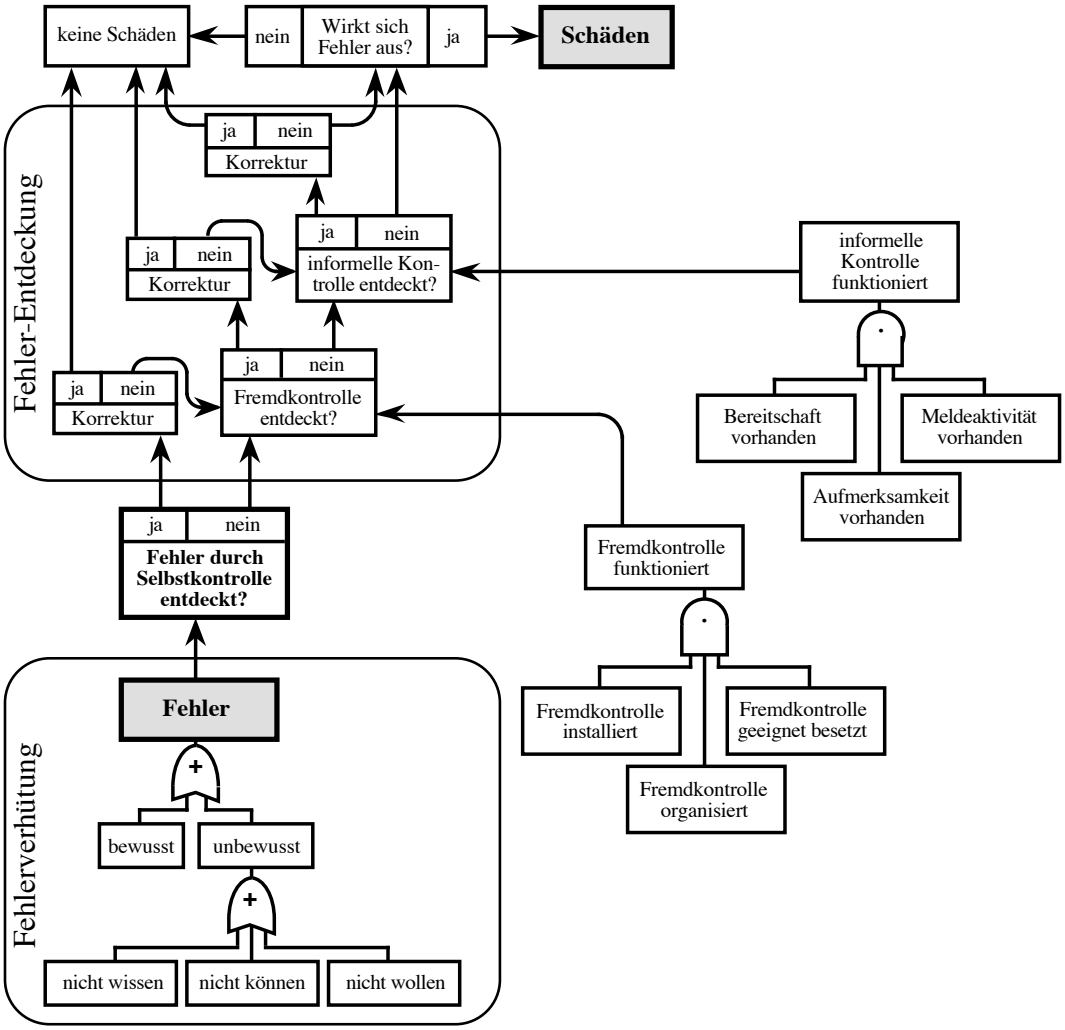
- Unterlassung:
  Als Unterlassung bezeichnet man, wenn etwas Nötiges unbewusst *nicht* getan oder *nicht* berücksichtigt wurde.
- Fehlhandlung:
  Als Fehlhandlung gilt, wenn etwas unbewusst *falsch* getan oder *falsch* berücksichtigt wurde.
- Irrtum:
  Es gibt die verschiedensten Irrtümer:
  - Irrtum der *Beschränkung*: Es wurde nur *ein Teil* der Lösung betrachtet. Dieser Teil kann an sich korrekt ausgeführt sein. Der übrige Teil der Lösung wurde hingegen nicht berücksichtigt.
  - Irrtum im *Massstab*, in der Grössenordnung: Man gibt sich keine Rechenschaft über *Proportionen*, Masse und Messgrössen.
  - *Verwechslung*: Verschiedene Teilresultate werden nicht auf ihre Zusammengehörigkeit und Kompatibilität geprüft.
  - *Kurzschluss*: Man hält das gefundene Resultat für die alleinige und einzig richtige Lösung. Auf die Suche nach anderen Lösungen und Alternativen wird verzichtet.
  - *Rechenfehler*: Es gibt eine grosse Palette von Rechenfehlern: Rundungsfehler, Dezimalfehler, grobe Rechenfehler, Ablesefehler, Interpolationsfehler, Übertragungsfehler.
- Unzweckmässigkeit:
  Massnahmen oder das ganze Vorgehen können ungeeignet bzw. unzweckmässig sein und damit zu Fehlern führen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

- Unsorgfältigkeit:
  Unsorgfältige, unzuverlässige oder mangelhafte Arbeit führt zu Fehlern.
- Fahrlässigkeit, Sabotage:
  Bewusstes Unterlassen einer notwendigen Tätigkeit oder bewusst falsche Erledigung einer Aufgabe ist als Sabotage zu betrachten.

8.13 Massnahmen gegen Fehler

Figur 8/2 zeigt in Form eines Ursachen/Folgen-Diagramms die wesentlichen Massnahmen gegen Fehler. Strategien gegen Fehlhandlungen sind demnach einerseits Massnahmen zur Fehlerverhütung, andererseits solche, die eine möglichst frühzeitige Entdeckung von Fehlern gewährleisten.



Figur 8/2

8.2 Selbstkontrolle

Die wichtigste und gleichzeitig die einfachste Massnahme gegen Fehler ist die minutiöse *persönliche Selbstkontrolle* der eigenen Arbeit. Ohne diese Selbstkontrolle ist der Kampf gegen Fehler schon von allem Anfang an verloren.

Die *initiale* Fehlerrate ist sehr hoch, vielleicht zehn- oder hundertmal höher als am Ende der Arbeit. Man überwache sich einmal bei der Ausführung einer Routinearbeit, beim Schreiben eines Briefes, eines Aufsatzes, bei der Aufstellung einer statischen oder hydraulischen Berechnung. Jeden Fehler,

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

den man bemerkt (und sofort korrigiert), notiert man am oberen Blattrand mit einen kleinen Strich. Man wird erkennen, dass man die meisten Fehler bereits beim Hinschreiben, praktisch im Moment der Fehlerentstehung selbst, bereits entdeckt und mit kleinstem Aufwand korrigiert. Andere "überleben" einige Sekunden. Sehr wenige Fehler werden Stunden oder mehrere Tage alt.

Es ist entscheidend, die Halbwertszeit von Fehlern, das ist die Zeit, bei der die Hälfte der Fehler bereits durch Selbstkontrolle entdeckt und ausgemerzt wurde, zu senken. Darin unterscheidet sich der erfahrene vom unerfahrenen Berufsmann. Im übrigen: Je länger ein Fehler unbemerkt bleibt, desto grösser ist die Gefahr, dass er überhaupt nie oder erst anlässlich eines daraus entstandenen Schadens entdeckt wird.

Die Selbstkontrolle ist unter allen Massnahmen zur Fehlerverhütung von ausschlaggebender Bedeutung. Es ist die wichtigste Aktivität, die jede Arbeit und Tätigkeit begleiten muss.

Individuell geeignete Strategien mögen die folgenden sein:

- Bleistift und Radiergummi
- Rück- und Quervergleiche
- gedanklich Abstand nehmen (wie man das – physisch – z.B. vor der Wandtafel oder einem grossen Bild tut, um Überblick zu gewinnen)
- abends nicht sofort "abschalten" und am nächsten Tag nicht gleich weiterfahren: die Arbeit Revue passieren lassen
- vorausdenken, vernetzt denken

Die Aufstellung allgemeiner Regeln ist in diesem Bereich unmöglich. Es geht darum, sich selbst zu beobachten, aus individueller Erfahrung zu lernen und einen individuellen, fehlerarmen Arbeitsstil zu entwickeln. Die vorstehenden Hinweise mögen nicht für jedermann zweckmässig sein.

8.3 Fehlerverhütung

Fehler lassen sich verhindern mittels technischer und organisatorischer Massnahmen sowie durch Einflussnahme auf das menschliche Verhalten. Anhand einiger Beispiele sollen diese Bereiche kurz erläutert werden:

Ein rigoroser Weg, Fehlhandlungen auszuschalten, besteht darin, diese durch *technische* oder *bauliche* Massnahmen zu verunmöglichen, also z.B. durch Abschrankungen, Abgrenzung, Abschirmung, Sicherungen, Notschützen, automatische Verriegelungen etc., aber auch z.B. durch Verhinderung der Verwechslung von Bewehrungsstählen auf der Baustelle durch die Wahl von deutlich verschiedenen Durchmessern.

Als *organisatorische* Massnahme gegen eine sehr bedeutende Fehlerquelle gilt ein geordnetes Verfahren zur Erfassung von Änderungen im Bauablauf oder in Plänen. Bauherr, Architekt, Ingenieur, Elektriker, Sanitär-Installateur und weitere Personen, die für ihre Arbeit Pläne benutzen, müssen in jedem Falle rechtzeitig über Änderungen informiert werden. Sonst sind Fehler mit erheblichen Folgekosten unvermeidlich.

Beispiele für *verhaltensorientierte* Massnahmen sind die positive Anerkennung oder Belohnung eines Mitarbeiters für sorgfältige Arbeit, aber auch die Androhung der Entlassung eines unzuverlässigen Mitarbeiters.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

8.31 Massnahmen im technischen Ablauf

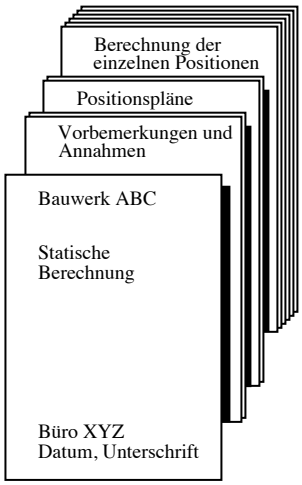
Fehler im technischen Ablauf des Bauprozesses sind im wesentlichen fehlende, falsche oder ungenügende Unterlagen für Ausführung und Nutzung des zu bauenden Objekts, aber auch fehlende oder falsche Regeln, Anweisungen etc. Wirksame Massnahmen zur Fehlerverhütung sind demnach solche, die klare und eindeutige Verhältnisse im Ablauf von Vorgängen der Vorbereitungs-, Planungs-, Ausführungs- und Nutzungsphase erzeugen.

Folgende Ansatzpunkte für die Fehlerverhütung können unterschieden werden:

- Zielanalyse: Die Frage "Was will der Bauherr eigentlich", ist sorgfältig zu klären. Die Fachleute, also der Architekt und der Ingenieur, müssen das Gespräch mit ihm führen und seine Absichten und Ziele besprechen. Die Beschlüsse müssen *schriftlich* festgehalten werden (vgl. Nutzungsplan Kapitel 2.42).
- Situationsanalyse: Welche Randbedingungen und Einschränkungen bezüglich Baugrund, Finanzmöglichkeiten etc. sind zu berücksichtigen?
- Gefährdungsanalyse und Massnahmenplanung: Diese Elemente zur Verhütung von Fehlern wurden unter dem Stichwort Sicherheitsplan und allen seinen Bestandteilen bereits in Kapitel 2.43 erwähnt.
- Überwachungsplan und Nutzungsanweisungen
- Bauwerksbuch (analog einem Kontrollheft bei Motorfahrzeugen, wo Reparaturen und Service-Leistungen festgehalten werden)

Im statisch-konstruktiven Bereich des Bauwesens zeigt sich, dass Klarheit und Eindeutigkeit insbesondere bei der Aufstellung der Statischen Berechnung, bei der Planbearbeitung und bei der Arbeitsvorbereitung nötig sind.

a) Systematischer Aufbau der Statischen Berechnung



Figur 8/3

Zur besseren Ordnung, Lesbarkeit und Transparenz wird folgende Gliederung (siehe Figur 8/3) vorgeschlagen:

- Auf dem *Titelblatt* stehen der Name des Bauherrn, das Bauwerk, der Name des für die Berechnung verantwortlichen Büros und die Unterschrift des Verfassers, das Datum sowie eventuelle Kontrollvermerke.
- Ein *Inhaltsverzeichnis* ist unerlässlich.

Die eigentliche *Berechnung* soll in drei Teile gegliedert werden:

- Die *Vorbemerkungen und Annahmen* enthalten alle Angaben über die benutzten Unterlagen wie Normen, Baugrundgutachten, Sicherheitspläne, Bemessungspläne sowie die verwendete Literatur. Das Bauwerk und die Anforderungen aus der vorgesehenen Nutzung sowie die Bauvorgänge werden beschrieben. Schliesslich werden die der Berechnung zugrundegelegten Baustoffe, deren Kennwerte und weitere Annahmen aufgeführt.
- In den *Positionsplänen* sind alle Tragelemente zu bezeichnen und klar zu lokalisieren. Das Durchdenken der Positionspläne führt zu einer klaren Vorstellung über die Tragstruktur, das Zusammenwirken der einzelnen Elemente und des Kraftflusses.
- Unter *Berechnung und Bemessung,* dem weitaus umfangreichsten Teil der Statischen Berechnung, werden alle Positionen mit einheitlicher Gliederung durchgerechnet. Die Berechnungen sind mit allen nötigen (massstäblichen) Skizzen zu versehen, damit der Zeichner die Vorstellungen des Ingenieurs eindeutig erkennen kann. Wesentliche Ergebnisse, insbesondere die Angaben für die weitere Bearbeitung durch den Zeichner, werden hervorgehoben. Um eine Nachrechnung zu erleichtern, sind

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

alle Berechnungen so darzustellen, dass jeder Fachmann sie mühelos verstehen kann.

Die Berechnung folgt dem Kräftefluss, erfasst also alle Positionen der Reihe nach im Tragwerk von oben nach unten.

Um Verwechslungen zu vermeiden, dürfen Vorbemessungen und verworfene Varianten *nicht* in die endgültige Statik hineingenommen werden. Es muss verhindert werden, dass der Zeichner oder andere Mitarbeiter, die sich bei ihrer weiteren Arbeit auf diese Berechnung stützen, falsche Werte übernehmen!

Die Berechnung jeder einzelnen Position ist einheitlich wie folgt zu gliedern und mit dem hier *kursiv* gedruckten Titel zu überschreiben:

Position XY (Decke, Platte, Stütze, …):

- *System:* Das statische System mit den Belastungskonfigurationen wird skizziert. Die Abmessungen und allfällige Teilsysteme sind daraus ersichtlich.
- *Belastungen:* Lasten und Einwirkungen werden ermittelt und zusammengestellt. Sie resultieren z.T. aus vorhergehenden Positionen.
- *Auflager- und Schnittgrössen:* Die zur Bemessung notwendigen Grössen werden hier berechnet. Es ist nützlich, Schnittkraft- und Momentenflächen zu zeichnen. Dabei ist auch schon an die nächsten Positionen zu denken: Es sollen an dieser Stelle bereits Werte in einem Zuge ermittelt werden, auch wenn sie erst in einer nächsten Position gebraucht werden.
- *Bemessung:* Aufgrund der erhaltenen Schnittgrössen sind nun die Querschnittsabmessungen, die Bewehrung etc. festzulegen. Skizzen zur Anordnung sind hilfreich für den Zeichner, der sich an dieser Stelle auf die Berechnungen stützt.
- *Nachweise:* Ergänzende Nachweise, meist solche bezüglich der Gebrauchstauglichkeit (Durchbiegungen, Risseverhalten etc.) stehen am Schluss.

Die Statische Berechnung muss in gut lesbarer Handschrift verfasst und direkt ins Reine geschrieben werden. Damit verhindert man Abschreibefehler. Das Abtippenlassen durch Dritte ist unprofessionell.

Computerstatik ist der konventionellen Statik beizufügen und gut zu dokumentieren. Nicht oder schlecht dokumentierte Computer-Outputs sind für Dritte wertlos! Wichtig sind vor allem die Eingabedaten und das eingegebene System. Die wesentlichen Ergebnisse des Computer-Outputs werden in die Statische Berechnung hineingenommen und übersichtlich dargestellt.

Unerlässlich ist es, mit einfachen "Handrechnungen" die Aussagen der Computerstatik zu überprüfen. Allfällige Zweifel an Ergebnissen muss man mit aller Sorgfalt ausräumen.

b) Konstruktive Durcharbeitung und Darstellung in Plänen

Die Sprache des Ingenieurs ist die – klare und eindeutige, alles wesentliche enthaltende – *Zeichnung*. Listen und ähnliche Darstellungsformen, die im Anschluss an Computerprogramme auch gleich noch die Detailbearbeitung durch den Konstrukteur zu ersetzen versuchen, überfordern das Vorstellungsvermögen. Man muss *konstruieren*, d.h. im wahren Sinne des Wortes im Plan *zusammenziehen*, was sich aus der abstrakten Berechnung und weiteren Randbedingungen ergeben hat und dieses Ergebnis damit für das Baustellen-Personal bereitmachen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

c) Planung der Arbeitsvorgänge; Arbeitsanweisungen

Eine gute Arbeitsvorbereitung vermeidet gefährliches Improvisieren. Sie gliedert sich in folgende Punkte:

- Geordnete Bereitstellung der Unterlagen
- Festlegung des Bauvorganges: Unterteilung; Baustoffe und Geräte; Personal; Erprobte Arbeitsabläufe bevorzugen
- Arbeitsanalyse: Detailliertes Vorausdenken der Abläufe; Gefahrenermittlung; Massnahmenplanung; Arbeitsanweisungen und Checklisten
- Sicherstellen der Arbeitsabläufe: Unterlagen bereithalten; erst beginnen, wenn die Voraussetzungen gegeben sind; auf Übereinstimmung mit Unterlagen achten und Abweichungen melden

Fehler lassen sich durch geeignete Einschränkungen der Handlungsmöglichkeiten verhüten: Abschrankungen, Blockierungen, Vereinheitlichen von Abläufen und Baustoffen, symmetrische Bewehrung, einheitliche Abmessungen von Schweissnähten und Schrauben etc. Fehler lassen sich auch mittels deutlicher Differenzierung, beispielsweise mit Farben, unwahrscheinlicher machen.

Was hier für den Problemkreis des statisch-konstruktiv tätigen Ingenieurs ausgeführt wurde, gilt mit kleinen Anpassungen auch in anderen Bereichen.

8.32 Massnahmen im organisatorischen Bereich

Fehler im organisatorischen Bereich des Bauprozesses sind ausserordentlich häufig, z.B. in Form von unklaren Zuständigkeiten, ungenügender Information und schlechter Zusammenarbeit.

Die vielfältigen Gegenmassnahmen können in vier Prinzipien zusammengefasst werden, die jeder Beteiligte in seinem Bereich als Pflichten anerkennt und in seiner Tätigkeit zur Anwendung bringt. Diese sind:

- *Führung:* Da Fehler oft im "Niemandsland" entstehen, müssen für alle mitarbeitenden Personen und deren Aktivitäten zuständige Verantwortliche bezeichnet werden.
- *Aktivität:* Alle Beteiligten müssen wissen, für welche Aktivitäten sie persönlich zuständig und verantwortlich und wem sie unterstellt sind.
- *Zusammenarbeit:* Alle Beteiligten sind zu loyaler Zusammenarbeit verpflichtet. "Nahtstellen" müssen überbrückt werden. Was der eine sieht, soll er – auch wenn er nicht "zuständig" ist – in kollegialer Weise dem anderen mitteilen, der darauf angewiesen ist.
- *Aufmerksamkeit:* Jeder ist zur Vermeidung von Fehlern und Schäden verpflichtet, auch wenn es sich nicht um den eigenen Verantwortungsbereich handelt. Wichtig ist dabei die psychologische Entlastung eines in der Hierarchie tiefergestellen Arbeiters: Das Arbeitsklima muss es zulassen, dass man ohne Ängste Mitarbeiter, auch Vorgesetzte, auf Fehler aufmerksam machen darf. Diese Entlastung lässt sich erfahrungsgemäss wesentlich einfacher fordern als verwirklichen.

Im kleinen Rahmen (Montageteam, Ingenieur-Büro etc.) reicht die Anwendung dieser vier Prinzipien aus. In grösseren Zusammenhängen müssen Zuständigkeiten und Pflichten in Organigrammen, Funktions-Diagrammen, Pflichtenheften, Stellenbeschreibungen etc. festgehalten werden.

Das Fehlen notwendiger Information ist oft Ursache für Fehler und damit für Schäden. Abhilfe schaffen Informationsfluss-Diagramme und Verteiler-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

listen. Aber auch die Kommunikations*formen* müssen geeignet gewählt werden, damit die Kommunikation selbst sichergestellt ist:

- Jede Information muss identifizierbar sein (Name, Unterschrift, Datum, Betreff …).
- Die Sprache muss für den Empfänger verständlich sein, das heisst, unter anderem, auch seinem Kenntnisstand entsprechen.
- Die Übertragung muss störungsunanfällig sein.
- Der Informationsträger muss dem Charakter der Information angepasst sein: mündlich, telephonisch, schriftlich, Fax, … .
- Der Empfang soll – wenigstens indirekt – bestätigt werden.
- Die *Dokumentation* von Information muss sichergestellt sein, z.B. mittels persönlicher, in Journal, Aktennotizen, Protokolle, Briefe gegliederter Informationsbücher.

Ganz wesentlich ist ein geordnetes *Änderungsverfahren*. Denn nur allzuoft wird nach falschen Plänen gebaut. Man muss dafür sorgen, dass alle, deren Arbeiten von Änderungen betroffen sind, diese auch rechtzeitig erfahren. Das hat mit Verteilerlisten zu tun, aber auch mit Terminplänen, vor allem aber mit Disziplin, insbesondere des Bauherrn und des Architekten.

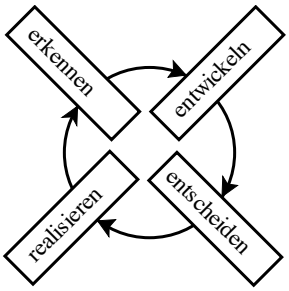
Um eine geregelte Zusammenarbeit sicherzustellen, ist ein *Sitzungskonzept* zu erarbeiten. Darin sind Aufgabe, Zeitpunkt, Leitung, Protokollführer etc. für alle als nötig befundenen Sitzungstypen festzulegen.

Sitzungen sollen regelmässig stattfinden. Es ist sinnvoll, Sitzungen auch dann durchzuführen, wenn dem Vernehmen nach nichts vorliegt. Einzelne Mitarbeiter mögen fälschlicherweise das Gefühl haben, dass ihr Anliegen nicht so wichtig sei. Auch könnten Informationslücken bestehen, die es zu schliessen gilt.

Speziell auf Baustellen ist ein *Sicherheitsbeauftragter* wichtig. Für diese Aufgabe ist eine begabte Person zu suchen, deren Immunität sicherzustellen ist, denn sie erhält keinen leichten Auftrag. Dass sich so ein Beauftragter auszahlt, lässt sich leicht überprüfen: Wenn pro Jahr auf einer durchschnittlichen Baustelle *ein einziger Beinbruch* verhindert werden kann, hat sich der Einsatz des Beauftragten bereits gelohnt (Gorisse/Declerck, 1985).

8.33 Verhaltensorientierte Massnahmen

Jeder am Bau Beteiligte wird mit ganz bestimmten Aufgaben betraut. Die Erfüllung dieser Aufgaben setzt das *Erkennen* von Sachverhalten und das *Entwickeln* von Lösungen voraus, verlangt *Entscheidungen* und schliesslich das *Realisieren* der Aufgaben. Erkennen, Entwickeln, Entscheiden und Realisieren sind die aufeinanderfolgenden, immer wiederkehrenden Grundaktivitäten in der Aufgabenerfüllung (Figur 8/4). Werden diese *nicht, falsch oder ungenügend* erfüllt, aus was für Gründen auch immer, entstehen Fehler, und man spricht von menschlichen Fehlhandlungen.



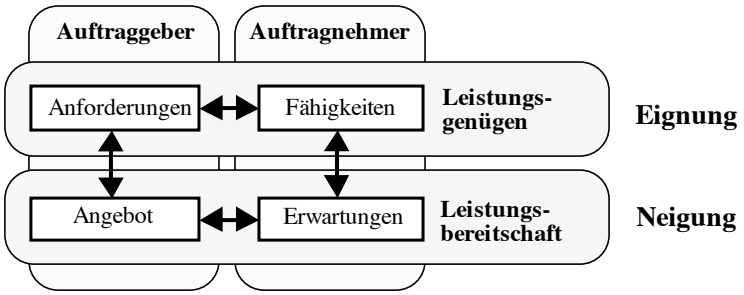
Figur 8/4

Eine erste Ursache solcher Fehlhandlungen kann darin liegen, dass die *Voraussetzungen* für eine entsprechende Leistung gar nicht gegeben sind, sei es, dass die Fähigkeiten fehlen oder bei vorhandenen Fähigkeiten die Bereitschaft, sie einzusetzen. Fehler verhüten heisst, die Leistungsvoraussetzungen sicherstellen.

Die Leistungsvoraussetzungen sind im Prinzip gegeben, wenn ein (oft recht empfindliches) Gleichgewicht herrscht zwischen den *Anforderungen* und

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

dem *Angebot* des Auftraggebers einerseits und den *Fähigkeiten* und den *Erwartungen* des Auftragnehmers andererseits (Figur 8/5).



Figur 8/5

Anforderungen und Fähigkeiten messen sich an Kriterien wie *wissen, können* (physisch, psychisch, sozial) und *wollen* und sind, mindestens vergleichend, messbar. Man spricht von *Profilen*, von Anforderungs- bzw. Fähigkeitsprofilen (siehe Figur 8/6), in denen man z.B. Sprachkenntnisse, Führungsfähigkeit, Arbeitsinteresse etc. bewertet, um die Eignung einer bestimmten Person für eine bestimmte Aufgabe zu beurteilen.

Anforderungs- bzw. Fähigkeitsprofil

Bereich		Anforderungen bzw. Fähigkeiten	Bewertung 1	2	3	4	5	6
Wissen		Ausbildung						
		Erfahrung						
		Sprachkenntnisse						
		…						
Können	physisch	Kraft						
		Ausdauer						
		Geschicklichkeit						
		…						
	psychisch	Aufnahmefähigkeit						
		Gedächtnis						
		Kreativität						
		Flexibilität						
		Selbständigkeit						
		Organisationstalent						
		Lernfähigkeit						
		Zuverlässigkeit						
		Sorgfalt						
		…						
	sozial	Führungsfähigkeit						
		Handlungsfähigkeit						
		Hilfsbereitschaft						
		…						
Wollen		Durchsetzungsfähigkeit						
		Eigeninitiative						
		Arbeitsinteresse						
		…						

Erwartungs- bzw. Angebotsprofil

Bereich		Erwartungen bzw. Angebot	Bewertung 1	2	3	4	5	6
Arbeitsbedingungen	Entlohnung	Gehalt						
		Prämien						
		Ferien						
		Dienstauto						
		…						
	Schutz	Arbeitszeit						
		Krankenkasse						
		Pensionskasse						
		Unfallschutz						
		Kündigungsschutz						
		…						
	Klima	Vorgesetzter						
		Team						
		Untergebene						
Arbeitsinhalte	Erlebnis	Art der Arbeit						
		Umfang der Arbeit						
		Selbständigkeit						
		Verantwortung						
		Weiterbildung						
	Bestätigung	Position						
		Anerkennung						
		Aufstiegschancen						
		…						
	Erfüllung	Organisationsfreiheit						
		Realisationsfreiheit						
		Entscheidungsfreiheit						

Figur 8/6

Angebot und Erwartungen messen sich an Bedürfnissen, die – individuell ganz verschieden – von den physiologischen Grundbedürfnissen (Nahrung, Kleidung, Schlaf) über die Bedürfnisse nach Sicherheit und sozialer Ein-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

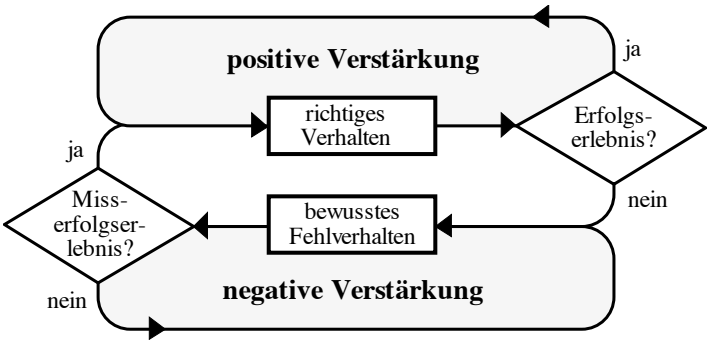
gliederung (Schutz, Vorratshaltung, Altersvorsorge) bis zum Bedürfnis nach Anerkennung (Selbstachtung und Fremdachtung) und Selbstverwirklichung reichen (Maslow, 1984; siehe auch Figur 9/2).

Auch die Bedürfnisse lassen sich unter den Stichworten Arbeitsbedingungen (Entlöhnung, Sozialleistungen, Weiterbildungsmöglichkeiten, Arbeitsplatzklima) und Arbeitsinhalt (Erlebnisgehalt, Bestätigungsmöglichkeiten, Handlungsfreiheiten) in Profilen darstellen und miteinander vergleichen. Man redet dabei von Erwartungsprofil und Angebotsprofil, in denen beispielsweise Bedürfnisse mit Zahlen oder graduell bewertet werden (Figur 8/6).

Stimmen Fähigkeitsprofil und Anforderungsprofil hinreichend überein (wobei man natürlich z.B. mit Ausbildungskursen etc. nachhelfen kann), ist die Leistungs*fähigkeit* einer Person gegeben. Bringt man zusätzlich das Erwartungsprofil in ausreichende Übereinstimmung mit dem Angebotsprofil (auch hier kann man nachhelfen), sind in der Regel auch die Leistungs*bereitschaft* und damit gute Voraussetzungen für eine fehlerarme Aktivität gegeben. Ein guter Vorgesetzter wird für ein sorgfältig gesichertes Gleichgewicht sorgen.

Fehler können aber auch aus ganz anderen Quellen entstehen, z.B. aus *störenden Einflüssen*, Ermüdung, Stress, oft infolge mangelhafter Gestaltung des Arbeitsplatzes, ungünstiger Gliederung der Arbeitszeiten etc. Auch solche Aspekte verdienen im Hinblick auf die Verhütung von Fehlern grosse Aufmerksamkeit.

Fehler gehen oft auch auf *bewusstes Fehlverhalten* zurück wie Ignoranz, Sorglosigkeit, Fahrlässigkeit, Überheblichkeit und so weiter. Die Verhaltenspsychologie lehrt, dass ein solches Fehlverhalten noch verstärkt wird, wenn es keine negativen Konsequenzen zeitigt. Hier liegt der Sinn von Geldstrafen, des Entzugs von Privilegien, von Versetzung und Entlassung etc., die – sofern einmal angedroht – gegebenenfalls auch auferlegt werden müssen, um die negative Verstärkung bewussten Fehlverhaltens zu durchbrechen (Figur 8/7). Wie schwierig dies ist, sieht man z.B. an den weitgehend fruchtlosen Bemühungen zur Durchsetzung des Helmtragens, des Gehörschutzes, des Aufsetzens von Schutzbrillen etc.



Figur 8/7

Man kann die Problematik auch von der positiven Seite her angehen: durch vorbildliches Verhalten, Überzeugung, Belohnung, Prämien und ausdrückliche Anerkennung. Dies ist ganz sicher der bessere Weg, da vor allem auch die höheren Bedürfnisse des Menschen angesprochen werden. Doch auch so kommt man nicht immer zum Ziel.

Letztlich resultieren Fehler auch aus individuellem *unbewusstem Fehlverhalten* (Vergessen, Verwechseln, Irrtum etc.) in den bereits erwähnten

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Grundaktivitäten. Verhüten lassen sich solche Fehler nur durch bewussteres Verhalten bei den Grundaktivitäten (siehe Figur 8/4) und ganz allgemein durch sog. "methodisches Vorgehen" und die Anwendung geeigneter, d.h. persönlicher Arbeitstechniken. Diese sind nicht generalisierbar, jeder muss sie – aufmerksam gegenüber seinen Stärken und Schwächen – sich selbst ablauschen und zur Methode machen.

Das heisst beispielsweise: Abstand nehmen, die Aufgabe in grösserem Zusammenhang sehen, auf sich wirken lassen, von grober Erfassung bis zum nötigen Mass verfeinernd die möglichen Lösungen darstellen, Bleistift und Radiergummi als Werkzeug, damit Änderungen und Verbesserungen rasch geschehen können, nicht vorschnell entscheiden, sich Zeit lassen, darüber schlafen (denn man übersieht leicht etwas), dann aber klar und eindeutig entscheiden, und schliesslich, soweit vertretbar, selbst tun, selbst realisieren. Aber das alles ist persönlicher Arbeitsstil, und dieser ist nicht für alle gleichermassen tauglich.

8.4 Entdecken von Fehlern und Korrektur

Da sich Fehler nie vollständig verhüten lassen, ist durch Kontrolle dafür zu sorgen, dass diese rechtzeitig entdeckt werden, so dass sie – mit möglichst kleinem Aufwand – behoben, d.h. korrigiert werden können. Schadenanalysen zeigen im übrigen, dass die Entdeckung von Fehlern durch informelle und formelle Kontrollen in den allermeisten Fällen möglich ist.

Kontrollen finden im Bauprozess traditionell an vielen Stellen statt. Doch wird häufig und gerne nur dasjenige kontrolliert, was sich leicht kontrollieren lässt (z.B. die Anzahl von Unterschriften auf Plänen, die numerische Richtigkeit einer Zahlenrechnung, die Würfeldruckfestigkeit von Betonproben etc.). Der Effizienz von Kontrollen muss eindeutig erhöhte Beachtung geschenkt werden.

8.41 Begriffe und Zusammenhänge

Kontrolle besteht im hier verwendeten Sinn aus drei Aktivitäten:

- Aufnahme des Ist-Zustandes
- Vergleich des Ist- mit dem Soll-Zustand
- Beurteilung der festgestellten Abweichungen.

Die Aufnahme des Ist-Zustandes erfolgt zu einem bestimmten Zeitpunkt und beschränkt sich notgedrungen auf einige massgebende, in der Regel messbare Merkmale des Zustands. Der so aufgenommene Ist-Zustand wird mit dem entsprechenden, vorher definierten Soll-Zustand verglichen. Die Beurteilung der festgestellten Abweichungen erfolgt unter Beachtung vorher festgelegter sog. *Toleranzen*. Was den Toleranzbereich überschreitet, wird als Fehler angesehen und ist durch Korrektur zu beheben.

Eine korrekte Kontrolle setzt demnach eine klare Festlegung der zu kontrollierenden Merkmale, eine Definition des Sollzustands sowie die Festlegung der Toleranzbereiche voraus.

Je nach Zeitpunkt der Kontrolle unterscheidet man zwischen

- Anfangskontrolle (z.B. Siebkurve Kies-Sand)
- Zwischenkontrolle (z.B. Betonkonsistenz)
- Endkontrolle (z.B. Betonfestigkeit nach 28 Tagen).

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Je schwieriger und kostspieliger die Behebung entdeckter Fehler ist, desto eher wird man durch Anfangs- und Zwischenkontrollen versuchen, den Arbeitsprozess zu steuern. Kontrolle heisst in diesem weiter gefassten Sinn "unter Kontrolle halten, im Griff haben".

Mit *Anfangskontrollen* wird beispielsweise die Übereinstimmung zwischen Bestellung und Lieferung überprüft (Eingangskontrolle). *End-Kontrollen* dienen in der Regel zur Bestätigung, dass geplante Sollzustände bzw. angestrebte Ziele erreicht wurden.

Eine besondere rechtliche Stellung haben die sog. *Abnahmekontrollen*. Es handelt sich hierbei um eine kombinierte Form von End- und Eingangskontrolle, die bei der Übergabe von Eigentumsrechten Anwendung findet: der Unternehmer beispielsweise beweist, dass der übergebene Gebäudeteil den mit dem Bauherrn vertraglich vereinbarten Bedingungen entspricht, und dieser bestätigt den Sachverhalt und übernimmt den Bauteil auf seine eigene Gefahr.

Je nach kontrollierender Instanz spricht man von

- Selbstkontrolle
- betriebsinterner Kontrolle
- Kontrolle durch die am Bau Beteiligten
- Kontrolle durch externe Instanzen.

Selbstkontrolle (siehe Abschnitt 8.2) steht an der Basis jeder Qualitätssicherung überhaupt. Sie deckt Fehler in der eigenen Arbeit auf und ist persönliche Aufgabe jedes Beteiligten. Selbstkontrolle deckt im übrigen Fehler zum frühestmöglichen Zeitpunkt auf, womit der Korrekturaufwand minimal ist. Es ist unbedingt nötig, Selbstkontrolle ganz bewusst in den persönlichen Arbeitsprozess einzubauen. Das fördert auch die Selbstsicherheit und damit die Freude an der Arbeit.

Da der Einzelne jedoch oft in seinen – möglicherweise fehlerhaften – Denkvorgängen befangen ist, und da oftmals verschiedene Personen am gleichen Projekt arbeiten, sollte eine *betriebsinterne Überprüfung* stattfinden.

Nachgeschaltete Kontrollen beeinflussen jedoch das Verhalten des Einzelnen in widersprüchlicher Hinsicht: einmal dadurch, dass sie ihn zu vermehrter Selbstkontrolle veranlassen (denn er will ja nicht als unzuverlässig erscheinen), zum anderen jedoch unter Umständen auch dadurch, dass er nachlässig wird, im Wissen, dass das Ganze ja ohnehin nochmals kontrolliert werde.

Die Erfahrung lehrt, dass viele der Selbstkontrolle entgangenen Fehler ohne zusätzliche formelle Kontrolle durch *normale Aufmerksamkeit* und adäquates Reagieren der im Bauprozess aufeinanderfolgenden Beteiligten entdeckt und behoben werden können, also z.B. durch den jeweils nächsten in der Reihe "Architekt – Ingenieur – Unternehmer – Bauführer – Polier". Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass die Meldung der auf diese Art entdeckten Fehler psychologisch entlastet wird. Es geht nicht um Anschuldigungen, sondern um ein Bemühen auf das gemeinsame Ziel hin, ein fehlerfreies Bauwerk zu erstellen sowie Personen- und Sachschäden zu vermeiden. Diese psychologische Entlastung ist Aufgabe einer kompetenten Leitung des Bauprozesses.

Zusätzliche, *externe Kontrollinstanzen* sind bei grossen Bauprozessen, wo Fehler zu grossen Schäden führen können, sowie bei speziellen Vertragsformen (z.B. Totalübernehmer) nötig. Oft wird eine externe Kontrolle auch

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

durch Gesetz, Normen, Richtlinien, das Baubewilligungsverfahren oder durch Versicherungsgesellschaften vorgeschrieben. In vielen Fällen beschränkt sich die externe Kontrolle bzw. Überwachung jedoch lediglich darauf zu überprüfen, ob die verschiedenen vorgeschalteten Kontrollformen wirksam sind und der Bauprozess geeignet organisiert ist.

8.42 Kontrollprinzipien

Bei der Planung von Kontrollen, aber auch bei jedem einzelnen Kontrollvorgang, erweist sich die Gliederung in vier *Kontrolldurchgänge* als sehr zweckmässig.

- Im ersten Kontrolldurchgang werden die vorliegenden Sachverhalte auf *Vollständigkeit* geprüft. Man geht dabei gar nicht auf die Richtigkeit und Glaubwürdigkeit der überprüften Daten ein, sondern prüft lediglich, ob alles Nötige vorhanden ist.
- In einem zweiten Durchgang werden die vorhandenen Sachverhalte auf *Richtigkeit* geprüft. Dabei geht man in die Details und vergleicht diese mit den zugehörigen Unterlagen.
- In einem dritten Durchgang löst man sich von den Details und überprüft – auf der Basis der durch die beiden vorhergehenden Durchgänge gewonnenen Einsicht – im Sinne einer unabhängigen *Gesamtüberprüfung* das Ganze noch einmal ("Schritt zurück"). Man überlegt, wo Schwachstellen, kritische Zonen, Lücken etc. sein könnten und betrachtet aus dieser Sicht das zu Kontrollierende noch einmal. Bei diesem Durchgang wird – indirekt – auch überprüft, was bei der Herstellung und den beiden vorhergehenden Kontrolldurchgängen als Grundlage diente.
- In einem letzten Durchgang werden die vorliegenden Sachverhalte bezüglich allfälliger *Rückwirkungen* auf den Bauprozess geprüft, und zwar sowohl in technischer Hinsicht als auch im Hinblick auf Organisation und Informationsfluss.

Dass einzelne Kontrolldurchgänge, insbesondere der zweite, selbst wieder aus verschiedenen Durchgängen bestehen, dürfte klar sein, denn man kann sein Augenmerk bekanntlich immer nur auf ganz wenige Kriterien gleichzeitig lenken, und "Richtigkeit" muss natürlich in bezug auf vieles überprüft werden (bei der Überprüfung verlegter Bewehrung z.B. Stahlsorte, Durchmesser, Anzahl, Abstand, Lage vertikal und horizontal, Überdeckung, Form, Länge, Krümmungen, Abstandhalter, Aussparungen nach Grösse und Lage etc.).

8.43 Planung der Kontrolle

Für den ganzen Bauprozess, evtl. auch für einzelne Bauphasen oder Bauvorgänge, muss in der Regel ein *Kontrollplan* aufgestellt werden. Dieser legt die einzelnen vorgesehenen Kontrollen in den wesentlichen Punkten fest, also bezüglich der vier W (wann, was, wer und wie):

- Zeitpunkt
- zu kontrollierende Merkmale
- Verantwortlicher
- Toleranzen und Vorgehen im Falle von Fehlern.

Beim Aufstellen solcher Kontrollpläne geht man die einzelnen Arbeitsgänge durch und überlegt sich, an welchen Stellen Fehler möglich und wahrscheinlich sind. Kennt man die möglichen Fehler, ist auch weitgehend klar, wie sie sich äussern und woran sie sich zeigen. Dies ist dann der Ansatzpunkt für Kontrollen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

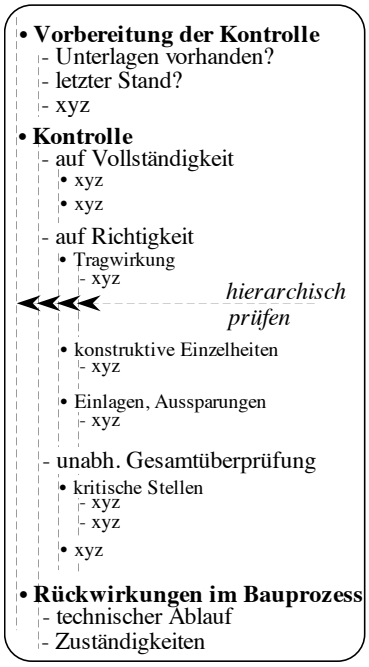
Komplizierte Kontrollvorgänge erfordern eine detaillierte Planung. Man wird hierfür *Kontrollanweisungen* ausarbeiten und in der Regel schriftlich festhalten. Solche Kontrollanweisungen halten fest, wie und von wem der Ist-Zustand aufzunehmen ist, sie beschreiben, oft im Detail, Messvorgänge etc., definieren Soll-Zustand und Toleranzbereich, geben die Beurteilungsregeln und legen schliesslich fest, was bei die Toleranz überschreitenden Abweichungen zu tun ist.

8.44 Checklisten

Schliesslich sind *Checklisten* zu erwähnen, die Kontrollvorgänge Schritt für Schritt vorschreiben oder begleiten. Sollen sie brauchbar sein, müssen sie die Arbeit des Kontrollierenden effizient führen. Das bedingt hierarchisch gegliederte Checklisten (Figur 8/8).

Man unterscheidet zwischen abgeschlossenen und offenen Checklisten. Abgeschlossene Checklisten werden angewendet, wo der Kontrollinhalt eindeutig definiert und begrenzt ist, wie z.B. die Abmessungen von Bauteilen, die Bereitstellung eines Fahrzeugs, Flugzeugs und so weiter. Mit abgeschlossenen Checklisten wird nur dasjenige geprüft (und "abgehakt"), was auf der Checkliste steht.

Oft würden Checklisten, wenn man sie abschliessen wollte, sehr lang. In solchen Fällen sind offene Checklisten zweckmässig, die mit Stichworten lediglich Denk- und Kontroll-Vorgänge auslösen sollen. Offene Checklisten stellen grössere Ansprüche an den Kontrollierenden als abgeschlossene Listen.



Figur 8/8

8.45 Durchführung und Protokoll

Kontrollvorgänge und der "Befund" sind auf jeden Fall zu protokollieren. Es kann sich hierbei um einen kurzen Eintrag in ein Journal handeln. Bei umfangreicheren Kontrollen sind *Kontrollnotizen* nötig, die man – zusammen mit den als notwendig erachteten Korrekturen – in spezielle Kontrollblätter einträgt oder gegebenenfalls, z.B. bei Plänen, direkt in die kontrollierten Unterlagen hineinschreibt (Farbstift).

Die Ergebnisse umfangreicher Kontrollvorgänge, die die weitere Arbeit wesentlich beeinflussen, müssen in Protokollen und Berichten festgehalten werden. Die bei der Kontrolle Anwesenden unterzeichnen das Protokoll.

Kontrollblätter, Protokolle und Berichte bilden selbst wieder eigentliche Checklisten für die Durchführung der notwendigen *Korrekturen*. Man tut gut daran, die Protokolle solange pendent zu halten, bis alles erledigt ist. Auch das ist eine organisatorische Frage.

8.46 Wer soll prüfen?

In diesem Zusammenhang stellt sich schliesslich auch die Frage, *wer* kontrollieren soll. Als wesentliche Erkenntnis gilt: Jeder kann nur das kontrollieren, was er kennt, genauso wie jeder nur das sieht, was er kennt: Schickt man den (billigen) Zeichner-Lehrling, wird er jeden Stabdurchmesser und jeden Stababstand messen. Schickt man den Zeichner, so sieht dieser alle Fehler in bezug auf Bewehrung und Aussparungen, aber wahrscheinlich nicht mehr. Ein junger Ingenieur wird vermutlich jede Ziffer einer zu kontrollierenden Statik nachrechnen. Schickt man den (teuren) Chef, so sieht der alles mögliche, auch, dass das Lehrgerüst nicht in Ordnung und der Kran nicht gesichert ist. Um die Dinge, derentwegen man ihn auf die Bau-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

stelle geschickt hat, nämlich z.B. um die Bewehrung zu prüfen, kümmert er sich vermutlich nur am Rande.

Man redet in diesem Zusammenhang von Filtern und Filtermodellen. Schliesslich ist die souveräne Prüfung ein sog. *Pattern Checking* (Knoll, 1986): Man prüft an den kritischen Stellen bis ins Detail, und vergleicht dann in den übrigen, weniger kritischen Zonen, ob dort die Grössenordnung plausibel, ob Abnormalitäten sichtbar sind. *Zweifeln* geht man mit aller Umsicht nach. Zweifel *muss* man ausräumen, bevor man weitermacht.

8.47 Feed-Back

Ein Dummer macht immer wieder die gleichen Fehler, ein Gescheiter immer wieder neue. Dieser sicher richtige Satz fordert uns auf, *aus Erfahrungen* zu *lernen,* und zwar zunächst aus den eigenen Fehlern und dann aus den Fehlern anderer. Das erfordert ein "Sich-Bewusst-Machen", indem man den Sachverhalt aus den engen Verstrickungen der Details auf eine allgemeinere, abstrakte Ebene zu heben versucht. Es kommt nicht darauf an, ob es Nägel, Schrauben oder Dübel waren, die fehlten, sondern warum etwas bei diesem Typus von Problemstellung schiefging. Erfahrung ist das, was im Gedächtnis hängengeblieben ist und was sich in einer intuitiven Reaktion äussert, nachdem das Beispiel, das zu dieser Erfahrung geführt hat, längst vergessen ist.

Aber auch bei oft wiederholten Arbeitsvorgängen ist dafür zu sorgen, dass Fehler oder auch nur schon Ungeschicklichkeiten, die zu Fehlern führen könnten, sukzessive ausgemerzt werden. Das ist Feed-Back auf der Baustelle oder im Betrieb.

Feed-Back ist der Motor des Fortschritts. Die Berichterstattung über Schäden oder Vorfälle in Zeitschriften und Vorträgen ist in diesem Sinne für uns alle wichtig. Jeder Einzelne sollte sich weit intensiver mit dem Schadengeschehen auseinandersetzen, als dies heute der Fall ist. Dazu gehört eine erhöhte Aufmerksamkeit, aber auch das freimütigere Preisgeben eigener Erfahrung. Das sollte überall da zu einer vornehmen Pflicht werden, wo man sich vielleicht noch ängstlich in der letztlich unangebrachten Sorge um das eigene fachliche Ansehen zurückhält.

Schliesslich ist Feed-Back auch ein Wegweiser für die Forschung. Forschung sollte dort ansetzen, wo sich Schäden zeigen, den entsprechenden Ursachen nachgehen und schliesslich geeignete Gegenmassnahmen vorschlagen und in die Praxis einführen.

Zusammenfassen lässt sich dieses Kapitel mit der sog. Blaut'schen Formel (Blaut, 1983), die alle für die Sicherung einer hohen Qualität nötigen Einflussgrössen in eine griffige Form bringt:

$$T = m \cdot k^2 \cdot i^3 \cdot a^x$$

T steht in dieser Formel für Task, für die Qualität der Erfüllung einer Aufgabe, m charakterisiert die eingesetzten materiellen und personellen Mittel, k steht für Know-how. Dieses ist wichtig, deshalb im Quadrat. Der Buchstabe i steht für Information und Kommunikation, diese sind noch wichtiger, deshalb hoch 3. Schliesslich steht a für die Ambition, die gestellte Aufgabe auch wirklich gut zu lösen. Hier kann der Exponent x negativ oder positiv sein. Die Formel ist weniger banal, als man zunächst annehmen möchte. Sie enthält alle wesentlichen Hinweise auf das, was man seit etwa einem Jahrzehnt unter Qualitätssicherung versteht.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

8.5 Qualitätssicherung und Sicherheitskultur

8.51 Definition und Vorbemerkungen

Über Qualitätssicherung (QS) finden Tagungen statt, es werden Bücher geschrieben, Zertifikate verliehen etc. Ganze Qualitätssicherungssysteme werden angeboten, bereits für teures Geld auch auf Diskette, und finden ihre Käufer. Man begegnet, auch im Bauwesen, vielen neuen Begriffen, wie QS-Politik, QS-Management, QS-Abteilung, QS-Handbuch, QS-Beauftragter, QS-Dokument, Qualitäts-Audit, etc. Doch was ist Qualität?

ISO 8402 definiert Qualität als Gesamtheit von Eigenschaften und Merkmalen eines Produktes oder einer Dienstleistung, die sich auf deren Eignung zur Erfüllung festgelegter oder vorausgesetzter Bedürfnisse beziehen. Dagegen ist nicht viel einzuwenden, und auch nicht viel gegen die auf dieser Definition aufbauenden Vorstellungen zur Qualitätssicherung industrieller Produkte, wie sie in ISO 9000 bis 9004 in der Form von 20 QS-Elementen vorgebracht werden. Doch bringt uns das im Bauwesen nicht wesentlich weiter, auch dann nicht, wenn man diese Elemente für das Bauwesen neu interpretiert, wie das in (SIA 2007, 1994) geschieht.

Wir meinen, man müsse bei der Qualitätssicherung vom Fehlergeschehen im Bauwesen ausgehen. Wir verstehen Qualität deshalb als Komplement zu Nicht-Qualität, also als Gegengrösse zu Mängeln und Schäden, die im wesentlichen auf Fehlhandlungen der beteiligten Menschen zurückzuführen sind. Damit sind deutlich alle am Bauprozess Beteiligten angesprochen, also z.B. der Bauherr selbst, dann Architekten, Ingenieure, Unternehmer mit allen ihren Mitarbeitern und Zulieferern und schliesslich natürlich auch der Besitzer und die Benützer eines bestimmten Bauwerks. Alle tragen mit fehlerarmer Aktivität zur angestrebten Qualität das ihre bei. Qualitätssicherung lässt sich aus diesem Blickwinkel wie folgt definieren (IABSE, Rigi, 1983):

Die Aufgabe der Qualitätssicherung ist, sicherzustellen, dass alle die Qualität eines Bauwerks beeinflussenden Aktivitäten

- *sich stützen auf klar definierte Grund-Anforderungen in bezug auf Nutzungs- und Umwelt-Bedingungen,*
- *korrekt ausgeführt werden durch kompetentes und gut instruiertes Personal in Übereinstimmung mit zum voraus erarbeiteten Plänen und festgelegten Verantwortlichkeiten, und dass dies*
- *in angemessener Form dokumentiert ist.*

Diese Definition steht in krassem Gegensatz zur Definition von ISO 8402, die Qualitätssicherung definiert als "... alle diejenigen geplanten und systematischen Tätigkeiten, die notwendig sind, um ein *hinreichendes Vertrauen* zu schaffen, dass ein Produkt oder eine Dienstleistung die festgelegten Qualitätsanforderungen erfüllen wird".

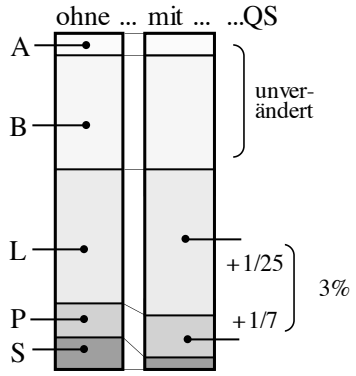
Hier geht es offenbar nicht um die Qualität selbst, die es sicherzustellen gilt, sondern lediglich um die Erzeugung eines hinreichenden Vertrauens, dass sie erreicht werde. Und das genügt natürlich nicht.

8.52 Neue Bürde für die Bauwirtschaft?

Kann man – so wird häufig gefragt – der ohnehin schon geplagten Bauwirtschaft diese neue Bürde auch noch aufladen? Die Gegenfrage: Ist es überhaupt eine Bürde? Hierzu findet sich in (Schneider, J., 1991) allerhand Details und Argumente.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Eine kurze, überschlägliche Kosten-Nutzen-Rechnung: Zur Behebung von Schäden und Mängeln sowie zur Fehlerbeseitigung werden etwa 5 bis 10% der Bausumme aufgewendet (Persönliche Befragungen; Gorisse/Declerck, 1985). Bei einer geschätzten Bausumme von 30 Mia. Franken ergibt das jährlich 1.5 bis 3 Milliarden Franken in der Schweiz.



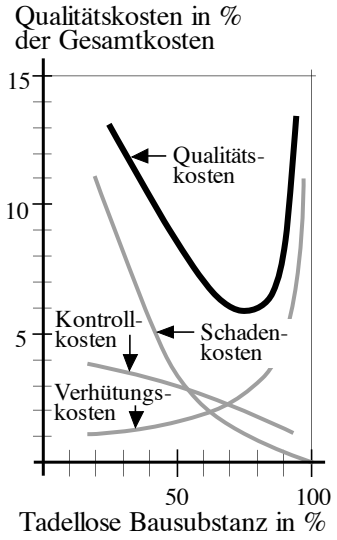
A: Abschreibungen
B: Baustoffe
L: Lohnkosten
P: Projektierung
S: Schäden, Mängel und Fehlerbehebung

Figur 8/9

Die in die Erstellung von Bauwerken investierten Mittel teilen sich etwa gemäss Figur 8/9 auf. Wenn durch den Einsatz qualitätssichernder Massnahmen während der Projektierung und bei der Ausführung je die Hälfte derjenigen Fehler, die durch formelle Kontrollen und "normale Aufmerksamkeit" entdeckt werden könnten (siehe Kapitel 1.4), auch rechtzeitig entdeckt und behoben würden, ergäbe sich eine Reduktion der Schäden um etwa 60%. Mit diesen Einsparungen von sicher 3% der gesamten Ausgaben des Bauwesens müssten die nötigen qualitätssichernden Massnahmen bezahlt werden. Wie und wo diese eingesetzt werden, ist zunächst unwesentlich, es sind mehrere Modelle denkbar.

Ein einfacher Überschlag ergibt, dass ein zusätzlicher Mitarbeiter auf 25 Arbeiter bei der Ausführung und ein zusätzlicher Angestellter auf 7 Mitarbeiter in der Projektierung zusammen die Baukosten um etwa 3% erhöhen würden. Jeder Sachkundige wird zustimmen, dass dieses zusätzliche Personal bzw. die dadurch hervorgebrachte Entspannung im Arbeitsprozess die Schäden um das vorne angegebene Mass reduzieren können. Damit wäre die Rechnung ausgeglichen.

Es ist also nicht nur sinnvoll, sondern auch wirtschaftlich vertretbar, Personal im angegebenen Ausmass für die Qualitätssicherung einzusetzen. Damit lassen sich Enttäuschungen und Ärger reduzieren und in vielen Fällen, über alles gesehen, sogar Geld sparen.



Figur 8/10

Zu den gleichen Schlüssen kommt auch Van den Beukel (Van den Beukel, 1989). Er stützt sich auf die einschlägige ISO-Norm und übernimmt von dort den Begriff *Qualitätskosten*. Diese setzen sich zusammen aus Verhütungskosten, Kontrollkosten und Schadenkosten. Figur 8/10 zeigt in schematischer Weise den Verlauf dieser Kosten in Prozenten der Gesamtkosten. Auf der Abszisse ist zum Beispiel der Prozentsatz der tadellosen Bausubstanz aufgetragen. Es ist offensichtlich, dass dieser 100% nicht erreichen kann. Es ist aber auch ersichtlich, dass es ein Optimum geben muss, bei dem die Qualitätskosten minimal werden. Wo dieses Minimum liegt, ist wohl nur projektorientiert herauszufinden. Die in Figur 8/10 eingetragenen Zahlenwerte sind lediglich Schätzungen.

8.53 Eine neue Grundeinstellung

Die traditionelle Waffe im Kampf gegen Fehler ist "Kontrolle". Man kontrolliert Zahlen und die Zahlenrechnung, die Konformität mit Regelwerken, Betonwürfel, die Zahl von Unterschriften auf Plänen, kurz: alles, was sich leicht kontrollieren lässt. Man sucht den verlorenen Schlüssel nicht vor der Haustüre, wo er einem aus der Hand geglitten ist, sondern lieber unter der Laterne, wo es heller ist.

Die Waffe "Kontrolle" ist durch übermässigen Gebrauch stumpf geworden. Formalismus, Erstarrung und Lähmung von Initiative und Einsatzfreude sind die Folge. Unschärfen im Verantwortungsbewusstsein machen sich breit. Frustration und sinkender Berufsstolz lähmen die Beteiligten. Das Ansehen des Ingenieurberufs sinkt. So darf es nicht weitergehen. Umdenken und Neubesinnung sind gefragt.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Ansatzpunkte einer Gegenbewegung können in einer bewussten Qualitätssicherung im Bauwesen unter vier Begriffen gesehen werden:

- *Motivation:* wir müssen uns und unsere Mitarbeiter besser motivieren. Das geschieht, wenn wir dem Einzelnen wieder mehr Freiheit im Handeln geben, allerdings innerhalb klar definierter Verantwortungsbereiche.
- *Vereinfachung:* Wir müssen wegkommen von fehleranfälligen Konzepten, Nachweisen, Systemen, Tragwerksformen etc. Aber auch im organisatorischen Bereich ist etwas zu tun: wir müssen zu einfacheren Organisations-Formen des Bauprozesses gelangen. Nicht das Organigramm soll regieren, der Mensch muss das Zepter wieder in die Hand nehmen (Knoll, 1986).
- *Entspannung:* Wir müssen unnötige zeitliche und finanzielle Zwänge abbauen. Wir müssen uns mehr Zeit für die Planung von Bauwerken gönnen. Gerade in den frühesten Phasen des Bauprozesses werden die folgenschwersten Fehler gemacht. Aber auch die Tendenz des Bauherrn, alles dem billigsten Anbieter zuzuschlagen, schafft Zwänge, die der gewünschten Qualität eindeutig entgegenwirken.
- *Kontrolle:* Natürlich ist Kontrolle nötig. Aber wir müssen lernen, sie überlegt am strategisch richtigen Ort einzusetzen. Nur dann ist sie wirksam.

In dieser vierfach abgestützten Form ist Qualitätssicherung nicht eine neue, dem Bauwesen zusätzlich aufgeladene Aktivität, sondern eigentlich eine *neue Grundeinstellung,* in der sich die am Bauprozess Beteiligten in positivem Sinne wieder zusammenfinden könnten.

Wer aber fängt an, wer macht die ersten Schritte? Unseres Erachtens müsste als erster der Bauherr vertrauensvolle erste Schritte tun, indem er überspannte Terminpläne streckt und den Kostendruck bescheiden reduziert, z.B. indem er nicht immer und grundsätzlich nur den billigsten Anbieter bei der Vergebung berücksichtigt. Planende, Projektierende und Ausführende müssten den so geschaffenen Freiraum durch behutsameres Vorgehen und eine erhöhte Sorgfalt nutzen. Dann zahlen sich die Konzessionen des Bauherrn aus: Personenschäden, Sachschäden und Mängel werden seltener, auch die Sorgen und der Ärger. Ein gegenseitiges Vertrauen kann möglich werden, wo heute der Kampf ums Überleben stattfindet.

8.54 Sicherheitskultur

Wir sind der Meinung, dass das Vorstehende viel mit dem zu tun hat, was man heute unter dem Begriff Sicherheitskultur zu verstehen beginnt. Dieser Begriff, obwohl älter, findet sich seit der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl in der Literatur immer häufiger. Die unbestrittene Meinung ist, dass die dort beobachteten schwerwiegenden Fehler und Verstösse Ausfluss ungenügender Sicherheitskultur seien, und zwar nicht nur beim Betreiben des Reaktors, sondern in der Reaktorindustrie der früheren Sowjetunion schlechthin (Pidgeon, 1994). Mangelnde Sicherheitskultur ist in diesem Sinne jedoch nicht nur zu den Ursachen schwerer Unfälle zu zählen, sondern vielmehr als wesentliche Quelle des Fehler- und Schadengeschehens in der täglichen Arbeit zu sehen. Und genau da müssen wir angreifen.

Pidgeon sieht Sicherheitskultur als mögliches Ergebnis von vier eng miteinander verknüpften Forderungen:

- die Verantwortung für Qualität bzw. Sicherheit darf nicht nach unten delegiert werden, sondern muss ausgesprochenes Anliegen der obersten Firmenleitung sein.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

- das Bemühen um Qualität bzw. Sicherheit muss in der ganzen Organisation und in allen Ebenen der Firma spürbar sein, es kann nicht einfach von oben herab ein für allemal befohlen werden.
- geeignete Vorschriften und Richtlinien müssen geschaffen, und diskutiert und eingeführt werden. Sie beeinflussen das Verhalten jedes einzelnen.
- Qualität bzw. Sicherheit bedürfen einer dauernden Aufmerksamkeit und einer beständigen Suche nach Verbesserung bestehender Zustände.

Natürlich bedingen sich diese Forderungen gegenseitig und unterstützen sich gleichzeitig. Ihre Erfüllung schafft das Klima, in welchem Sicherheitskultur gedeihen kann.

8.55 Präsent sein ist alles

Copyright André-Paul Perret, Tonbildschau SIA

Will man dies alles in einen prägnanten Ratschlag verpacken, mag der folgende gelten: Präsent sein ist alles. Aufmerksamkeit ist gefordert, eine Haltung, die der Empfehlung der bekannten drei Affen fundamental widerspricht: aufmerksam sein mit allen Sinnen und bereit sein, anderen mitteilen, was man gesehen und gehört hat, wenn das nötig oder zweckmässig ist. Und schliesslich, selbst wieder bereit sein, zuzuhören.

Präsent sein heisst, mit Fehlern souverän umgehen zu können. Jeder macht Fehler, nicht nur die anderen, sondern zweifellos auch man selbst. Fehler sind erlaubt. Sie sollten jedoch, z.B. in Planungsprozessen, aber auch in jeder Organisation, nicht lange unentdeckt bleiben. Selbstkontrolle ist dabei die unabdingbare Voraussetzung adäquater persönlicher Leistung. Die Qualität eines Beauftragten (und auch einer Organisation) misst sich nicht so sehr an fehlerarmer Arbeit, sondern an der mittleren Lebensdauer der Fehler.

Offensichtliche Fehlleistungen darf man nicht stehen lassen in der fälschlichen Ansicht, deren Beseitigung sei Aufgabe des anderen, z.B. des für die Sache verantwortlichen Kollegen. Alle Beteiligten müssen sich der ganzen Aufgabe stellen. Die noch so sorgfältige Erledigung von Teilaufgaben allein genügt nicht.

Präsent sein heisst auch bereit sein, positiv vorgebrachte Kritik mit Interesse entgegen zu nehmen und die einzelnen Punkte dieser Kritik vorurteilslos zu prüfen. Es könnte etwas daran sein, das uns und unser Anliegen, Sicherheit zu erzeugen, weiter bringt.

Präsent sein heisst schliesslich, mit Verantwortung umgehen zu können: Wir müssen einerseits Verantwortung delegieren können. Dazu gehört, den sich daraus ergebenden Zustand auszuhalten und sich nicht auf tieferem Niveau wieder einzumischen. Freilich gehört auch dazu, sorgfältig Aufsicht zu üben und niveaugerecht zu reagieren. Man muss andererseits Verantwortung tragen können – und das auch bewusst tun. Es kann nicht angehen, die auf uns übertragene Verantwortung im kritischen Moment wieder zurückzugeben oder abzuwälzen auf andere. Doch man muss das unverzüglich tun, wenn man der übertragenen Verantwortung nicht gewachsen ist.

Literatur

Allen, D.E.: "Human Error and Structural Practice"; In: Nowak, A.S. (Ed.): "Modelling Human Error in Structural Design and Construction"; 1986

Blaut, H.: "Checklist for the Reliable Performance of Tasks"; IABSE Workshop on "Quality Assurance within the Building Process"; Rigi 1983, IABSE Reports Vol. 47, Zürich, 1983

De Bono, E.: "The Mechanism of Mind"; Penguin Books, 1971

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

De Bono, E.: "Practical Thinking"; Penguin Books, 1976

Deutscher Beton-Verein: "DBV-Merkblatt ›Qualitätssicherung‹"; Deutscher Beton-Verein e.V., Wiesbaden, 1985

Ditlevsen, O.: "Formal and Real Structural Safety – The Influence of Gross Errors"; IABSE Periodica, Proceedings P-36/80, IABSE Zürich, 1980

Gorisse, F. et Declerck, R.: "Gestion de la qualité dans l'entreprise - Application au chantier"; In: Volume 1 of Proceedings of the 4th European Congress on Construction Quality Management, Brussels, 1985

IABSE Workshop on "Quality Assurance within the Building Process"; Rigi 1983, IABSE Reports Vol. 47, Zürich, 1983

ISO 8402: "Qualität – Begriffe"; ISO Norm, vertrieben in der Schweiz von der Schweizerischen Normen-Vereinigung SNV, 1988

ISO 9000: eigentlich ISO 9000 – 9004; ISO Normenreihe zur Qualitätssicherung, vertrieben in der Schweiz von der Schweizerischen Normen-Vereinigung SNV, Deutschsprachige Fassung, 1990

Knoll, F.: "Grundsätzliches zur Sicherheit der Tragwerke"; Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, Heft 4, 1961

Knoll, F.: "Checking Techniques"; In: Nowak, A.S. (Ed.): "Modelling Human Error in Structural Design and Construction"; 1986

Ligtenberg, F.K.: "Structural Safety and Catastrophic Events"; London 1969, IABSE Reports Vol. 4, Zürich, 1969

Maslow, A.H.: "Motivation and Personality", Harper and Row, 1984

Matousek, M. und Schneider, J. : "Untersuchungen zur Struktur des Sicherheitsproblems bei Bauwerken"; IBK-Bericht 59, ETH Zürich, 1976

Matousek, M.: "Massnahmen gegen Fehler im Bauprozess"; IBK-Bericht 124, ETH Zürich, 1982

Matousek, M. und Schneider, J.: "Massnahmen gegen Fehler im Bauprozess"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 1988

Melchers, R.E.: "Human Errors, Human Intervention and Structural Safety Predictions"; IABSE Periodica, Proceedings P-119/87, IABSE Zürich, 1987

Nowak, A.S. (Ed.): "Modelling Human Error in Structural Design and Construction"; Proceedings of a Workshop in Ann Arbor, published by the ASCE, New York, 1986

Pidgeon, N.F.: "Safety culture in hazard management"; in CEB Bulletin d'Information No. 221, Seiten 63 bis 75, 1994

Schneider, J.: "Über den Rang der Entscheidung in der Arbeit des Ingenieurs"; Schweizerische Bauzeitung, Heft 1, 1969

Schneider, J.: "Qualitätssicherung im Bauwesen – Eine zusätzliche Bürde für die Bauwirtschaft?". In Tagungsband "Wie er-Bau-en wir unsere Zukunft?", SAQ-TFB Fachtagung, Oktober 1991

SIA 2007: "Qualitätssicherung im Bauwesen – Beitrag zur Interpretation der Normen ISO 9000 – 9004", Merkblatt, Januar 1994

SIA 260: "Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken – Weisung des SIA an seine Kommissionen für die Koordination des Normenwerks"; 5. Fassung 1980 und 11. Fassung, September 1982

Van den Beukel, NL.: "Quality Cost"; United Nations, Economic and Social Council, Committee on Housing, Building and Planning, Working Party on Building, Report 227, April 1989

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

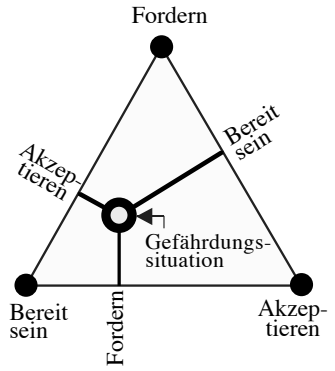
9. Risikovergleiche und Wertungsfragen

9.1 Sicherheit und die Gefahrenumwelt des Menschen

Als Sicherheitsziel kann – in allen massgebenden Zusammenhängen – letztlich die Sicherung von Leib und Leben des Menschen gesehen werden, und zwar unmittelbar und mittelbar, räumlich und zeitlich unbeschränkt.

Larousse definiert Sicherheit als

> "... la tranquillité d'esprit résultant de la pensée, qu'il n'y a pas de péril à redouter", frei übersetzt als "die Seelenruhe, die aus der Empfindung kommt, das keine Gefahr zu fürchten sei".



Figur 9/1

Seelenruhe ...? Wir glauben, dass sich diese Seelenruhe als Folge eines individuellen Sicherheitsgefühls im Raum zwischen drei grundsätzlich verschiedenen Polen persönlicher Einstellung (Figur 9/1) finden lässt. Diese drei Pole lassen sich wie folgt charakterisieren (J. Schneider, 1974):

- Annehmen der Gefährdung als Bestandteil des jedem Menschen zugeteilten Schicksals, vor dem Furcht ohnehin eine irrelevante Empfindung ist. Das ist eine typisch östliche Einstellung.
- Bereitschaft, der Gefährdung gegenüber adäquat zu handeln. Diese Bereitschaft finden wir in ausgesprochenen Pioniergesellschaften, in Seilschaften beispielsweise, wo jeder sich auf das situationsgerechte Handeln des Kameraden verlässt, verlassen muss, verlassen kann, und wo in diesem unbedingten Vertrauen auf den anderen auch in überaus gefährlicher Situation ein Gefühl für Sicherheit und Geborgenheit aufkommt.
- Forderung nach einer jede Gefährdung ausschliessenden Absicherung der individuellen Gefahrenumwelt. Passiv wie die zuerst genannte Einstellung, hier jedoch fordernd, mag sie als typische Haltung des "hochindustrialisierten westlichen Menschen" gelten, der nur noch fordert, weil ihm die beiden anderen Pole unzugänglich geworden sind.

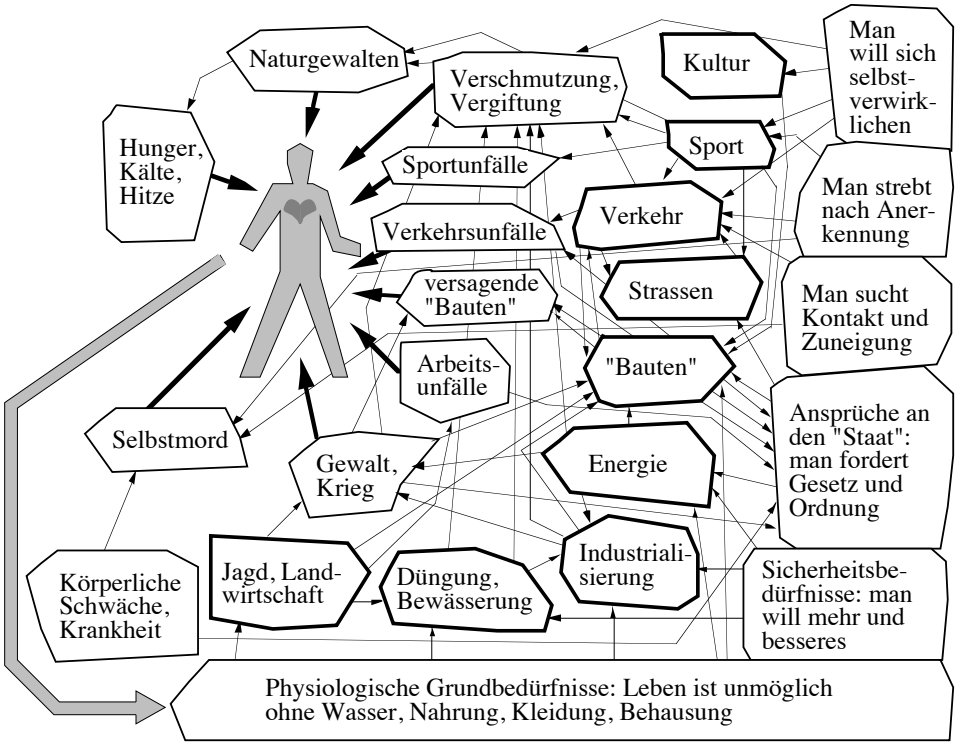
Freilich sind das Extreme. Und keiner wird seine Einstellung voll und ganz aus einem der drei Pole allein beziehen. Wir sind jedoch daran, uns endgültig im dritten Pol festzusetzen, d.h. bei der Forderung nach Sicherheit, insbesondere wenn ein anderer zahlt. Wer ist der andere? In vielen Fällen sind die anderen erneut wieder wir selbst. Wir werden ein neues, persönliches und gesellschaftliches Gleichgewicht zwischen diesen drei Polen möglicher persönlicher Einstellung gegenüber Gefahren und der Festlegung angemessener Massnahmen finden müssen.

Leib und Leben des Menschen sind zunächst durch Gefahren aus der natürlichen Umwelt bedroht und durch die mangelhafte Befriedigung seiner physiologischen Grundbedürfnisse nach Wasser, Nahrung, Kleidung und Behausung.

Das Streben nach Befriedigung dieser Bedürfnisse löst elementare menschliche Aktivitäten aus, z.B. Jagd, Fischerei, Ackerbau und primitive Formen der Bautechnik. Die Ergebnisse dieser Aktivitäten schützen einerseits den Menschen vor Gefahren, erzeugen aber gleichzeitig neue Gefahren und lösen somit neue Bedürfnisse aus. Arbeitsunfälle, gefährlicher Kampf um neue sowie die Verteidigung angestammter Jagdgründe und Pflanzungen sind die Folge. Das Bedürfnis nach Absicherung und Mehrung des Erreichten führt zu neuen Aktivitäten: Bewässerung, Entwässerung, Düngung und zu wieder neuen, bisher nicht gekannten Gefahren.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Das ist der Einstieg in die in Figur 9/2 angedeutete Gefahrenumwelt des Menschen (J. Schneider, 1983). Die rechts in der Figur gezeigte Bedürfnis-Pyramide (Maslow, 1984) wächst. Es werden Ansprüche an den Staat gestellt, sichernde Gesetze und Ordnungen zu erlassen. Das individuelle Bedürfnis nach menschlichem Kontakt, Zuneigung, Anerkennung und Selbstverwirklichung weckt neue Aktivitäten und trägt erneut zu den Gefahren bei. Die Figur zeigt – als Anregung gedacht und keinesfalls vollständig – Wirkung und Rückwirkung aus Bedürfnissen, Aktivitäten und Gefahren.



Figur 9/2

Dabei sind die Bedürfnisse breiter Bevölkerungskreise, sogar der westlichen, industrialisierten Welt, bei weitem noch nicht befriedigt: Eine Umfrage in der Schweiz zeigte, dass 85% der Befragten ihre physiologischen Bedürfnisse befriedigt sahen, 70% fanden, dass ihre Sicherheitsbedürfnisse gedeckt seien. 50% waren im sozialen Kontext zufrieden, mehr oder weniger anerkannt sahen sich 40%, und 10% waren der Meinung, dass auch ihre Ansprüche in bezug auf Selbstverwirklichung befriedigt seien. Das sind im Grunde genommen grosse Prozentzahlen.

Um wieviel schlimmer sieht es in sich entwickelnden armen und vom Terrorismus geschüttelten Ländern aus, und was wären die nötigen Aktivitäten und die Folgen dieser Aktivitäten, wenn man die berechtigten Bedürfnisse aller Menschen auch nur halbwegs decken wollte?

Der Mensch der industriellen Welt lebt heute offensichtlich in einer weitgehend selbst geschaffenen Gefahrenumwelt. Dabei sind – oft bestritten, aber letztlich wohl unbestreitbar – die Lebensrisiken bis heute stetig gesunken, die Sicherheit ständig gewachsen: Die Lebenserwartung des Menschen ist höher denn je und sicher auch die objektive Lebensqualität, und dies gerade durch die Technik.

Doch scheint uns, dass wir heute an einer Stelle angelangt sind, wo ein Marschhalt, ein Überdenken der Situation und eine Neubesinnung nötig sind. Vor allem müssen wir Risikovergleiche und Bewertungsfragen in dieser umfassenden Gefahrenumwelt betrachten und prüfen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Und wenn es um die Zuordnung von Mitteln geht, um Sicherheit zu erzeugen, ist sorgfältig zu prüfen, wo eine eingesetzte Geldeinheit das Gesamtrisiko am effizientesten senken kann.

9.2 Risikovergleiche

Absolute Sicherheit gibt es nicht. Wie sicher ist dann aber sicher genug (Starr, 1969 und Fischhoff et al., 1979)? Das ist eine gut gestellte und viel diskutierte Frage, die letzten Endes nach einem gesellschaftlichen Konsens ruft. Ob dieser zu finden ist, bleibt offen. Dass wir jedoch auf einen solchen Konsens hinarbeiten müssen, ist unbestreitbar.

Drei Wege, die sich (neben anderen) im Streben nach Konsens beschreiten lassen, möchten wir kurz andeuten:

- Vergleich der Risiken mit offensichtlich akzeptierten Risiken
- Vergleich der Rettungseffizienz von Sicherheitsmassnahmen
- Vergleich im Häufigkeits/Ausmass-Diagramm

9.21 Vergleich von Risiken

Oft werden Risiken am Todesfallrisiko des Individuums gemessen. Das hat seine Gründe: Zum einen sind Todesfälle eindeutig und einfach zählbar im Gegensatz zu mehr oder weniger schweren Verletzungen, zum anderen steht die Anzahl der Toten oft in einem bestimmten, mehr oder weniger konstanten Verhältnis zur Zahl der Verletzten. Das ist zweifellos für viele Fragestellungen richtig, in vielen Fällen aber auch völlig unzutreffend. Auf die Problematik dieser Vereinfachung soll unter Abschnitt 9.25 noch näher eingegangen werden. In der Folge jedoch steht hier das Todesfallrisiko stellvertretend für das Gesamtrisiko bezüglich Leib und Leben.

Zur Einleitung ein paar Zahlen und Vergleiche: Es gibt in der Schweiz rund 20'000 Brände pro Jahr. Dabei sterben im langjährigen Mittel etwa 6 Menschen pro Million Einwohner. Das individuelle Todesfallrisiko durch Brand liegt demnach in der Schweiz bei rund $6 \cdot 10^{-6}$. Dieses Risiko lässt sich mit anderen Risiken vergleichen, z.B. mit dem rund 20-mal grösseren Risiko, in einem Verkehrsunfall zu sterben.

Das Todesfallrisiko durch Brand kann man natürlich auch international vergleichen: anstelle der Zahl 6 steht dann in Deutschland etwa 12, in Schweden und vielen anderen europäischen Staaten etwa 20 und in den USA rund 30. Das lässt eine ganze Reihe von Rückschlüssen zu: auf die Bauweise, die Art der Heizung, die Qualität der Feuerpolizei, die Eignung der Fluchtwege, etc. Wir überlassen es dem Leser, diesen Fragen gedanklich nachzugehen.

Figur 9/3 enthält Beispiele für offensichtlich akzeptierte, da weitgehend widerspruchslos hingenommene mittlere individuelle Todesfallrisiken. Es handelt sich um runde Zahlen, die im wesentlichen für die Schweiz zutreffen. Eine Fülle weiterer solcher Daten finden sich in (Fritzsche, 1992).

Deutlich dominieren die im wesentlichen altersabhängigen Risiken, insbesondere natürlich für ältere Menschen. Diesem quasi natürlichen Risiko überlagern sich die recht unterschiedlichen Berufsrisiken und die Risiken aus individuellen Aktivitäten verschiedenster Art und auch des persönlichen Lebensstils. Die Zahlen dürfen gemäss Gleichung (3.6) mit guter Näherung addiert werden.

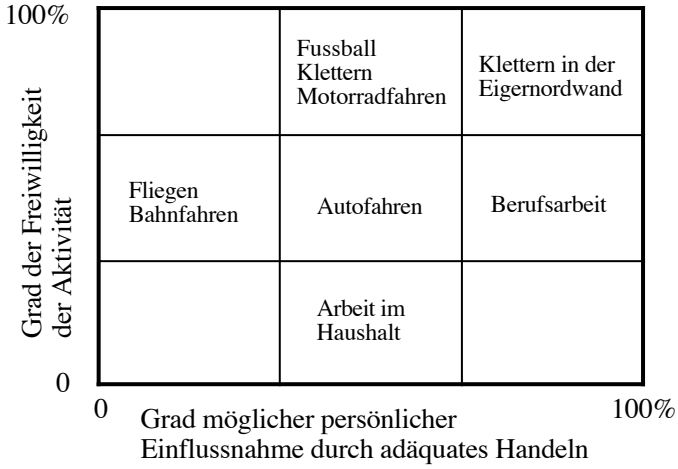
Mittlere Todesfallrisiken pro Jahr und pro 100'000 Personen	
Über alles:	
50	25-jährig
80	35-jährig
200	45-jährig
600	55-jährig
1200	65-jährig
3000	75-jährig
Berufsrisiken:	
100	Holzfällen, Holztransport
90	Forstbetrieb
50	Bauarbeiter auf Baustelle
15	Chemische Industrie
10	Mechanische Fabrik
5	Büroarbeit
Vermischte Risiken:	
400	20 Zigaretten pro Tag
300	1 Flasche Wein pro Tag
150	sportl. Motorradfahren
100	Deltafliegen als Hobby
20	Autofahren (20–24 jährige)
10	Fussgänger, Haushalt
10	10'000 km Fahrt im PW
5	Bergwandern
3	10'000 km Autobahn
1	Flugzeugabsturz pro Flug
1	Brand in Gebäuden
1	10'000 km mit der Bahn
0.2	Tod d. Erdbeben (Kalif.)
0.1	Tod durch Blitzschlag

Figur 9/3

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

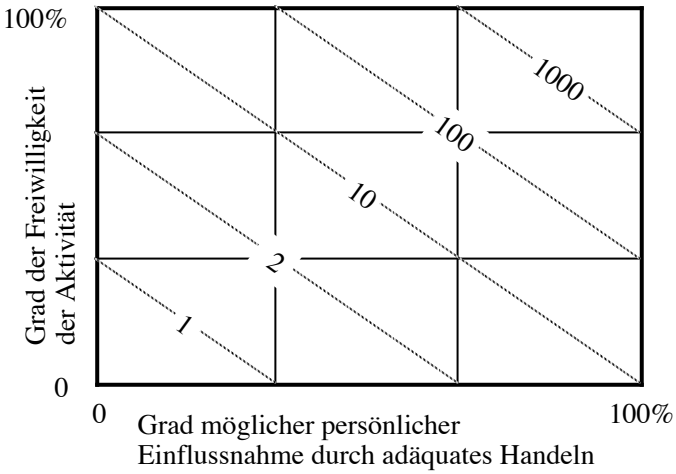
Das eine oder andere Risiko hätte man, unbefangen befragt, vermutlich subjektiv höher eingeschätzt, so z.B. das Risiko, in Kalifornien bei einem Erdbeben zu sterben. Von besonderem Interesse sind auch die Verkehrsrisiken, wo die Zahlen auf eine mittlere, jährlich zurückgelegte Distanz von 10'000 km normiert sind. Deutlich wird die vergleichsweise hohe Sicherheit des Schienentransports.

Eine zahlenmässige Festlegung dessen, was akzeptierbar ist oder sein könnte, muss den *Grad der Freiwilligkeit* der Aktivitäten und den Grad möglicher persönlicher *Einflussnahme* auf die Reduktion von Risiken, also die Möglichkeit adäquaten Handelns, zusätzlich in Betracht ziehen (siehe Th. Schneider, 1981). Das Diagramm der Figur 9/4 setzt diese Aspekte in Beziehung und zeigt zur Erläuterung einige typische Aktivitäten.



Figur 9/4

Die Festlegung individuell akzeptierbarer Risiken für die verschiedenen Zonen der Figur 9/4 wird sich an der Erfahrung orientieren müssen, also z.B. an den Zahlen der der Tabelle Figur 9/3. Was man in dieses Schema eintragen will, kann oder muss, ist eine schwierige Frage. Wir haben in Figur 9/5 Zahlen hineingeschrieben, die uns persönlich tragbar und angemessen erscheinen. Es sind individuelle Risiken, wie in Figur 9/3 auf 100'000 Personen und ein Jahr bezogen.



Figur 9/5

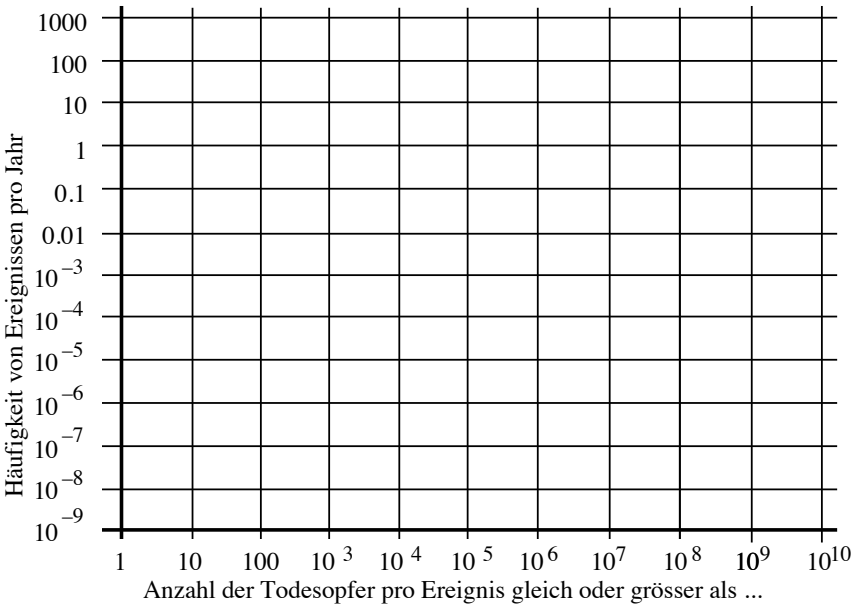
Einem gesellschaftlichen Konsens entsprechende, als Schutzziele zu bezeichnende Zahlenwerte sind bisher in dieser Komplexität noch nicht festgelegt worden. Verschiedene Länder und auch die Europäische Gemeinschaft sind allerdings daran, Zahlenwerte wenigstens für die linke untere Ecke des Diagramms festzulegen, die dann als staatlich festgelegte Schutzziele für die Wohnbereiche unbeteiligter Dritter gegenüber nachbarlicher

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Aktivitäten gelten könnten. Die Niederlande sind in dieser Hinsicht relativ weit voran und haben akzeptierte individuelle Risiken in der Grössenordnung zwischen 10^{-5} und 10^{-6} pro Jahr festgelegt (Premises ..., 1989). Weitere Hinweise zu Schutzzielen enthält auch (Merz, 1995).

Risiken lassen sich auch gut in einem sog. *Farmer-Diagramm* (Farmer, 1967) darstellen, das die Anzahl der Todesopfer pro Ereignis der Häufigkeit der Ereignisse gegenüberstellt. Figur 9/6 zeigt ein solches Diagramm. Bemerkenswert ist, dass auf der Abszisse eines Farmer-Diagramms sowohl der Unfall mit einem einzigen Toten als auch der Untergang der Welt (die Weltbevölkerung umfasst rund 5 Milliarden Menschen) darstellbar ist. Die Ordinate enthält ebenfalls das gesamte denkbare Spektrum der Ereignishäufigkeiten, von den vielen einzelnen Todesopfern auf den Strassen der Schweiz bis hin zum sehr seltenen Ereignis.

Die Risiken jeder einzelnen Ereignisart zeigen sich im Farmer-Diagramm als eine – allerdings oft nur sehr kurze – Kurve, denn die Gesamtzahl der Toten einer Ereignisart setzt sich zusammen aus Unfällen mit einem einzigen, aber auch aus solchen mit 2, 5, 10 oder noch mehr Toten.



Figur 9/6

Farmer-Diagramme eignen sich besonders gut für den Vergleich der Schwere von Ereignisarten. So kann man in Farmer-Diagrammen z.B. weltweit die Risiken aus der technischen Umwelt (z.B. Risiken aus kommerziellem Flugverkehr, aus Kernkraftwerken, aus industrieller Tätigkeit) mit solchen aus der natürlichen Umwelt (z.B. Risiken aus Überschwemmungen, Wirbelstürmen, Erdbeben, Erdrutschen und Schlammlawinen) vergleichen. Man erkennt dann, dass wider Erwarten die Risiken aus der natürlichen Umwelt weit grösser sind als die aus der technischen Umwelt herrührenden Risiken.

Auch Risken in räumlich beschränkten Regionen (also z.B. in der Schweiz, in der Region Basel) lassen sich in Farmer-Diagrammen relativ leicht vergleichen. Folgerichtig hat die Schweizerische Störfallverordnung (StFV, 1991) im Prinzip diese Darstellungsart übernommen.

Bei der Benutzung solcher Diagramme ist der räumliche Bezug sorgfältig zu beachten, damit man nicht falsche Vergleiche zieht.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

9.22 Rettungseffizienz von Sicherheitsmassnahmen

Jede Massnahme kostet Geld. Bei reinen Sicherheitsmassnahmen sind dies die sog. *Sicherheitskosten*. Tragen Massnahmen lediglich teilweise zur Erhöhung der Sicherheit bei, lässt sich ein entsprechender Teil der Gesamtkosten als Sicherheitskosten abspalten.

Jede hinsichtlich Sicherheit sinnvolle Massnahme führt zu einer *Risiko-Reduktion*. Der Quotient aus Sicherheitskosten und Risiko-Reduktion hat die Dimension "Geldeinheit pro Schadeneinheit", also z.B "Franken pro gerettetes Menschenleben". Wir verbinden diesen Quotienten mit dem Begriff *Rettungskosten* (Stiefel et al, 1985).

Ein Zahlenbeispiel soll zeigen, dass es sich dabei um einen grundsätzlich sehr einfachen Gedanken handelt: Auf einer Strassenkreuzung XY finden jährlich im Schnitt 4 Menschen den Tod. Eine vollständige Sanierung (z.B. mit Überführung) kann diese Zahl auf Null bringen. Diese Sanierung kostet 8 Millionen Franken, löst demnach Jahreskosten von rund 800'000 Franken aus. Davon müssen – das habe z.B eine kleine Untersuchung ergeben – z.B. 75% als Sicherheitskosten gewertet werden, während der Rest der Sanierungskosten z.B. auf erhöhten Komfort, auf weniger Lärm aus Bremsen und Anfahren usw. abzubuchen ist.

Die in die Sanierung der Kreuzung investierten Rettungskosten betragen somit

$$RK_{Sanierung} = \frac{0.75 \cdot 800'000 \text{ Fr.}}{4 \text{ gerettete Menschenleben}} = 150'000 \text{ Fr./Menschenleben}$$

Es wäre nun zu prüfen, ob diese Massnahme angemessen ist. Hierzu kann man sich auf Figur 9/7 beziehen. Diese zeigt Beispiele für die Grössenordnung von Rettungskosten verschiedener Massnahmen. Erstaunlich ist zunächst wieder die grosse Bandbreite der Zahlenwerte.

Beim Betrachten dieser Zahlenwerte wird deutlich, dass es offenbar zwischen vernünftigen und unvernünftigen Sicherheitsmassnahmen zu unterscheiden gilt. Man kann ein neugeborenes Menschenleben in der 3. Welt durch eine Mehrfach-Schutzimpfung für rund 100 Franken retten. In welches Schicksal man dieses Menschenleben entlässt, steht freilich auf einem anderen Blatt. Das Tragen eines Helms beim Motorradfahren ist eine vergleichsweise billige und sehr zu empfehlende Sicherheitsmassnahme. Ähnliches gilt für das Helmtragen auf Baustellen. Bei Rettungskosten zwischen 100'000 und 500'000 Franken findet man eine ganze Reihe von Sicherheitsmassnahmen und -aktivitäten, die man als vernünftig und angemessen bezeichnen würde, während z.B. gewisse, von den Gewerkschaften in den USA geforderte Massnahmen Rettungskosten von vielen Millionen Dollars binden. Die Asbest-Hysterie ist ein entsprechendes Beispiel aus unserer Welt. Auch hier finden sich, z.B. in (Fritzsche, 1992) weitere Zahlen.

Rettungskosten
Fr. pro gerettetes Menschenleben

100	Mehrfachimpfung 3. Welt
$1 \cdot 10^3$	
$2 \cdot 10^3$	Installation Röntgenanlage
$5 \cdot 10^3$	Tragen Motorradhelm
$10 \cdot 10^3$	Kardiomobil
$20 \cdot 10^3$	Tuberkulose-Überwachung
$50 \cdot 10^3$	Bereitstellung Helikopter
$100 \cdot 10^3$	Sicherheitsgurte in Autos
bis	Sanierung von Kreuzungen Nieren-Dialyse
$500 \cdot 10^3$	Tragwerke
$1 \cdot 10^6$	
$2 \cdot 10^6$	
$5 \cdot 10^6$	S-Bahn Zürich, AlpTransit
$10 \cdot 10^6$	Erdbebennorm SIA
$20 \cdot 10^6$	Bergwerksicherheit USA
$50 \cdot 10^6$	DC 10 ausser Betrieb
$100 \cdot 10^6$	Hochhäuservorschrift GB
$1 \cdot 10^9$	Asbest-Sanierung Schulen

Figur 9/7

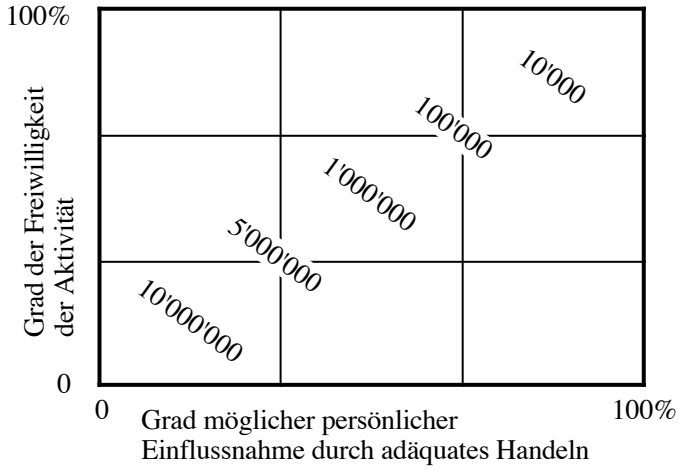
Die Frage, welche absolute Grösse hier noch vertretbar sei, ist eine Wertungsfrage, die hier im Prinzip nicht zur Diskussion steht. Sie ist aber zunächst ohnehin ohne Belang, denn es entspricht solidem ingenieurmässigem Denken, Gelder zweckmässig einzusetzen, d.h. dort, wo sie viel nützen. Bei beschränkten Mitteln ist es sinnvoll, teure Massnahmen zugunsten von billigeren aufzugeben. So lassen sich bei gleichbleibenden Gesamtausgaben mehr Menschenleben retten. "... if our priorities in managing risks are not cost-effective, we are, in effect, killing people whose premature deaths could be prevented ..." (Okrent, 1980). Das lässt sich in seiner Krassheit kaum in die deutsche Sprache bringen, drum sei das hier im Original zitiert.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Und doch stellt sich dann die Frage, was wir uns denn eigentlich leisten können, müssen, wollen oder sollten? Bei der Beantwortung dieser Fragen kann wieder das Diagramm von Figur 9/5 nützlich sein. In Figur 9/8 ist eingetragen, was wir als aufzubringende Rettungskosten in sFr. (in unserer reichen Volkswirtschaft) persönlich noch für vertretbar halten.

Natürlich wäre auch hier wieder ein gesellschaftlicher Konsens zu suchen. Es ist offensichtlich, dass dieser von der Leistungsfähigkeit der jeweiligen Volkswirtschaft abhängig ist. Was in der Schweiz als Rettungskosten noch vertretbar ist, wird in Bangladesh nicht aufzubringen sein. Auch werden entsprechende Werte von der jeweils betrachteten Aktivität abhängen. Man wird bei der Absicherung kritischer oder problematischer Technologien fraglos mehr in Sicherheit investieren als in selbstverständlichen Bereichen.

Beim Bau der S-Bahn Zürich zum Beispiel hat man Massnahmen mit Rettungskosten unter 3 Millionen Franken pro gerettetes Menschenleben ohne langes Überlegen realisiert, bei solchen mit Kosten über 10 Millionen hat man gezögert. Auch bei der Projektierung des alpenquerenden schweizerischen Hochleistungsbahnnetzes AlpTransit gelten ähnliche Kriterien.



Figur 9/8

Eine merkwürdige Eigenart der in den Figuren 9/5 und 9/8 eingetragenen Zahlenwerte sei hier noch angefügt: das Produkt aus akzeptierbarem Todesfallrisiko/Jahr und den empfohlenen Rettungskosten in Franken pro gerettetes Menschenleben erreicht an jeder Stelle des Diagramms den Betrag von 100 Fr/Jahr, ist also bei Annahme dieser sehr persönlichen Empfehlungen konstant. Das ist nicht gewollt, sondern zufälliges Ergebnis zweier unabhängiger subjektiver Einschätzungen. Wie diese Konstante zu interpretieren wäre, ist noch zu untersuchen.

9.23 Vergleich in Häufigkeits/Ausmass-Diagrammen

Risiken lassen sich auch in einem sog. Häufigkeits/Ausmass-Diagramm gut vergleichend beurteilen. Die Arbeit mit solchen Diagrammen erweist sich in vielen Fällen als effizient, weil man sich damit rasch einen qualitativen Überblick, z.B. über die verschiedenen mit einem technischen Vorhaben verbundenen Risiken, verschaffen kann. Auch ist das Vorgehen für Laien leicht verständlich und fördert deshalb eine gute Kommunikaton.

Die zu vergleichenden Gefährdungsbilder werden nach den beiden für die Beurteilung von Risiken wesentlichsten Grössen

- Eintretenshäufigkeit
- Schadenausmass

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

qualitativ klassiert, d.h. nach Gutdünken eingeschätzt, und, z.B. mit einer kennzeichnenden Nummer, in ein entsprechendes Diagramm (siehe Figur 9/9) eingetragen. Gefährdungsbilder mit grossen Risiken erscheinen dann im Diagramm rechts oben, solche mit kleinen Risiken links unten.

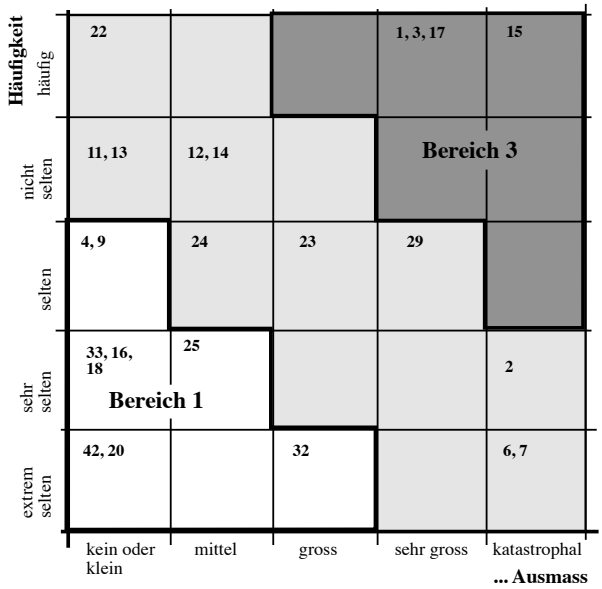
Im Diagramm lassen sich in einem zweiten Schritt Bereiche abgrenzen und damit die erfassten Gefährdungsbilder gruppieren. Die Risiken im Bereich 3 wird man beispielsweise mit erster Priorität angehen. Diejenigen des Bereichs 2 kann man sich für eine spätere Diskussion vorbehalten und vorderhand einmal stehen lassen. Die Risiken des Bereichs 1 schliesslich lassen sich unter Umständen von vorne herein als akzeptierbar einstufen und damit von der weiteren Bearbeitung ausschliessen.

Dass die Massstäbe für Ausmass und Häufigkeit im Sinne von Kapitel 3.7 *fuzzy* sind, ist offensichtlich. Man wird sich also hier zunächst einigen müssen, was unter den qualitativen Begriffen verstanden werden soll. Schon diese Diskussion allein bringt die Beteiligten auf dem Wege der angestrebten Einigung einen Schritt weiter.

Es erweist sich als zweckmässig, die Gefährdungsbilder in mehreren Diagrammen zu klassieren, die für spezifische Schädigungsarten und damit für jeweils spezifische Risiken gelten. Sinnvoll sind separate Blätter beispielsweise für

- Personenschäden
- Sachschäden an Bauwerken, Einrichtungen usw.
- Umweltschäden (Grundwasser, Oberflächengewässer, Boden, ...)

Gelegentlich werden in solchen Diagrammen zusätzlich noch sog. Akzeptanzlinien definiert und eingetragen. Man spricht dann davon, Gefährdungsbilder mit grossem Risiko durch geeignete Sicherheitsmassnahmen nach unten bzw. links unter diese Akzeptanzlinie zu bringen.

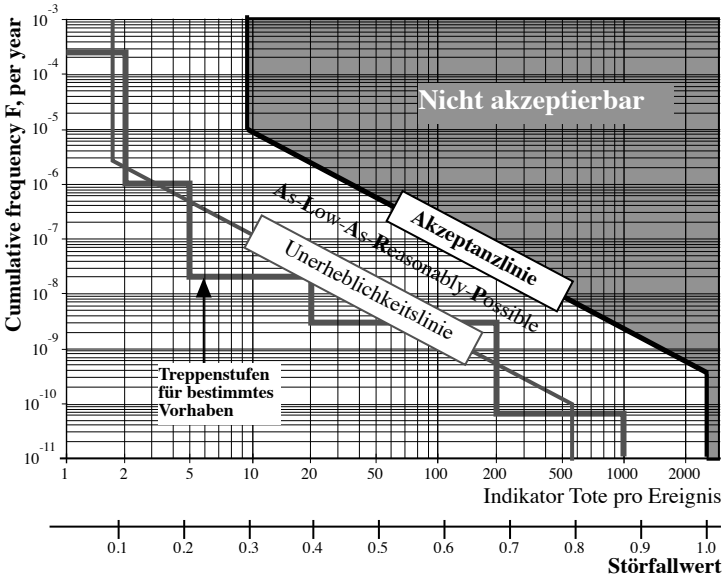


Figur 9/9

Das Handbuch I zur Störfallverordnung (StFV, 1991) sieht für die Häufigkeit eine kontinuierliche Skala vor. Auch das Ausmass wird auf einer kontinuierlichen Skala als Störfallwert zwischen Null und Eins dargestellt (siehe Figur 9/10). Im Prinzip ist ds ein Farmer-Diagramm (siehe Abschnitt 9.21).

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Störfallwerte bis 0.3 werden als Unfall bezeichnet, Werte über 0.5 nennt die Verordnung Katastrophe. Was dazwischen liegt, wird als Grossunfall bezeichnet. Bemerkenswert sind die sehr kleinen Häufigkeiten und die strengen Akzeptanzkriterien, die allerdings mit anderen europäischen Entwürfen in guter Übereinstimmung sind (Merz, 1995).



Figur 9/10

Der Störfallwert eines Gefährdungsbilds (die Störfallverordnung spricht in diesem Zusammenhang von Störfallszenarien) wird aus neun Indikatoren hergeleitet. Einer dieser Indikatoren, der Erwartungswert der Toten, ist in Figur 9/10 eingetragen. Weitere Indikatoren sind andere Formen der Schädigung von Menschen und Lebewesen, die Beeinträchtigung der Lebensgrundlagen in Form kontaminierter Ökosysteme sowie Sachschäden. Der Indikator mit dem grössten Wert bestimmt den Störfallwert des Gefährdungsbilds. Zu jedem Gefährdungsbild ist dann die Auftretenshäufigkeit zu ermitteln. Diese Häufigkeit spannt mit dem zugehörigen Störfallwert in den Koordinaten von Figur 9/10 ein Rechteck auf, dessen Fläche als Risiko des betrachteten Gefährdungsbilds gedeutet werden kann.

Ordnet man die Gefährdungsbilder nach der Grösse ihrer Störfallwerte, lassen sich diese Risikoflächen aufeinandertürmen und so das gesamte Gefährdungspotential des betrachteten Vorhabens oder des betrachteten Betriebs darstellen. Die sukzessive Addition der Häufigkeiten der einzelnen Gefährdungsbilder ergibt, ausgehend von demjenigen mit dem grössten Störfallwert, eine Treppenkurve, die dieses Potential beschreibt und eine Beurteilung anhand der Akzeptanzlinien gestattet. Die in Figur 9/10 eingezeichnete, zu einem bestimmten Vorhaben gehörende Treppenkurve ist angesichts ihrer Lage bezüglich der Akzeptanzlinie wohl akzeptabel.

9.24 Risiko-Aversion

Die Erfahrung zeigt, dass die Bevölkerung seltene Unfälle mit vielen Toten und Verletzten wesentlich schwerer nimmt als häufige Ereignisse mit wenigen Toten. Das sog. "objektive" Risiko gemäss Formel (1.1) verliert dann bei Vergleichen den Charakter eines verlässlichen Massstabs.

Ein Beispiel soll das belegen: pro Jahr sterben auf den Strassen der Schweiz rund 700 Menschen. Diese 700 Todesfälle rühren aus Unfällen mit einem einzigen oder – selten – wenigen Toten her und verteilen sich mehr oder weniger gleichmässig über das ganze Jahr. Das individuelle jährliche

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Todesfallrisiko auf den Strassen der Schweiz beträgt somit bei etwa 7 Millionen Einwohnern etwa 10^{-4}. Dieses Risiko nehmen wir offenbar diskussionslos hin.

Falls pro Monat jedoch 2 Grossunfälle mit Reisebussen oder im Bahnverkehr mit je rund 30 Toten passieren würden, würde das von der Bevölkerung sicher nicht akzeptiert, und die Betreiber der entsprechenden Verkehrssysteme kämen ganz erheblich unter Druck, ihren Betrieb sicherer zu gestalten. Das Risiko für die Bevölkerung der Schweiz ist jedoch in beiden Fällen gleich gross, nämlich rund 700 Tote pro Jahr. Institutionen wie die SBB, die Post, die Swissair etc. können sich offenbar nicht leisten, was – in anderer Form – auf unseren Strassen passiert. Schwere Unfälle mit vielen Toten schaden ihrem Ansehen.

Solche Verzerrungen der Risikoempfindung müssen gelegentlich berücksichtigt werden. Dies hat zur Einführung des Begriffs *Risikoaversion* geführt. Ein möglicher Ansatz benützt einen von der Zahl der möglichen Todesopfer abhängigen Aversionsfaktor $A(E) > 1$ [Th. Schneider, 1981]. Es ergibt sich:

$$R_{empf} = R_{obj} \cdot A(E) \tag{9.1}$$

Auch andere Ansätze sind schon vorgeschlagen worden, so insbesondere

$$R_{empf} = p_E \cdot E(S)^a \tag{9.2}$$

worin p_E die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines schädigenden Ereignisses und $E(S)$ der Erwartungswert des Schadens bedeuten. Der von der Zahl der möglichen Todesopfer weitgehend unabhängige Exponent $a > 1$ vergrössert das Risiko im Sinne der Aversion. Der Faktor $A(E)$ bzw. der Exponent a sind rein subjektiver Natur. Beide können im Einzelfall, z.B. durch gezielte Befragung von Experten, ermittelt werden.

Man erhält auf diesem Weg einen Wert für das sog. *empfundene* Risiko, also die subjektive Einschätzung eines Risikos mit grossen möglichen Folgen. Dieses empfundene Risiko ist grösser, z.B. 5mal, oder 100mal grösser als das aufgrund ausreichender Tatbestände mit wissenschaftlichen Methoden festgestellte sog. *objektive* Risiko. Die Akzeptanzlinien der Störfallverordnung enthalten für die Gefährdung von Menschen einen unserer Meinung nach recht grossen Aversionsexponenten von etwa $a \approx 2$.

Sind menschliche Fehlhandlungen im Spiel, entstehen ähnliche Verzerrungen: Dass der Kapitän der Exxon Valdez betrunken war, lässt die Katastrophe in Alaska schlimmer erscheinen, als wenn der Kapitän angesichts schwerer Stürme oder technischer Mängel den Grosstanker nicht mehr auf Kurs hätte halten können. Aber auch ein notorischer Raser, der einen zweiten tödlichen Unfall verursacht, löst weit grösseren Protest aus als ein sozusagen normaler Unfall. Aversion ist demnach nicht nur eine Frage der Grösse des Schadens, sondern auch von den Einzelheiten der Ursache des Schadens abhängig. Hier versagen dann offensichtlich die obengenannten Ansätze.

Zur Erläuterung des Vorstehenden greifen wir das Beispiel aus Kapitel 7.32 wieder auf und insbesondere die Figur 7/7, die hier als Figur 9/11 mit den nötigen Erweiterungen wiedergegeben ist.

Die ersten Spalten zeigen das Ergebnis des Ereignisbaums unter den in Kapitel 7.32 getroffenen Annahmen und insbesondere das dort begründete "tatsächliche individuelle Personenschadenrisiko" eines Reisenden auf der fraglichen Strecke. Es beziffert sich zu insgesamt 0.078 Toten, gegeben das

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Gleis wird verschüttet. Falls die Verschüttungshäufigkeit z.B. mit H(A) = 0.1/Jahr beziffert wird, ergibt sich das "objektive individuelle Risiko" des Reisenden als Produkt der genannten Zahlen zu 0.008 Tote pro Jahr. Hier setzt eine erste Akzeptanzdiskussion ein, die sich der Frage stellt, ob dies tragbar sei als individuelles Risiko der Benützer der Bahn. Bei der Beurteilung dieser Frage wird man auf das unter Abschnitt 9.21 Diskutierte zurückgreifen.

Konse-quenzen	**Σ P(ClA) ‰**	Anzahl betroffener Personen	Anzahl der effektiv tödlich Gefährdeten	tatsächliches Personen-schadenrisiko [10^{-3}]	Aversionsfaktor A(E)	Empfundenes Personen-Risiko		
sehr klein	968.8	0	0					
klein	12.7	1	0					
mittel	13.9	5	3	42	1	42		
gross	4.4	10	6	26	3	78		
sehr gross	0.2	100	50	10	10	100		
	1000			78		220		

Figur 9/11

Der Bahnbetreiber hingegen wird sich fragen, ob er sich das kollektive Risiko eines Unfalls mit z.B. 50 Toten leisten kann. Er sieht den Grossunfall und gewichtet Unfälle mit grossen Folgen weit stärker als kleine Unfälle, er hat eine Aversion gegen Grossunfälle. Führt man diese grössere Gewichtung von Grossunfällen z.B. mit den in Figur 9/11 eingetragenen Aversionsfaktoren ein und multipliziert aus, ergibt sich mit H(A) = 0.1/Jahr das empfundene Risiko des Bahnbetreibers zu R_{empf} = 0.022 Tote/Jahr. Hier setzt die Akzeptanzdiskussion beim Bahnbetreiber ein.

Es ist ohne Zweifel so, dass sich Unternehmungen, also z.B. Industriezweige, Firmen etc., weniger am sog. objektiven Risiko orientieren, sondern sich eher von einem durch Aversionen beeinflussten empfundenen Risiko leiten lassen. Sie tun das insbesondere aus der Befürchtung heraus, dass ein grosser Schadenfall den weiteren Betrieb ihrer Anlagen, ja sogar die Existenz der Unternehmung bedrohen könnte und sind deshalb bereit, zum voraus und vorsorglich weitaus mehr in Sicherheit zu investieren, als rational begründbar ist (siehe hierzu auch Ditlevsen, 1994). Eine Reihe kleinerer Unfälle, mit der gleichen Anzahl von Toten beispielsweise, spielen hingegen für den Ruf einer Unternehmung eine weit kleinere Rolle und gestatten rationales Verhalten.

Aber auch jeder Einzelne orientiert sich bei der Beurteilung von Risiken eher am durch Aversionen verzerrten empfundenen Risiko. Er fordert Massnahmen, wo ihm das letztere als unakzeptierbar erscheint. Das objektive Risiko interessiert ihn weit weniger. Beweise hierfür liefern die Akzeptanzdiskussionen angesichts technischer Risiken zuhauf. Es ist also davon auszugehen, dass die als akzeptierbar eingestuften Zahlenwerte in Fig. 9/5 links unten eher zu gross sind, wenn man Risiken mit gleichzeitig vielen Toten betrachtet. Und diese Risiken sind ja sogar eher typisch für die linke untere Ecke im Diagramm.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

9.25 Ausweitung des Blickwinkels

Die Beschränkung der Akzeptanzdiskussion auf die Gefährdung von Leib und Leben von Menschen ist, auch wenn man Aversionsfaktoren berücksichtigt, natürlich in vielen Fällen zu eng. Wesentliche Bereiche des zu betrachtenden Umfelds bleiben dabei unberücksichtigt. Wir wollen uns hier auf einige wenige Hinweise beschränken, und es ist unvermeidlich, dass dabei Fragen stehen bleiben.

Was ist zu tun, wenn man den Mechanismus zwischen Einwirkung und Schaden nicht kennt oder Zusammenhänge nur vermutet? Ein einschlägiges Beispiel bietet die Ozon-Problematik. Offenbar ist dann nicht das Schadenrisiko von Belang, sondern die mit einem gewissen Grad quantifizierte Vermutung, dass eine Gefährdung überhaupt vorliegen könnte.

Als zweites sei der Bereich der *Ethik* erwähnt. Darf man Dinge, Werte, auch ideelle Werte, z.B. unersetzliche Kulturgüter, darf man Pflanzen und Tiere gefährden, auch wenn Menschenleben weder direkt noch indirekt gefährdet sind? Wie sind entsprechende Risiken zu bewerten?

Dann ist der *psychologische Bereich* von Belang: Darf man zB. das lähmende Gefühl der Angst, auch wenn Menschenleben objektiv und aller sorgfältigen Beurteilung nach weder direkt noch indirekt gefährdet sind, bei Sicherheitsüberlegungen ausser Acht lassen?

Auch Fragen der *Soziologie* spielen hinein: Unter welchen Umständen darf man bei der Lösung von Sicherheitsproblemen zugunsten der Sicherheit vieler Menschen einzelne überproportional gefährden? Dies ist eine Frage, vor der ein Ingenieur gelegentlich steht. Darf er zur Rettung eines lebenswichtigen Werks, einer Verkehrsverbindung beispielsweise, einzelne Arbeiter einer grossen Gefährdung aussetzen und unter welchen Umständen?

Das geschriebene *Recht* und das Gewohnheitsrecht sind bei der Bewertung von Risiken zu beachten, auch wenn keine Menschenleben gefährdet sind.

Schliesslich spielt der Aspekt der *Schadenversicherung* in die Beantwortung von Bewertungsfragen hinein: Was kostet ein Menschenleben? Sind alle Menschen gleich teuer? Was kostet ein Frosch, was eine Froschpopulation, was eine ganze Gattung?

Fragen über Fragen. Weiterführendes findet sich in (Berg et al., 1994). Konkrete Antworten sind jedoch wohl nur im konkreten Einzelfall zu finden, und oft wohl nur in der Form impliziter Antworten durch die im Einzelfall getroffene Lösung des anstehenden Sicherheitsproblems.

9.3 Rettungskosten

9.31 Definition

Der Begriff lässt sich wie folgt in Formeln fassen und damit definieren:

$$RK_M = \frac{SK_M}{\Delta R_M} \tag{9.3}$$

Darin bedeuten:

RK_M = einer bestimmten Massnahme zugeordnete Rettungskosten

SK_M = mit der Massnahme investierte Sicherheitskosten

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

ΔR_M = $\Delta[p_f \cdot E(S)]_M$ = durch Einsatz der Massnahme erzeugte Risikoreduktion

p_f = Versagenswahrscheinlichkeit vor bzw. nach dem Massnahmeneinsatz

$E(S)$ = Erwartungswert des Schadens

In der Regel ist der Erwartungswert des Schadens unabhängig von der betrachteten Massnahme. In diesem Fall ist

$$\Delta R_M = \Delta p_{f_M} \cdot E(S)$$

worin Δp_{f_M} die durch die Massnahme M herbeigeführte Risikoreduktion ist. Damit reduziert sich der Ausdruck (9.3) auf

$$RK_M = \frac{SK_M}{\Delta p_{f_M} \cdot E(S)} \tag{9.4}$$

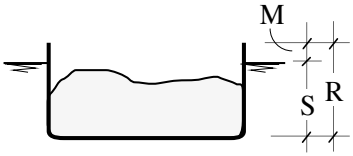
Hat man es nicht mit diskreten Massnahmen zu tun, sondern mit Massnahmen, denen mit stetig steigender Intensität des Einsatzes stetig anwachsende Sicherheitskosten bei stetig zunehmender Wirkung zugeordnet werden können, gilt:

$$RK_M = \frac{dSK_M}{dp_{f_M} \cdot E(S)} \tag{9.5}$$

Zunächst ist nichts über die *Art des Schadens* ausgesagt. Das können Menschenleben sein, die man retten möchte. Es können aber auch unersetzliche Natur- und Kulturgüter sein, die wir bewahren wollen. Es kann sich um Frösche handeln, die man auf ihrem jährlichen Weg zu den Laichplätzen durch speziell gebaute Unterführungen vor dem Überfahrenwerden schützen möchte. Es kann sich schliesslich auch um finanzielle Mittel drehen, die man sichern möchte. In diesem Fall ist das Ganze natürlich nur sinnvoll, wenn man zur Rettung pro Franken weniger als einen Franken ausgibt.

Auch die Wahrscheinlichkeiten p_f sind nicht immer von vornherein numerisch gut gesicherte Grössen, und oft muss man sich mit Schätzungen begnügen. Erfahrungsgemäss liegt man jedoch bei der Abschätzung von Rettungskosten kaum um mehr als eine Zehnerpotenz daneben. Und das ist – angesichts der grossen Bandbreite der beobachteten Rettungskosten (Figur 9/7) – doch recht zufriedenstellend.

9.32 Optimierungsfragen



Figur 9/12

Wir beziehen uns im folgenden auf stetige Zusammenhänge, die mit Formel (9.5) beschrieben werden und stützen uns auf die Betrachtung eines einfachen Beispiels, eines Lastkahns zur Beförderung von Schüttgut (siehe Figur 9/12).

Es leuchtet ein, dass eine bestimmte Investition getätigt werden muss, um Lastkahn und Schüttgut überhaupt zu tragen. Beschränkt man sich auf diese minimale Investition, liegen Bordrand und Wasseroberfläche auf gleicher Höhe. Dann beträgt die Versagenswahrscheinlichkeit 0.5, denn die Chancen stehen, mathematisch gesehen, gleich gut für sinken oder nicht sinken. Was darüber hinaus investiert wird, im diskutierten Beispiel zur Schaffung eines sog. Freibords, dient der Sicherheit. Die hierfür eingesetzten Mittel entsprechen den Sicherheitskosten (siehe Figur 9/13).

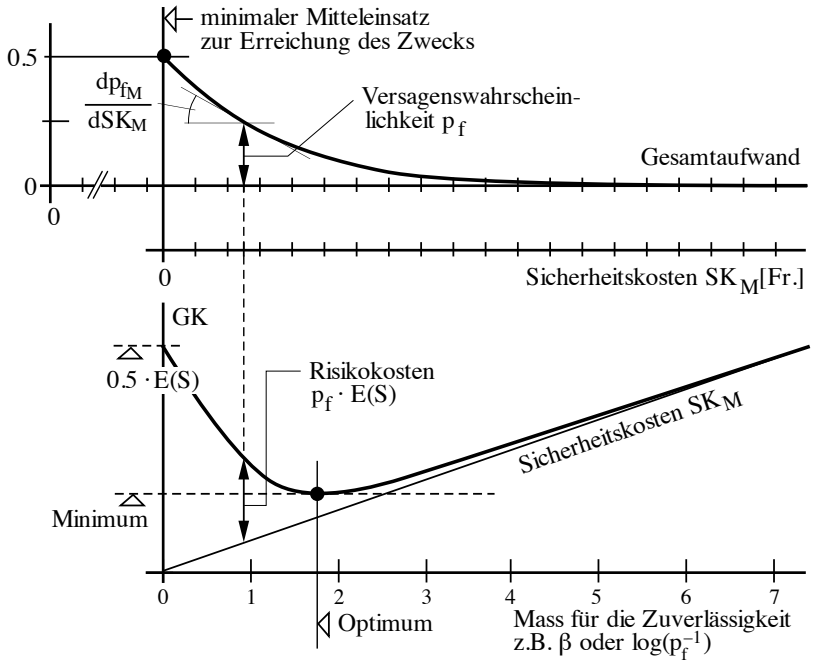
Figur 9/13 zeigt im oberen Teil auf der Abszisse den finanziellen Gesamtaufwand, der nötig ist, um das Ziel zu erreichen, also z.B. den Lastkahn zu

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

bauen, der eine bestimmte Masse Schüttgut mit vorgegebener Versagenswahrscheinlichkeit p_f zu tragen imstande ist.

In Figur 9/13 ist unten die Summe aus Risikokosten und Sicherheitskosten aufgetragen. Die Risikokosten sind hier – der gewählten Vereinfachung entsprechend – proportional zur Versagenswahrscheinlichkeit angesetzt. Die Sicherheitskosten steigen mit steigendem Aufwand für Sicherheit.

Die Figur zeigt deutlich, dass die ersten Franken, die zur Schaffung von Sicherheit ausgegeben werden, sehr viel wirksamer sind als jene, die man auf einem bestimmten Sicherheitsniveau zusätzlich einsetzt. Schliesslich ergibt sich offensichtlich irgendwo ein Minimum der Gesamtkosten. Es ist unter Umständen von Interesse, dieses Optimum anzuzielen.



Figur 9/13

Oft lassen es die Möglichkeiten der Volkswirtschaft nicht zu, das Optimum zu realisieren. Auf der anderen Seite geben wir unter Umständen aus politischen Gründen für gewisse Massnahmen mehr aus, als zur Realisierung dieses Optimums nötig wäre.

Das Beispiel sei auch zahlenmässig durchgerechnet: der Lastkahn (siehe Figur 9/12) habe einschliesslich Ladung einen Gesamtwert von 5 Millionen Franken. Der Tiefgang S, näherungsweise proportional zur Ladung angesetzt, sei normalverteilt mit S = N(5, 0.5). Die Seitenwandhöhe sei deterministisch und vom Freibord M abhängig. Dieses Freibord ist als Sicherheitsmassnahme zu sehen und koste pro Meter Höhe 100'000 Fr. Die Zahlenrechnung ist einfach. Es ergeben sich die folgenden Werte:

M	γ	β	p_f	$\log(p_f^{-1})$	SK_M	$p_f \cdot E(S)$	GK
0	1.0	0	0.5	0.30	0	2'500'000	2'500'000
0.5	1.1	1	0.16	0.80	50'000	800'000	850'000
1.0	1.2	2	0.023	1.64	100'000	115'000	215'000
1.5	1.3	3	0.0014	2.85	150'000	7'000	157'000
2.0	1.4	4	0.000032	4.50	200'000	160	200'160
2.5	1.5	5	$3 \cdot 10^{-7}$	6.52	250'000	1	250'001

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Das Optimum liegt offenbar irgendwo zwischen 1 und 2 Metern. Es lässt sich grafisch oder analytisch ermitteln.

Dass hier sehr idealisierte Verhältnisse diskutiert wurden, ist jedem mit Wasser, Wind und Wellen vertrauten Leser sofort aufgefallen. Was geschieht, wenn Wellen kommen, der Wind bläst und das als Sicherung gedachte Freibord einseitig den Wind fängt und das Schiff schief legt, oder wenn die Ladung nicht zentrisch eingebracht wird oder verrutscht? Auch ist die Tatsache zu untersuchen, dass ein solcher Kahn viele Jahre im Dienst stehen und damit viele Fahrten überstehen soll. Dann verteilen sich die investierten Sicherheitskosten auf die Summe aller Fahrten. Schliesslich könnte die Fracht aus Menschen bestehen, bei der sich dann eine allein nach wirtschaftlichen Kriterien ausgerichtete Optimierung verbietet.

Jede Antwort gilt nur im Rahmen der Voraussetzungen, und man müsste jeden Fall aufgrund der geschilderten Charakteristiken neu untersuchen.

9.33 Setzen von Prioritäten

Eigentümer von bestehenden Bauwerksbeständen sehen sich bei begrenzten Mitteln oft mit der Frage konfrontiert, welche Bauwerke zuerst saniert werden sollten.

Es liegt nahe, als Entscheidungshilfe den Begriff und die Aussagekraft von Rettungskosten zu nutzen und Prioritätenlisten zu erstellen, die nach steigenden Rettungskosten geordnet sind. Solche Listen kann man dann im Prinzip von oben nach unten im Laufe der Zeit abarbeiten.

Auch die Gesellschaft als Ganzes sieht sich den verschiedensten Problemkreisen gegenüber und der Frage, welche Probleme man im Sinne vernünftigen Handelns zuerst lösen müsste. Auch hier könnten Rettungskosten eine gute Entscheidungsgrundlage liefern. Dass dabei natürlich noch viele andere Anforderungen zu beachten sind, steht natürlich ausser Frage.

9.34 Rettungskosten in Tragwerken

Ein Beispiel aus dem Bereich des statisch-konstruktiv tätigen Ingenieurs soll die Diskussion über Rettungskosten abschliessen. Es handelt sich um die Frage, wie gross die in Tragwerke investierten Rettungskosten sind. Es handelt sich um eine Reihe von Abschätzungen, die auf der Vorstellung basieren, dass plötzlich sämtliche Tragwerke der Schweiz gleichzeitig mit einer Versagenswahrscheinlichkeit p_f versagen. Wir legen der Abschätzung die folgenden Zahlen zugrunde:

- Investitionen in der Schweiz (in Fr):

Bauwerke total	1800 Mia.	
davon Tragwerke	600 Mia.	
Sicherheitskosten in Tragwerken	100 Mia.	(≈ 15%)

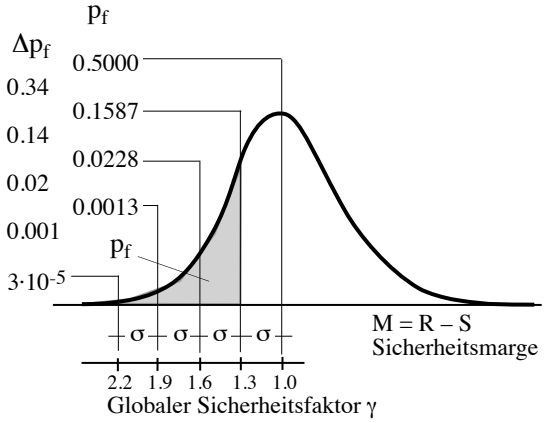
- Gefährdete:

Einwohner	7 Mio.
in Bauwerken anwesend	4 Mio.
durch Einsturz Betroffene	$p_f \cdot 3$ Mio.
Tote	$p_f \cdot 1$ Mio.

Die Verhältnisse zeigt Figur 9/14. Aus der Figur geht z.B. der markierte Fall hervor, der bei einem globalen Sicherheitsfaktor von beispielsweise $\gamma = 1.3$ die Versagenswahrscheinlichkeit mit etwa $p_f = 0.17$ beziffert.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Weiter sei angenommen, dass ein globaler Sicherheitsfaktor von $\gamma = 2.2$ zu einer Sicherheitsmarge gehört, die dem Vierfachen ihrer Standardabweichung entspricht. Damit wäre $\beta = 4$ und die Versagenswahrscheinlichkeit in der Grössenordnung von $p_f = 10^{-5}$.



Figur 9/14

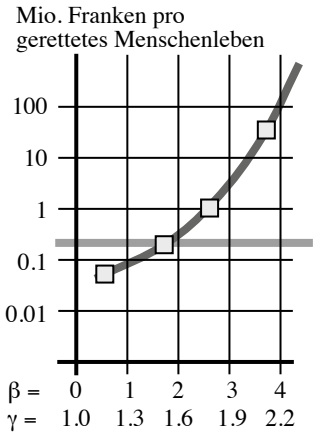
Ein Absenken des globalen Sicherheitsfaktors von 2.2 auf 1.0 bringt offensichtlich eine Differenz der Versagenswahrscheinlichkeiten von rund $\Delta p_f = 0.5$. Damit kämen $0.5 \cdot 1$ Mio. = 500'000 Menschen zu Tode. Dem stehen Sicherheitskosten von 100 Mia. Franken gegenüber. Die in Tragwerke investierten Rettungskosten belaufen sich demnach global auf

$$RK = \frac{100 \cdot 10^9}{0.5 \cdot 10^6} = 200'000 \text{ Fr./Menschenleben}$$

Interessanter noch ist die Entwicklung der Rettungskosten mit steigendem Sicherheitsfaktor, siehe Figur 9/15. Zu jeder Standardabweichung σ gehören Sicherheitskosten von etwa 25 Milliarden Fr. Eine Steigerung des Sicherheitsfaktors von 1.0 auf 1.3 entspricht einer Senkung der Versagenswahrscheinlichkeit von 0.5 auf 0.17, also einer Differenz von 0.33. Das entspricht Rettungskosten von nur

$$RK = \frac{25 \cdot 10^9}{0.33 \cdot 10^6} \approx 76'000 \text{ Fr./Menschenleben}$$

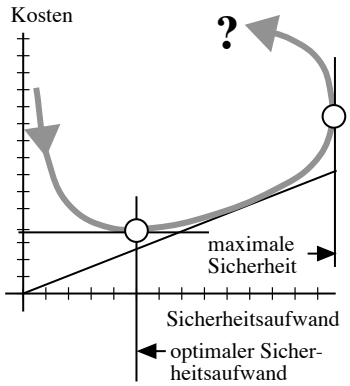
Der erste Schritt in Richtung grösserer Sicherheit ist billig. Weitere Schritte kosten der Reihe nach 167'000, 1'316'000, und für den Schritt von $\gamma = 1.9$ auf 2.2 belaufen sich die Rettungskosten auf rd. 25 Mio. Fr./Menschenleben.



Figur 9/15

9.4 Gibt es einen oberen Grenzwert der Sicherheit?

Je grösser die schon vorhandene Sicherheit, desto mehr kostet zusätzliche Sicherheit. Das ist sogar im logarithmischen Massstab (Figur 9/15) noch eine ansteigende Kurve. Die Erkenntnis, dass mehr Sicherheit je teurer wird, desto sicherer man schon ist, erweist sich im übrigen als allgemeingültig. Es gibt offenbar einen *optimalen* Sicherheitsaufwand, bei dem die Summe aus Sicherheitskosten und Risikokosten ein Minimum findet. Das zeigte schon Figur 9/13.



Figur 9/16

Kaum noch eine Frage ist, ob es auch ein Maximum gibt, einen oberen Grenzwert der Sicherheit, über den man nicht hinauskommt, und bei dem schliesslich trotz steigendem Sicherheitsaufwand und steigenden Gesamtkosten die Sicherheit wieder sinkt, das System wieder empfindlich und ver-

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

letzlich wird. Figur 9/16 veranschaulicht diese Vermutung. Es gibt Anzeichen, dass wir in manchen Bereichen der Technik bereits in dieser eher problematischen Zone agieren.

Literatur

Berg, M. et al.: "Was ist ein Schaden? Zur normativen Dimension des Schadensbegriffs in der Risikowissenschaft"; Polyprojekt Risiko und Sicherheit, Dokument Nr. 2, Zürich Verlag vdf, 1994

Ditlevsen, O.: "Decision making facing risk aversion"; in Proceedings of the Symposium on Risk Analysis, University of Michigan, Ann Arbor, Mich., USA, 1994

Farmer, F.R.: "Siting Criteria – A New Approach"; Proceedings of a Symposium on Containment and Siting of Nuclear Power Plants, IAEA-SM-89/34, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 1967

Fischhoff, B. and others: "How Safe is Safe enough? A Psychometric Study of Attitudes Towards Technological Risks and Benefits"; Policy Science, 9, 1978

Fritzsche, A.F.: "Wie sicher leben wir? Risikobeurteilung und -bewältigung in unserer Gesellschaft"; Verlag TÜV Rheinland, 1986

Fritzsche, A.F.: "Wie sicher leben wir? Der Risikokatalog"; Verlag TÜV Rheinland, 1992

Locher & Cie AG: "Risiken erkennen und meistern"; herausgegeben von der Firma Locher & Cie AG, Zürich 1980

Maslow, A.H.: "Motivation and Personality", Harper and Row, 1984

Mauch, S.P. und Schneider, Th.: "Die unmittelbare Gefährdung unseres Lebensraums"; Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, Heft 6, 1971

Merz, H.A.: "Bewertung von technischen Risiken"; Polyprojekt Risiko und Sicherheit technischer Systeme, vdf, 1995

Okrent, D.: "Comment on Societal Risk"; Science, Vol. 208, April 1980

Premises for Risk Management, Risk Limits in the Context of Environmental Policy, Annex to the Dutch National Environmental Policy Plan, Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, The Hague, 1989

Schneider, J.: "Über den Rang der Entscheidung in der Arbeit des Ingenieurs"; Schweizerische Bauzeitung, Heft 1, 1969

Schneider, J.: "Grundsätzliches zum Sicherheitsbegriff sowie Elemente einer Sicherheitsnorm für Tragwerke"; Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht No. 51, 1974 oder Berichte der Arbeitskommissionen, Band 18, IVBH, Zürich, 1974

Schneider, J.: "Unkonventionelle Überlegungen zum Thema 'Sicherheit' "; Schweizer Ingenieur und Architekt, 7, 1983

Schneider, J.: "Zwischen Sicherheit und Risiko"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 18, 1988, Seiten 505 ff

Schneider, J. (Hrsg.): "Risiko und Sicherheit technischer Systeme – auf der Suche nach neuen Ansätzen"; Birkhäuser Basel, Boston, Berlin, 1991

Schneider, J.: "Safety – A Matter of Risk, Cost and Consensus"; Structural Engineering International 4/2000, 2000

Schneider, Th.: "Grundgedanken und Methodik moderner Sicherheitsplanung"; Der Sicherheitsingenieur, 8 & 9/81, 1981

Starr, Ch.: "Social Benefit versus Technological Risk"; Science, Vol. 165, No. 19, S. 1232, 1969

Stiefel, U. und Schneider, J.: "Was kostet Sicherheit?"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 47, 1985

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

StFV: "Störfallverordnung, Handbuch zur ..." herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, 1991

Wildavsky, A.: "No Risk is the Highest Risk of All"; American Scientist, Volume 67, 1979

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

10. Anhang

Inhaltsübersicht

10.1 Häufig verwendete stetige Verteilungen

Die Beilage enthält die häufigsten Verteilungstypen: Dichte- und Verteilungsfunktion, Definitionsbereich etc. und einige notwendige Ergänzungen. Auch findet sich hier eine kleine Tabelle mit Zufallszahlen.

10.2 Standard-Normalverteilung

Die Beilage enthält die Zahlenwerte der Dichte- und Verteilungsfunktion der Standard-Normalverteilung. Für Tabellen von anderen Verteilungstypen wird auf die Literatur verwiesen (z.B. Benjamin/Cornell, 1970).

10.3 Wahrscheinlichkeitspapiere

Dieser Abschnitt enthält Wahrscheinlichkeitspapiere für die Normal-, die Log-Normal- und die Gumbel-Verteilung.

10.4 Prüfungsfragen

Typische Prüfungsfragen sind hier – ungeordnet – zusammengestellt.

10.5 Das Computerprogramm *VaP*

Das Computerprogramm **V**a**P** (**V**ariables **P**rocessor) wird hier kurz beschrieben. Es kann aus dem Internet heruntergeladen werden.

10.6 Murphy's Law

Hinweise für Gefahrenerkennung und Massnahmenplanung.

10.7 Abkürzungen

Die Abkürzungen wurden z.T. in den einzelnen Kapiteln bereits definiert oder erklärt. An dieser Stelle sind die wichtigsten Hinweise noch einmal zusammengetragen.

10.8 Begriffe

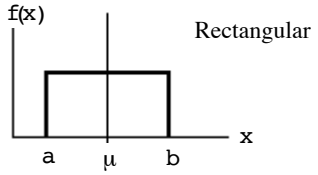
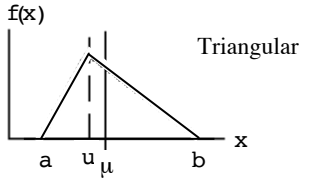
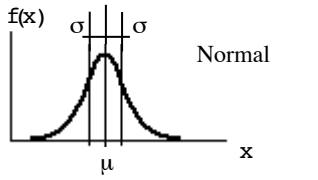
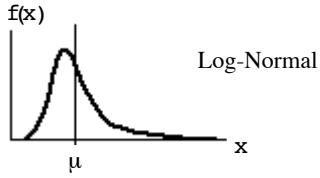
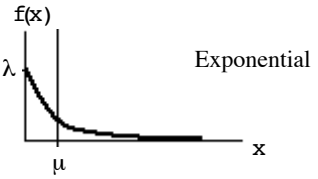
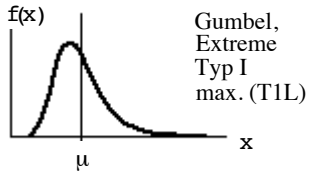
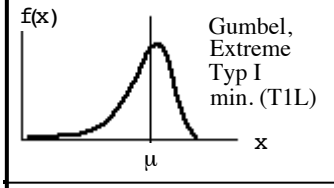
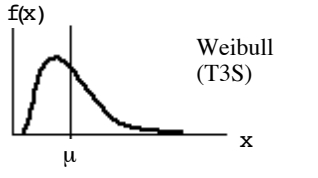
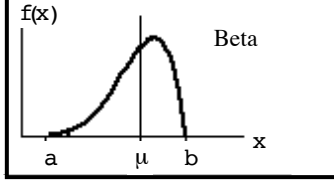
Die wichtigsten Begriffe wurden z.T. in den einzelnen Kapiteln bereits definiert oder erklärt. An dieser Stelle sind die wichtigsten Hinweise noch einmal zusammengetragen.

10.9 Literaturverzeichnis

Die Beiträge sind nach dem erstgenannten Verfasser alphabetisch geordnet, gegliedert nach Mathematischen Grundlagen, Büchern zur Zuverlässigkeitstheorie, Zeitschriftenartikel und weitere Bücher, Software, etc.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

10.1 Häufig verwendete stetige Verteilungen

 Rectangular	$-\infty < a < b < +\infty$ $\mu = \frac{a+b}{2}$ $\sigma = \frac{b-a}{\sqrt{12}}$	$a \le x \le b$ $f(x) = \frac{1}{b-a}$ $F(x) = \frac{x-a}{b-a}$	
 Triangular	$-\infty < a < b < +\infty$ $\mu = \frac{1}{3}(a+b+u)$ $\sigma = \sqrt{\frac{1}{18}\left(a^2+b^2+u^2-ab-au-bu\right)}$	$a \le x \le u$ $f(x) = \frac{2}{b-a}\left(\frac{x-a}{u-a}\right)$ $F(x) = \frac{x^2-2ax+a^2}{(b-a)(u-a)}$	$u \le x \le b$ $f(x) = \frac{2}{b-a}\left(\frac{b-x}{b-u}\right)$ $F(x) = 1-\frac{x^2-2bx+b^2}{(b-a)(b-u)}$
 Normal	$-\infty < \mu < +\infty \qquad \sigma > 0$ μ σ	$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)$ $F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\int_{-\infty}^{x}\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right)dx$	
 Log-Normal	λ, ζ $\mu = \exp\left(\lambda + \frac{\zeta^2}{2}\right)$ € $\sigma = \mu\sqrt{\exp(\zeta^2) - 1}$	$f(x) = \frac{1}{\zeta x\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x-\lambda}{\zeta}\right)^2\right)$ $F(x) = \int_0^x \frac{1}{\zeta x\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x-\lambda}{\zeta}\right)^2\right)dx$	
 Exponential	$\lambda > 0$ $\mu = \frac{1}{\lambda}$ € $\sigma = \frac{1}{\lambda}$	$x \ge 0$ $f(x) = \lambda\exp(-\lambda x)$ $F(x) = 1-\exp(-\lambda x)$	
 Gumbel, Extreme Typ I max. (T1L)	$u, \alpha \qquad \gamma \cong 0.577216$ $\mu = u + \frac{\gamma}{\alpha}$ $\sigma = \frac{\pi}{\alpha\sqrt{6}}$	$f(x) = \alpha\cdot\exp\left(-\alpha(x-u) - \exp(-\alpha(x-u))\right)$ $F(x) = \exp\left(-\exp(-\alpha(x-u))\right)$	
 Gumbel, Extreme Typ I min. (T1L)	$\mu = u - \frac{\gamma}{\alpha}$ $\sigma = \frac{\pi}{\alpha\sqrt{6}}$	$f(x) = \alpha\cdot\exp\left(\alpha(x-u) - \exp(\alpha(x-u))\right)$ $F(x) = 1-\exp\left(-\exp(\alpha(x-u))\right)$	
 Weibull (T3S)	$\varepsilon \le x < +\infty \qquad k > 0$ $\mu = \varepsilon + (u-\varepsilon)\Gamma\left(1+\frac{1}{k}\right)$ $\sigma^2 = (u-\varepsilon)^2\left[\Gamma\left(1+\frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1+\frac{1}{k}\right)\right]$	$f(x) = \frac{k}{u-\varepsilon}\left(\frac{x-\varepsilon}{u-\varepsilon}\right)^{k-1}\cdot\exp\left(-\left(\frac{x-\varepsilon}{u-\varepsilon}\right)^k\right)$ $F(x) = 1-\exp\left(-\left(\frac{x-\varepsilon}{u-\varepsilon}\right)^k\right)$	
 Beta	$-\infty < a < b < +\infty \qquad r, s \ge 1$ $\mu = a + (b-a)\cdot\frac{r}{r+1}$ $\sigma = \frac{b-a}{r+s}\cdot\sqrt{\frac{r\cdot s}{r+s+1}}$	$f(x) = \frac{\Gamma(r+s)}{\Gamma(r)\cdot\Gamma(s)}\cdot\frac{(x-a)^{r-1}(b-x)^{s-1}}{(b-a)^{r+s-1}}$ $F(x) = \frac{\Gamma(r+s)}{\Gamma(r)\cdot\Gamma(s)}\cdot\int_a^u\frac{(u-a)^{r-1}(b-u)^{s-1}}{(b-a)^{r+s-1}}du$	

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Werte der Gamma-Funktion

Γ(...)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.00	1.000	0.994	0.989	0.984	0.978	0.974	0.969	0.964	0.960	0.955
1.10	0.951	0.947	0.944	0.940	0.936	0.933	0.930	0.927	0.924	0.921
1.20	0.918	0.916	0.913	0.911	0.909	0.906	0.904	0.903	0.901	0.899
1.30	0.897	0.896	0.895	0.893	0.892	0.891	0.890	0.889	0.889	0.888
1.40	0.887	0.887	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886	0.886
1.50	0.886	0.887	0.887	0.888	0.888	0.889	0.890	0.890	0.891	0.892
1.60	0.894	0.895	0.896	0.897	0.899	0.900	0.902	0.903	0.905	0.907
1.70	0.909	0.911	0.913	0.915	0.917	0.919	0.921	0.924	0.926	0.929
1.80	0.931	0.934	0.937	0.940	0.943	0.946	0.949	0.952	0.955	0.958
1.90	0.962	0.965	0.969	0.972	0.976	0.980	0.984	0.988	0.992	0.996

Zufallszahlen

0.407	0.324	0.123	0.246	0.343	0.125	0.423	0.466	0.391	0.656	0.833
0.362	0.371	0.814	0.796	0.663	0.731	0.078	0.302	0.548	0.859	0.607
0.512	0.797	0.452	0.283	0.389	0.551	0.109	0.158	0.966	0.085	0.719
0.502	0.133	0.723	0.348	0.688	0.337	0.060	0.617	0.610	0.035	0.512
0.758	0.004	0.523	0.715	0.305	0.721	0.134	0.164	0.196	0.563	0.168
0.079	0.477	0.060	0.035	0.356	0.130	0.372	0.697	0.297	0.513	0.762
0.662	0.784	0.755	0.758	0.139	0.069	0.450	0.037	0.004	0.905	0.254
0.475	0.836	0.825	0.777	0.414	0.801	0.469	0.647	0.043	0.104	0.172
0.134	0.281	0.442	0.388	0.379	0.523	0.303	0.319	0.929	0.486	0.299
0.414	0.675	0.011	0.463	0.589	0.898	0.597	0.661	0.120	0.251	0.554
0.557	0.948	0.117	0.273	0.115	0.560	0.738	0.750	0.812	0.241	0.810
0.264	0.513	0.827	0.135	0.253	0.051	0.238	0.236	0.657	0.389	0.118
0.985	0.102	0.832	0.170	0.868	0.829	0.717	0.610	0.130	0.079	0.904
0.370	0.320	0.815	0.391	0.543	0.185	0.561	0.340	0.305	0.949	0.905
0.951	0.187	0.964	0.802	0.119	0.017	0.096	0.973	0.403	0.407	0.966
0.894	0.498	0.037	0.646	0.080	0.107	0.495	0.461	0.519	0.767	0.189
0.512	0.614	0.816	0.002	0.548	0.811	0.697	0.984	0.453	0.838	0.295
0.578	0.487	0.944	0.796	0.540	0.841	0.864	0.689	0.046	0.380	0.345
0.922	0.856	0.868	0.731	0.106	0.854	0.320	0.920	0.408	0.870	0.867
0.082	0.114	0.292	0.381	0.138	0.317	0.752	0.540	0.275	0.628	0.707
0.160	0.930	0.706	0.851	0.292	0.198	0.601	0.996	0.972	0.279	0.193
0.126	0.105	0.197	0.079	0.834	0.724	0.058	0.762	0.082	0.184	0.784
0.134	0.375	0.024	0.854	0.427	0.524	0.733	0.656	0.826	0.528	0.761
0.377	0.634	0.402	0.656	0.180	0.555	0.568	0.931	0.122	0.793	0.486
0.747	0.338	0.659	0.111	0.723	0.484	0.232	0.587	0.990	0.828	0.406
0.059	0.230	0.451	0.772	0.657	0.574	0.270	0.218	0.089	0.643	0.149
0.425	0.603	0.895	0.810	0.765	0.492	0.173	0.327	0.533	0.905	0.182
0.498	0.127	0.846	0.953	0.048	0.355	0.189	0.378	0.777	0.137	0.100
0.736	0.629	0.712	0.497	0.840	0.818	0.947	0.005	0.668	0.492	0.414
0.100	0.486	0.993	0.287	0.253	0.533	0.946	0.932	0.064	0.155	0.168
0.796	0.964	0.419	0.540	0.083	0.467	0.578	0.722	0.136	0.463	0.910
0.230	0.722	0.363	0.425	0.237	0.435	0.110	0.892	0.292	0.503	0.046
0.737	0.123	0.707	0.082	0.319	0.583	0.624	0.615	0.740	0.861	0.488
0.152	0.830	0.631	0.765	0.789	0.405	0.394	0.330	0.679	0.513	0.103
0.827	0.633	0.776	0.980	0.119	0.551	0.457	0.396	0.495	0.936	0.717
0.535	0.008	0.784	0.887	0.904	0.242	0.995	0.482	0.509	0.912	0.317
0.969	0.407	0.086	0.684	0.193	0.427	0.966	0.133	0.736	0.031	0.471
0.196	0.019	0.496	0.463	0.412	0.133	0.592	0.221	0.416	0.651	0.083
0.308	0.100	0.682	0.676	0.223	0.416	0.489	0.249	0.257	0.284	0.754
0.218	0.786	0.087	0.734	0.722	0.323	0.676	0.602	0.130	0.102	0.259

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

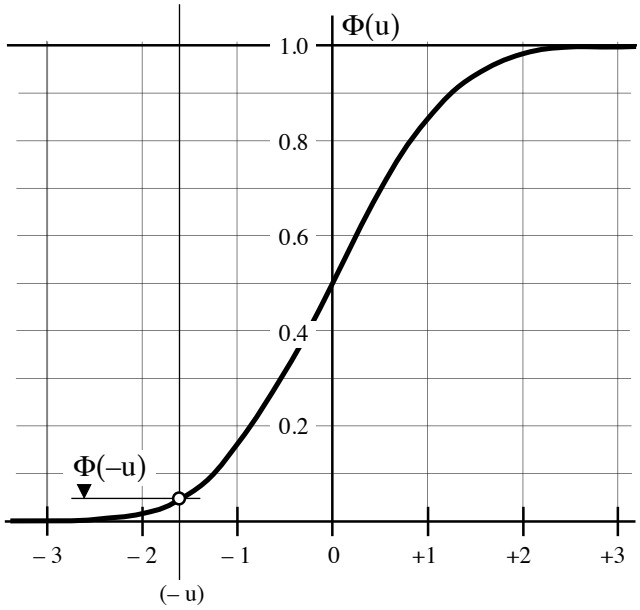
10.2 Standard-Normalverteilung

Definitionen

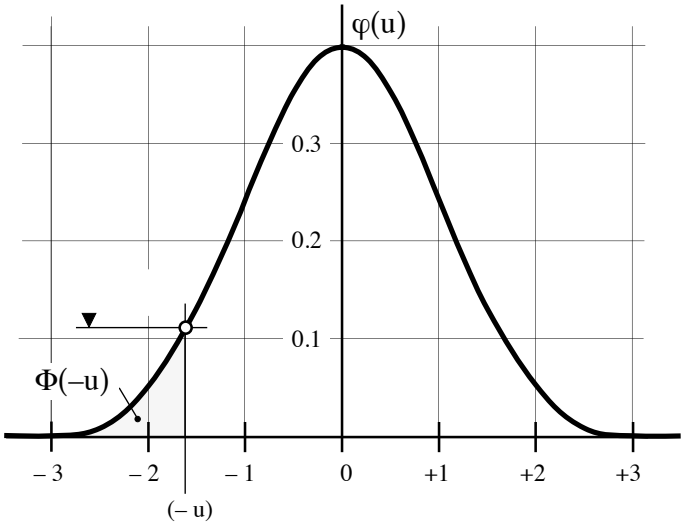
$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}u^2}$$

$$\Phi(u) = \int_{\pm\infty}^{u} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2}u^2} du$$

Verteilungsfunktion



Verteilungsdichte



Quelle: JSA (Japanese Standards Association), "Statistical Tables and Formulas ..."; Tokyo, 1972

u	Φ(– u)	φ(u)
.0	.500 00	.398 94
.1	.460 17	.396 95
.2	.420 74	.391 04
.3	.382 09	.381 39
.4	.344 58	.368 27
.5	.308 54	.352 07
.6	.274 25	.333 22
.7	.241 96	.312 25
.8	.211 86	.289 69
.9	.184 06	.266 09
1.0	.158 66	.241 97
1.1	.135 67	.217 85
1.2	.115 07	.194 19
1.3	.096 80	.171 37
1.4	.080 76	.149 73
1.5	.066 81	.129 52
1.6	.054 80	.110 92
1.7	.044 57	.094 05
1.8	.035 93	.078 95
1.9	.028 72	.065 62
2.0	.022 75	.053 99
2.1	.017 86	.043 98
2.2	.013 90	.035 48
2.3	.010 72	.028 33
2.4	.008 20	.022 40
2.5	.006 21	.017 53
2.6	.004 661	.013 58
2.7	.003 467	.010 42
2.8	.002 555	.007 92
2.9	.001 866	.005 95
3.0	.001 350	.004 43
3.1	.000 968	.003 27
3.2	.000 687	.002 38
3.3	.000 483	.001 72
3.4	.000 337	.001 23
3.5	.000 233	.008 73
3.6	.000 159 1	.000 612
3.7	.000 107 8	.000 425
3.8	.000 072 3	.000 292
3.9	.000 048 1	.000 199
4.0	.000 031 7	.000 134
4.1	.000 020 7	.000 089 3
4.2	.000 013 3	.000 058 9
4.3	.000 008 5	.000 038 5
4.4	.000 005 4	.000 024 9
4.5	.000 003 4	.000 016 0
4.6	.000 002 1	.000 010 1
4.7	.000 001 3	.000 006 4
4.8	.000 000 8	.000 003 9
4.9	.000 000 5	.000 002 4

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

10.3 Wahrscheinlichkeitspapiere

10.31 Eintragung einer Stichprobe

Jedem Einzelwert x_n einer Stichprobe vom Umfang N wird entsprechend seiner relativen Stellung n einer nach Grösse geordneten Liste ein empirisch festgelegter Wert

$$F_X(x_n) = \frac{n}{N+1}$$

zugeordnet. Für Extrapolationen wird empfohlen, die relative Stellung eines Wertes mit der leicht abgeänderten Formel

$$F_X(x_n) = \frac{n-0.4}{N+0.2}$$

zu berechnen. Die Unterschiede sind allerdings nur bei kleinen N erheblich. Im übrigen sei auf Kapitel 3.4 verwiesen.

Jeder Einzelwert der Stichprobe wird als Punkt mit seinen Koordinaten $[x_n; F_X(x_n)]$ in das Papier eingetragen. Beachte, dass $F_X(x)$ in den nachfolgenden Wahrscheinlichkeitspapieren auf der Ordinate in ‰ angegeben ist.

Der so entstandenen Punktreihe wird nach Augenmass die bestmögliche Gerade angepasst. Dabei sollen eher die extremen Werte berücksichtigt werden. Bei starken Abweichungen muss man vielleicht den Papiertyp wechseln und den Vorgang wiederholen, bis eine zufriedenstellende Näherung erreicht ist. Diese Gerade charakterisiert, zusammen mit dem Papiertyp, die passende Verteilung. Es geht lediglich noch darum, die Parameter der Verteilung zu ermitteln.

10.32 Ermittlung der Parameter

Liegen der Verteilungstyp und die Gerade fest, lassen sich die Parameter der jeweiligen Verteilung aus zwei Stützpunkten wie folgt ermitteln:

- *Normalverteilung:*

  Man liest die Werte x_0 und x_1 ab, welche die gewählte Gerade bei $F_X(x_0) = 0.5$ und $F_X(x_1) = 0.841$ auf dem Normal-Papier markiert. Aus diesen Werten ergeben sich der Mittelwert μ und die Standardabweichung σ zu:

  $$\mu = x_0$$

  $$\sigma = (x_1 - x_0)$$

- *Log-Normalverteilung:*

  Man liest die Werte x_0 und x_1 ab, welche die gewählte Gerade bei $F_X(x_0) = 0.5$ und $F_X(x_1) = 0.841$ auf dem Log-Normal-Papier markiert. Aus diesen Werten ergeben sich die Parameter λ und δ, aus denen sich der Mittelwert μ und die Standardabweichung σ berechnen lassen:

  $$\lambda = \ln(x_0) \qquad \mu = e^{(\lambda + \zeta^2/2)}$$

  $$\delta = \ln(x_1/x_0) \qquad \sigma = \mu \cdot (e^{\zeta^2} - 1)^{1/2}$$

- *Gumbel-Verteilung:*

  Man liest die Werte x_0 und x_3 ab, welche die gewählte Gerade bei $F_X(x_0) = 0.368$ und $F_X(x_3) = 0.951$ auf dem Gumbel-Papier markiert.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Aus diesen Werten ergeben sich die Parameter u und α, woraus sich Mittelwert μ und Standardabweichung σ ermitteln lassen:

$$u = x_0 \qquad \mu = u + 0.577/\alpha$$

$$\alpha = 3/(x_3 - x_0) \qquad \sigma = 1.283/\alpha$$

10.33 Ermittlung der Wiederkehrperiode

Wahrscheinlichkeitspapiere eignen sich vorzüglich für Extrapolationen. Ist das "richtige" Papier einmal gefunden, kann im Prinzip nach rechts oder links extrapoliert werden. An der gewählten Geraden kann direkt auch die Wiederkehrperiode abgelesen werden, die gemäss:

$$T_R = \frac{\Delta t}{1 - F_X(x)}$$

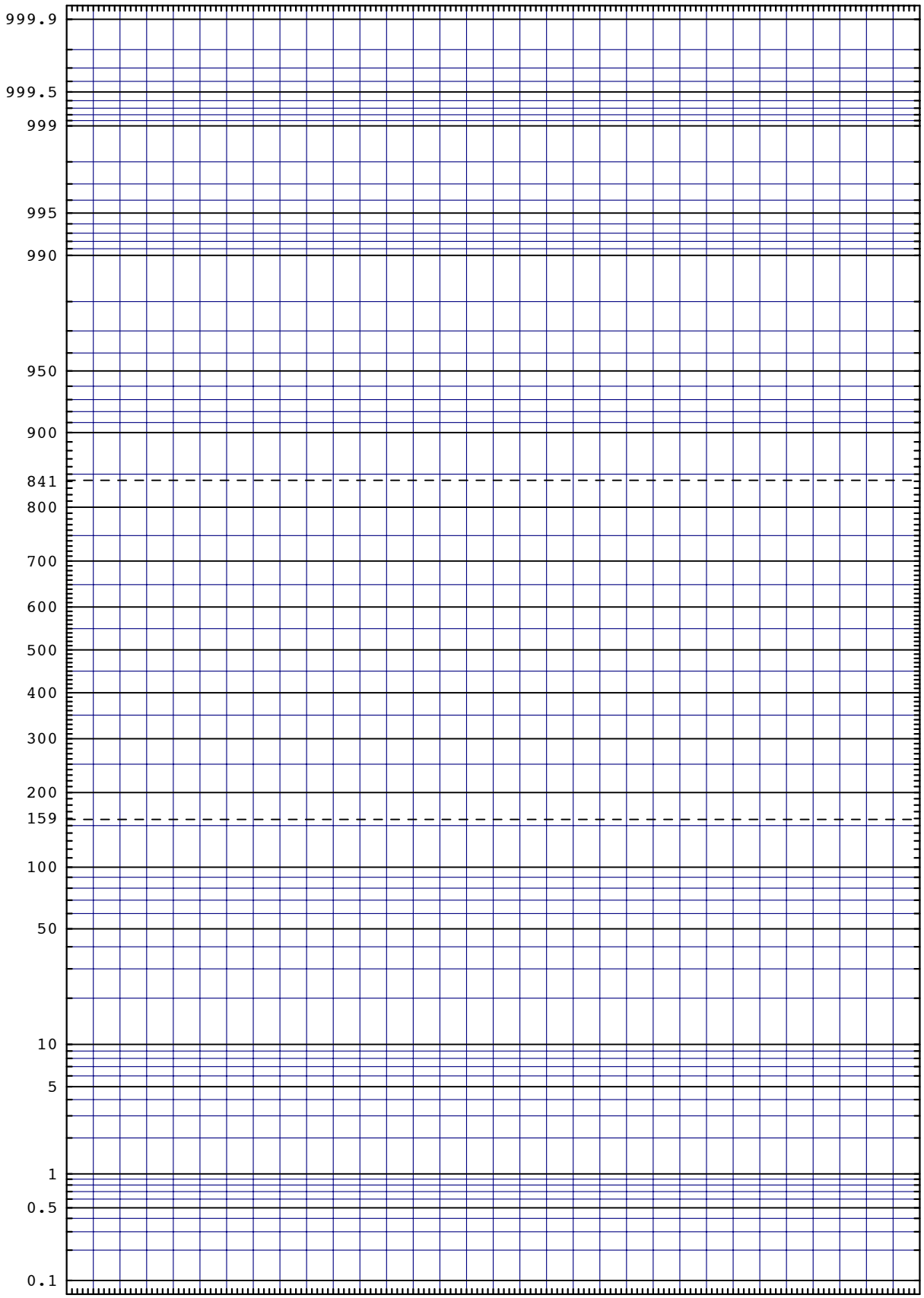
vom Wert der Verteilungsfunktion $F_X(x)$ abhängig ist. Siehe hierzu auch Kapitel 3.44.

10.34 Wahrscheinlichkeitspapiere

Die folgenden Seiten zeigen gebrauchsfertige Formulare für die wichtigsten Wahrscheinlichkeitspapiere.

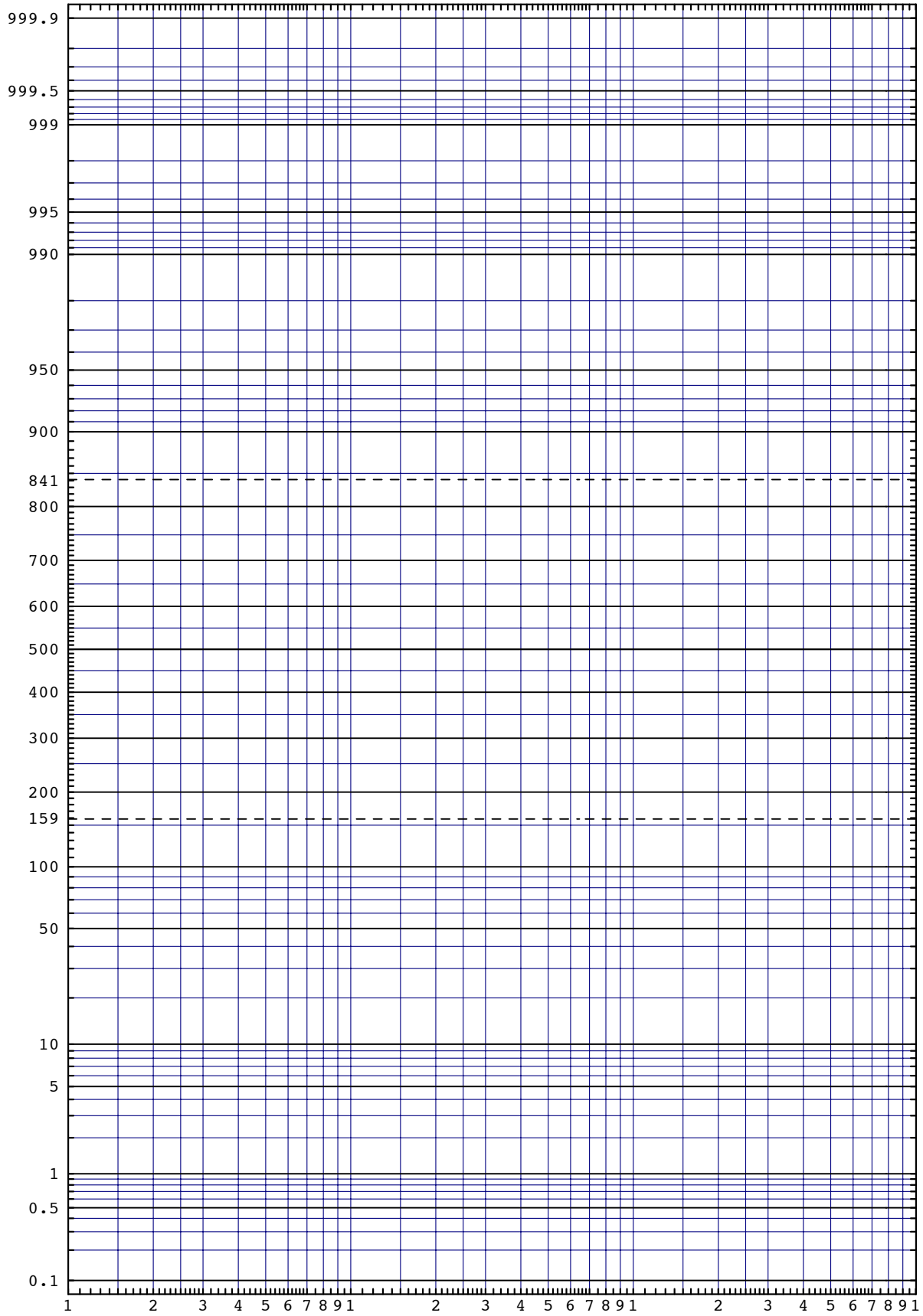
© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Normal-Papier



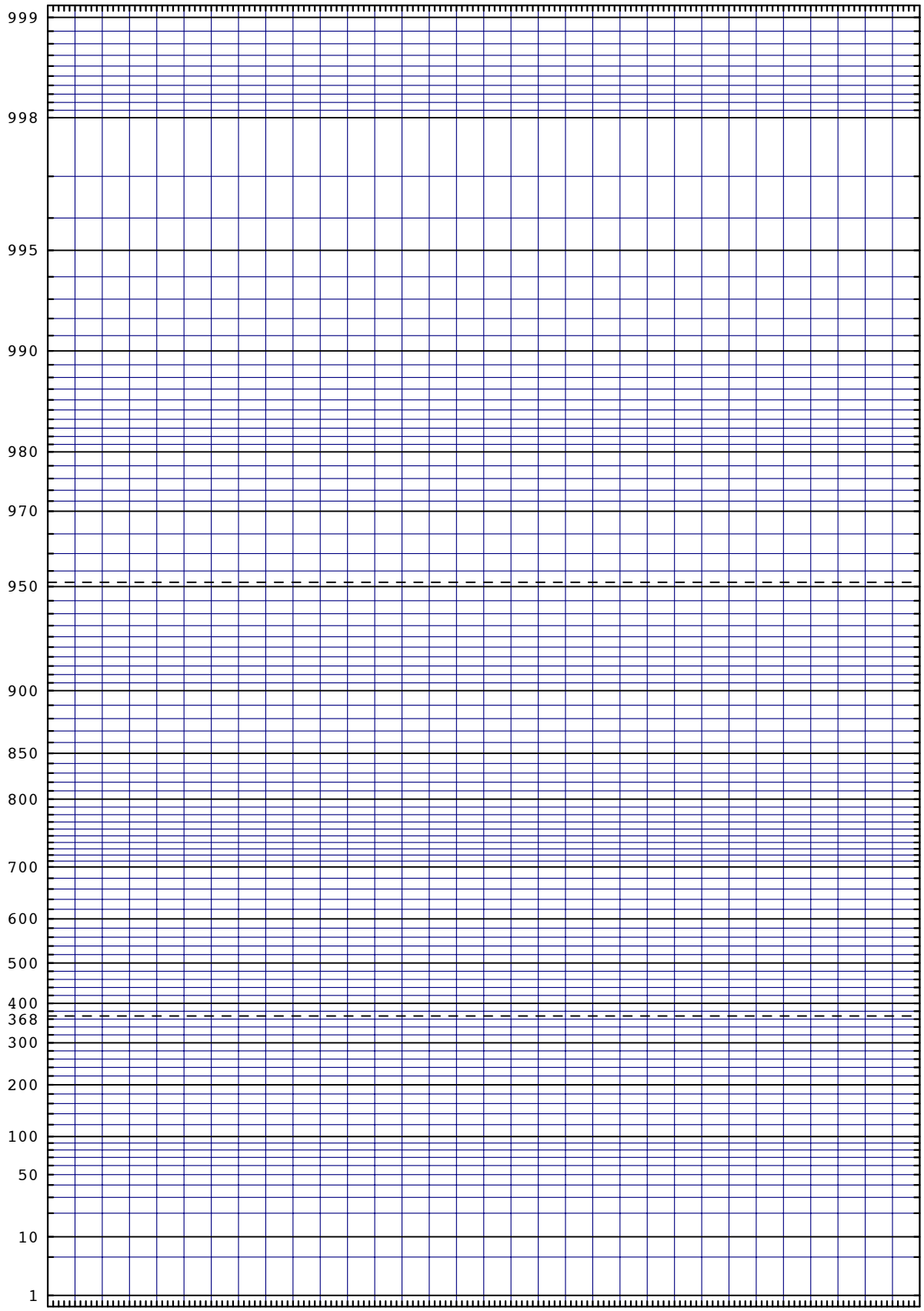
© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Log-Normal-Papier



© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Gumbel-Papier



© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

10.4 Prüfungsfragen

Die folgenden Fragen sind als Ausgangspunkte für ein kurzes Referat des Prüfungskandidaten zu verstehen mit anschliessender Diskussion. Es geht darum, die Frage, die Nachbarbereiche und den Hintergrund der jeweiligen Frage auszuleuchten. Allzu kurze Antworten rufen ein "warum?" des Prüfenden hervor. Die Fragen sind ungeordnet notiert und als Beispiele zu verstehen:

Wie identifizieren Sie Sicherheitsprobleme?

Wie ist b definiert?

Welche Erweiterungen beinhaltet das Verfahren FORM gegenüber der Berechnung nach Basler/Cornell?

Referieren Sie über Risiken.

Welche Charakteristiken sind bei der Diskussion von Akzeptanzfragen wesentlich?

Wie erstellt man einen Sicherheitsplan?

Welche Komponenten sind beim Aufbau eines Qualitätssicherungskonzepts zu berücksichtigen?

Wie ist m_X, wie s_X definiert? Was sagen sie aus?

Wozu dienen die a-Werte?

Erklären Sie in wenigen Sätzen das Verfahren nach "Monte-Carlo".

Wieviele Durchläufe sind beim einfachen "Monte-Carlo"-Verfahren notwendig, um sinnvolle Aussagen machen zu können?

Von welchen Voraussetzungen geht man stillschweigend aus, wenn in einer Berechnung steht: "HL-Index = 4.4; $p_f = 5.4 \cdot 10^{-6}$"? Wie sind sie zu begründen?

Wie ermittelt man eine Augenblicksverteilung A, wie eine Extremwertverteilung E? Welche Eigenschaften haben sie?

Wie ermittelt man die Wiederkehrperiode T_r?

Welche Kategorien von Massnahmen gegen Gefahren kennen Sie?

Wie ermittelt man den Korrelationskoeffizienten $r_{x,y}$? Was sagt er aus?

Was ergeben zwei unabhängige Rechteckverteilungen gleicher Breite, wenn man sie addiert?

Was ergeben zwei unabhängige Rechteckverteilungen gleicher Breite, wenn man sie multipliziert? Worauf muss bei der Multiplikation speziell geachtet werden?

Was sind Rettungskosten?

Weshalb wird die Varianz nie negativ?

Worin besteht der grundsätzliche Unterschied bei einer statischen Berechnung nach Norm gegenüber probabilistischen Ansätzen?

Was besagt die Regel von Turkstra? Liegt sie auf der sicheren oder der unsicheren Seite? Kennen Sie eine praktische Anwendung der Regel von Turkstra?

Welches sind die drei grundsätzlich verschiedenen Definitionen der Wahrscheinlichkeit p? Wo sind die Gemeinsamkeiten?

Was ist der Unterschied zwischen Wahrscheinlichkeit und Häufigkeit?

Wie ist Risiko definiert und was ist in diesem Zusammenhang zu beachten?

Was besagt der Satz von Bayes?

Zeigen Sie in einer Skizze, wie man die Versagenswahrscheinlichkeit p_f graphisch erklären kann!

Was ist die Standard-Normalverteilung? Was zeichnet sie aus gegenüber anderen Verteilungen?

Wie ist ein Wahrscheinlichkeitspapier aufgebaut? Skizzieren Sie ein Normalpapier.

Skizzieren Sie ein Serie-System mit drei Elementen E_1, E_2 und E_3 und den jeweiligen Versagenswahrscheinlichkeiten p_{f1}, p_{f2} und p_{f3}. Wie berechnet man die Versagenswahrscheinlichkeit des Systems?

Nennen Sie ein Beispiel für ein Parallelsystem. Wie berechnen Sie die System-Versagenswahrscheinlichkeit hier?

Welche logischen Bäume kennen Sie? Wozu dienen sie?

Welchen logischen Baum kann man z.B. benützen, um eine Störfallablaufanalyse durchzuführen?

Referieren Sie über den Begriff Aversion!

Welche persönlichen Strategien gegen Fehler halten Sie für zweckmässig?

Wo bestehen Fehlerquellen, wenn mehrere Personen am gleichen Problem mitarbeiten?

Ist p_f eine Eigenschaft eines Tragwerks?

Wie kann der Nutzen eines "Töffhelm" mit dem einer "Lawinenverbauungen" in einem Bergdorf vergleichen?

Erklären Sie in groben Zügen das Vorgehen bei der Nachrechnung bestehender Tragwerke ("Kalibrierung am Objekt selber")!

Sind Betonfestigkeit und Stahlüberdeckung korreliert?

Skizzieren Sie die Dichtefunktionen N(2;1) und LN(2;1) und kommentieren Sie die Sachverhalte und die typischen Anwendungsbereiche.

Skizzieren Sie die Dichtefunktion D(0; 7) und die zugehörige Verteilungsfunktion. Wie gross ist $f(m_D)$?

Erklären Sie die Begriffe Modalwert, Median und Mittelwert anhand einer Skizze.

Was besagt "Murphy's Law"?

Nennen Sie typische R- und S-Variablen und begründen Sie Ihre Wahl.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

10.5 Das Computer-Programm *VaP*

VaP bietet eine Umgebung am Computer, um Berechnungen mit Zufallsvariablen auszuführen. Der Name ergibt sich aus der generellen Funktion der Software, nämlich der Verarbeitung von Zufallsvariablen (Variables Processor). Das Programm soll dem Benutzer die Zuverlässigkeitstheorie näherbringen und die Behandlung von Problemen im probabilistischen Sinn erleichtern.

Bei der Konzeption von VaP wurde ein neuer Weg beschritten. Aus der Forderung nach einem möglichst einfach zu bedienenden und flexiblen Instrument entstand eine interaktive Software. Die Schnittstelle zum Computer ist auf ein Minimum von Funktionen und Dialogen beschränkt. Die Interaktivität ist in hohem Mass gewährleistet, da alle Eingaben während der Laufzeit des Programms erfolgen und keine vorbereitende Programmierung nötig ist.

Der Benutzer definiert als erstes die Grenzzustandsfunktion in Form eines beliebig komplizierten algebraischen Ausdrucks und legt damit das mathematische Modell für das zu untersuchende Problem fest. Alle in diesem Ausdruck vorkommenden Bezeichnungen werden als Bemessungsvariablen verstanden. In einem folgenden Schritt wird diesen Variablen ein stochastisches Modell zugeordnet. Es stehen die gebräuchlichsten Verteilungstypen zur Verfügung sowie die Möglichkeit, eine Grösse als deterministisch zu erklären. Um ein komfortables Ändern des Verteilungstyps zu gewährleisten, werden immer der Mittelwert und die Standardabweichung eingegeben. Je nach gewähltem Typ muss die Definition eventuell noch durch zusätzliche obere oder untere Grenzen ergänzt werden. Auch besteht die Möglichkeit, Variablen durch ein Histogramm zu definieren. Man kann auf diese Weise konkrete Messergebnisse in die Berechnung einfliessen lassen.

Die Analyse einer definierten Grenzzustandsfunktion erfolgt mit den bekannten Verfahren. Es stehen die First Order Reliability Method, die Crude Monte Carlo Methode und zwei numerische Intergrationsmethoden zur Verfügung, die Ergebnisse mit unterschiedlichem Informationsgehalt liefern. Alle eingegebenen Grössen lassen sich jederzeit leicht ändern, womit sich Erkenntnisse über die Sensitivität des Ergebnisses bezüglich einer Parametervariation gewinnen lassen. VaP ist für die Verwaltung mehrerer Grenzzustandsfunktionen ausgelegt. Einfache Wahrscheinlichkeitsaussagen über Serien- und Parallelsysteme können auf diese Art gewonnen werden.

Das Programm wurde für den Macintosh als MacVaP von Markus Petschacher im Jahr 1990 in der Programmiersprache Modula-2 geschrieben. Einige Verbesserungen erfolgten im Jahr 1992. Das Programm lief unter den verschiedensten Versionen von Windows. VaP ist seit 2006 auch in einer kommerziellen Version erhältlich, die wesentlich leistungsfähiger ist.

Seit 2017 existiert unter dem Namen FreeVaP auch eine kostenlose Software mit reduziertem Umfang. Sie kann unter www.pont.eu angefordert werden.

Weitere Informationen sind unter folgender Adresse erhältlich:
Ingenieurbüro Petschacher
DI Dr. Markus Petschacher
Am Hügel 4
A-9560 Feldkirchen
Tel. 0043 4276 3378 0
e-mail: office@petschacher.at
www.petschacher.at

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

10.6 Murphy's Law

Auf der Luftwaffenbasis Edwards in Kalifornien entwickelte 1949 der Ingenieur Ed Murphy für einen Forschungsauftrag eine elektronische Schaltung. Der Labortechniker, der die Stromkreise aufbaute, hatte die Möglichkeit, einen Draht auf zwei verschiedene Arten einzulöten. Selbstverständlich entschied er sich für den falschen Lötpunkt: Als Ed Murphy die Schaltung prüfte, funktionierte sie nicht. "If anything can go wrong, it will.", seufzte der geplagte Ingenieur. Das war die Geburtsstunde von Murphy's Gesetz. Zu jener Zeit gab es im Bereich von Lehre und Forschung mindestens einen Projektleiter, der nicht an galoppierender Gottähnlichkeit litt. Murphy's Vorgesetzter, George Nichols, erwähnte die kleine Panne und den Stosseufzer des Ingenieurs in seinem Bericht.

Das an sich geringfügige Ereignis löste eine Kettenreaktion aus. Vor allem in der amerikanischen Raumfahrttechnik wurde Murphy's Gesetz zum Leitmotiv und zur Herausforderung beim Entwickeln, Überlagern und Ineinanderschachteln von Sicherheitssystemen. Hobby-Philo-Psycho- und Soziologen erfanden laufend neue Abwandlungen der Murphy-Formel. Eine Lawine kam ins Rollen und brachte neben schnell verbrauchten Tageswitzen auch Gedanken hervor, die sich neben Aphorismen von Lichtenberg, La Rochefoucauld, Morgenstern und Lec durchaus sehen lassen können.

Die Mathematiker gaben uns die Gesetze der Logik und die Künstler die Massstäbe für Schönheit. Die Philosophen versuchten, die Grundgesetze der Ethik, und die Religion die der Moral in Worte zu fassen. Die Mystiker wollten uns die Kräfte und Gesetze zeigen, die unser Schicksal bestimmen, und nun kommen die Praktiker des Lebens, die Mechaniker, Techniker und Ingenieure und machen uns auf die Regel der schlimmstmöglichen Abläufe eines Ereignisses aufmerksam, nämlich auf

Murphy's Gesetz:

- **"If anything can go wrong, it will!"**

  O'Toole (wer immer das war) antwortete angeblich darauf mit:
- **"Murphy was an optimist."**

Corollaries:

- Nothing is as easy as it looks.
- Everything takes longer than you think.
- If there is a possibility of several things going wrong, the one that will cause the most damage will be the one to go wrong.
- If you perceive that there are four possible ways in which a procedure can go wrong, and circumvent these, then a fifth way will promptly develop.
- Left to themselves, things tend to go from bad to worse.
- Whenever you set out to do something, something else must be done first.
- Every solution breeds new problems.
- It is impossible to make anything foolproof, because fools are so ingenious.
- Nature always sides with the hidden flaw.
- Mother nature is a bitch.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

10.7 Abkürzungen

X_i	Zufallsvariablen, stets mit Grossbuchstaben geschrieben, also X, Y, Z, C, X_1, X_2, X_3, ...
x_i	Realisationen von Zufallsvariablen, werden stets klein geschrieben, also x, y, z, c, x_1, x_2, x_3, ...
$f_Y(y)$	Verteilungsdichte der Zufallsvariablen Y, Ableitung der Verteilungsfunktion
$F_Y(y)$	Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen Y, Integral der Verteilungsdichte
p%-Fraktile	Wert, der von p% der Realisationen unter- bzw. überschritten wird
$\varphi(z)$	Verteilungsdichte der (0,1)-standardisierten Normalverteilung
$\Phi(z)$	Verteilungsfunktion der (0,1)-standardisierten Normalverteilung
m_X, s_X	Mittelwert und Standardabweichung einer Stichprobe
μ_X, σ_X	Mittelwert und Standardabweichung einer Verteilung
v_X	Variationskoeffizient einer Stichprobe bzw. Verteilung
s^2, σ^2	Varianz einer Stichprobe bzw. einer Verteilung
$r_{X,Y}$, $\rho_{X,Y}$	Korrelationskoeffizient zwischen den zwei Stichproben bzw. Verteilungen X und Y
G(...)	Funktion, Grenzzustandsgleichung
P(...)	Wahrscheinlichkeit von (...)
r	Zuverlässigkeit eines Elements, $r = (1 - p_f)$, $0 \le r \le 1$
p_E, P_E	Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses
h_E, H_E	Häufigkeit eines Ereignisses, meist auf ein Jahr bezogen
p_f	Versagenswahrscheinlichkeit eines Elements, $p_f = (1 - r)$, $0 \le p_f \le 1$
R	Zuverlässigkeit eines Systems, $R = (1 - P_f)$, $0 \le R \le 1$
P_f	Versagenswahrscheinlichkeit eines Systems, $P_f = (1 - R)$, $0 \le P_f \le 1$
R	Widerstand
S	Beanspruchung
M	Sicherheitsmarge
β	Sicherheitsindex
γ_i	Sicherheitsfaktoren, bezogen auf Grösse i
L_i	Leitgefahr i
B_j	Begleitgefahr bzw. Begleitumstand j
$\Sigma(...)$	Summe von Grössen (...)
$\Pi(...)$	Produkt von Grössen (...)
min(...)	Minimum aus (...)

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

10.8 Begriffe

Aktualisieren
Überprüfen und ergänzen von z.B. in Plänen, Listen und weiteren Unterlagen vorhandenen Informationen oder deren Ersatz durch problemspezifisch am Bauwerk erhobene Informationen.

Akzeptanz
Empirisch feststellbare Bereitschaft von Individuen oder Gruppen, einen Zustand oder einen Vorgang ohne Widerspruch hinzunehmen.

Akzeptabilität
Empirisch: Zustand, Umstand oder Vorgang, für den die Aussicht besteht, dass er bei Individuen oder Gruppen Akzeptanz findet.
Normativ: Zustand, Umstand oder Vorgang, der aufgrund normativer Kriterien als erlaubt oder zulässig erscheint.

Analyse
Siehe z.B. Risikoanalyse.

Aversionsfunktion
Subjektiv festgelegte Funktion zur überproportionalen Gewichtung von Schäden aus Grossunfällen. Ausgangspunkt ist die Erfahrung, dass z.B. ein Unfall mit zehn Toten als schwerer empfunden wird als zehn Unfälle mit je einem Toten. Oft in Form eines Aversionsfaktors > 1, mit dem Risiken multipliziert werden, aber auch in Form eines Aversionsexponenten > 1, mit dem Schäden potenziert werden.

Bewertung
Siehe z.B. Risikobewertung.

Bauschaden
Schwächung oder Schädigung der materiellen Substanz eines Bauwerks, welche die Tragsicherheit oder die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks beeinträchtigt.

Gefahr
Zustand, Umstand oder Vorgang, aus dem ein Schaden für Mensch, Umwelt und/oder Sachgüter entstehen kann.

Gefährdung
Ganz konkret auf eine bestimmte Situation oder ein bestimmtes Objekt bezogene Gefahr.

Gefährdungsanalyse bzw. Risikoanalyse
Technisch-wissenschaftliches Vorgehen, um Gefährdungen in abgegrenzten Systemen zu erfassen. Sie besteht aus zwei wesentlichen Phasen: Gefahrenerkennung und Gefahrenermittlung.

Gefährdungsbild
Zusammenwirken verschiedener Gefahren bzw. Gefährdungen.

Gefahrenerkennung
Der schwierigere Teil der Gefährdungsanalyse, der sich auf Sachverstand, Erfahrung, Intuition, technische Fantasie und Methodik stützt. Der Prozess der Gefahrenerkennung kann durch gewisse Methoden gefördert werden: Brainstorming, logische Bäume, Morphologisches Denken, vernetztes Denken usw.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Gefährdungsermittlung
Erfassung der erkannten Gefahren bzw. der als möglich erachteten Schadenereignisse einschliesslich aller konstituierenden Elemente wie Eintrittswahrscheinlichkeit, mittlerer Erwartungswert des Schadens usw.

Häufigkeit
Mittlere Zahl der Fälle, in denen ein Ereignis eintrifft, bezogen auf eine festgelegte Zeiteinheit (meist ein Jahr).

Grenzzustand
Ein (gedachter) Zustand eines technischen Systems an der Grenze zwischen akzeptiertem Verhalten und Versagen.

Mangel
Fehlen einer Eigenschaft, welche die Betrachtungseinheit nach vertraglicher Vereinbarung oder nach geübter Baupraxis aufweisen sollte.

Nachhaltigkeit
Zufriedenstellung der Bedürfnisse der heutigen Generation, ohne dadurch die Möglichkeiten zukünftiger Generationen zu beeinträchtigen, ihre dannzumaligen Bedürfnisse zu befriedigen (nach Bruntland, Rio-Konferenz).

Nutzen
Positiv bewertete Folge eines Ereignisses oder eines Vorgangs. Bei Marktgütern erfolgt die Quantifizierung durch Preisbildung.

Nutzungsplan
Von Fachleuten zusammen mit dem Bauherrn erarbeitete Zusammenstellung der verschiedenen Elemente der vorgesehenen Nutzung einer baulichen Anlage und der vom Bauherrn gestellten Ansprüche an deren Verhalten.

Personenschadenrisiko
Individuell: Wahrscheinlichkeit, dass bei einem bestimmten Schadenereignis eine Einzelperson zu Schaden kommt, d. h. getötet, verletzt oder sonstwie beeinträchtigt wird.
Kollektiv: Funktion von Wahrscheinlichkeit eines Schadenereignisses und der potentiellen Personenschadenfolge (oft als Produkt der beiden Grössen dargestellt).
Empfunden: Oft wird das individuelle oder kollektive Risiko noch vergrössert gemäss einer Aversionsfunktion, um Grossunfälle stärker zu gewichten. Man redet dann von empfundenem Personenschadenrisiko.

Qualitätssicherung
Qualitätssicherung soll sicherstellen, dass alle die Qualität einer Betrachtungseinheit beeinflussenden Aktivitäten unter Beachtung grundlegender Anforderungen, Nutzungs- und Umweltbedingungen korrekt ausgeführt werden durch kompetentes und gut instruiertes Personal in Übereinstimmung mit zum voraus erarbeiteten Plänen. Dies ist in angemessener Form zu dokumentieren.

Qualifizierte Risiken
Akzeptiertes Risiko: Risiko, das vom Akzeptierenden unwidersprochen hingenommen wird.
Freiwilliges Risiko: Risiko, das freiwillig eingegangen wird.
Aufgezwungenes Risiko: Risiko, welchem ein Individuum oder ein Kollektiv ohne Möglichkeit einer Einflussnahme ausgesetzt ist.

Restnutzungsdauer
Diejenige Zeitdauer, während der ein bestehendes Bauwerk gemäss aktualisiertem Nutzungsplan noch in Betrieb bleiben soll bzw. darf.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Restrisiko
Deskriptiv: das nach der Realisation aller vorgesehenen Sicherheitsmassnahmen noch verbleibende Risiko. Dieses setzt sich zusammen aus
- bewusst akzeptierten Risiken
- falsch beurteilten Risiken
- nicht erkannten Gefahren

Normativ: erlaubtes Risiko, d.h. Risiko, das aufgrund von Akzeptabilitätsbeurteilungen als zulässig gilt.

Der Begriff wird oft falsch und verallgemeinernd benützt und sagt dann nichts mehr aus. Er sollte deshalb wenn möglich durch die vorstehenden präziseren Begriffe ersetzt werden.

Rettungskosten
Ein Mass für die Effizienz von Sicherheitsmassnahmen. Betrag in Geldeinheiten, der beim Einsatz einer Sicherheitsmassnahme zur Rettung eines Menschenlebens bzw. zur Verminderung von Sachschäden ausgegeben wird.

Risiko
Im allgemeinen Sinn: Möglichkeit, dass aus Zustand, Umstand oder Vorgang ein Schaden entstehen kann.
Im engeren Sinn: Mass für die Grösse einer Gefährdung. Funktion der Eintrittshäufigkeit eines Schadenereignisses und der möglichen Schadenfolge.
Akzeptiertes Risiko: Risiko, das von den Fachleuten als akzeptierbar eingestuft, mit dem Bauherrn bzw. Betreiber einer Anlage abgesprochen und von diesem bewusst akzeptiert wird.

Risikoakzeptanz
Empirisch feststellbare Bereitschaft von Individuen oder Gruppen, ein Risiko widerspruchslos hinzunehmen.

Risikoanalyse
Systematisches Verfahren, um ein Risiko hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit des Eintreffens und des Ausmasses der Folgen zu charakterisieren und wenn möglich zu quantifizieren.

Risikobewertung
Angesichts der Ergebnisse der Gefährdungs- bzw. Risikoanalyse wird, Vor- und Nachteile abwägend, festgelegt, welche Risiken akzeptierbar sind bzw. akzeptiert werden müssen. Der Begriff wird oft synonym mit Risikobeurteilung verwendet.

Risikomanagement
Einsatz von Methoden mit dem Ziel, die im Sicherheitsplan vorgesehenen Massnahmen durchzusetzen und den Sicherheitsplan den sich verändernden Umständen anzupassen.

Risikowahrnehmung
Subjektive Aufnahme, Verarbeitung und Bewertung von risikobezogenen Informationen.

Sachschadenrisiko
Funktion der Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Schadenereignisses und des zu erwartenden mittleren Sachschadens, ausgedrückt in Geldeinheiten. Oft als Produkt der beiden Grössen dargestellt.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Schaden
Ein äusserst komplexer Begriff, sowohl die Verletzung eines Rechtsguts, die Minderung des Vermögens eines Geschädigten, als auch z.B. die Beeinträchtigung der Psyche eines Menschen einschliessend.
Allgemein: negativ bewertete Folge eines Ereignisses oder eines Vorgangs.
Oft auch: unerwünschte Beeinträchtigung eines Schutzgutes als Konsequenz eines schädigenden Ereignisses.
Im engeren Sinn: Schwächung oder Schädigung der materiellen Substanz der Betrachtungseinheit, die deren Zuverlässigkeit, Sicherheit oder Tauglichkeit beeinträchtigt.

Schadenpotential
Der einer Gefährdungssituation zugehörige grösstmögliche Schaden.

Schutzziel
Beschreibung eines angestrebten, als akzeptierbar eingestuften Risikos.

Sicherheit
Im absoluten Sinn: durch das Nichtvorhandensein von Gefahren charakterisierte Eigenschaft eines Zustandes und damit letztlich unerreichbar.
Im relativen Sinn: durch das Nichtvorhandensein einer ganz bestimmten Gefährdung charakterisierte Eigenschaft eines Zustandes. Ein Zustand gilt als sicher, wenn er ein vergleichbar kleines und damit akzeptierbares Risiko enthält.
Subjektiv: persönlich empfundene Gewissheit, vor Gefahren geschützt zu sein.
Inhärente Sicherheit: Eine Prozess- oder Produkteigenschaft, die eine Gefahr zwingend auf ein vom Prozess bzw. Produkt vorbestimmtes und als akzeptierbar erachtetes Mass limitiert oder die Gefahr ausschliesst.
Gemäss SIA 160: Sicherheit gegenüber einer Gefährdung besteht dann, wenn diese Gefährdung durch geeignete Massnahmen unter Kontrolle gehalten oder auf ein akzeptierbar kleines Mass beschränkt wird. Eine absolute Sicherheit kann nicht erreicht werden.

Sicherheitsmassnahmen
Gefahrenabwehrende technische, organisatorische oder das menschliche Verhalten beeinflussende Massnahmen mit dem Ziel, bestehende Gefahren, Gefährdungen und Risiken zu reduzieren oder zu beseitigen.

Sicherheitsplan
Allgemein: Der Sicherheitsplan dient der Festlegung aller in einem abgegrenzten technischen System, aber auch in einer abgegrenzten Region zur Abwehr von Gefahren vorgesehenen Sicherheitsmassnahmen. Er stützt sich auf die Ergebnisse der Gefährdungsanalyse. Da in einer Region Risiken aus den verschiedensten technischen Aktivitäten zusammenkommen, sind zur Aufstellung regionaler Sicherheitspläne Risiken aus verschiedenen technischen Bereichen vergleichbar zu erfassen. Dies ist of sehr schwierig.
Gemäss SIA 160: Zusammenstellung der massgebenden Gefährdungsbilder und der zu ihrer Abwehr vorgesehenen Sicherheitsmassnahmen.

Störfall
Oft plötzlich und unerwartet eintretendes Ereignis, das den üblichen Ablauf eines Vorgangs unterbricht und eine Gefährdung darstellen kann (siehe auch Unfall).

Systembegrenzung
Für Risikobetrachtungen zweckmässige Festlegung der Grenzen in räumlicher, zeitlicher und inhaltlicher Hinsicht. Innerhalb dieser Grenzen soll die Gesamtheit der Wechselwirkungen zwischen Ursache und Wirkung erfasst werden können.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Technisches System
Jedes vom Menschen geschaffene, betriebene und beeinflusste System, z.B. ein Tragwerk, aber auch ein Industriekomplex oder ein Transportsystem.

Unfall
Plötzlich eintretendes unerwartetes Ereignis, das einen Schaden auslöst (siehe auch Störfall).

Ursache
Dasjenige, was aufgrund subjektiver Betrachtung bzw. aufgrund der jeweiligen Fragestellung wohl eine Folgeerscheinung hervorruft, selbst jedoch keine Folgeerscheinung ist. Die Folgeerscheinungen liegen zeitlich gesehen immer nach der Ursache.

Verfügbarkeit
Wahrscheinlichkeit, dass das betrachtete System zu einem bestimmten Zeitpunkt die vereinbarten Anforderungen erfüllt.

Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses
Klassisch (Laplace): Zahl der Fälle, in denen ein Ereignis eintrifft, dividiert durch die Zahl aller möglichen Fälle.
Frequentistisch: Grenzwert der relativen Häufigkeit, mit der ein Ereignis bei vielen unabhängigen Wiederholungen unter gleichen Bedingungen eintritt.
Subjektiv: Grad der Erwartung oder des Vertrauens eines Individuums in die Aussage, dass ein mögliches Ereignis eintrifft, ein umschriebener Sachverhalt zutrifft, usw.

Zuverlässigkeit
Eigenschaft einer Betrachtungseinheit, eine festgelegte Funktion unter vorgegebenen Bedingungen während einer festgelegten Zeitdauer mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit zu erfüllen.

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

10.9 Literaturverzeichnis

Das Literaturverzeichnis enthält nicht nur die vielen Beiträge, auf die sich das vorliegende Buch dankbar stützt, sondern auch Beiträge, die aus historischer Sicht von Belang sind oder im vorliegenden Zusammenhang von Interesse sein könnten. Sie sind nach dem erstgenannten Verfasser alphabetisch geordnet.

10.91 Mathematische Grundlagen

Berchtold, W.: "Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik"; Vorlesungsskript ETH Zürich, 1991

Bernardo, J. and Smith, A.F.M.: "Bayesian Theory", J. Wiley & Sons, New York, 1994

Birolini, A.: "Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme"; Springer-Verlag, Berlin, 1985

Bühlmann, H., Loeffel, H. und Nievergelt, E.: "Einführung in die Theorie und Praxis der Entscheidung bei Unsicherheit"; Springer-Verlag, Berlin, 1967

Bühlmann, H.: "Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik"; AMIV-Verlag, ETH Zürich, 1982

Burg, Th.: "MacBeta", Programm zur Berechnung des Sicherheitsindex b nach Hasofer/Lind für den Macintosh, IBK, ETH Zürich, 1985

Castillo, E.: "Extreme Value Theory in Engineering"; Academic Press Inc., 1988

Chung, K.L.: "Elementare Wahrscheinlichkeitstheorie und stochastische Prozesse"; Springer-Verlag, Berlin, 1978

Gottinger, H.W.: "Subjektive Wahrscheinlichkeiten"; Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1974

Hale, R.L.: "Mystat: Statistical Applications", Macintosh Edition; Course Technology Inc., 1992

Lindley, D.V.: "Introduction to Probability and Statistics from a Bayesian Viewpoint"; Part 1: Probability, Part 2: Inference, Cambridge University Press, 1965

Miller, I. et al.: "Probability and Statistics for Engineers"; Prentice-Hall International, 1990

O'Hagan, A.: "Bayesian Inference", Kendall's Advanced Theory of Statistics, Volume 2B, J. Wiley & Sons, New York, 1994

Stahel, W.: Statistische Datenanalyse";
Vieweg Lehrbuch, 1995

10.92 Bücher zur Zuverlässigkeitstheorie

AICHE: "Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis"; Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers, 345 East 47th Street, New York, NY 10017, 1989

Ang, A.H.S. and Tang, W.H.: "Probability Concepts in Engineering Planning and Design; Volume I – Basic Principles"; John Wiley & Sons, New York, 1975

Ang, A.H.S. and Tang, W.H.: "Probability Concepts in Engineering Planning and Design; Volume II – Decision, Risk, and Reliability"; John Wiley & Sons, New York, 1984

Augusti, G., Baratta, A. and Casciati, G.: "Probabilistic Methods in Structural Engineering"; Chapman and Hall, London, 1984

Benjamin, J.R. and Cornell, A.C.: "Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers"; MacGraw-Hill Book Company, New York, 1970

Bolotin, V.V.: "Wahrscheinlichkeitsmethoden zur Berechnung von Konstruktionen"; VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1981

Ditlevsen, O., and Madsen, H.O.: "Structural Reliability Methods", übersetzt aus SBI-Rapport 211, Statens Byggeforskningsinstitut, "Baerende konstruktioners sikkerhed", 1990

Elishakoff, I.: "Probabilistic Methods in the Theory of Structures"; John Wiley & Sons, New York, 1983

Ferry-Borges, J. and Castanheta, M.: "Structural Safety"; Laboratorio Nacional de Engenharia Civil, Lissabon, 1971

Kersken-Bradley, M. und Diamantidis, D.: "Sicherheit von Baukonstruktionen"; In: Peters, O.H. und Meyna, A. (Hrsg.): "Handbuch der Sicherheitstechnik, Band 1"; C. Hanser Verlag, München 1985

Klingmüller, O. und Bourgund, U.: "Sicherheit und Risiko im Konstruktiven Ingenieurbau"; Vieweg Verlag, Braunschweig, 1992

Madsen, H.O., Krenk, S. and Lind, N.C.: "Methods of Structural Safety"; Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1986

Mayer, M.: "Die Sicherheit der Bauwerke und ihre Berechnung nach Grenzkräften anstatt nach zulässigen Spannungen"; Verlag von J. Springer, Berlin, 1926

Melchers, R.E.: "Structural Reliability – Analysis and Prediction"; Ellis Horwood Ltd., Halsted Press, John Wiley & Sons, 1987

Murzewski, J.: "Sicherheit der Baukonstruktionen"; VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1974

Plate, E.J.: "Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitstheorie für Bauingenieure" Ernst & Sohn, Berlin, 1993

Schuëller, G.I.: "Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken"; Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin, 1981

Spaethe, G.: "Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen"; Springer-Verlag, 1992

Singh, G. and Kiangi, G.: "Risk and Reliability Appraisal on Microcomputers"; Chartwell-Bratt, Studentlitteratur, Lund, 1987

Thoft-Christensen, P. and Baker, M.: " Structural Reliability and its Applications"; Springer-Verlag, Berlin, 1982

10.93 Zeitschriftenartikel, weitere Bücher

Allen, D.E.: "Human Error and Structural Practice"; In: Nowak, A.S. (Ed.): "Modelling Human Error in Structural Design and Construction"; 1986

Baker, M.: Siehe auch Thoft-Christensen

Basler, E.: "Untersuchungen über den Sicherheitsbegriff von Bauwerken"; Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, Heft 4, 1961

Berg, M. et al.: "Was ist ein Schaden? Zur normativen Dimension des Schadensbegriffs in der Risikowissenschaft"; Polyprojekt Risiko und Sicherheit, Dokument Nr. 2, Zürich vdf, 1994

Blaut, H.: "Checklist for the Reliable Performance of Tasks"; IABSE Workshop on "Quality Assurance within the Building Process"; Rigi 1983, IABSE Reports Vol. 47, Zürich, 1983

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Blockley, D.I.: "Predicting the Likelihood of Structural Accidents"; Proc. of the Institution of Civil Engineers, Part 2, Vol. 59, London, 1975

Blockley, D.I.: "The Nature of Structural Design and Safety", Ellis Horwood, Chichester, 1980

Blockley, D.I. (Ed.): "Engineering Safety", MacGraw-Hill, 1992

Bosshard, W.: "Structural Safety – A Matter of Decision and Control"; IABSE Periodica, Surveys Series, S-9/79, IABSE Zürich, 1979

Brauner, Ch.: "Das verdrängte Risiko. Können wir uns Katastrophen leisten?"; Herder Freiburg, Basel, Wien, 1990

Briner, H.: "Nutzungs-/Sicherheits-/Kontrollplan – Rechtliche Fragen und Antworten zur Norm SIA 160"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 26, 1992.

Casciati, F., Negri, R. and Rackwitz, R.: "Geometrical Variability in Structural Members and Systems"; Working Document of the JCSS, erhältlich bei IABSE Zürich, 1989

CEB Bulletin 192: "Diagnosis and Assessment of Concrete Structures"; CEB, Lausanne 1989

Chakraborty, S. und Kröger, W.: "Risikobestimmung – Eine Bestandesaufnahme der Methodik für Kernkraftwerke"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 37, 1990

CIB Reports from W 81 "Actions on Structures" Publications
No. 115 "Self Weight Loads", 1989
No. 116 "Live Loads in Buildings", 1989
No. 141 "Snow Loads", 1991
Erhältlich bei CIB, Rotterdam

C.I.R.I.A.-Report No. 63: "Rationalisation of Safety and Serviceability Factors in Structural Codes"; Construction Industry Research and Information Association, London, 1976

Cornell, A.C.: "Bounds on the Reliability of Structural Systems"; Proc. ASCE, Journal of the Structural Division, Vol. 93, 1967

Cornell, A.C.: "A Probability Based Structural Code"; ACI Journal No. 12, Proceedings V 66, 1969

Cornell, A.C.: siehe auch Benjamin

Corotis, R.B.: "Probability-based design codes"; Concrete International, April 1985

De Bono, E.: "The Mechanism of Mind"; Penguin Books, 1971

De Bono, E.: "Practical Thinking"; Penguin Books, 1976

Deutscher Beton-Verein: "DBV-Merkblatt >Qualitätssicherung<"; Deutscher Beton-Verein e.V., Wiesbaden, 1985

Dicke, D.: "Safety"; A set of lecture notes, published as Report 63 by CUR, The Netherlands Concrete Association, Zoetermeer, NL, 1975

Ditlevsen, O.: "Structural Reliability and the Invariance Problem"; Report No. 22, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Canada, 1973

Ditlevsen, O.: "Formal and Real Structural Safety – The Influence of Gross Errors"; IABSE Periodica, Proceedings P-36/80, IABSE Zürich, 1980

Ditlevsen, O.: "Fundamental Postulate in Structural Safety"; Journal of Engineering Mechanics, Vol. 109, No. 4, 1983

Ditlevsen, O.: "Reliability Updating of Existing Structures"; Appendix A in: "Structural Reliability of Existing Bridges"; Report No. 1, the Road Directorate, Ministry of Transport, Denmark, 1986

Ditlevsen, O.: "Proposal for a Code for the direct Use of Reliability Methods in Structural Design"; Working Document of the JCSS, erhältlich bei IABSE Zürich, 1989

Ditlevsen, O. and Madsen, H.O.: "Bayesian Decision Analysis as a Tool for Structural Engineering Decisions"; Working Document of the JCSS, erhältlich bei IABSE Zürich, 1989

Ditlevsen, O.: "Decision making facing risk aversion"; in Proceedings of the Symposium on Risk Analysis, University of Michigan, Ann Arbor, Mich., USA, 1994

Dracos, T.: "Hydrologie"; Springer-Verlag, 1980

Dracos, T.: "Hydraulik"; Vorlesungsunterlagen, vdf Verlag der Fachvereine, Zürich, 1987

Evans, D.H.: "An Application of Numerical Integration Techniques to Statistical Tolerancing, III - General Distributions", Technometrics 14, 23 - 35, 1972

Farmer, F.R.: "Siting Criteria – A New Approach"; Proceedings of a Symposium on Containment and Siting of Nuclear Power Plants, IAEA-SM-89/34, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, 1967

Favre, R., Andrey, D. et Suter, R.: "Maintenance des ouvrages d'art – Méthodologie de surveillance"; Eidgenössisches Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement, Bundesamt für Strassenbau, Bern, 1987

Fiessler, B., Hawranek, H., Rackwitz, R.: "Numerische Methoden für probabilistische Bemessungsverfahren und Sicherheitsnachweise", Berichte zur Sicherheitstheorie der Bauwerke 14, TU München, 1976

Fischhoff, B., Slovic, P., Lichtenstein, S. and others: "How Safe is Safe enough? A Psychometric Study of Attitudes Towards Technological Risks and Benefits"; Policy Science, 9, 1978

Frei, R.: "MORT – Ein Sicherheitskonzept"; SUVA, Abt. Unfallverhütung, Sektion Information, 6002 Luzern

Freudenthal, A.M.: "The Safety of Structures"; Transactions of the ASCE, Vol. 112, 1947

Fritzsche, A.F.: "Wie sicher leben wir? Risikobeurteilung und -bewältigung in unserer Gesellschaft"; Verlag TÜV Rheinland, 1986

Fritzsche, A.F.: "Wie sicher leben wir? Der Risikokatalog"; Verlag TÜV Rheinland, 1992

Ghiocel, D. and Lungu, D.: "Wind, Snow and Temperature Effects on Structures based on Probability"; Abacus Press, Turnbridge Wells, Kent, UK, 1975

Giannini, R., Pinto, P.E. and Rackwitz, R.: "Action Scenarios and Logic Trees"; Working Document of the JCSS, erhältlich bei IABSE Zürich, 1989

Goodin, R.E.: "Uncertainty as an Excuse for Cheating Our Children: The Case of Nuclear Waste"; Policy Science, 10, 1978

Gorisse, F. et Declerck, R.: "Gestion de la qualité dans l'entreprise - Application au chantier"; in: Volume 1 of Proceedings of the 4th European Congress on Construction Quality Management, Brussels, 1985

Grütter, F.: "Probabilistische Sicherheits- und Risikoanalysen für Talsperren"; In: "Risikountersuchungen als Entscheidungsinstrument"; Verlag TÜV Rheinland, 1985

Hasofer, A.M. and Lind, N.C.: "Exact and Invariant Second-Moment Code Format"; Proc. ASCE, Journal of the Eng. Mech. Division, Vol. 100, No. EM 1, 1974

Heunisch, M.: "Sicherheitstheorie im Stahlbetonbau"; Universität Stuttgart, Vorlesungsautografie

Hirt, M.A.: "Nutzungs-/Sicherheits-/Kontrollplan"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 1, 1992

Hosser, D.: "Zuverlässigkeitstheorie im Bauwesen"; Technische Universität Braunschweig, Vorlesungsautografie, 1987/88

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Huber, K: "Nutzungs-/Sicherheits-/Kontrollplan – Beispiel Werkerweiterung eines Stahlbaubetriebes"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 1, 1992

IABSE Reports: "General Principles of Structural Design" and "General Principles of Quality Assurance"; IABSE Report No. 35, IABSE Zürich, 1981

IABSE Workshop on "Quality Assurance within the Building Process"; Rigi 1983, IABSE Reports Vol. 47, Zürich, 1983

IP Bau: "Zustandsuntersuchungen an bestehenden Bauwerken – Leitfaden für Bauingenieure"; Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1992

IP Bau: "Beurteilung und Verstärkung von Tragwerken"; Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1994

ISO 8402: "Qualität – Begriffe"; ISO Norm, vertrieben in der Schweiz von der Schweizerischen Normen-Vereinigung SNV, 1988

ISO 9000: eigentlich ISO 9000 – 9004; ISO Normenreihe zur Qualitätssicherung, vertrieben in der Schweiz von der Schweizerischen Normen-Vereinigung SNV, deutschsprachige Fassung, 1990

Jacquemoud, J.: "Analyse du comportement à la fatigue des ponts-routes"; Thèse No. 389, EPFL Lausanne, 1981

Jäggi, M.: "Sicherheitsüberlegungen im Flussbau – Konsequenzen aus den Unwetterschäden von 1987"; Neue Zürcher Zeitung, No. 166, vom 19. Juli 1988

JCSS, Joint Committee on Structural Safety (eine von den internationalen Organisationen CEB, CECM, CIB, FIP, IABSE, IASS und RILEM eingesetzte Kommission):
- "General Principles of Structural Design"
- "General Principles of Quality Assurance";

In: "IABSE Reports of Working Commissions"; Report No.35, IABSE, Zürich, 1981

JCSS, Joint Committee on Structural Safety:
- "Basic Notes on Strength", 1984
- "Basic Notes on Actions", 1984
- "Working Documents", 1991

Kersken-Bradley, M. and others: " Workshop Summary"; IABSE Workshop on "Quality Assurance within the Building Process"; Rigi 1983, IABSE Reports Vol. 47, Zürich, 1983

Kersken-Bradley, M. and Rackwitz, R.: "Stochastic Modeling of Material Properties and Quality Control"; Working Document of the JCSS, erhältlich bei IABSE Zürich, 1989

Knoll, F.: "Grundsätzliches zur Sicherheit der Tragwerke"; Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, Heft 4, 1961

Knoll, F.: "Checking Techniques"; In: Nowak, A.S. (Ed.): "Modelling Human Error in Structural Design and Construction", 1986

Kröger, W.: siehe Chakraborty

Kuhlmann, A.: "Einführung in die Sicherheitswissenschaft", Verlag TÜV Rheinland, 1981

Künzle, O. et al.: "Nutzungs-/Sicherheits-/Kontrollplan – Beispiel Unterführung SBB-Linie und Flurwege"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 48, 1992, Seiten 912 ff.

Ladner, M.: "Zustandsuntersuchungen von Bauwerken"; Forschungs- und Arbeitsberichte, Abteilung 116, Massivbau, Bericht Nr. 116/3, EMPA Zürich, 1988

Li, K.S.: "Point-Estimate Method for Calculating Statistical Moments", Journal of Engineering Mechanics 118, 1506 - 1511, 1992

Ligtenberg, F.K.: "Structural Safety and Catastrophic Events"; London 1969, IABSE Reports Vol. 4, Zürich, 1969

Lind, N.C.: "The Design of Structural Design Norms"; Journal of Structural Mechanics, Vol. 1, No. 3, 1973

Lind, N.C.: siehe auch Hasofer, Madsen ...

Lind, N.C., Turkstra, C.J. and Wright, D.T.: "Safety, Economy and Rationality of Structural Design"; IABSE 7th Congress, Rio de Janeiro, IABSE Zürich, 1964

Locher & Cie AG: "Risiken erkennen und meistern"; herausgegeben von der Firma Locher & Cie AG, Zürich 1980

Madsen, P.H. and Lind, N.: "Bayesian Approach to Prototype Testing"; Paper No. 163, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Canada, 1981

Maslow, A.H.: "Motivation and Personality", Harper and Row, 1984

Matousek, M.: "Massnahmen gegen Fehler im Bauprozess"; IBK-Bericht 124, ETH-Z, 1982

Matousek, M.: "Quality Assurance", in: Blockley: "Engineering Safety"; MacGraw-Hill, 1992

Matousek, M. und Schneider, J. : "Untersuchungen zur Struktur des Sicherheitsproblems bei Bauwerken"; IBK-Bericht No. 59, ETH Zürich, 1976

Matousek, M. und Schneider, J.: "Gewährleistung der Sicherheit von Bauwerken – Ein alle Bereiche des Bauprozesses erfassendes Konzept"; Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht No. 140, 1983

Matousek, M. und Schneider, J.: "Massnahmen gegen Fehler im Bauprozess"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 1988

Mauch, S.P. und Schneider, Th.: "Die unmittelbare Gefährdung unseres Lebensraums"; Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik, Heft 6, 1971

Melchers, R.E.: "Human Errors, Human Intervention and Structural Safety Predictions"; IABSE Periodica, Proceedings P-119/87, IABSE Zürich, 1987

Menn, C.: "Sicherheit bei der Bauausführung"; In: SIA Dokumentation 51, 1981

Merz, H.A.: "Bewertung von technischen Risiken"; Polyprojekt Risiko und Sicherheit technischer Systeme, vdf, 1995

Meyna, A.: "Grundlagen von Sicherheitsanalyseverfahren"; In: Peters, O.H. und Meyna, A. (Hrsg.): "Handbuch der Sicherheitstechnik, Band 1"; C. Hanser Verlag, München, 1985

Mirza, S.A. and MacGregor, J.G.: "Variations in Dimensions of Reinforced Concrete Members"; Proc. ASCE, Journal of the Structural Division, Vol. 105, No. ST 4, 1979

Motor-Columbus, Spie Batignolles, Socotec: "Quality Management Standard for Civil Works"; Macmillan Press, London, 1984

Nielsen, D.S.: "The Cause-Consequence Diagram Method as a Basis for Quantitative Accident Analysis"; RISO-M-1374, Danish Atomic Energy Commission, 1971

Nowak, A.S.: "Structural Reliability"; Notes of a Short Course, presented at the ETH Zürich in 1987

Nowak, A.S. (Ed.): "Modelling Human Error in Structural Design and Construction"; Proceedings of a Workshop in Ann Arbor, June 1986, Published by the ASCE, New York, 1986

Okrent, D.: "Comment on Societal Risk"; Science, Vol. 208, April 1980

Östlund, L: "Structural Performance Criteria"; Working Document of the JCSS, 1989, erhältlich bei IABSE Zürich

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Paloheimo, E.: "On the Reliability of Structural Elements and Structures"; Helsinki University of Technology, Research Paper 33, 1970, siehe auch: "Eine Bemessungsmethode, die sich auf variierende Fraktile gründet", in: "Sicherheit von Betonbauten", Deutscher Betonverein, Wiesbaden, 1973

Petersen, Ch.: "Der wahrscheinlichkeitstheoretische Aspekt der Bauwerkssicherheit im Stahlbau"; Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Deutscher Stahlbautag, 1977

Petschacher, M.: "MacVaP", Programm zur Berechnung von Funktionen von Variablen für den Macintosh, IBK, ETH Zürich, 1990, 1992

Petschacher, M.: "Zuverlässigkeit technischer Systeme – Computerunterstützte Verarbeitung von stochastischen Grössen mit dem Programm VaP; Diss. ETH Zürich, 1993

Petschacher, M.: "VaP, aktuelle Version von VaP" siehe www.petschacher.at

Pfister, F. und Günter, R.: "Sicherheitsplanung in Schutzwaldprojekten"; Sanasilva-Teilprogramm 8, Bericht der Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, 8903 Birmensdorf, 1988

Pidgeon, N.F.: "Safety culture in hazard management"; in CEB Bulletin d'Information No. 221, Seiten 63 bis 75, 1994

Pinto, P.E.: siehe Giannini

Premises for Risk Management, Risk Limits in the Context of Environmental Policy, Annex to the Dutch National Environmental Policy Plan, Ministry of Housing, Physical Planning and Environment, The Hague, 1989

Primault, B.: "Du poids maximum de la neige en Suisse"; Bericht No. 96 der "Arbeitsberichte der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt", Zürich, 1981

Rackwitz, R.: "First Order Reliability Theories and Stochastic Models"; Proceedings, ICOSSAR '77, TU München, 1977

Rackwitz, R.: "Ein theoretisches Modell für wirtschaftliche Betonproduktion und Kontrolle"; Beton + Fertigteil-Technik, Heft 3/80, 1980

Rackwitz, R.: siehe auch Casciati, Giannini, Kersken-Bradley

Rackwitz, R. und Fiessler, B.: "Note on Discrete Safety Checking when using Non-Normal Stochastic Models for Basic Variables"; Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Heft 14, Technische Universität München, 1976

Rackwitz, R. und Peintinger, B.: "Ein wirklichkeitsnahes stochastisches Bodenmodell mit unsicheren Parametern und Anwendung auf die Stabilitätsuntersuchung von Böschungen"; Bauingenieur, 56, 1981

Rouvé, B.: "Application du calcul probabiliste à l'étude des structures, conclusions provisoires"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 19, 1979

Rowe, W.D.: "What is an acceptable Risk and how can it be determined"; In: "Energy Risk Management"; Academic Press, London, 1979

Sägesser, R. und Mayer-Rosa, D.: Erdbebengefährdung in der Schweiz"; Schweizerische Bauzeitung, Heft 7, 1978

Schneider, J.: "Über den Rang der Entscheidung in der Arbeit des Ingenieurs"; Schweizerische Bauzeitung, Heft 1, 1969

Schneider, J.: "Überlegungen zu einem konkreten Sicherheitsbegriff für die Bemessung von Bauwerken"; Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht No. 37, 1971

Schneider, J.: "Grundsätzliches zum Sicherheitsbegriff sowie Elemente einer Sicherheitsnorm für Tragwerke"; Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht No. 51, 1974 oder Berichte der Arbeitskommissionen, Band 18, IVBH, 1974

Schneider, J.: "Gefahren, Gefährdungsbild und ein Sicherheitskonzept"; Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht No. 97, 1980

Schneider, J.: "Ausfälle im Bauwesen – ein geeigneter Ausgangspunkt für Sicherheitsüberlegungen"; Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich, Bericht No. 120, 1981 oder "SIA, Dokumentation 51"; 1981

Schneider, J.: "Unkonventionelle Überlegungen zum Thema 'Sicherheit' "; Schweizer Ingenieur und Architekt, 7, 1983

Schneider, J.: "Hazard Scenarios and Structural Design"; IABSE Periodica, Surveys S-33/85, IABSE Zürich, 1985

Schneider, J.: "Zwischen Sicherheit und Risiko"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 18, 1988

Schneider, J.: "Quality Assurance in the Building Process"; IABSE Periodica, Proceedings P-133/89, IABSE Zürich, 1989

Schneider, J.: "Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit"; in SIA Dokumentation D 041, 1989

Schneider, J.: "Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Tragwerke"; SIA-Heft Nr. 46/1990 vom 15. November 1990

Schneider, J. (Hrsg.): "Risiko und Sicherheit technischer Systeme – auf der Suche nach neuen Ansätzen"; Birkhäuser Basel, Boston, Berlin, 1991

Schneider, J.: "Qualitätssicherung im Bauwesen – Eine zusätzliche Bürde für die Bauwirtschaft?". In Tagungsband "Wie erbauen wir unsere Zukunft?", SAQ-TFB Fachtagung, Oktober 1991, SAQ, Postfach 4601 Olten, Seiten 17 ff

Schneider, J.: "Safety – A Matter of Risk, Cost and Consensus"; Structural Engineering International 4/2000, 2000

Schneider, J. und Vrouwenvelder, T.: „Introduction to Safety and Reliability of Structures"; SED 5, 3rd Edition, IABSE, 2017

Schneider, J.: siehe auch Matousek, Stiefel

Schneider, Th.: "Grundgedanken und Methodik moderner Sicherheitsplanung"; Der Sicherheitsingenieur, 8 und 9/81, 1981

Schneider, Th.: "Zur Charakterisierung von Risiken", in: "Risiko und Sicherheit technischer Systeme – auf der Suche nach neuen Ansätzen"; Birkhäuser Basel, Boston, Berlin, 1991

Schneider, Th.: in "Akzeptabilität von Risiken"; SATW–SUVA Studie, 1992

Schneider, Th.: siehe auch Mauch. S.

Sentler, L.: "Live Load Survey – A Review with Discussions"; Lund Institute of Technology, Report 78, Lund, Sweden, 1976

SIA Dokumentation D 041: "Einführung in die Norm SIA 160 'Einwirkungen auf Tragwerke' und in die Empfehlung 'Erhaltung von Ingenieurbauwerken' (SIA 168)"; Referate der Einführungstagungen 1989, SIA, 1989

SIA Dokumentation D 0114: "Einwirkungen auf Tragwerke – Anwendung der Norm SIA 160 in der Praxis"; Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1994

SIA Dokumentation D 042: "Einführung in die Norm SIA 162 'Betonbauten'. Referate der Einführungstagungen 1989, SIA, 1989

SIA Dokumentation 51: "Gefahren, Risiken und Sicherheitsprobleme für alle am Bau Beteiligten"; Referate der FBH Tagung 1981, SIA 1981

SIA 160: "Einwirkungen auf Tragwerke"; Norm. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1989

SIA 161: "Stahlbauten"; Norm. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1990

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

SIA 162: "Betonbauten"; Norm. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1989

SIA 169: "Erhaltung von Ingenieur-Bauwerken"; Empfehlung, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1987

SIA 260: "Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Tragwerken – Weisung des SIA an seine Kommissionen für die Koordination des Normenwerks"; 5. Fassung 1980 und 11. Fassung, September 1982

SIA 462: "Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke"; Richtlinie, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich, 1994

SIA Tragwerksnormen 1892–1956: "Sammlung der in der Schweiz zwischen 1892 und 1956 erlassenen Verordnungen, Vorschriften und Normen für Tragwerke aus Stahl, Beton, Mauerwerk und Holz", faksimilierte Wiedergabe, SIA, 1994

SIA 2007: "Qualitätssicherung im Bauwesen – Beitrag zur Interpretation der Normen ISO 9000 – 9004", Merkblatt, Januar 1994

Spektrum der Wissenschaft, 3, 1993, Diverse Aufsätze zur Fuzzy Logic

Spiess, M.: "Wolkiges Wissen – Faustregeln in Expertensystemen", Spektrum der Wissenschaft, 10, 1989

Starr, C.: "Social Benefit versus Technological Risk", Science, Vol. 165, 1969

Statistisches Jahrbuch der Schweiz, Bundesamt für Statistik, jeweils neueste Ausgabe

Stiefel, U. und Schneider, J.: "Was kostet Sicherheit?"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 47, 1985

StFV: "Störfallverordnung, Handbuch zur ..." herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bezugsquelle: EDMZ, 3000 Bern, 1991

Streich, W.: "Nutzungs-/Sicherheits-/Kontrollplan Eine Hilfestellung zur Bearbeitung der Nutzungs- und Sicherheitspläne"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 1, 1992

SUVA: "Ergebnisse der Unfallstatistik"; herausgegeben alle 5 Jahre, Schweizerische Unfallversicherungsanstalt Luzern

Troxler, Ch., Guenter, R. und Bohnenblust, H.: "Schutz vor Naturgefahren"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 39, 1989

Turkstra, C.J.: "Theory of Structural Design Decisions"; Study No. 2, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 1972

Turkstra, C.J.: siehe auch Lind

U.S. National Academy of Sciences: "Confronting Natural Disasters: An International Decade for Natural Hazard Reduction"; National Academy Press, Washington D.C., 1987

Vallon, D.: "Fault Tree Analysis – Die Fehlerbaumanalyse"; Bulletin 1/92 des Brand-Verhütungs-Dienstes für Industrie und Gewerbe (BVD), 1992

Van den Beukel, NL.: "Quality Cost"; United Nations, Economic and Social Council, Committee on Housing, Building and Planning, Working Party on Building, Report 227, April 1989

Vischer, D.: "Das Überflutungsrisiko einer Baugrube"; "Wasserbau", Heft 10/1977

Vischer, D. und Huber, A.: "Wasserbau"; Springer-Verlag, 1985

Vollenweider, U.: "Grundsätzliche Gedanken zur Sicherheit im Grundbau"; In: "SIA Dokumentation 51", 1981

Vollenweider, U.: "Gedanken zur Sicherheit im Grundbau"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 39, 1988

Vrouwenvelder, A.C.W.M.: "Assessment of Existing Structures"; IBBC-TNO Report No. BI-88-010, TNO Delft, 1988

Vrouwenvelder, A.C.W.M. and Siemens, T.: "Durability – A Probabilistic Approach"; IABSE Periodica, Proceedings P-85/85. IABSE Zürich, 1985

Vrouwenvelder, A.C.W.M. and Vrijling, J.K.: "Probabilistisch Ontwerpen"; Technische Hochschule Delft, Vorlesungsautographie, 1984

Vrouwenvelder, A.C.W.M. and Siemes, A.J.M.: "Probabilistic calibration procedures for the derivation of partial safety factors for the Netherlands Building Code"; HERON, Vol. 32, No. 4, Stevin-Laboratory of the Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, NL, 1987

Warner, R.F. and Dandy, G.C.: "Multistage Decision Models for the Assessment of Structural Defects"; IABSE Periodica, Proceedings P-83/85, IABSE Zürich, 1985

Wicke, M. et al.: "Verfahren zur Vorhersage des Umfangs von Brückensanierungen"; Bundesministerium für Wirtschaftliche Angelegenheiten, Strassenforschung, Heft 338, Wien, 1987

Wildavsky, A.: "No Risk is the Highest Risk of All"; American Scientist, Volume 67, 1979

Wolfseher, R.: "Stahlbeton in Bau, Erhaltung und Sanierung"; sechsteilige Serie in Schweizer Baublatt, No. 19, 27, 43, 53, 81 und 93, 1992

Zadeh, L.A.: "Fuzzy Sets"; Information and Control, Vol. 8, 1965

Zhou, J. and Nowak, A.S.: "Integration Formulas to Evaluate Functions of Random Variables"; Structural Safety 5, 267 - 284, 1988

Zimmermann, H.-J.: "Fuzzy Set Theory – and Its Applications"; Kluwer, Dordrecht, 1991

Zwicky, F.: "Entdecken Erfinden Forschen im morphologischen Weltbild"; Verlag Baeschlin, Glarus, 1989 (2. Auflage)

10.94 Software

DNV: "PROBAN – Probabilistic Analysis Program", entwickelt von Det Norske Veritas Research AS, vertrieben von Semafor Informatik & Energie AG, Basel, 1994

RCP: "STRUREL – Structural Reliability Analysis Program–System"; entwickelt und vertrieben durch RCP GmbH, München, 1993

VaP: Programm zur Berechnung von Funktionen von Variablen, IBK, ETH Zürich, 1990, 1992, 1995, VaP: aktuelle Version siehe www.petschacher.at. Kostenlose Version FreeVaP bestellen unter www.ponti.eu

© CC BY-NC-ND, https://vdf.ch/sicherheit-und-zuverlassigkeit-im-bauwesen.html

Zu den Autoren dieser Publikation

Jörg Schneider wurde 1967 als Professor für Baustatik und Konstruktion an die ETH Zürich gewählt. Er unterrichtete in den statisch-konstruktiven Fächern an der seinerzeitigen Abteilung VIII und bestritt die Lehrveranstaltung "Sicherheit im Bauwesen" an der Abteilung für Bauingenieurwesen. Im Jahr 1999 trat er in den Ruhestand.

Geboren 1934 in Köln am Rhein, erwarb Jörg Schneider sein Diplom als Bauingenieur an der ETH Zürich im Jahre 1958. Danach war er bis 1962 Assistent an den Abteilungen I und VIII der ETH Zürich. Vier weitere Jahre arbeitete er in der Entwicklungsabteilung der Firma Stahlton AG Zürich und befasste sich dort vorwiegend mit Problemen der Vorspannung und Vorfabrikation.

Das Forschungsgebiet von Jörg Schneider lag im Gebiet der Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen. Während vieler Jahre war er in verschiedenen Normenkommissionen des SIA tätig. Von 1993 bis 1999 führte er die Expertengruppe Sicherheit AlpTransit, die – achsübergreifend – die Projektleitungen der beiden alpenquerenden neuen Eisenbahn-Transversalen am Gotthard und am Lötschberg in Fragen der Sicherheit im späteren Betrieb beriet.

Im internationalen Kontext diente er von 1975 bis 1998 als Mitglied der Geschäftsleitung der Internationalen Vereinigung für Brückenbau und Hochbau (IVBH/ IABSE) und war von 1993 bis 2001 einer ihrer Vizepräsidenten. Von 1979 bis 2001 war er Mitglied des Joint Committee on Structural Safety (JCSS) und während fünf Jahren dessen Präsident. 1991 wurde er als Einzelmitglied in die Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften gewählt. 1998 verlieh ihm die Universität für Bodenkultur in Wien der Titel eines Ehrendoktors und schliesslich 2002 die IVBH die Ehrenmitgliedschaft.

Im Jahr 2000 gründete Jörg Schneider mit ehemaligen Assistenten und Freunden das in Aarau domizilierte Ingenieurbüro Risk&Safety AG, Ingenieure in Gemeinschaft.

Weitere Veröffentlichungen des Verfassers
zum Gratis-Download unter
www.4shared.com/folder/pV_u09iD/_online.html

Hanspeter Schlatter, 1962 in Zürich geboren, war von 1989 bis 1992 Assistent an der ETHZ beim Autor dieses Buches. Er unterstützte ihn im Unterricht und in vielen weiteren Belangen, so z.B. bei der Redaktion eines umfangreichen Berichts über eine internationale Tagung unter dem Titel „Risiko und Sicherheit technischer Systeme – Auf der Suche nach neuen Ansätzen“. Bei der Entstehung dieses Buches hat er sich durch Umsetzen der im Unterricht verwendeten Folien in lesbaren Text und in computer-taugliche Figuren grosse Verdienste erworben.

Das Thema „Sicherheit und Risiko“ liess ihn in der Folge nie mehr los: Im Anschluss arbeitete er bei Ingenieurbüros im Raum Zürich und befasste sich mit speziellen Tragsicherheitsfragen und Baumängeln. Später weitete sich das Themenspektrum aus: Sicherheitsfragen im Strassen- und Schienenverkehr, Naturgefahren, Landesversorgung, etc. kamen hinzu. Seit 2002 befasst er sich mit Sicherheitsfragen bei der SBB, insbesondere mit Kollisions-, Entgleisungs- und Bahnübergangsrisiken, aber auch Brandrisiken in langen Tunnels, etc. Der Einbezug von menschlichen Fehlhandlungen spielt in all diesen Fragen immer eine wichtige Rolle.

ISBN 3-7281-2167-3
ISBN 3-7281-2167-7
DOI: 10.3218/2167-7