

**Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und  
Simulation**

**Technische Universität München**

Prof. Dr.- Ing. ANDRÉ BORRMAN

Arcisstraße 21, 80290 München, Tel. (089) 289 - 23047

---

# **Bachelorarbeit**

Abbildung von Schädigungsmechanismen für Betonbrücken

Technische Universität München

**Sokol Ferataj**

Betreuer:

Dipl.-Ing. Gergő Dori (LS für Computergestützte Modellierung und Simulation)

Dipl.-Ing. (FH) Matthias Wild M.Sc. (LS für Massivbau)

Bearbeitungszeitraum:

01.05.2012 bis 21.09.2012

München, 09/2012

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>5</b>
1.1 Vorgehen .....	7
1.2 Motivation.....	7
<b>2 Quersysteme</b> .....	<b>8</b>
2.1 Quersysteme in Tragrichtung.....	8
2.1.1 Massivplattenquerschnitt .....	8
2.1.2 Plattenbalkenquerschnitt .....	9
2.1.3 Trogquerschnitt .....	10
2.1.4 Hohlkastenquerschnitt.....	11
2.2 Ausrüstungsteile der Quersysteme .....	13
2.2.1 Kappe, Distanzschutzplanke und Geländer.....	13
2.2.2 Abdichtung und Belag .....	14
2.2.3 Entwässerung.....	14
<b>3 Schädigungsmöglichkeiten</b> .....	<b>16</b>
3.1 Definition der Schädigung .....	16
3.2 Allgemeines zur Einteilung der Schäden.....	16
3.3 Schadensarten.....	17
3.3.1 Gefügeschädigung des Betons .....	17
3.3.2 Korrosion .....	20
3.3.3 Ermüdung.....	26
3.3.4 Schädigungen infolge Brandbeanspruchung und Anprall.....	27
3.3.4.1 Schädigung infolge Brandbeanspruchung.....	27
3.3.4.2 Schädigung durch den Anprall .....	28
3.4 Schadensmerkmale .....	28
3.4.1 Betonschädigende Merkmale .....	28
3.4.2 Betonschädigende Merkmale mit Auswirkungen auf den Betonstahl ...	30
3.4.3 Betonstahl und Spannstahlschädigende Merkmale .....	32
<b>4 Abbildung von Systemelementen durch Module</b> .....	<b>33</b>
4.1 Systembeschreibung.....	33
4.2 Untergliederungen der Tragsysteme in Querrichtung .....	40
4.2.1 Untergliederung des Hohlkastenquerschnitts .....	40
4.2.2 Untergliederung des Plattenbalkenquerschnitts .....	41
4.2.3 Untergliederung des Trogquerschnitts.....	42
4.2.4 Untergliederung des Massivplattenquerschnitts .....	42

---

4.3	Die Modellierung der Systemelemente .....	43
4.3.1	Fahrbahnplatte .....	43
4.3.2	4.3.2 Stege/Trogwände .....	44
4.3.3	Bodenplatte .....	44
<b>5</b>	<b>Abbildung von Schädigungen durch Module .....</b>	<b>45</b>
5.1	Schadensanalyse.....	45
5.1.1	Schädigungen der Baustoffe und Ausrüstungsteile .....	45
5.1.2	Parameter als Schadensindikatoren.....	49
5.2	Modellierung der Schädigungen .....	58
<b>6</b>	<b>Abbildung von Schädigungsmechanismen.....</b>	<b>63</b>
6.1	Fehlerbaumanalyse.....	63
6.1.1	Grundlagen.....	63
6.1.2	Logisches Systemmodell zur Abbildung von Schädigungsmechanismen für Systemelemente.....	65
6.2	Logisches Systemmodell zur Abbildung von Schädigungsmechanismen für Quersysteme.....	72
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>75</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>76</b>
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>79</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Massivplattenquerschnitt.....	9
Abbildung 2 - Plattenbalkenquerschnitt.....	10
Abbildung 3 - Trogquerschnitt.....	11
Abbildung 4 - Hohlkastenquerschnitt.....	13
Abbildung 5 - Frost-Tausalz-Einwirkung .....	18
Abbildung 6 – Risse infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion .....	19
Abbildung 7 – Voraussetzungen einer Korrosion .....	21
Abbildung 8 – Grenzzustände eines Korrosionsprozesses in Abhängigkeit der Zeit .....	22
Abbildung 9 – Korrosionsgeschwindigkeit gemäß Duracrete .....	23
Abbildung 10- Voraussetzungen einer Spannungsrisskorrosion .....	24
Abbildung 11 – Chemische Reaktion bei flächiger Korrosion des Spannstahls.....	25
Abbildung 12 – Systembeschreibung Hohlkastenquerschnitt .....	33
Abbildung 13 – Systembeschreibung Hohlkastenquerschnitt (Ausrüstungsteile).....	34
Abbildung 14 – Ausrüstungsteile Detail A .....	35
Abbildung 15 – Systembeschreibung Plattenbalkenquerschnitt.....	36
Abbildung 16- Systembeschreibung Plattenbalkenquerschnitt (Ausrüstungsteile).....	36
Abbildung 17 Systembeschreibung Trogquerschnitt .....	37
Abbildung 18 – Systembeschreibung Trogquerschnitt (Ausrüstungsteile) .....	37
Abbildung 19 - Systembeschreibung Massivplattenquerschnitt .....	38
Abbildung 20 - Systembeschreibung Massivplattenquerschnitt (Ausrüstungsteile).....	38
Abbildung 21 – Untergliederung Hohlkastenquerschnitt .....	40
Abbildung 22 – Untergliederung Plattenbalkenquerschnitt.....	41
Abbildung 23 – Untergliederung Trogquerschnitt .....	42
Abbildung 24 – Untergliederung des Massivplattenquerschnitts .....	42
Abbildung 25 – Modul Fahrbahnplatte .....	43
Abbildung 26 – Modul Fahrbahnplatte (Trogquerschnitt) .....	43
Abbildung 27 – Modul Steg 1 .....	44
Abbildung 28 – Modul Steg 2 .....	44
Abbildung 29 – Modul Trogwand 1.....	44
Abbildung 30 – Modul Trogwand 2.....	44
Abbildung 31 – Modul Bodenplatte .....	44
Abbildung 32 – Modul Beton .....	46
Abbildung 33 – Modul Betonstahl.....	46
Abbildung 34 – Modul Spannstahl.....	47
Abbildung 35 - Modul Kappe .....	47
Abbildung 36 – Ausrüstungsteil Distanzschutzplatte .....	48

Abbildung 37 – Ausrüstungsteil Geländer .....	48
Abbildung 38 – Modul Belag .....	49
Abbildung 39 – Modul Abdichtung.....	49
Abbildung 40 – Modul Entwässerung.....	49
Abbildung 41 - Schadensparameter.....	50
Abbildung 42 – Schadensparameter Frost-Tausalz-Schädigung .....	51
Abbildung 43 – Schadensparameter Alkali-Kieselsäure-Reaktion .....	51
Abbildung 44 – Schadensparameter chlorid-/karbonatisierungsinduzierte Korrosion .....	53
Abbildung 45 – Schadensparameter SRK.....	53
Abbildung 46 – Schadensparameter Ermüdung Betonstahl/Spannstahl .....	55
Abbildung 47 – Schadensparameter Last .....	55
Abbildung 48 – Schadensparameter Verankerung.....	55
Abbildung 49 – Schadensparameter Verschleiß .....	56
Abbildung 50 – Schadensparameter Chlorideintrag / hohe Temperaturänderung .....	56
Abbildung 51 - Schadensparameter Rohrschaden/Abflussbehinderung .....	57
Abbildung 52 - Schadensparameter Brandbeanspruchung.....	57
Abbildung 53 – Schadensparameter Anprall.....	57
Abbildung 54 – Schädigungsmodul Beton .....	58
Abbildung 55 – Schädigungsmodul Betonstahl/Spannstahl .....	59
Abbildung 56 – Schädigungsmodul Kappe, Distanzschutzplanke.....	60
Abbildung 57 – Schädigungsmodul Geländer .....	61
Abbildung 58 – Schädigungsmodul Abdichtung/Belag .....	61
Abbildung 59 – Schädigungsmodul Entwässerung .....	62
Abbildung 60 - Fehlerbaum.....	64
Abbildung 61 – Logisches Systemmodell der Systemelemente .....	65
Abbildung 62 - Systemmodell Fahrbahnplatte.....	70
Abbildung 63 - Systemmodell Steg .....	71
Abbildung 65 – Logisches Systemmodell des gesamten Quersystems .....	72
Abbildung 64 - Systemmodell Bodenplatte .....	72
Abbildung 66 – Systemmodell Hohlkastenquerschnitt .....	73
Abbildung 67 – Systemmodell Plattenbalkenquerschnitt.....	73
Abbildung 68 – Systemmodell Trogquerschnitt.....	74
Abbildung 69 – Systemmodell Massivplattenquerschnitt .....	74

# 1 Einleitung

Brücken sind als Teil der technischen Infrastruktur ein Ausdruck der Innovationskraft unserer Gesellschaft und ihrer Ingenieure. Gestaltungsleistung, Umgang mit Natur und gebauter Umgebung, Wirtschaftlichkeit sowie technische Funktionalität finden in guten Brücken eine überzeugende Balance und entfalten Symbolkraft für die Baukultur in Deutschland.

Dabei ist die dauerhafte Sicherstellung der Mobilität auf Straßen, Schienen und Wasserwegen eine wesentliche Voraussetzung für das Funktionieren einer arbeitsteiligen Wirtschaft und ein wichtiger Beitrag für die Flexibilität und die Lebensqualität der Menschen. Das Straßennetz trägt hierbei die Hauptlast des Verkehrs. Brücken sind hinsichtlich der Investitions- und Folgekosten, die mit Abstand teuersten Anlagenteile der Straßen, die insbesondere durch den weiter stetig anwachsenden Schwerverkehr extremen Belastungen ausgesetzt sind. Die neusten Verkehrsprognosen sagen weitere Steigerungen der Güterverkehrsmengen auf Straßen bis 2025 von rund 80% voraus, die sich vor allem auf den bereits hochbelasteten Bundesfernstraßen bewegen werden. Die Erhaltung der Sicherheit und Funktionsfähigkeit der Brücken hat daher nicht nur für die verantwortlichen Baulastträger, sondern auch für die Nutzer eine herausragende Bedeutung. Zunehmende Meldungen in den Medien über Brückenschäden und einen sich rapide verschlechternden Zustand vieler Brücken sind daher für alle Beteiligten alarmierend. Denn Störungen vor allem auf den hochbelasteten Autobahnen durch eventuell notwendige Verkehrsbeschränkungen an Brücken führen sehr schnell zu erheblichen Stauerscheinungen als Dauerzustand mit gravierenden Folgekosten für die Nutzer.

Es handelt sich dabei nicht nur um ein paar wenige Brücken, sondern es droht ein grundlegendes Problem. Selbst der Verkehrsminister musste in seinem Statement 2011 einräumen, dass schon jetzt für etliche Brücken Verkehrsbeschränkungen aufgrund von Schäden bestehen und zahlreiche Brücken in der nächsten Zeit konstruktiv verstärkt oder erneuert werden müssen.

Bei der Haushaltsplanung für das Jahre 2012 war die Erhaltung der knapp 39 000 Brücken an den ca. 53 000 Kilometern Bundesfernstraßen in Deutschland ein zentrales Thema. Dabei wurde für den erheblichen Sanierungsbedarf die Devise Erhalt vor Neubau vertreten. Etwa ein Viertel der knapp 39 000 Brücken muss in den nächsten fünf bis sieben Jahren instand gehalten werden. Allein dazu bedarf es einer Summe von etwa 7 Milliarden Euro.

Vergleichsweise dazu wurden in der Zeit zwischen 1998 und 2009 pro Jahr lediglich ungefähr 270 Millionen Euro in Brücken investiert. Nach der neuen CDU-Finanzplanung sollen die Investitionen in Maßnahmen zur Instandhaltung von Brücken bis 2015 etwa verdoppelt werden, ihre Höhe soll dann bei knapp unter 700 Millionen Euro liegen.

Brücken sind einem fortwährendem Alterungs- und Schädigungsprozess unterworfen und erfordern eine kontinuierliche Überwachung und Instandhaltung, was mit erheblichen Kosten verbunden ist. Unter akutem Kostendruck werden diese Maßnahmen oft minimiert, was in der Vergangenheit zur Ausweitung von Bestandsschäden führte.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, ein Systemmodell zu entwickeln, das verschiedene Schädigungsmechanismen von Betonbrücken abbildet. Dadurch soll erkannt werden wie Schädigungen oder Fehlstellen sich weiterentwickeln können und welche Wirkung sie auf das gesamte Brückenbauwerk haben.

Da jede Brücke ein Unikat mit individuellen Schäden und Besonderheiten darstellt, soll das im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnde Systemmodell einfach und kostengünstig an eine Brücke individuell angepasst werden können, indem ähnlich einem Baukastensystem aus einer Menge vorgefertigter System- und Schädigungsmodule diejenigen zusammengestellt werden können, die für eine bestimmte Brücke notwendig sind. Zentraler Gegenstand dieser Arbeit ist daher Entwurf und Realisierung entsprechender System- und Schädigungselemente, die von geeignet geschulten Personal flexibel konfiguriert und kombiniert werden können, so dass sie an einer möglichst großen Zahl von Brücken eingesetzt werden können.

## 1.1 Vorgehen

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, ein logisches Systemmodell zu entwickeln, welches Schädigungsmechanismen für Betonbrücken und ihre Wirkung auf das Gesamtsystem abbildet. Dabei wird untersucht wie sich die Schädigung weiterentwickelt und welche Einflüsse sie auf weitere Systemelemente haben kann.

Hauptsächlich habe ich mich dabei mit den verschiedenen Quersystemen von Betonbrücken, Massivplatten-, Plattenbalken-, Trog- und Hohlkastenquerschnitt, beschäftigt.

## 1.2 Motivation

Die Motivation für diese Bachelorarbeit beruht auf der Möglichkeit, einen außerordentlich spannenden und sehr komplexen Themenbereich, den der Schädigungsmechanismen für Betonbrücken zu bearbeiten. Die Themenschwerpunkte „Quersysteme“, und die spezielle Betrachtung von Betonbrücken im Hinblick auf ihre Schädigung und die Abbildung von Systemelementen durch Module waren für mich sehr interessante Aspekte um den Themenbereich besser verstehen zu können.

Meine Intention war es, dem Leser dieser Bachelorarbeit einen guten Überblick und ein gutes Verständnis für die oben genannten Bereiche zu geben. Vor allem aber habe ich ein Thema im Bereich des Brückenbaus gewählt, weil ich in den letzten Jahren durch mein Studium eine Leidenschaft für diesen Themenbereich entwickelt habe. Weiterführend wollte ich den Lesern näherbringen, welche Schädigungsarten, Schädigungsmöglichkeiten es gibt und worauf man dabei achten sollte.

## 2 Quersysteme

### 2.1 Quersysteme in Tragrichtung

#### 2.1.1 Massivplattenquerschnitt

Die Platte ist das bevorzugte Konstruktionselement für Querschnitte von Brücken kleiner Stützweiten, da sie den Vorzug einfacher Herstellung und einer geschlossenen Untersicht besitzt.

Zusätzlich wird sie gern als gestalterisches Element im Stadthochstraßenbau verwendet. Dabei kommt die Platte als Vollplatte zur Ausführung. Hier sind allerdings Hohlkörper zur Gewichtsersparnis wegen der Unterbringungsproblematik nicht mehr zugelassen.

Platten sind Flächentragwerke, die senkrecht zu ihrer Mittelfläche belastet werden. Sie tragen die Belastungen in zwei, in der Regel, senkrecht zueinander stehenden Richtungen ab. Hierbei geschieht die Verteilung der Beanspruchungen aus Einzel- und Teilflächenlasten in jeder Tragrichtung entsprechend dem Biegeverhalten der Platte auf eine zugehörige mitwirkende Breite. Hierdurch werden kleinere Bemessungsgrößen als bei vergleichbaren einachsig gespannten Tragwerken erreicht.

Eine Platte ist nicht für beliebig große Stützweiten konstruierbar, da das Eigengewicht die Grenzen setzt.

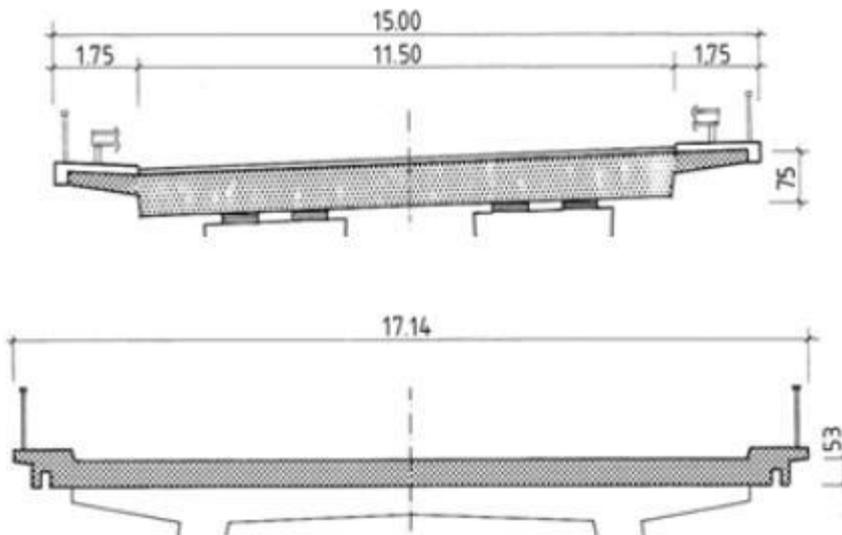


Abbildung 1 - Massivplattenquerschnitt

### 2.1.2 Plattenbalkenquerschnitt

Der Plattenbalkenquerschnitt stellt den idealen Querschnittstyp des Betonbaues dar, da er für den Bereich positiver Biegemomente - also im Feldbereich - im Biegedruckbereich die durchgehende Querschnittsfläche anbietet, dagegen im Bereich der Biegezone sich auf die Breiten der Balkenstege beschränkt. Hierdurch lassen sich die Eigengewichtseinflüsse günstig beeinflussen. Im Bereich negativer Feldmomente dagegen treten bei dieser Form Probleme im Hinblick auf die Beanspruchung der Biegedruckzone auf, die jetzt nur in Stegbreite vorliegt.

Das Tragverhalten des Plattenbalkenquerschnitts ist durch dasjenige der Balken selbst gekennzeichnet, die in diesem Querschnitt die Funktion der Hauptträger übernehmen. Die Platte - in ihrer Wirkung wieder als Flächentragwerk zu verstehen - übernimmt die örtliche Beanspruchung aus den Fahrbahnlasten und leitet diese an die Hauptträger weiter. Sie ist im Querschnitt das Nebentragglied und demzufolge für das Tragverhalten des gesamten Querschnittes von untergeordneter Bedeutung.

Die gebräuchlichste Form hier ist der zweistegige Plattenbalken. Dieser gestattet durch den statisch bestimmten Kraftfluss in der Fahrbahntafel eine eindeuti-

ge und einfache Lastabtragung auf die Hauptträger. Bei Querschnittsbreiten, die über ca. 12,0 m hinausgehen, kann man einen dritten Hauptträger vorsehen, der eine zu große Querstützweite zu vermeiden. Beim dreistegigen Plattenbalken ist der Kraftfluss in der Fahrbahnplatte aber statisch unbestimmt aufzufassen, die zugehörige Lastabtragung auf die Hauptträger hängt von der Zwängung der statischen Unbestimmten der Querrichtung ab. Vierstegige Plattenbalken sind heute kaum noch üblich.

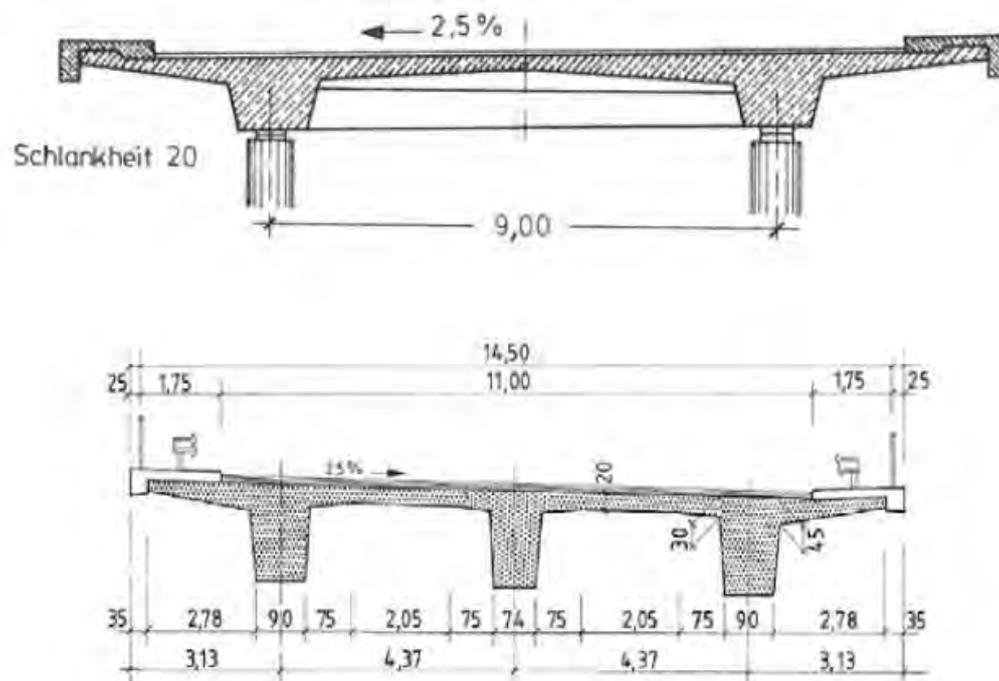


Abbildung 2 - Plattenbalkenquerschnitt

### 2.1.3 Trogquerschnitt

Die umgekehrte Form des Plattenbalkens wird durch den Trogquerschnitt dargestellt. Er besitzt damit eine kleine Biegedruckzone der Hauptträger für positive Biegemomente.

Die Fahrbahnplatte ist zwischen den Hauptträgern angeordnet und liegt tiefer als die Oberkante der Hauptträger. Der Trogquerschnitt kommt bei schmalen Brücken und Brüchen, die sich durch eine geringe Bauhöhe auszeichnen, zum Einsatz. Diese werden bei Eisenbahnüberführungen oder bei Überführungen von Fuß- und Radwegen über Bäche oder kleine Flüsse verwendet.

Dieser Querschnittstyp wird auch durch einen zweistegigen Plattenbalken gebildet, wobei es sich hier um eine Neuentwicklung handelt, denn der Trogbrückenquerschnitt ist bisher nicht typisch für den Betonbrückenbau. Diese Querschnittsform ist aber zukunftssträchtig, da die Aufgaben des Lärmschutzes mit den steigenden Erfordernissen des Umweltschutzes zunehmen werden.

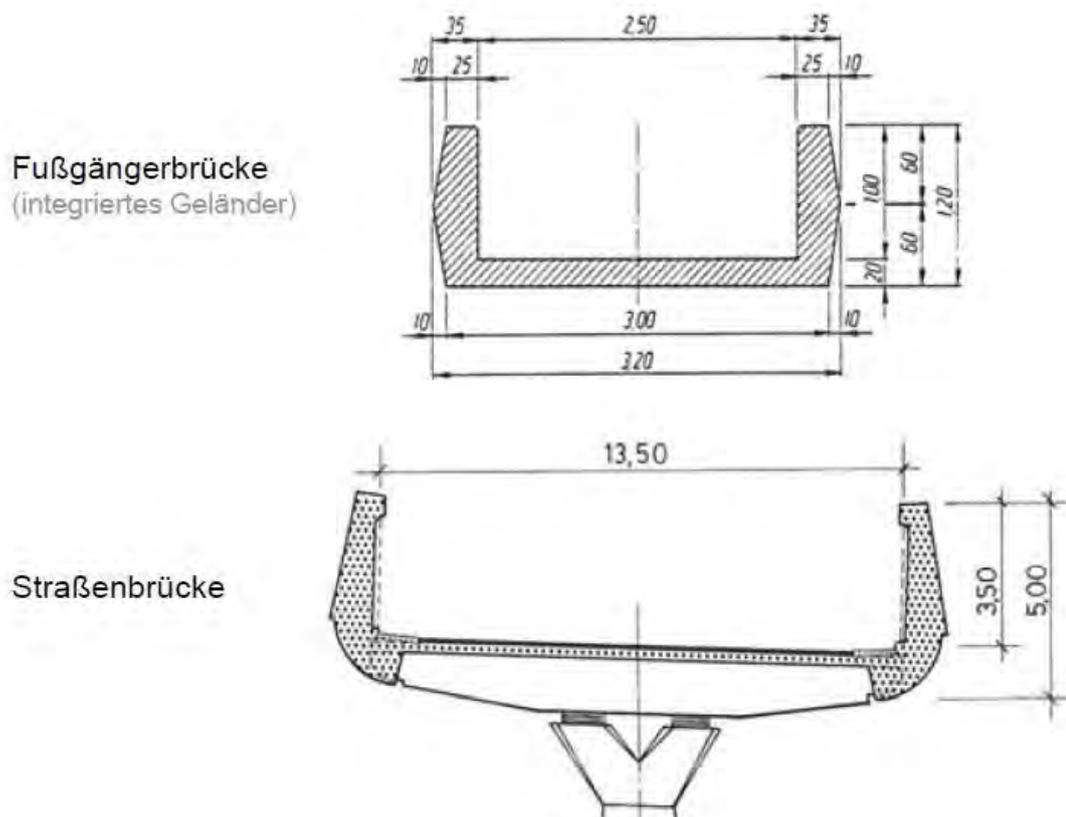


Abbildung 3 - Trogquerschnitt

#### 2.1.4 Hohlkastenquerschnitt

Der Hohlkastenquerschnitt hat sich ursprünglich aus dem Plattenbalkenquerschnitt entwickelt. Durch das Anbringen einer unteren Druckplatte, die aus stati-

schen Gründen im Stützbereich des Durchlaufträgers erforderlich ist, entsteht eine Querschnittsform die ein anderes Tragverhalten zeigt. Dadurch hat sie ihren eigenständigen Platz unter den Querschnittstypen erobert.

Das Kernstück dieses Querschnittes ist eine torsionssteife Zelle, die es ermöglicht, außermittige Beanspruchungen nahezu gleichmäßig auf die Hauptträger aufzuteilen. Im Gegensatz zum Plattenbalkenquerschnitt bildet der gesamte Hohlkasten den Hauptträger. Da sich die Biegedruckzone durchgehend in der Fahrbahnplatte und die Biegezugzone sich durchgehend in der unteren Platte befinden stellt der Hohlkastenquerschnitt eine ideale Querschnittsform zur Aufnahme von Biegemomenten dar.

Aufgrund der Eigenschaften einer großen Biege- und Torsionssteifigkeit wird der Hohlkastenquerschnitt insbesondere bei Balkenbrücken mit mittleren und größeren Stützweiten, bei gekrümmter Linienführung und bei eingeschränkten Platzverhältnissen im Stadtbereich (Einpunktstützung) eingesetzt.

Der Hohlkastenquerschnitt eignet sich zur Aufnahme großer Straßenbreiten, vor allem dann, wenn er in mehrere Zellen aufgelöst wird. Bei Querschnittsbreiten die über 13,0 m hinausgehen, kommt der zweizellige Hohlkasten zum Einsatz. Müssen noch größere Breiten überführt werden, so kann der Querschnitt in mehrere einzellige Grundeinheiten aufgelöst werden, welche miteinander über Querträger verbunden sind. Bei Fahrbahnplatten mit getrenntem Mittelstreifen wird der Querschnitt in der Mitte ebenfalls getrennt, und es werden jeweils zwei Grundeinheiten symmetrisch angeordnet.

In seiner weiteren Entwicklung hat sich der Hohlkastenquerschnitt zum bevorzugtesten Querschnittstyp der Spannbrücken, insbesondere im Großbrückenbau, entwickelt. Dies ergab sich aus der Weiterentwicklung der Herstellungsverfahren in Form beweglicher Rüstung, die den Hohlkastenquerschnitt wegen seiner günstigen statischen Eigenschaften in ihren Mittelpunkt gestellt haben.

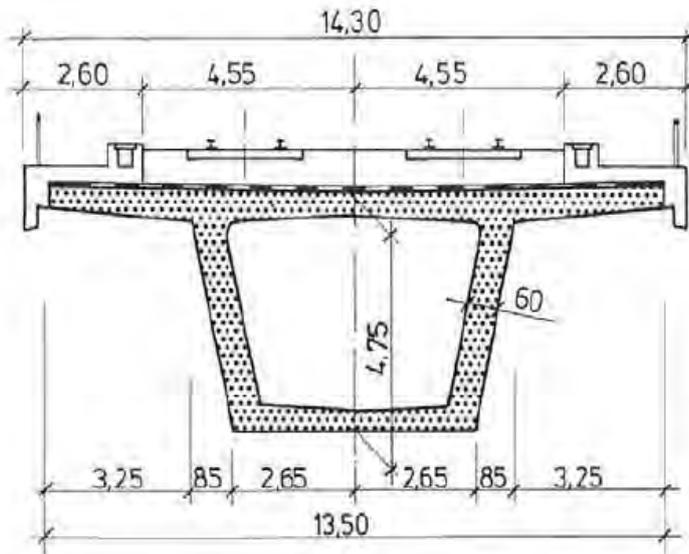


Abbildung 4 - Hohlkastenquerschnitt

## 2.2 Ausrüstungsteile der Quersysteme

### 2.2.1 Kappe, Distanzschutzplanke und Geländer

Die Kappe ist ein wichtiger Teil der Fahrbahnplatte, welcher das Aussehen der Brücke beeinflusst, die Fahrbahn seitlich begrenzt und in die die Distanzschutzplanken und Geländer (ggf. Lärmschutzelemente) verankert werden.

Obwohl Kappen praktisch immer monolithisch mit der Fahrbahnplatte verbunden sind, wird ihre mittragende Mitwirkung beim Nachweis der Tragfähigkeit nicht berücksichtigt. Dies geschieht, weil die Tragfähigkeit auch während einem eventuellen Ersatz der Kappe gewährleistet sein muss.

In der Querschnittsaufteilung einer Straßenbrücke bilden die Kappen den Schrammbordbereich. Hierdurch soll die mechanische Sicherung des Verkehrsraumes erreicht werden. Mit der mechanischen Sicherung des Verkehrsraumes soll eine sichere Führung des Kraftfahrzeuges erreicht werden, insbesondere soll ein Abstürzen der Fahrzeuge von der Brücke (Sicherung des Seitenstreifens) ein Ausbrechen der Fahrzeuge in die Fahrbahn (Sicherung des Mittelstreifens) vermieden werden.

Die Sicherung erfolgt durch stählerne Distanzschutzplanken. Diese geben die Beanspruchung über die Pfostenfußpunkte an die Kappe weiter, die ihrerseits über eine Anschlussbewehrung in den Kragarm des Überbaues ableiten.

Es gibt jedoch auch Kappenausbildungen ohne Distanzschutzplanken, die z.B. bei Brücken im innerstädtischen Bereich zur Anwendung kommen. Dies geschieht, weil dort Geh- und Radwege vorhanden sind. Die mechanische Sicherung des Verkehrsraumes findet durch einen Vorbord, der ca. 15 cm über die Fahrbahn hinausragt.

Der Absturz von Personen wird durch die Brückengeländer verhindert. Im Allgemeinen beträgt die Höhe der Geländer 1,10m. Sie sind somit nicht für die Aufnahme von Fahrzeuganprall dimensioniert.

### **2.2.2 Abdichtung und Belag**

Die Ausbildung der Fahrbahndecke - bestehend aus Abdichtung und Belag- ist für die Dauerhaftigkeit und den Unterhalt einer Brücke von größter Bedeutung. Die Abdichtung soll die Betonfläche der Fahrbahnplatte vor allem gegen die starken chemisch-physikalischen Einwirkungen durch Tausalze und Frost schützen. Der Oberflächenbeton der Fahrbahnplatte weist nie durchwegs eine ausreichende Dichtigkeit auf, um die Frost-Tausalz-Beständigkeit und einen genügenden Widerstand gegen Chlorideintrag des Betons zu leisten. So kann auf eine Abdichtung nicht verzichtet werden.

Der Belag bildet die Verschleißschicht der Fahrbahnfläche und hat zudem die Aufgabe, die empfindliche Abdichtung zu schützen und die Temperaturschwankungen in der Abdichtungsschicht zu vermindern.

### **2.2.3 Entwässerung**

Die Entwässerung soll das anfallende Regenwasser schnell und vollständig ableiten. Dies geschieht nicht nur aus Gründen der Verkehrssicherheit, sondern auch damit der Belag möglichst zügig austrocknen kann. In der Regel wird das Wasser über das Entwässerungssystem bis in die Kanalisation abgeleitet. Die Einlaufschächte und die Leitungen müssen aus einem abriebfesten, möglichst chloridresistenten Werkstoff bestehen. Normalerweise wird für die Ein-

laufschächte Grauguss und für die Leitungen ein möglichst zäher Kunststoff (z.B. Hartpolyäthylen, HDPE) verwendet.

Die Einlaufschächte sollten unabhängig von der Niederschlagsintensität im Hinblick auf eine schnelle Wasserableitung an den beiden Fahrbahnrandern in Abständen von ca. 15 m angeordnet werden. Mit den Einlaufschächten am höheren Brückenrand wird verhindert, dass Schmelzwasser quer über die Fahrbahn fließen kann.

Das Leitungssystem sollte durchwegs ein Mindestgefälle von 2 % aufweisen. Die Auswahl des Leitungsdurchmessers ist der Niederschlagsintensität entsprechend zu bestimmen.

## **3 Schädigungsmöglichkeiten**

### **3.1 Definition der Schädigung**

Bauwerke unterliegen während ihrer Nutzungsdauer einer Vielfalt diverser Schädigungsmechanismen. Unter einem Schädigungsprozess versteht man physikalische, chemische oder mechanische Prozesse, welche den Zustand eines Bauwerks verschlechtern und damit – ohne Gegenmaßnahmen – auch dessen Lebensdauer verkürzen. Schädigungsprozesse treten häufig nicht einzeln, sondern in Kombination auf, wobei sich die Einzelprozesse erheblich beeinflussen können.

### **3.2 Allgemeines zur Einteilung der Schäden**

Brückenbauwerke werden im Laufe ihrer Lebensdauer neben den Einwirkungen infolge von klimatischen Verhältnissen und der Chloridbelastung aus Winterdiensten, auch durch stark zunehmende Verkehrslasten und ggf. mechanische Einwirkungen beansprucht. Die daraus resultierenden Schäden wirken sich insbesondere auf die Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks aus. Durch die Veränderung von Werkstoffkennwerten und ggf. der Querschnittsabmessungen, z.B. im Falle der Korrosion, verändert sich auch der Bauteilwiderstand (Querschnittsverminderung aufgrund von Betonabplatzungen infolge Bewehrungskorrosion). Damit werden Schäden auch für die Nachweise - im Grenzzustand der Tragfähigkeit - relevant. (Schießl, P., Gehlen, C., Sodeikat, C. , 2004)

Die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit dürfen durch Bauwerksschäden, die im Laufe der Lebensdauer des Bauwerks entstehen können, nicht unzulässig vermindert werden, d.h. die Dauerhaftigkeit des Bauwerks muss während der gesamten Nutzungsdauer des Bauwerks sichergestellt werden (Zilch und Zehetmaier, 2010)

### 3.3 Schadensarten

Die Funktion des Stahlbetons beschränkt sich nicht nur auf die Tragfunktion. Die Betonhaut und der Überdeckungsбетон haben eine Schutzfunktion für die Bewehrung. Sie müssen gegenüber Einwirkungen physikalischer, chemischer und mechanischer Natur widerstandsfähig sein. Einwirkungen aus Umgebungseinflüssen können die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton verringern, indem sie zu den nachfolgenden Schadensbildern führen, die am häufigsten auftreten:

- *Gefügeschädigung des Betons*
- *Bewehrungskorrosion*

#### 3.3.1 Gefügeschädigung des Betons

##### Gefügeschädigung infolge von Frost- und Frost-Tausalz-Einwirkung

Bauteile, die Witterungseinflüssen unmittelbar ausgesetzt sind, müssen einen ausreichenden Frost- und Frosttausalz-Widerstand während der gesamten Nutzungsdauer besitzen. Frostwechsel betreffen die oberflächennahe Zone des Betons, wobei vor allem die Verteilung von Kapillar- und Luftporen von Bedeutung ist. Bei tiefen Außentemperaturen kann das an der Betonoberfläche reichlich vorhandene Wasser in den Kapillarporen („Porenwasser“) gefrieren. Die Volumenzunahme beim Übergang von Wasser zu Eis beträgt 9% des Wasservolumens. Bei erschwerter Expansion, z.B. bei Eisbildung in einer vollständig gefüllten Pore, entsteht ein hydraulischer Druck und eine entsprechende Sprengwirkung. Stehen nicht genügend Ausweichräume (wasserfreie Poren) zur Verfügung oder sind diese Poren zu weit voneinander entfernt, bauen sich Zugspannungen im Zementsteingefüge auf. Hierdurch wird die Sprengwirkung begünstigt. Frostschäden beginnen meist mit oberflächlichen Ablösungen von kleinen Mörtelteilchen, sie treten somit vor allem in wassergesättigtem Beton auf.

Bei einer kombinierten Einwirkung von Frost und Tausalz wird das oberflächennahe Betongefüge stärker beansprucht. Durch den plötzlichen Wärmeent-

zug beim Aufstreuen von Tausalzen kommt es zu einem in der oberflächennahen Schicht besonders ausgeprägten Temperaturabsturz, wodurch im Betongefüge beträchtliche Eigenspannungen verursacht werden. Das in den Beton eingedrungene Tausalz führt – je höher die Konzentration von Tausalz ist – zu entsprechend tieferen Gefrierpunkten im Porenwasser. Zunächst gefriert das Porenwasser an der Oberfläche und in einer tiefer liegenden Schicht, denn die Betontemperaturen sind in diesen Bereichen tiefer als die Gefrierpunktskurve des Porenwassers Abb.1.

ei  
:n  
3-

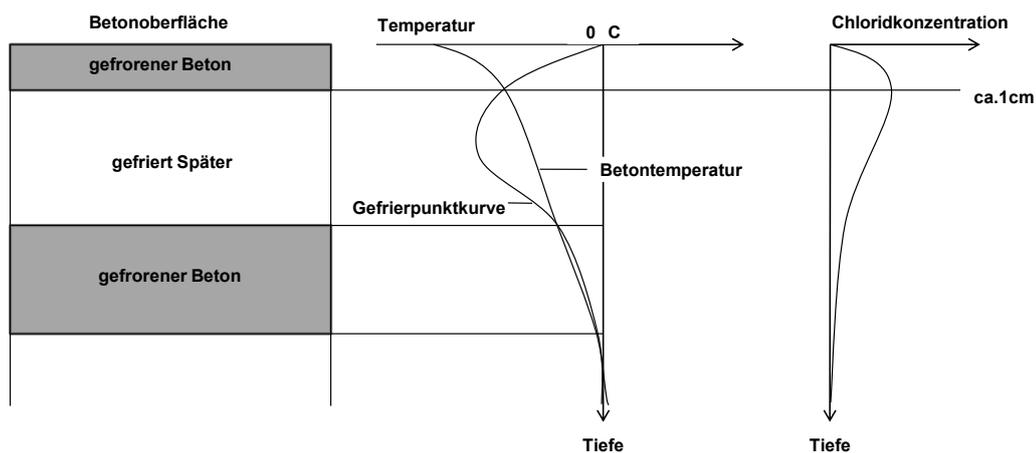


Abbildung 5 - Frost-Tausalz-Einwirkung

### Gefügeschädigung infolge Alkali-Kieselsäure Reaktion

Bei der treibenden Form der Betonzerstörung führt die Reaktion eines in den Beton eingedrungenen Stoffes mit Bestandteilen des Betons zu einem Produkt, das mit Volumenexpansion verbunden ist.

Bei einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion reagieren alkaliempfindliche Bestandteile der Gesteinskörnung mit den Alkalien (Kalium, Natrium) der Porenlösung im Beton zu einem Alkalisilicatgel, welches bestrebt ist, Wasser aufzunehmen. Unter ungünstigen Umständen vergrößert sich dabei das Volumen des

Alkalisilicatgels. Die damit verbundene Volumenvergrößerung wird als Treiben bezeichnet. Diese kann mit der Zeit so stark werden, dass lokal Quelldrücke auftreten, die das Betongefüge schädigen und äußerlich zu Netzzissen, Ausblühungen und Abplatzungen führen. Abb.2

Damit eine Schädigung infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion erfolgen kann, müssen gleichzeitig reaktive Zuschlagsstoffe, eine gewisse Feuchtigkeit und ein genügender Alkaligehalt im Beton vorhanden sein. Beim Fehlen eines der drei genannten Voraussetzungen tritt eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion nicht auf.



Risse im Hauptträger der Eisenbahnbrücke Kaltenkirchen infolge Alkalitreibens

**Abbildung 6 – Risse infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion**

Die Schadensbilder treten für gewöhnlich erst nach einem Zeitraum von 5 bis 10 Jahren und mehr auf. Dadurch kann die Dauerhaftigkeit des Betons beeinträchtigt werden, jedoch tritt eine Gefährdung der Standsicherheit tritt in der Regel nicht ein.

### 3.3.2 Korrosion

Die Korrosion des Betonstahls stellt bei Stahlbetonbrücken die wichtigste Schädigung im Hinblick auf den Einfluss der Tragfähigkeit dar. Grundsätzlich ist die Bewehrung in Stahlbetonbauteilen dauerhaft vor Korrosion geschützt. Dieser Schutz beruht auf der Alkalität der Porenlösung im Beton (pH-Werte 12,5-13,5), bei der sich eine Passivschicht aus Eisenoxiden auf der Stahloberfläche bildet. Die Eisenauflösung wird dadurch praktisch vollständig verhindert. Die Passivität der Stahloberfläche kann jedoch verloren gehen. Hierfür kommen zwei Vorgänge in Frage:

- *Absinken des pH-Wertes der Porenlösung durch Karbonatisierung des Betons auf Werte unter etwa 9.*
- *Überschreitung eines kritischen korrosionsauslösenden Grenzwertes für den Chloridgehalt (0,3 M.-% bis 0,5 M.-%) bezogen auf den Zementgehalt des Betons) an der Stahloberfläche durch eindringende Chloridionen.*

Die Wirkung der beiden Vorgänge wird unter dem Begriff der Depassivierung der Stahloberfläche zusammengefasst. Bei ausreichendem Feuchtigkeits- und Sauerstoffangebot kann als Folge der Depassivierung Korrosion der Bewehrung auftreten. Infolge einer karbonatisierungsinduzierten Korrosion erfolgt dann ein gleichmäßiger Abtrag, infolge chloridinduzierter Korrosion dagegen ein lokaler Abtrag, der als Lochfraßkorrosion bezeichnet wird.

Damit es also zur Bewehrungskorrosion kommt, müssen drei Voraussetzungen gleichzeitig erfüllt sein: (Abb. 3):

- *Es muss ein leitendes Medium (Elektrolyt) vorhanden sein. Beton mit einem gewissen Feuchtigkeitsgehalt wirkt in der Regel als Elektrolyt.*
- *Die sehr dünne, oxidische Schutzschicht (Passivschicht) die den Bewehrungsstahl umgibt ist infolge Karbonatisierung oder Anwesenheit von Chloriden zerstört, d.h. der Bewehrungsstahl ist depassiviert.*
- *Sauerstoff ist durch den Beton bis zur Bewehrung vorgedrungen. Diese Bedingung ist immer erfüllt, außer bei Bauteilen, die sich ständig unter Wasser befinden. (Brühwiler, Menn, 2003)*

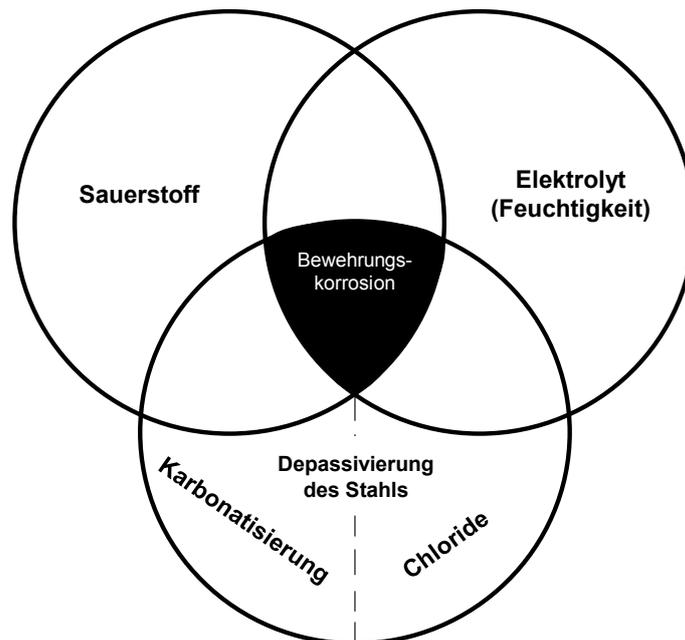


Abbildung 7 – Voraussetzungen einer Korrosion

Die Korrosion des Betonstahls ist nur dann möglich, wenn alle genannten Voraussetzungen erfüllt sind.

Aufgrund der Volumenzunahme der Korrosionsprodukte um das 2-bis 6-fache gegenüber nicht korrodiertem Stahl, entstehen Zugspannungen und Sprengdrücke im Beton, die zu Längsrissen und zu Abplatzungen der Betondeckung und letztendlich auch zum Verlust der Tragfähigkeit führen können (Von HUNKELER).

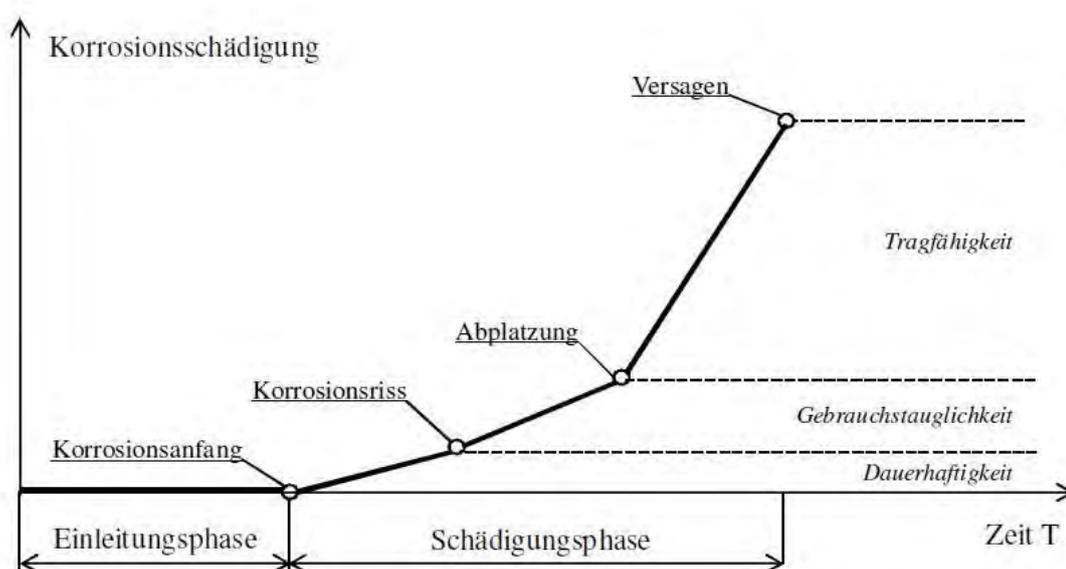
Der Schädigungsvorgang von Stahlbeton infolge Bewehrungskorrosion kann in zwei Phasen unterteilt werden Abb.4:

### **Einleitungsphase**

In der Einleitungsphase erfolgt die Karbonatisierung des Betons und/oder die Chloride dringen von der Oberfläche zur Bewehrung vor. Die Einleitungsphase beginnt mit dem Betonbau und dauert bis zur Depassivierung des Bewehrungsstahls.

### Schädigungsphase

Während der Schädigungsphase korrodiert die Bewehrung. Der Korrosionsprozess ist mit einer Volumenvergrößerung des Bewehrungsstahls im Inneren des Betonkörpers verbunden, dies kann zum Absprennen des überdeckenden Betons führen. Die Dauer dieser Phase hängt von der Korrosionsgeschwindigkeit ab. Das Ende der Schädigungsphase ist gleichbedeutend mit einem durch den Querschnittsverlust der Bewehrung bedingten Grenzzustand der Tragfähigkeit oder der Gebrauchstauglichkeit des Bauteils.



Grenzzustände eines Korrosionsprozesses in Abhängigkeit der Zeit TUUTTI

Abbildung 8 – Grenzzustände eines Korrosionsprozesses in Abhängigkeit der Zeit

Die Korrosionsgeschwindigkeit ist kein konstant bleibender Wert, sondern vor allem bei Feuchtigkeitswechseln stark variabel. Bei karbonisierten Bauteilen, die nur durch Kondenswasser befeuchtet werden, ist die Korrosion sehr langsam und flächenhaft. Eine hohe Korrosionsgeschwindigkeit liegt dagegen bei chloridinduzierter Korrosion bei Bauteilen, die regelmäßig befeuchtet werden, in Form von Lochfraß vor. (Brühwiler, Menn, 2003)

Im Rahmen des DURACRETE Projektes wurden Abtragsraten bei der Bewehrungskorrosion in Abhängigkeit der Expositionsklasse des Betons für den praktischen Gebrauch angegeben (Abb. 9). Die Korrosionsgeschwindigkeit hängt

u.a. von der relativen Luftfeuchtigkeit, der Betonfeuchtigkeit, der Temperatur des Betons, des Typs der Korrosion etc. ab.

Abtragsraten bei der Bewehrungskorrosion  $i_{corr}$  in Abhängigkeit von der Expositionsklasse gemäß DURACRETE

Expositionsklasse		Korrosionsgeschwindigkeit, $\mu\text{m}/\text{Jahr}$		Nasszeit (Mittelwert)
		Mittelwert	Standardabweichung	
Korrosion infolge Karbonatisierung				
XC1	trocken	0		
XC2	nass, selten trocken	4	3	1
XC3	mäßige Feuchte (unbewittert)	2	1	0,5
XC4	wechselnd nass und trocken	5	3	0,75
Chloridinduzierte Korrosion				
XD1	nass, selten trocken	4	3	1
XD2	wechselnd nass und trocken	30	20	0,75
XS1	salzhaltige Luft	30	20	0,5
XS2	ständig unter Wasser	Korrosion ist nicht zu erwarten, ausgenommen bei schlechtem Beton und/oder ungenügender Überdeckung		
XS3	Tidebereich	70	40	1

Abbildung 9 – Korrosionsgeschwindigkeit gemäß Duracrete

Die Korrosionsrate von Stahl in "gesundem" Beton wird in DURACRETE mit  $1,1 \mu\text{m}/\text{Jahr}$  angegeben.

Ähnliche Ergebnisse wie in Abb.9 werden auch in Bertolini et al. Veröffentlicht. Die obige Tabelle zeigt, dass die Korrosionsgeschwindigkeit bei chloridinduzierter Korrosion im Gegensatz zur karbonatisierungsinduzierten Korrosion deutlich höher ist.

Neben der karbonatisierungs- und chloridinduzierten Bewehrungskorrosion spielt die wasserstoffinduzierte Spannungsrissskorrosion eine wichtige Rolle.

Unter der Spannungsrissskorrosion (SRK) wird die Ausbreitung von Rissen in Werkstücken unter gleichzeitiger Einwirkung von Korrosion und statischer mechanischer Zugspannung verstanden. (Lingemann, 2009)

Bei der Spannungsrissskorrosion, die in der Regel im Spannbetonbau auftritt, handelt es sich um die wasserstoffinduzierte Spannungsrissskorrosion. Damit es zu dieser kommt, müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein (Abb.10):

- *Empfindlichkeit des Werkstoffes*
- *Aufhebung der Passivität bzw. Zutritt von korrosionsfördernden Medien zur Stahloberfläche*
- *Mechanische Belastung des Werkstoffes*

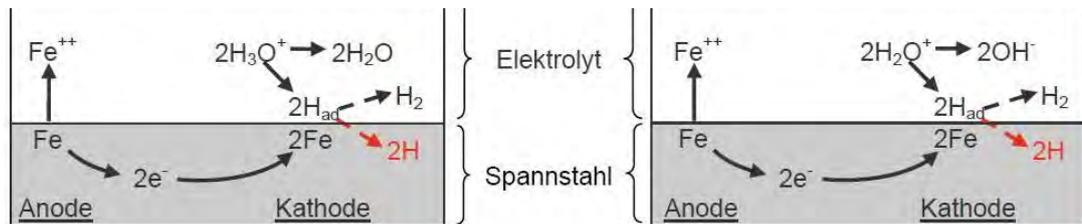


**Abbildung 10- Voraussetzungen einer Spannungsrissskorrosion**

Die Nichterfüllung einer Randbedingung reicht aus, um die wasserstoffinduzierte SRK zu verhindern. SRK tritt in der Regel nur bei Werkstoffen auf, die eine hohe Empfindlichkeit gegen SRK aufweisen.

Durch die Aufhebung der Passivität des Werkstoffes kann eine flächige Korrosion der Werkstoffoberfläche stattfinden. Die hierbei ablaufenden chemischen Reaktionen sind in der Abb. 11 dargestellt. Abhängig vom pH-Wert stellen sich unterschiedliche Reaktionen ein, bei denen jeweils im Bereich der Kathode Wasserstoff produziert wird, welcher an der Spannstahloberfläche in atomarer Form absorbiert wird.

Abbildung 11 – Chemische Reaktion bei flächiger Korrosion des Spannstahls



Darstellung der chemischen Reaktionen bei flächiger Korrosion des Spannstahls in einem Elektrolyten mit Wasserstoffentwicklung an der Kathode

Beim Erreichen einer kritischen Wasserstoffkonzentration oder infolge einer mechanischen Zugbeanspruchung kann es zur Bildung eines Anrisses kommen. Unter hoher Zugbeanspruchung genügt bei empfindlichen Stählen schon seine sehr niedrige Wasserstoffkonzentration um einen Risswachstum auszulösen. Im Gegensatz dazu genügt bei entsprechender Wasserstoffkonzentration schon eine niedrige mechanische Belastung (ca. 10 % der Streckgrenze), damit es zu einer wasserstoffinduzierten SRK kommt (Nürnberger, 1995).

Bei empfindlichen Spannstählen kann unter ungünstigen Bedingungen schon die Eigenspannung aus dem Herstellprozess des Spannstahls zur Bildung von Anrissen und zum Risswachstum bis hin zum Versagen führen (Isecke u. a. 1995).

Korrosionsnarben (z.B. infolge chloridinduzierter Lochfraßkorrosion) begünstigen die Aufnahme von Wasserstoff. In Bereichen von Anrissen bzw. Korrosionsnarben kann sich der Wasserstoff anreichern und ein kontinuierliches Risswachstum bis zum Versagen des Spannstahls verursachen (Grimme u.a., 1983).

Die Gefahr der SPK liegt vor allem darin, dass z.B. In Brückenbauwerken, welche empfindlichen Spannstahl enthalten, unbemerkt Spannstahlbrüche auftreten können, welche zu einem schlagartigen Versagen führen. Der Bruch des Werkstoffes infolge SRK erfolgt plötzlich und ohne nennenswerte Bruch einschnürung. Die Korrosionsgeschwindigkeit der wasserstoffinduzierten SRK ist u.a. abhängig von der Intensität der Wasserstoffentwicklung, der Höhe der Zugspannungen sowie der Empfindlichkeit des Stahls.

### 3.3.3 Ermüdung

Die Schädigung infolge von Ermüdung ist ein schleichender Prozess, der sich über einen weiten Zeitraum erstrecken kann. Betontragwerke, die einer Vielzahl von Lastwechseln ausgesetzt sind, wie z.B. Brücken durch hohe Verkehrslasten, können eine Zerstörung des Materialgefüges oder das Versagen eines Bauteils erleiden, selbst wenn die aufgebrachten Beanspruchungen weit unterhalb des statischen Tragvermögens liegen. Dieses Phänomen wird als Ermüdung bezeichnet (Brühwiler, Menn, 2003).

#### **Ermüdung des Betons**

Ermüdung spielt bei Beton und vor allem bei Massivbrücken eher eine untergeordnete Rolle, da aufgrund des meist hohen Eigengewichts die schwingungserzeugende Einwirkung sehr niedrig ist. Für Straßenbrücken werden jedoch meist schon durch die Begrenzung der Druckspannungen im Gebrauchszustand die Ermüdungsnachweise erfüllt.

#### **Ermüdung des Betonstahls**

Die Ermüdungsschädigung eines Stahlstabes beginnt mit der Mikrorissbildung an einem Ort mit hoher Spannungskonzentration. Es folgt die Phase des stabilen Risswachstums und schließlich bricht der Stab schlagartig ab. Die wichtigsten Parameter zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens sind die aufgebrachte Spannungsdifferenz  $\Delta\sigma$  und die ertragbare Anzahl an Spannungswechseln.

#### **Ermüdung des Spannstahls**

Der Spannstahl unterliegt grundsätzlich den gleichen Ermüdungseinflüssen wie der Betonstahl. Bei nachträglich injizierten Spanngliedern wirkt sich zudem die Reibung sowohl zwischen Spannstahl und Hüllrohr als auch zwischen den einzelnen Litzen oder Drähten maßgeblich auf die Ermüdungsschädigung aus. Diese Form der Ermüdung wird als Reibermüdung bezeichnet.

### 3.3.4 Schädigungen infolge Brandbeanspruchung und Anprall

#### 3.3.4.1 Schädigung infolge Brandbeanspruchung

Beton mit mineralischen Gesteinskörnungen ist nach DIN 4102 ein nicht brennbarer Baustoff der Klasse A1. Der Beton leitet den Brand nicht weiter, ergibt zudem selbst keine Brandlast und bildet keinen Rauch oder toxische Gase. Dennoch können im Brandfall an Stahlbetonbauwerken infolge der großen Spannungen große Schäden entstehen, die bis zum Einsturz des Bauwerks führen können.

#### **Beton:**

Der Abfall der Betonfestigkeit ist bis ca. 200 °C minimal. Bei Temperaturen des Betons über 100 °C verdampft das darin enthaltene Wasser. Kann dieser Wasserdampf nicht entweichen (bei dichten Betonen), kommt es zu massiven Betonabplatzungen. Bei höheren Temperaturen fällt die Festigkeit beachtlich ab und kann bei 500 °C schon bis auf 50 % der normalen Druck- und Spaltzugfestigkeit abgesunken sein. Aufgrund der relativ schlechten Wärmeleitfähigkeit des Betons, werden Temperaturen von bis zu 500 °C im Inneren des Querschnitts nicht erreicht.

#### **Betonstahl und Spannstahl :**

Betonstahl ist wesentlich temperaturempfindlicher als Beton. Schon bei verhältnismäßig geringen Brandtemperaturen beginnt der Stahl sich auszudehnen. Die Dehnung ist dabei nicht nur von der Höhe der Brandtemperatur sondern auch von der Dicke des Überdeckungsbetons abhängig. Aufgrund der besseren Wärmeleitfähigkeit des Stahls erwärmt dieser sich auch in Bereichen, in denen der Beton noch kühler ist. Hierdurch kommt es zu Dehnungsdifferenzen zwischen Stahl und Beton, welche zu Abplatzungen des Überdeckungsbetons führen. Dies ist der Grund, dass der Stahl dann direkt der Brandeinwirkung ausgesetzt ist.

Bei etwa 500 °C erreicht der Stahl seine Fließgrenze, dabei sind hochwertige und kaltverformte Stähle in der Regel empfindlicher gegen Brandtemperaturen. Bei Spannstahl liegt die kritische Grenze knapp über 350 °C. Sinkt in einem Stahlbetonbauteil die Fließgrenze des Stahls unter die von ihm aufzunehmende Spannung, dann ist die Tragfähigkeit des Bauteils erschöpft. Zunächst wird es sich verformen und bei weiterer Belastung versagen.

#### **3.3.4.2 Schädigung durch den Anprall**

Bei Bauteilen der Quersysteme wie Geländer, Distanzschutzplanken und Trogwände (Trogquerschnitt) besteht eine erhöhte Gefahr des Anpralls durch ein Fahrzeug. Eine Schädigung dieser Art bedeutet jedoch nicht den Verlust der Tragfähigkeit. Die Größe der Deformation bzw. der Schädigung spielt im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit eine wichtige Rolle.

### **3.4 Schadensmerkmale**

Brücken weisen im Laufe ihrer Lebensdauer eine Vielzahl von Schädigungen auf, die messbare wie sichtbare Spuren am Bauwerk hinterlassen. Diese Schädigungen besitzen wesentliche Merkmale die im Rahmen einer visuellen Inspektion erkannt werden können. Auf Grundlage dieser Schadensmerkmale lässt sich eine Aussage über die Art der Schädigung und deren Auswirkung auf die Tragfähigkeit des Bauwerks treffen.

Es werden nachfolgend dabei nur die Merkmale und Schäden betrachtet, die auch im Rahmen einer solchen Prüfung mit der üblichen Prüfausrüstung erkannt werden können. Grundsätzlich kann bei Stahlbetonbrücken die Unterscheidung der Schäden in betonschädigend, in betonschädigend mit Auswirkungen auf den Betonstahl und in betonstahlschädigend erfolgen.

#### **3.4.1 Betonschädigende Merkmale**

Zu den wesentlichen betonschädigenden Merkmalen bzw. Mängeln an einem Brückenbauwerk, die im Rahmen einer visuellen Inspektion erkannt werden können, gehören Ausblühungen und die Betonkorrosion infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion (chemischer Angriff) sowie infolge von Tausalzschäden (physikalischer Angriff).

### **Ausblühungen**

Die Ausblühungen bilden sich durch lösliche Salze, die sich durch das Wasser im Beton auflösen und damit auch an die Oberfläche des Betons gelangen und sich durch chemische Reaktionen oder beim Verdunsten ablagern. In Erscheinung treten diese als einheitliche Verfärbung oder als lokal begrenzte Verkrustung an den Stellen auf, an denen Wasser im Beton zu finden ist. Sie bilden sich dicht unter der Betonoberfläche und werden erst dann sichtbar, wenn das kristalline Wachstum ein Ausmaß erreicht hat, um die Salze durch Abplatzungen freizulegen. Sofern noch keine wesentlichen Abplatzungen des Betons entstanden sind, haben die Ausblühungen keinen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften. Sie geben aber deutliche Hinweise auf mögliche Schäden am Bauwerk wie z. B. poröse Stellen und Risse.

### **Betonkorrosion**

Die Wirkung äußerer Einflüsse bzw. eingedrungener Stoffe, den Beton chemisch und/oder physikalisch zu verändern, nennt man Betonkorrosion. Sie wird bei Brücken primär durch physikalischen, seltener durch chemischen Angriff, verursacht.

### **Schadensmerkmale infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion**

Durch die starke Volumenzunahme des Alkalisilicatgels und die dadurch resultierenden lokalen Quelldrücke wird das Betongefüge geschädigt. Dies kann zu äußerlich sichtbaren Netzzissen, Ausblühungen und Abplatzungen führen. Diese Risse lassen sich jedoch optisch nicht einwandfrei von Rissen unterscheiden, die aufgrund anderer Schadensabläufe, z. B. aufgrund eines Frostangriffs, entstanden sind. Wird in Bauteilen eine schädigende AKR vermutet, muss grundsätzlich eine eingehende Untersuchung durch einen Sachverständigen erfolgen, um zu klären, ob eine schädigende AKR vorliegt.

### **Schadensmerkmale infolge einer Frost - und Frost-Tausalzbeanspruchung**

Das bekannte Beispiel für den physikalischen Angriff ist die Frost- und Frost-Tausalzbeanspruchung. Eine entscheidende Rolle spielt dabei das gleichzeitige Einwirken von Taumitteln in Form von Chloriden sowie das Auftreten von Frost. Das wiederholte Frieren und Tauen von Beton führt zur Zerstörung der Betonstruktur. Es entstehen die typischen Schadensbilder der Zerbröselung, Abschalung und Aussprengung infolge von Gefrierdruck im Beton, Temperaturschock mit entstehenden Eigenspannungen sowie durch schichtweises Gefrieren des Betons (Nürnberger ,1995).

#### **3.4.2 Betonschädigende Merkmale mit Auswirkungen auf den Betonstahl**

Das Auftreten von Chloriden, die Karbonatisierung des Betons sowie Risse und Abplatzungen am Bauwerk haben wesentlichen Einfluss in Hinblick auf die Dauerhaftigkeit des Betons und damit auf dessen Schutzwirkung für den Betonstahl.

##### **Chloridschäden**

Zu den häufigsten Schadensarten an Brückenbauwerken zählen in den letzten Jahren infolge der Zunahme der Verwendung von Streusalz im Winter die Chloridschäden. Die hohen Chloridanreicherungen im Beton treten dann auf, wenn dieser chloridhaltiges Wasser aufsaugt und später wieder austrocknet. Wenn die Salze die Passivierungsschicht durchdringen und somit ein Potentialgefälle im Bewehrungsstahl erzeugen, entsteht die typische Lochfraßkorrosion. Findet ein Transport der im Wasser gelösten Chloride im Bauwerk statt oder diffundieren die Chloride durch ein Konzentrationsgefälle an die Oberfläche, so kann es zu Ausblühungen kommen. Sind bräunliche bis schwarze Ausblühungen zu erkennen, so deuten diese auf eine bereits fortschreitende Korrosion der Betonstahlbewehrung und eine ggf. beschädigte Abdichtung der Brückentafel hin. Neben den Ausblühungen treten meist auch Abplatzungen am Betonquerschnitt auf, wenn die Chloride nicht bis an die Oberfläche diffundieren, sondern im Beton mit entsprechender Volumenzunahme kristallisieren.

### **Karbonatisierung**

Bei der Karbonatisierung des Betons wandelt das mit der Luft eindiffundierende CO<sub>2</sub> das in der Porenflüssigkeit vorhandene Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat um. Kann kein Calciumhydroxid mehr nachgelöst werden, so sinkt der pH-Wert nach vollständiger Karbonatisierung von ca. 13 auf 8,3. Liegt der Betonstahl bereits im karbonatisierten Bereich, beginnt beim Vorhandensein von Feuchtigkeit und Sauerstoff die Korrosion. Dabei führen Risse zu einer beschleunigten Karbonatisierung.

### **Risse**

Solange Risse in Stahlbetonbauwerken die zulässigen Breiten nicht überschreiten, tritt im Allgemeinen keine Schädigung der Struktur auf. Bei einer Chloridbeanspruchung ist eine geringe Rissbreite dagegen für die Chlorideintragung nur von zeitlich verzögerndem Einfluss. Chloride sind in der Lage auch in kleinste Risse zu gelangen. Bei größeren Rissbreiten infolge von äußeren Einwirkungen oder infolge von Eigenspannungen des Betons kann jedoch die schützende Wirkung des Betons für die Bewehrung verloren gehen und es kann ggf. eine Querschnittsminderung auftreten. Längsrisse am Überbau einer Brücke sind besonders zu beachten, da diese auf eine fortschreitende Korrosion der Bewehrung sowie auf den Verlust des Verbundes der Betonstahlbewehrung mit dem Beton schließen lassen. Größere Risse infolge von unplanmäßigen Einwirkungen sowie erkennbare Trennrisse in der Konstruktion sind gesondert zu behandeln.

### **Abplatzungen**

Diese Querschnittsverminderung tritt auf, wenn die Druckzone des Betons aufgrund von zu hohen Druckspannungen versagt oder bei korrosionsbedingtem Abplatzen der Betondeckung aufgrund der Sprengwirkung der voluminösen Korrosionsprodukte. Dies betrifft vor allem Konstruktionen mit geringer Betongüte und mit einer kleinen Betondeckung. Diese Querschnittsreduktion wirkt sich auf die Tragfähigkeit des Bauteils aus. So z. B. bei einer Biegebeanspruchung aufgrund des verkleinerten Hebelarmes der inneren Kräfte bei einer Abplatzung in der Druckzone. Im Bereich der Betonstahlbewehrung geht die Schutzwirkung des Betons verloren.

### **3.4.3 Betonstahl und Spannstahlschädigende Merkmale**

Die Korrosion des Betonstahls stellt bei Stahlbetonbrücken die wichtigste Schädigung im Hinblick auf den Einfluss auf die Tragfähigkeit dar. Diese kann im Rahmen einer handnahen visuellen Bauwerksprüfung gut identifiziert werden. Infolge karbonatisierungsinduzierter Korrosion erfolgt dann meist ein gleichmäßiger Abtrag, infolge chloridinduzierter Korrosion dagegen ein lokaler Abtrag, der als Lochfraß bezeichnet wird. Im Rahmen einer visuellen Bauwerksprüfung kann dies durch die Färbung der Rostfahnen erkannt werden. Schwarz gefärbte Rostfahnen deuten auf eine chloridinduzierte Korrosion hin, hingegen rot bis bräunliche Färbung auf die karbonatisierungsinduzierte Korrosion hinweist.

Aufgrund der Volumenzunahme der Korrosionsprodukte um das 2- bis 6-fache gegenüber unkorrodiertem Stahl, entstehen Zugspannungen und Sprengdrücke im Beton, die zu Längsrissen und letztendlich zu Abplatzungen der Betondeckung führen.

Weitere Schädigungen am Beton oder am Betonstahl infolge außergewöhnlicher Einwirkungen wie z. B. Schädigungen durch Anprall, Brandschäden etc. müssen stets im Einzelfall beurteilt werden.

## 4 Abbildung von Systemelementen durch Module

### 4.1 Systembeschreibung

Bauwerke bestehen aus einer Vielzahl von Komponenten, die auf unterschiedliche Art und Weise in Beziehung zueinander stehen. Zunächst müssen im Zuge einer Systembeschreibung die tabellarische Auflistung und grafische Darstellung („Zerlegung“) der wesentlichen Systemelemente eines Bauwerks durchgeführt werden (Müller, Voel .2009)

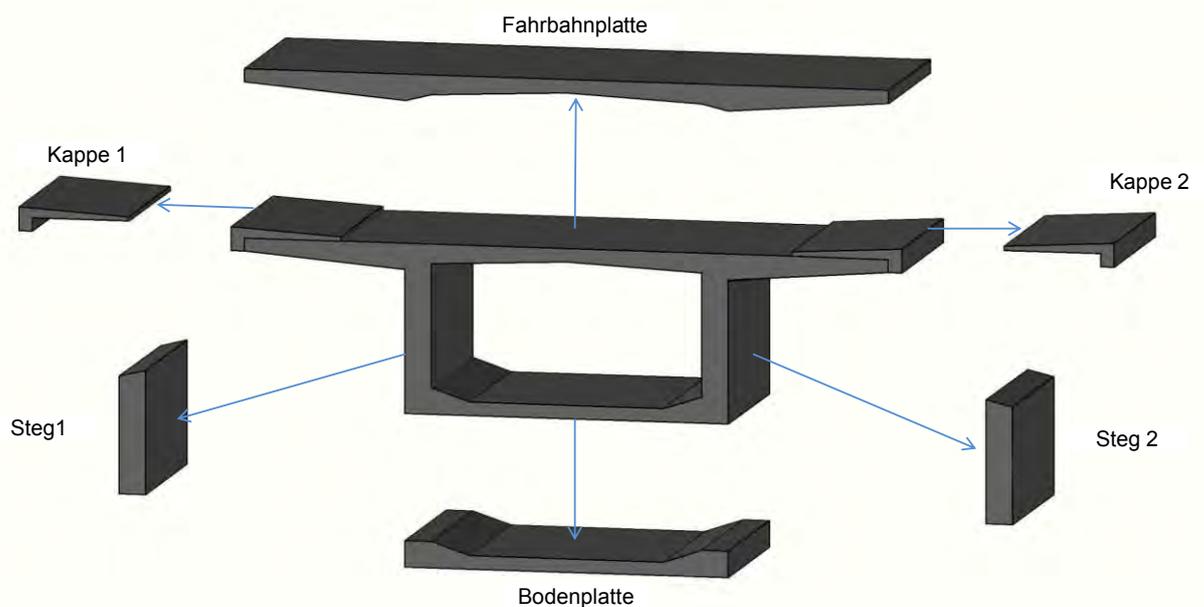


Abbildung 12 – Systembeschreibung Hohlkastenquerschnitt

Der Hohlkastenquerschnitt wird im ersten Schritt der Systembeschreibung in seine wesentlichen Systemelemente zerlegt, die für die Tragfähigkeit des Systems von Bedeutung sind. Diese sind die Fahrbahnplatte, die beiden Stege und die Bodenplatte. Obwohl die Kappen praktisch immer monolithisch mit der Fahrbahnplatte verbunden sind, wird ihre mittragende Mitwirkung beim Nach-

weis der Tragfähigkeit nicht berücksichtigt. Daher wird die Kappe in der Systembeschreibung als nichttragendes Bauteil gesehen.

Die Querschnittelemente eines Brückenträgers (Fahrbahnplatte, Stege, Bodenplatte) üben gleichzeitig verschiedene Tragfunktionen aus. Grundsätzlich lassen sich die Tragfunktion in Längsrichtung und die Tragfunktion in Querrichtung unterscheiden. Die Fahrbahnplatte trägt zur Querverteilung der Lasten bei. Sie dient in Längsrichtung der Aufnahme der Biegedruckkraft und in Querrichtung der Lastaufnahme der Fahrbahnlasten und Weitergabe an die Trägerstege. Die beiden Stege werden neben dem Schub (Querkraft) aus der Längstragrichtung auch durch eine von der Fahrbahnplatte übertragene Querbiegung beansprucht. Die Bodenplatte wird zur Aufnahme der Biegezugkräfte aus der Längsträgerbiegung benötigt. In Querrichtung ergänzt sie den Querschnitt zu einer torsionssteifen Zelle, die es ermöglicht außermittige Beanspruchungen gleichmäßig auf die Hauptträger aufzuteilen.

Im zweiten Schritt der Systembeschreibung wird der Hohlkastenquerschnitt in seine wesentlichen Systemelemente (Ausrüstungsteile) zerlegt die für Gebrauchstauglichkeit des Systems von Bedeutung sind. Diese sind der Belag, die Abdichtung, die Entwässerung, die Distanzschutzplanken und die Geländer. Diese Systemelemente haben keinen Einfluss auf den Grenzzustand der Tragfähigkeit, jedoch sind sie für die Dauerhaftigkeit der Betonkonstruktion und der Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks von großer Bedeutung. Daher werden sie



Abbildung 13 – Systembeschreibung Hohlkastenquerschnitt (Ausrüstungsteile)

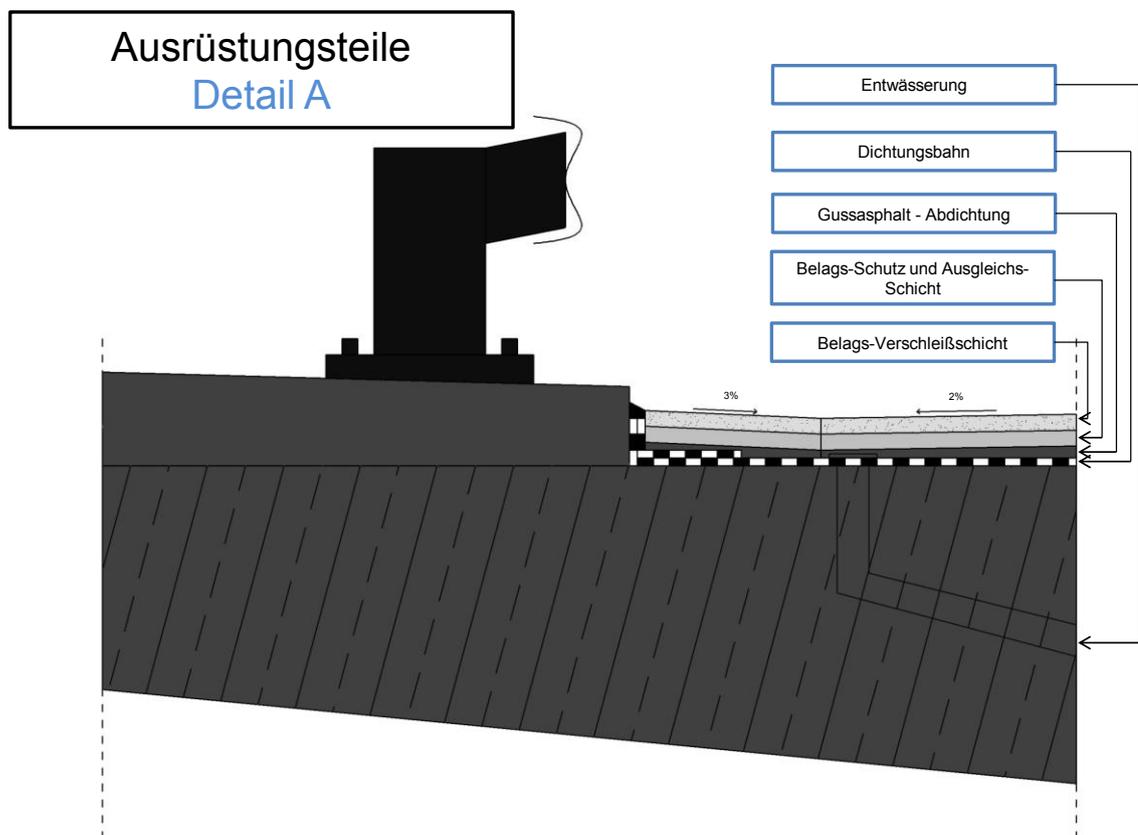
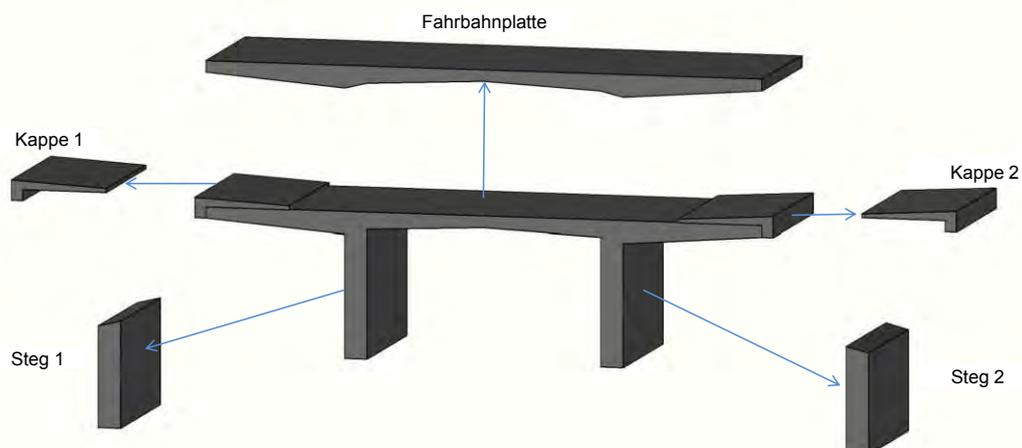


Abbildung 14 – Ausrüstungsteile Detail A

Für die Systembeschreibung der weiteren Querschnittstypen ist die Vorgehensweise identisch. Im ersten Schritt findet die Zerlegung der Systemelemente, welche für die Tragfähigkeit des Systems relevant ist statt und im zweiten Schritt die Zerlegung der Systemelemente, die für die Gebrauchstauglichkeit des Systems von Bedeutung ist. Die Abbildungen 11,13 und 15 zeigen die Systembeschreibung des Plattenbalkenquerschnitts, Trogquerschnitts und des Massivplattenquerschnitts.



**Abbildung 15 – Systembeschreibung Plattenbalkenquerschnitt**

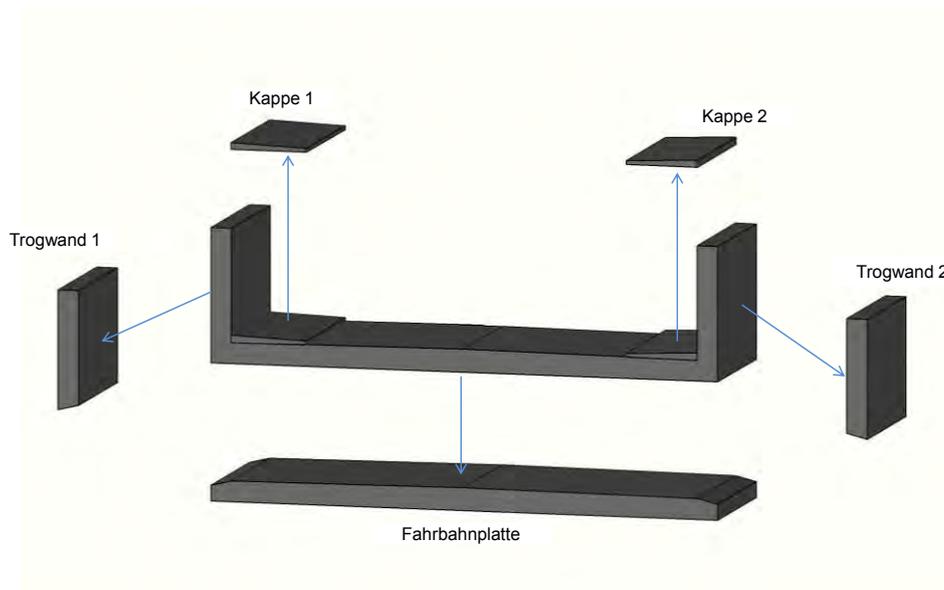
Die wesentlichen Systemelemente beim Plattenbalkenquerschnitt, die für die Tragfähigkeit von Bedeutung sind, sind die Fahrbahnplatte und die beiden Stege. Die Kappen werden als nichttragende Bauteile gesehen.

Die Fahrbahnplatte übernimmt die örtliche Beanspruchung aus den Fahrbahnlasten und leitet diese an die Hauptträger weiter. Sie ist im Querschnitt das Nebentragglied und ist für das Tragverhalten des gesamten Querschnittes von untergeordneter Bedeutung. Die beiden Stege werden neben dem Schub (Querkraft) aus der Längstragrichtung auch durch eine von der Fahrbahnplatte übertragene Querbiegung beansprucht.

Die wesentlichen Systemelemente die für die Gebrauchstauglichkeit des Systems wässerung, die D



**Abbildung 16- Systembeschreibung Plattenbalkenquerschnitt (Ausrüstungsteile)**



**Abbildung 17 Systembeschreibung Trogquerschnitt**

Die wesentlichen Systemelemente beim Trogquerschnitt die für die Tragfähigkeit von Bedeutung sind, sind die Fahrbahnplatte und die beiden Trogwände. Die Kappen werden als nichttragende Bauteile gesehen.

Die Fahrbahnplatte übernimmt die örtliche Beanspruchung aus den Fahrbahnlasten und leitet diese an die Hauptträger weiter. Die Trogwände werden durch Schub ( Querkraft ) aus der Längstragrichtung beansprucht. Diese werden beim Trogquerschnitt auch gleichzeitig als Geländer genutzt.

Die wesentlichen Systemelemente die für die Gebrauchstauglichkeit des Systems von Bedeutung sind, sind der Belag, die Abdichtung, die Entwässerung und die



**Abbildung 18 – Systembeschreibung Trogquerschnitt (Ausrüstungsteile)**

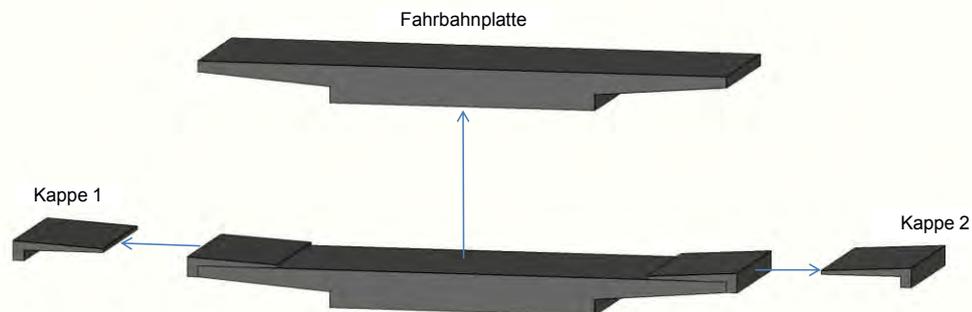


Abbildung 19 - Systembeschreibung Massivplattenquerschnitt

Das wesentliche Systemelement beim Massivplattenquerschnitt, das für die Tragfähigkeit von Bedeutung ist, ist die Fahrbahnplatte. Die beiden Kappen werden als nichttragende Bauteile gesehen.

Die Fahrbahnplatte als Hauptträger wird senkrecht zu ihrer Mittelfläche belastet und trägt die Belastung in zwei in der Regel senkrecht zueinander stehenden Richtungen ab. Hierbei verteilen sich die Beanspruchungen aus Einzel- und Teilflächenlasten in jeder Tragrichtung entsprechend dem Biegeverhalten der Platte auf eine zugehörige mitwirkende Breite.

Die wesentlichen Systemelemente die für die Gebrauchstauglichkeit des Systems,



Abbildung 20 - Systembeschreibung Massivplattenquerschnitt (Ausrüstungsteile)

**Tabellarische Auflistung der Systembeschreibungen**

Querschnittstyp	Systemelemente (GZT)	Systemelemente (GZG)
Hohlkastenquerschnitt	Fahrbahnplatte	Kappe 1/2
	Steg 1/2	Belag
	Bodenplatte	Abdichtung
		Entwässerung
		Distanzschutzplanke 1/2
		Geländer 1/2

Querschnittstyp	Systemelemente (GZT)	Systemelemente (GZG)
Plattenbalkenquerschnitt	Fahrbahnplatte	Kappe 1/2
	Steg 1/2	Belag
		Abdichtung
		Entwässerung
		Distanzschutzplanke 1/2
		Geländer 1/2

Querschnittstyp	Systemelemente (GZT)	Systemelemente (GZG)
Trogquerschnitt	Fahrbahnplatte	Kappe 1/2
	Trogwände 1/2	Belag
		Abdichtung
		Entwässerung
		Distanzschutzplanke 1/2

Querschnittstyp	Systemelemente (GZT)	Systemelemente (GZG)
Massivplattenquerschnitt	Fahrbahnplatte	Kappe 1/2
		Belag
		Abdichtung
		Entwässerung
		Distanzschutzplanke 1/2
		Geländer 1/2

## 4.2 Untergliederungen der Tragsysteme in Querrichtung

Die einzelnen Systemelemente stehen zueinander in Beziehung und bilden zusammen das Quersystem in Tragrichtung. Die Systemelemente bestehen aus Ausrüstungsteilen und Baustoffen durch die sie ihre Eigenschaften erhalten. Folgend werden den wesentlichen Systemelementen (hellgrau), welche für die Tragfähigkeit des Quersystems verantwortlich sind, die Ausrüstungsteile (rot) und Baustoffe (grau) zugeordnet und ihre Beziehungen untereinander graphisch dargestellt.

### 4.2.1 Untergliederung des Hohlkastenquerschnitts im Feldbereich

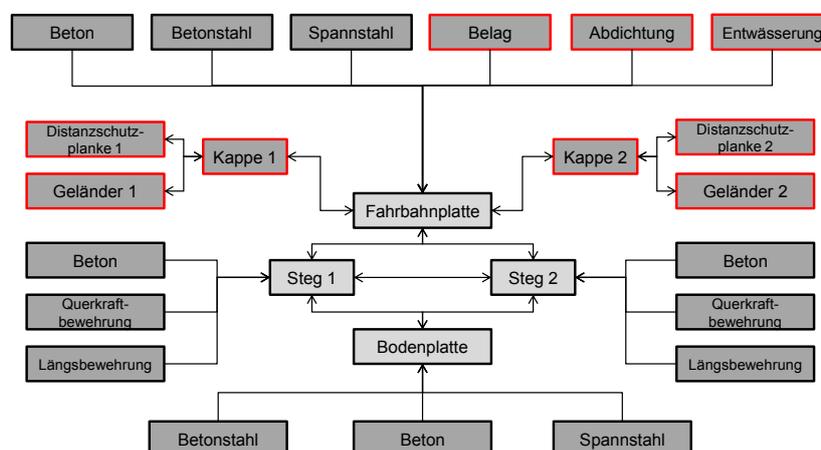


Abbildung 21 – Untergliederung Hohlkastenquerschnitt

Die Systemelemente Fahrbahn, Stege und Bodenplatte, die für die Tragfähigkeit des Systems von Bedeutung sind, bilden zusammen den Hohlkastenquerschnitt. Die Fahrbahnplatte besteht hauptsächlich aus Beton, Betonstahl und Spannstahl. Die primäre Aufgabe des Betons ist Druckspannungen aufzunehmen und den Bewehrungsstahl vor äußeren Umwelteinflüssen zu schützen. Der Beton hat hauptsächlich die Aufgabe, Druckspannungen aufzunehmen und den Bewehrungsstahl vor äußeren Umwelteinflüssen zu schützen.

Betonstahl sowie Spannstahl werden benötigt um Zugspannungen aufzunehmen, welche bei der Fahrbahnplatte vor allem in Stützbereichen vorkommen. Zusätzlich werden der Fahrbahnplatte die Ausrüstungsteile Belag, Abdichtung, Entwässerung, Kappen, Distanzschutzplanken und Geländer zugeordnet. Zusammen bilden sie das Systemelement Fahrbahnplatte.

Die Systemelemente Stege bestehen aus Beton, der Querkraft und der Längsbewehrung. Diese Baustoffe dienen der Lastabtragung in Quer- und Längsrichtung. Die Baustoffe Beton, Betonstahl und Spannstahl bilden zusammen das Systemelement Bodenplatte.

#### 4.2.2

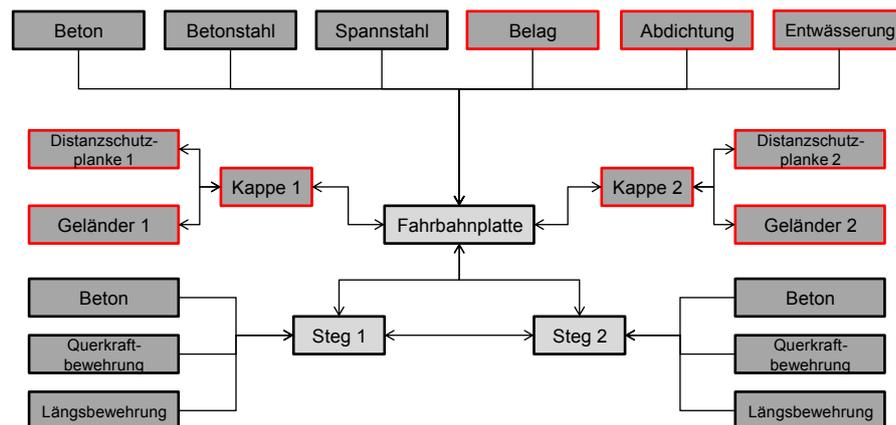


Abbildung 22 – Untergliederung Plattenbalkenquerschnitt

Der Plattenbalkenquerschnitt wird aus den Systemelementen Fahrbahnplatte und Stege gebildet. Die Fahrbahnplatte besteht aus den Baustoffen Beton, Be-

tonstahl und Spannstahl, welche für die Tragfunktion zuständig sind. Zusammen mit den Ausrüstungsteilen Belag, Abdichtung, Entwässerung, Kappen, Distanzschutzplanken und Geländer bilden sie das Systemelement Fahrbahnplatte. Die Systemelemente Stege bestehen aus Beton, Betonstahl und Spannstahl

#### 4.2.

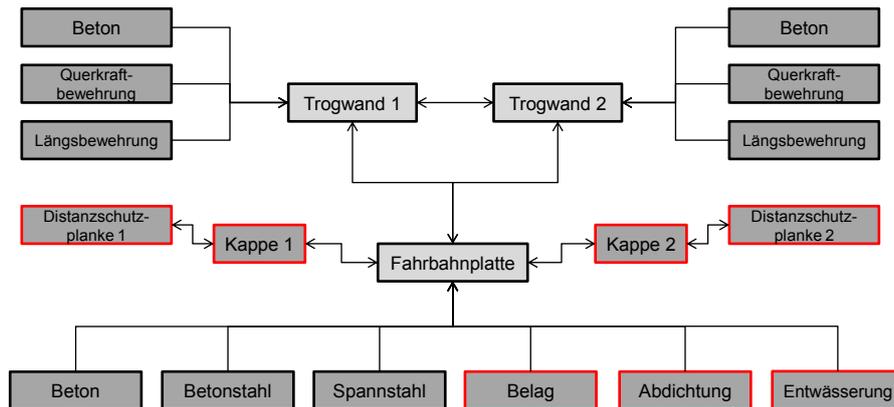


Abbildung 23 – Untergliederung Trogquerschnitt

Die Fahrbahnplatte und die Trogwände bilden zusammen den Trogquerschnitt. Aus den Baustoffen Beton, Betonstahl und Spannstahl besteht die Fahrbahnplatte. Zusammen mit den Ausrüstungsteilen Belag, Abdichtung, Entwässerung, Kappen und Distanzschutzplanken bilden sie das Systemelement Fahrbahnplatte. Die Trogwände bestehen aus den Baustoffen Beton, Querkraftbewehrung und Längsbewehrung.

#### 4.2.4

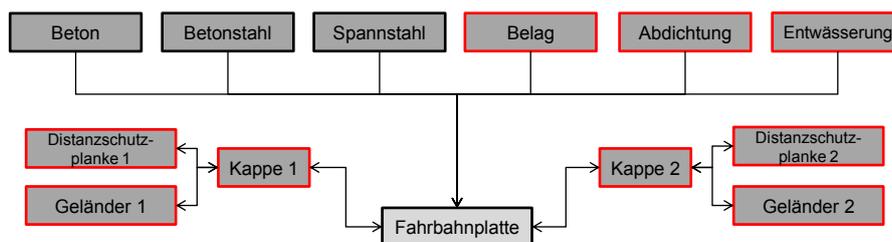


Abbildung 24 – Untergliederung des Massivplattenquerschnitts

Das Systemelement Fahrbahnplatte bildet den Massivplattenquerschnitt. Die Fahrbahnplatte besteht aus den Baustoffen Beton, Betonstahl und Spannstahl die zur Erfüllung der Tragfunktion dienen. Durch die Zuordnung der Ausrüstungsteile Belag, Abdichtung, Entwässerung, Kappen, Distanzschutzplanken und Geländer entsteht das Systemelement Fahrbahnplatte.

### 4.3 Die Modellierung der Systemelemente

Aus den Systemelementen, die durch die Zuordnung von Ausrüstungsteilen und Baustoffen beschrieben worden sind, werden im folgenden Module erstellt, die die Systemelemente der einzelnen Querschnittstypen abbilden sollen:

#### 4.3.1 Fahrbahnplatte



Abbildung 25 – Modul Fahrbahnplatte

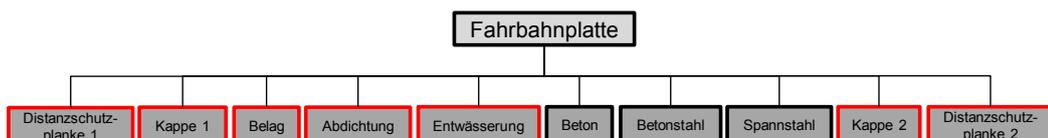


Abbildung 26 – Modul Fahrbahnplatte (Trogquerschnitt)

### 4.3.2 Stege/ Trogwände

chnitts. Plattenbalkenquer-

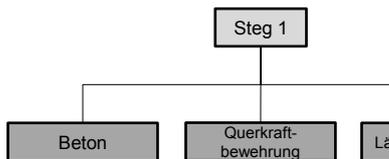


Abbildung 27 – Modul Steg 1

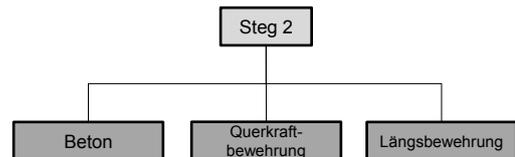


Abbildung 28 – Modul Steg 2

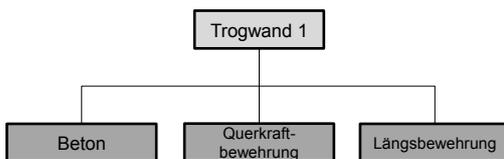


Abbildung 29 – Modul Trogwand 1

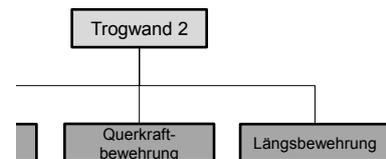


Abbildung 30 – Modul Trogwand 2

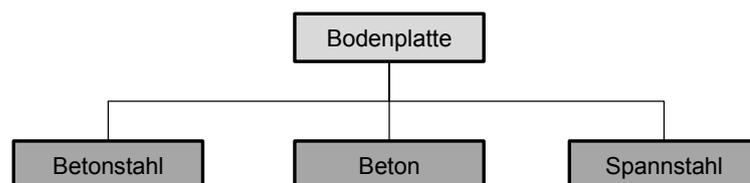


Abbildung 31 – Modul Bodenplatte

## 5 Abbildung von Schädigungen durch Module

Im **Kapitel 2** Schädigungsmöglichkeiten wurden verschiedene Schädigungsmöglichkeiten und deren Schadensmerkmale vorgestellt, die die Dauerhaftigkeit von Baustoffen negativ beeinflussen können. Im Folgenden sollen diese Schädigungsmöglichkeiten den einzelnen Baustoffen und Ausrüstungsteilen zugeordnet, Parameter als Schadensindikatoren ermittelt und diese als Module abgebildet werden.

### 5.1 Schadensanalyse

Schadensanalysen dienen der Ermittlung von Versagensursachen von Bauteilen und der daraus zu schlussfolgernden Einleitung gezielter Maßnahmen zur Schadensabhilfe und Schadensverhütung.

#### 5.1.1 Schädigungen der Baustoffe und Ausrüstungsteile

Ein Schaden ist definiert als Veränderungen an einem Bauteil, durch die seine vorgesehene Funktion wesentlich beeinträchtigt oder unmöglich gemacht wird, wobei die Schadensursache die Summe der schadensauslösenden Einflüsse ist. (VDI-Richtlinie-Schadensanalyse, 2004)

Baustoffe und Ausrüstungsteile sind natürlichen und nutzungsbedingten Umgebungseinflüssen ausgesetzt, die zu Schäden und zur Beeinträchtigung ihrer Funktionalität führen können.

#### **Beton**

Der Beton im Stahlbetonverbund besitzt nicht nur die Aufgabe Druckspannungen aufzunehmen, sondern auch den Betonstahl vor äußeren Umwelteinflüssen zu schützen. Beton in Brückenbauteilen kann durch Gefügeschädigung infolge Frost- und Frost-Tausalzschädigung, infolge einer Alkalikieselsäure-Reaktion und durch außergewöhnliche Einwirkungen wie Brand in seiner Funktionalität beeinträchtigt werden. Eine andere Form der Betonschädigung ist die Ermüdung des Betons (Druckfestigkeitsabfall infolge einer hohen Anzahl von Last-

wechseln z.B. Verkehrslasten) oder die Überlastung, die zu einem Bruch im Betonbauteil führen können

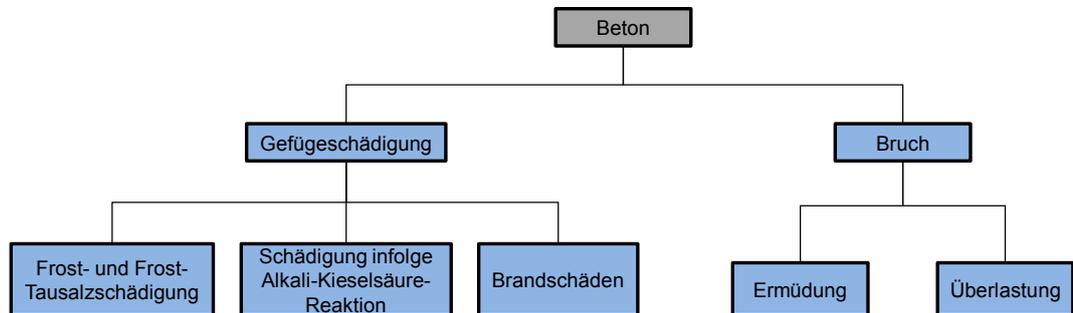


Abbildung 32 – Modul Beton

## Be

Ko

sci

chl

dominant, bei Spannstählen tritt zudem Spannungsrisskorrosion, häufig mit Wasserstoffversprödung auf. (Zilch und Zehetmaier, 2005)

Weitere Formen der Betonstahl- und Spannstahlschädigung sind der Bruch infolge Ermüdung (Zugfestigkeitsabfall aufgrund hoher Lastwechsel und Spannkraftverluste) und Überlastung, sowie die Schädigung infolge Brandeinwirkungen. Außerdem führt die Verwitterung des Spannstahls zur Ver-

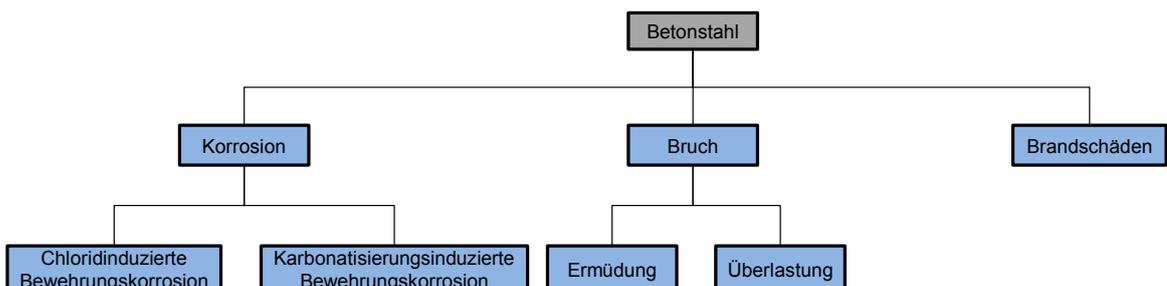


Abbildung 33 – Modul Betonstahl

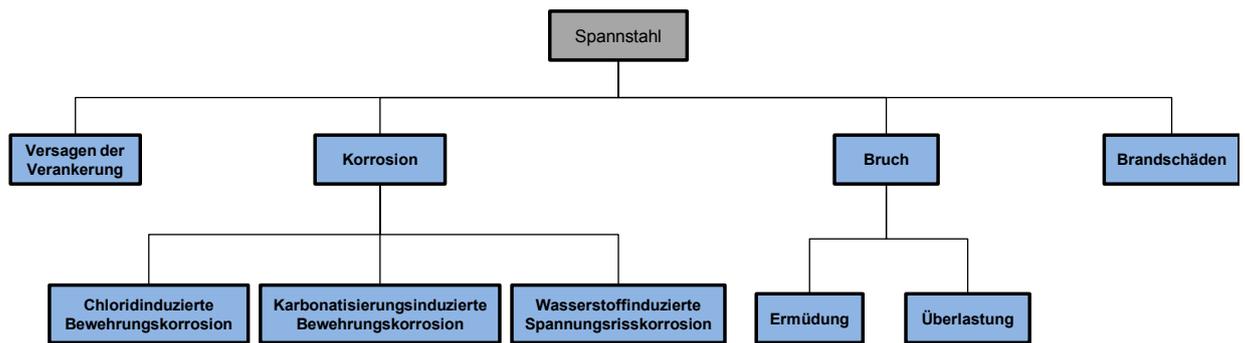


Abbildung 34 – Modul Spannstahl

seitlich und in ihr werden Distanzschutzplanken und Geländer verankert. Kap-  
pen werden fugenlos über die ganze Bauwerkslänge ausgebildet und unterlie-  
gen deshalb in Längsrichtung einer starken Schwindbeanspruchung. Aus die-  
sem Grund beträgt der Bewehrungsprozentsatz der Längsbewehrung 1,3 %.  
Die Querbewehrung entspricht dem Grundsatz der Mindestbewehrung.

Schädigungen von Kappen treten in Form von Gefügeschädigung (Frost- und  
Frost-Tausalzschädigung, Alkali-Kieselsäure-Reaktion) und Korrosion der Be-  
wehrung (chlorid-/karbonatisierungsinduziert) auf. Jedoch sind auch Distanz-  
schutzplanken und Geländer von der chloridinduzierten Korrosion und an Ver-  
bundstellen (Distanzschutzplanke-Beton, Geländer-Beton) durch die

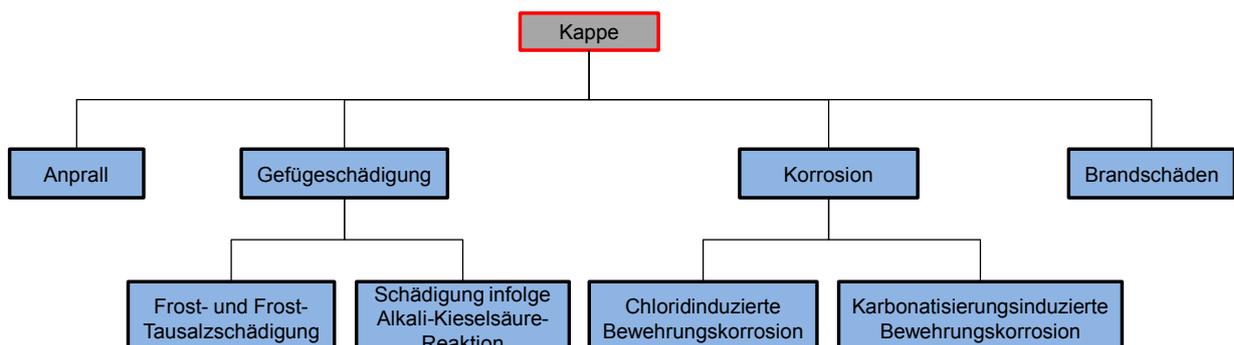
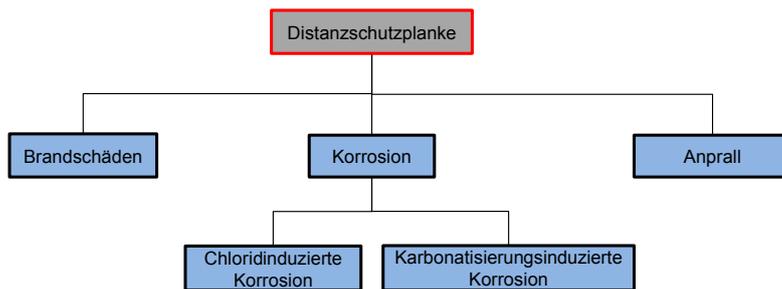


Abbildung 35 - Modul Kappe



**Abbildung 36 – Ausrüstungsteil Distanzschutzplatte**



**Abbildung 37 – Ausrüstungsteil Geländer**

Wasser und ... Aufgrund von Undichtigkeiten infolge Chlorideintrag und hoher Temperaturänderungen kann es zu Schädigungen an der Abdichtung kommen. Vor allem an Randaanschlüssen besteht eine hohe Gefahr von undichten Stellen.

Der Belag bildet die Verschleißschicht der Fahrbahnfläche und hat zudem die Aufgabe, die empfindliche Abdichtung zu schützen. Frost- und Frost-Tausalzschädigung, hoher Verschleiß und hohen Temperaturänderungen können zu Belagsschäden führen durch die die Funktionalität des Belags nicht mehr möglich ist.

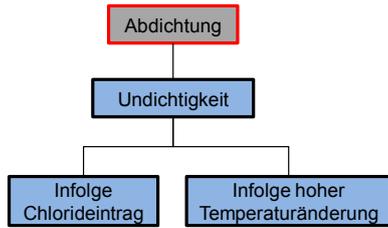


Abbildung 39 – Modul Abdichtung

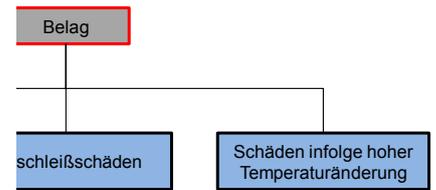


Abbildung 38 – Modul Belag

in die Kanalisation abzuleiten. Die Funktionalität des Entwässerungssystems kann jedoch verloren gehen, wenn schadhafte Entwässerungsleiten (z.B. Rohrbruch) oder Abflussbehinderungen (z.B. infolge Vereisung) vorliegen. Dadurch kann das anfallende Regenwasser nicht mehr geregelt abfließen und es kommt

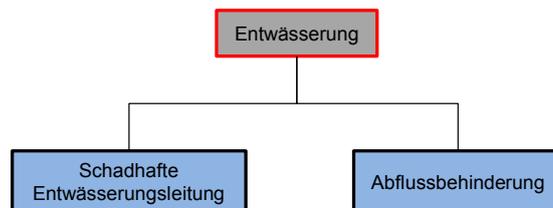


Abbildung 40 – Modul Entwässerung

en  
:se  
ve-

sentliche Merkmale besitzen, die im Rahmen einer visuellen Inspektion erkannt werden können. Auf Grundlage dieser Schadensmerkmale lässt sich eine Aus-

sage über die Art der Schädigung und deren Auswirkung auf die Tragfähigkeit des Bauwerks machen.

Im Folgenden wird auf die im **Kapitel 5.1.1** genannten Schädigungsmöglichkeiten der Baustoffe und Ausrüstungsteile näher eingegangen, deren Ursachen untersucht und daraus verschiedene Schadensparameter für einzelne Schädigungen definiert.

Diese Schadensparameter setzen sich aus zwei Bestandteilen zusammen Abb. 41:

- *Voraussetzungen, die erfüllt sein müssen, damit die Schädigung entstehen kann*

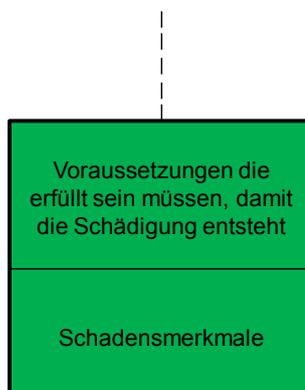


Abbildung 41 - Schadensparameter

### Gefügeschädigung des Betons

#### **Gefügeschädigung infolge Frost-und Frost-Tausalzschädigung**

Damit es zu einer Frost- und Frost-Tausalzschädigung müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

- *Es müssen bestimmte klimatische Bedingungen herrschen, die zu einer hohen Anzahl von Frostwechseln führen.*
- *Es muss ein bestimmter Wassergehalt an der Betonoberfläche in den Kapillarporen vorhanden sein.*
- *Durch nicht genügend Expansionsraum wird die Volumenzunahme des Wassers behindert, wodurch ein hydraulischer Druck und eine entsprechende Sprengwirkung entstehen.*
- *Bestimmter Tausalzgehalt im Porenwasser*

Das wiederholte Frieren und Auftauen führt zu einer Schädigung der Betonstrukturen. Es entstehen die Abplatzungen an der Betonoberfläche. Es schließt sich, dass es sich bei Frost- und Frost-Tausalzschädigung handelt. Aus hohen Werten des Wassergehalts kann man eventuelle Schädigung und Entwässerung ableiten. Die Menge an Wasser und Tausalzgehalt sind zu berücksichtigen.

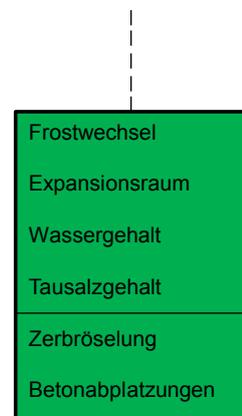


Abbildung 42 – Schadensparameter Frost-Tausalz-Schädigung

### Gefügeschädigung infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Damit eine Schädigung infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) erfolgen kann, müssen reaktive Zuschlagstoffe, eine gewisse Feuchtigkeit und ein hoher Alkaligehalt im Beton vorhanden sein. Die Volumenvergrößerung des Betons durch die AKR kann mit der Zeit so stark werden, dass lokal Quelldrücke auftreten, die das Betongefüge schädigen und zu Betonabplatzungen führen.



Abbildung 43 – Schadensparameter Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Hier sei noch einmal hervorgehoben, dass sich Risse infolge einer AKR (keine Abkürzungen) optisch nicht einwandfrei von Rissen unterscheiden, die aufgrund anderer Schadensabläufe, z. B. aufgrund eines Frostangriffs, entstanden sind. Wird in Bauteilen eine schädigende AKR vermutet, muss grundsätzlich eine eingehende Untersuchung durch einen Sachverständigen erfolgen, um zu klären, ob eine schädigende AKR vorliegt.

Risse und Abplatzungen tragen zum Verlust der Schutzfunktion des Betons bei, welche einen wesentlichen Einfluss auf den Bewehrungsstahl hat. Daraus ergibt sich eine beschleunigte Karbonatisierung entlang der Rissflanken und erleichtertes Eindringen von Wasser und Chloriden.

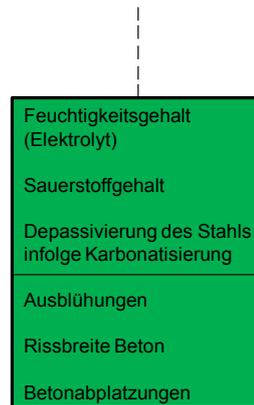
### **Korrosion des Beton- und Spannstahls**

#### **Chloridinduzierte- und karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion**

Damit es zur Bewehrungskorrosion kommt, müssen drei Voraussetzungen gleichzeitig erfüllt sein:

- *Es muss ein leitendes Medium (Elektrolyt) vorhanden sein. Beton mit einem gewissen Feuchtigkeitsgehalt wirkt in der Regel als Elektrolyt.*
- *Die sehr dünne, oxidische Schutzschicht (Passivschicht), die den Bewehrungsstahl umgibt ist infolge Karbonatisierung oder Anwesenheit von Chloriden zerstört, d.h. der Bewehrungsstahl ist depassiviert.*
- *Sauerstoff ist durch den Beton bis zur Bewehrung vorgedrungen.*

Aufgrund der Volumenzunahme der Korrosionsprodukte um das 2-bis 6-fache gegenüber nicht korrodiertem Stahl, entstehen Zugspannungen und Sprengdrücke im Beton, die zu Längsrissen und zu Abplatzungen der Betondeckung führen können. Um welche der beiden Korrosionsart es sich handelt, kann durch die Färbung der Rostfahnen erkannt werden. Schwarz gefärbte Rostfahnen deuten auf eine chloridinduzierte Korrosion hin, wogegen rot bis bräunliche Färbung auf die karbonatisierungsinduzierte Korrosion hinweist.

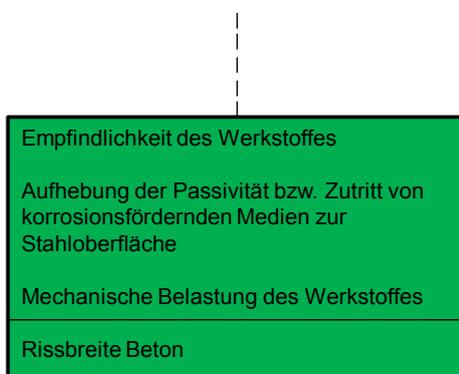


Form von Abplatzungen und Rissen, durch die eine erhöhte Menge an Wasser und Chloridlösung zur Bewehrung gelangt. Das bedeutet, dass ein erhöhter Feuchtigkeitsgehalt auch auf andere Schädigungsmöglichkeiten schließen lässt.

### **Wasserstoffinduzierte Bewehrungskorrosion**

Bei der Spannungsrissskorrosion die in der Regel im Spannbetonbau auftritt handelt es sich um die wasserstoffinduzierte Spannungsrissskorrosion. Damit es

*zuden zur*



**Abbildung 45 – Schadensparameter SRK**

An Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund kann es unter ungünstigen Bedingungen, wie z. B. Korrosion des Spannstahls vor dem Verpressen oder unzureichende Verpressung der Hüllrohre, zu einer Schädigung der Spanndrähte durch wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion oder zu Lochfraßkorrosion infolge Chlorideintrag kommen. Dies kann normalerweise von der Betonoberfläche nicht erkannt werden. Jedoch lassen Risse im Beton, in der Nähe von Spannbetonbauteilen, auf eine mögliche Schädigung der Spanndrähte vermuten.

Im schlimmsten Fall ist ein Versagen des gesamten Bauteils ohne Vorankündigung möglich, da Risse in den Spanndrähten die Folge der Korrosionsmechanismen sind. Um ein solches Szenario zu vermeiden, ist eine zerstörungsfreie Feststellung (z.B. magnetisches Streufeldverfahren) von Spanndrahtbrüchen zur Bewertung der Dauerhaftigkeit erforderlich (Flohrer, 2006).

Der Schadenparameter Feuchtigkeitsgehalt bei Spannstahlschäden erfasst die Korrosion des Spannstahls vor dem Verpressen und auch unzureichende Verpressung der Hüllrohre. Durch einen erhöhten Feuchtigkeitsgehalt im Spannbetonbauteil.

### **Bruch infolge Ermüdung**

#### **Beton**

Die Ermüdung spielt bei Beton und vor allem bei Massivbrücken eher eine untergeordnete Rolle, da aufgrund des meist hohen Eigengewichts die schwingungserzeugende Einwirkung sehr niedrig ist.

Aufgrund der hohen Anzahl an Lastwechseln (z.B. durch hohe Verkehrslasten einer Brücke) können Ermüdungsschäden in Form von Rissen im Beton auftreten, wodurch die Druckfestigkeit des Betons reduziert werden kann.

#### **Beton und Spannstahl**

Die Ermüdungsschädigung eines Stahlstabes beginnt mit der Mikrorissbildung an einem Ort mit hoher Spannungskonzentration. Es folgt die Phase des stabilen Risswachstums und schließlich bricht der Stab schlagartig. Beim Spannstahl kommt zusätzlich noch der Einfluss des Spannkraftverlustes hinzu. Dieser



namische Effe  
wurde (Scheer  
Der Bruch tritt  
als der Bauteil  
Parameter Las

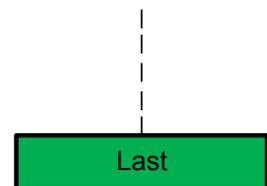


Abbildung 47 – Schadensparameter Last

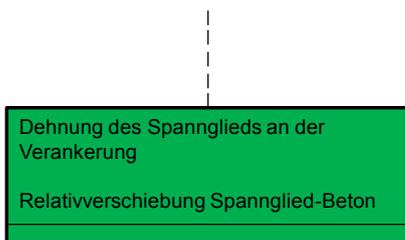


Abbildung 48 – Schadensparameter Verankerung

**Verschleißschäden**

rch schleifenden  
 e Betonbestand-  
 hrungsflächen –  
 , hängt vom Ab-

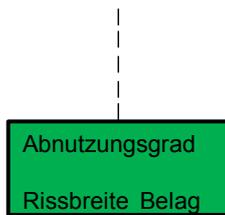


Abbildung 49 – Schadensparameter Verschleiß

n Temperaturän-  
 D. 11

RISSBREITE UR  
 durchfeuchte  
 dichtung hinc

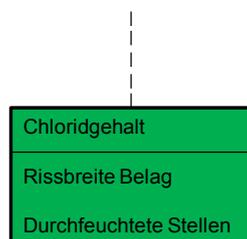


Abbildung 50 – S

### Schadhafte Entwässerungsleitung und Abflussbehinderung

Die Funktionalität des Entwässerungssystems kann verloren gehen, wenn schadhafte Entwässerungsleitungen (z.B. Rohrbruch) oder Abflussbehinderungen (z.B. infolge Vereisung) vorliegen. Das Ausmaß der Schadhafte (schadhafte) Rohrs ab. Werden zusätz-

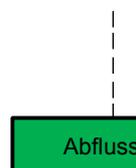


Abbildung 51 - Schadensparameter Rohrschaden/Abflussbehinderung

Abbildung 52 - Schadensparameter Brandbeanspruchung

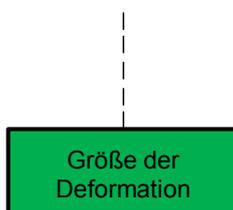


Abbildung 53 – Schadensparameter Anprall

## 5.2 Modellierung der Schädigungen

An dieser Stelle werden die Schadensparameter den jeweiligen Schädigungsmöglichkeiten der Baustoffe und Ausrüstungsteile zugeordnet. Der Schadensparameter und die Schädigungsmöglichkeit bilden zusammen das Schädigungsmodul.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Module der in 5.1.1 ermittelten Schädigungsmöglichkeiten:

**Bet**

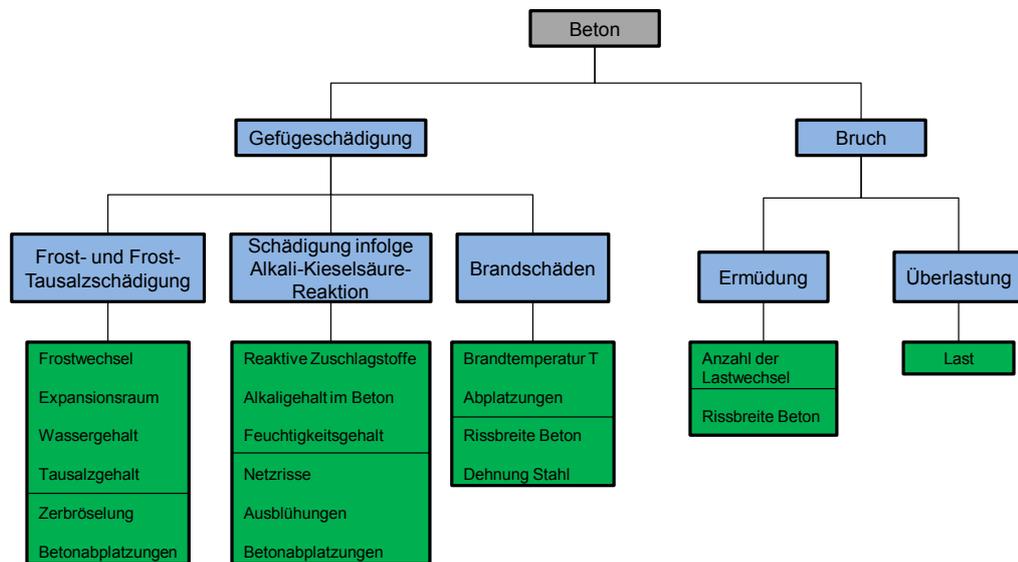


Abbildung 54 – Schädigungsmodul Beton

### Betonstahl und Spannstahl

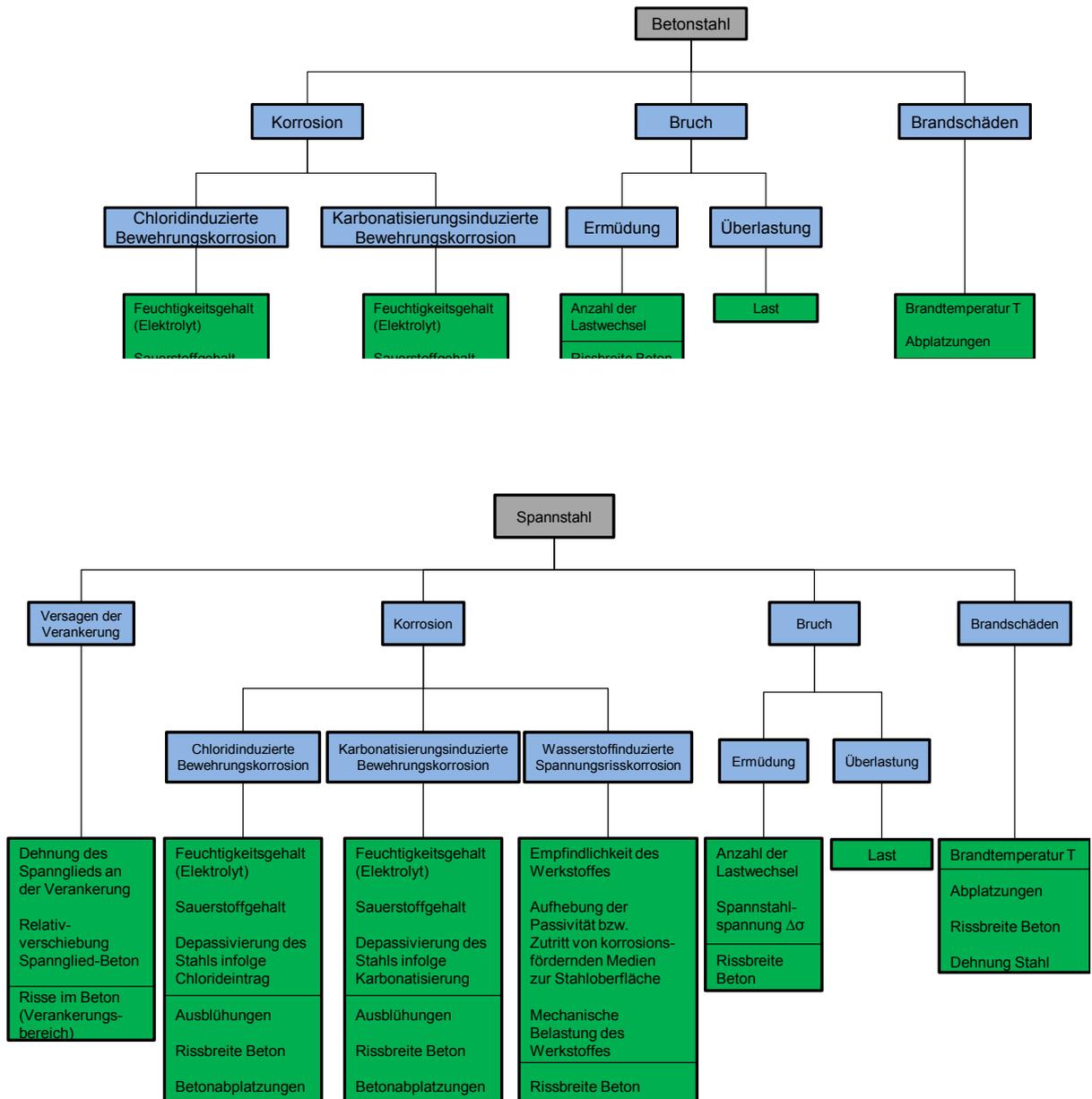


Abbildung 55 – Schädigungsmodul Betonstahl/Spannstahl

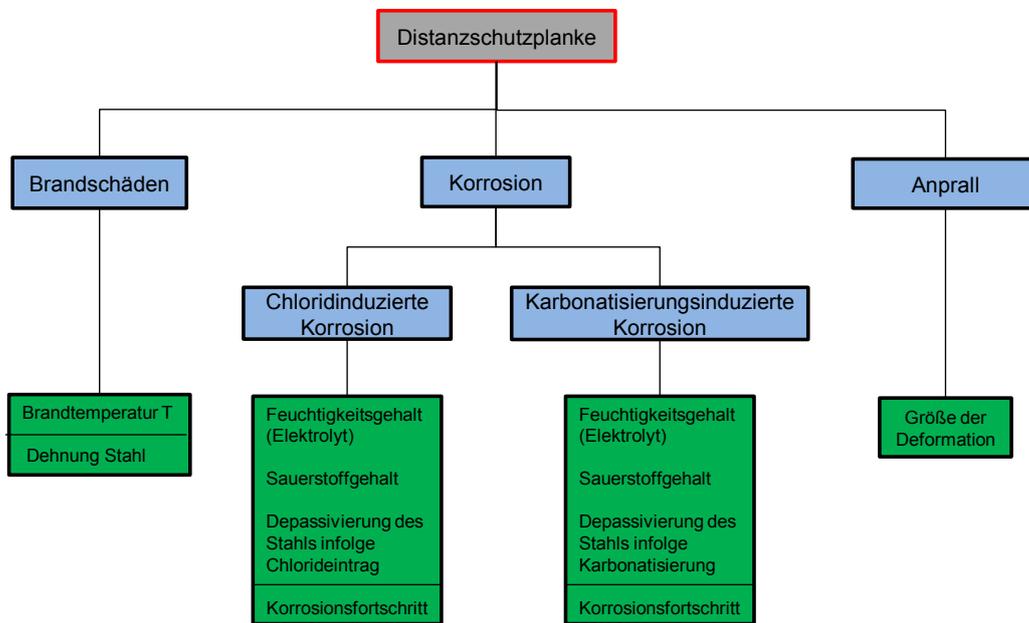
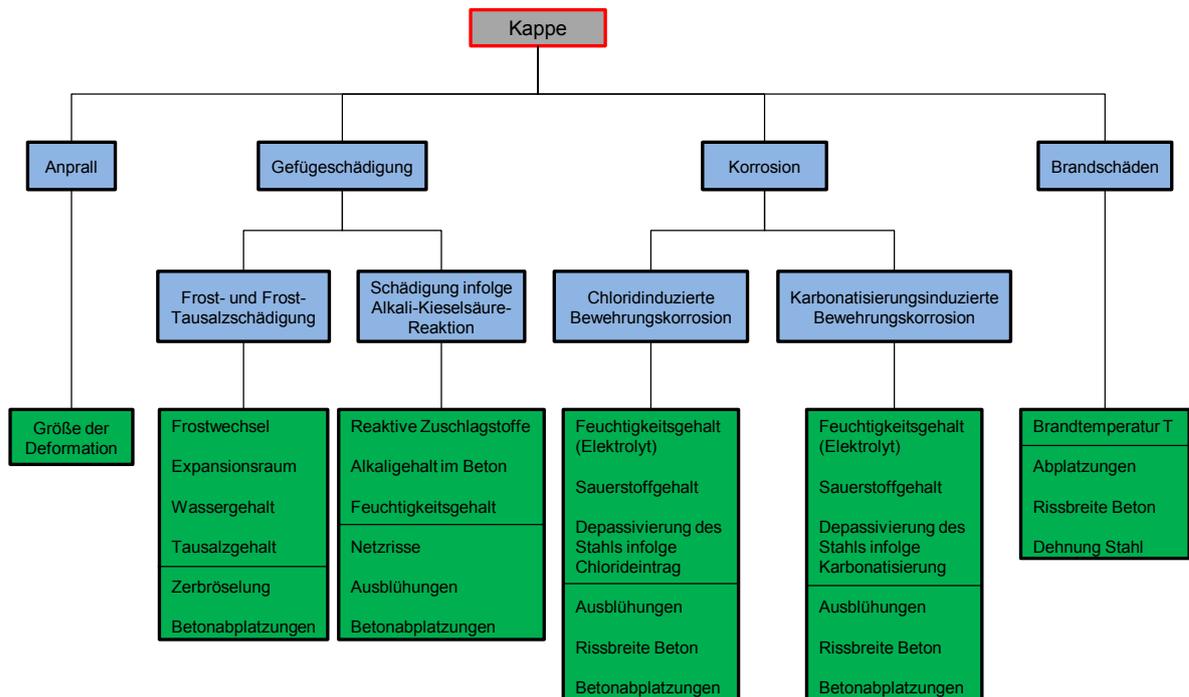


Abbildung 50 Schädigungsmechanismen Kappe, Distanzschutzplanke

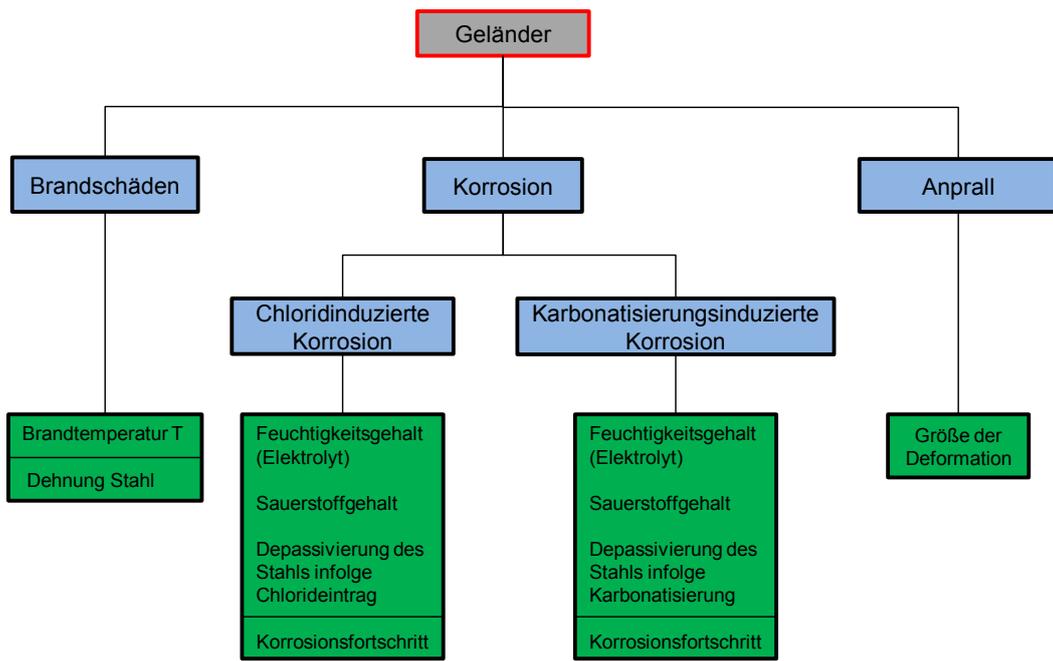
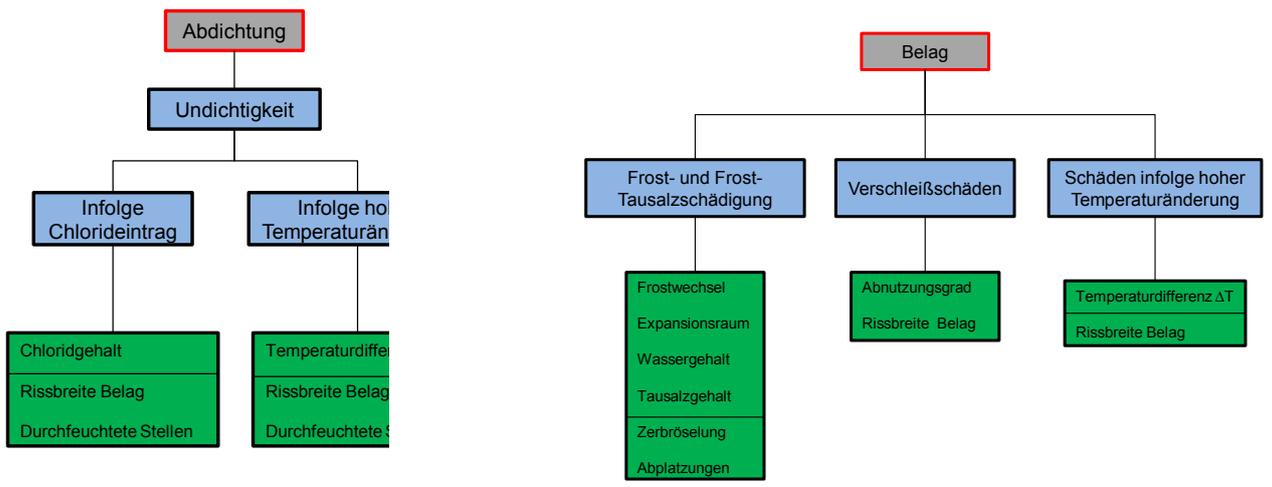


Abbildung 57 – Schädigungsmodul Geländer



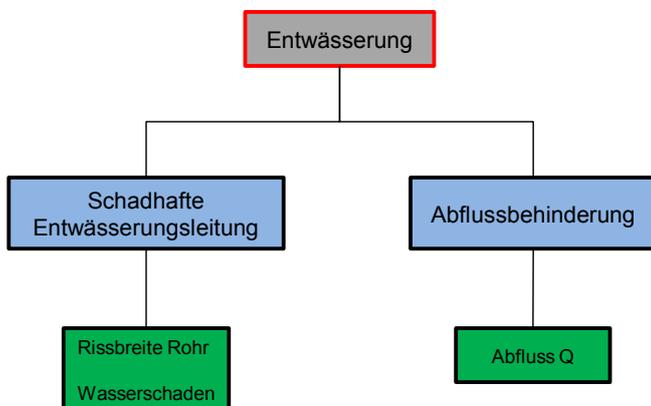


Abbildung 59 – Schädigungsmodul Entwässerung

## 6 Abbildung von Schädigungsmechanismen

Technische Systeme wie z.B. Brücken, bestehen aus einer Vielzahl von Systemelementen, die auf unterschiedliche Art und Weise mit einander verknüpft sind. Der Zustand eines Systems hängt vom Zustand seiner Systemelemente und den Beziehungen zwischen den Systemelementen ab. Um ein Bauwerk in seiner Gesamtheit bewerten zu können, ist es notwendig den Einfluss der geschädigten Systemelemente auf die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu bestimmen.

Laut Scheer (2010) führte in vielen Fällen ein progressiver Kollaps zum vollständigen oder teilweisen Versagen der betrachteten Brückenbauwerke. Hierbei verursachte das Versagen eines einzelnen Systemelements und eine anschließende plötzliche Lastumlagerung eine Kettenreaktion, die letztendlich zum Versagen des Bauwerks führt.

Ziel ist es ein Logisches Systemmodell basierend auf einen Fehlerbaum zu definieren das verschiedene Schädigungsmechanismen, die zu einem vollständigen oder teilweisen Versagen des Quersystems führen, abbildet. Module der Systemelemente (Kapitel 4) sowie die der Schadensparameter (Kapitel 5) finden dabei Eingang in das Systemmodell.

### 6.1 Fehlerbaumanalyse

#### 6.1.1 Grundlagen

Das Ziel der Fehlerbaumanalyse ist es, eine abgesicherte Aussage über das Verhalten eines Systems hinsichtlich des Auftretens eines zu definierenden Fehlers zu machen, wobei insbesondere eine Abschätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit angestrebt wird. Sie dient der systematischen Suche nach denkbaren Ursachen für einen vorgegebenen Fehler. Als Ergebnis werden alle Kombinationsmöglichkeiten geliefert, die zu einem unerwünschten Ereignis führen (Schmitt, 2009).

Das Vorgehen hierbei ist deduktiv, d.h. ausgehend von einem unerwünschten Ereignis (Fehler) werden alle möglichen Ausfallkombinationen, die den Fehler verursachen können, in Form einer Baumstruktur aufgetragen. Die Verknüpfungen der Ereignisse werden jeweils durch verschiedene logische Operatoren, den sogenannten Gates hergestellt.

### Im Fehlerbaum befinden sich 2 Arten von Gates



;en)



en-

z.B

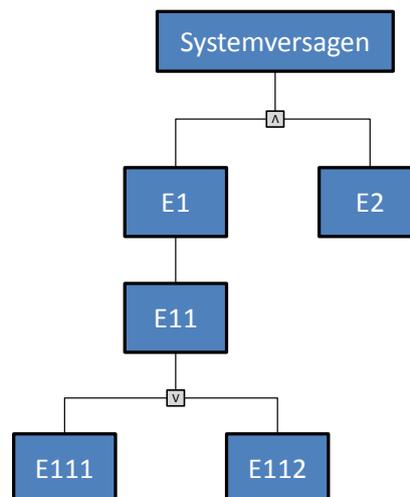


Abbildung 60 - Fehlerbaum

### 6.1.2 Logisches Systemmodell zur Abbildung von Schädigungsmechanismen für Systemelemente

Mit Hilfe von Fehlerbäumen wird im Folgenden gezeigt wie Schädigungsmechanismen entstehen, sich weiterentwickeln und letztendlich zum Versagen der einzelnen Systemelemente führen können.

Als erstes werden den Modulen der Systemelemente, die in Kapitel IV definiert worden sind, Module der Schädigungen zugeordnet. Anschließend werden mit Hilfe von logischen Verknüpfungen (AND, OR) Systemelemente und Schädigungen

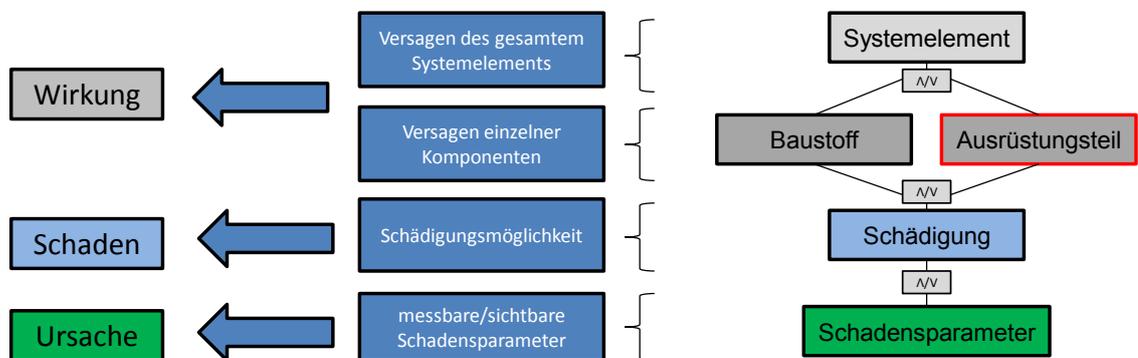


Abbildung 61 – Logisches Systemmodell der Systemelemente

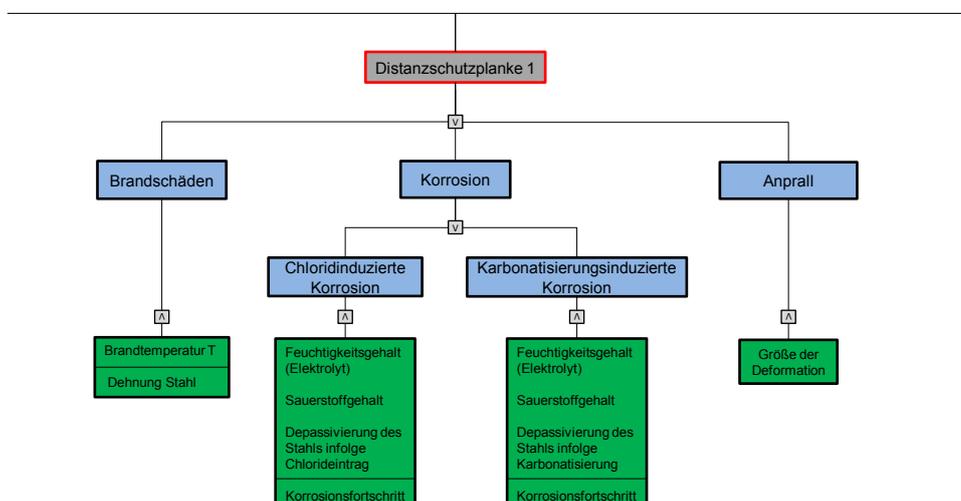
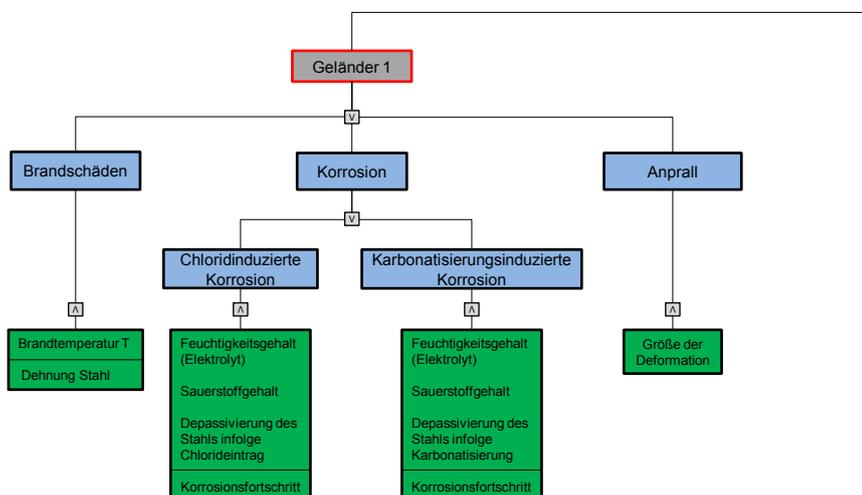
der Schädigung eingegangen die eine bestimmte Wirkung auf das System haben.

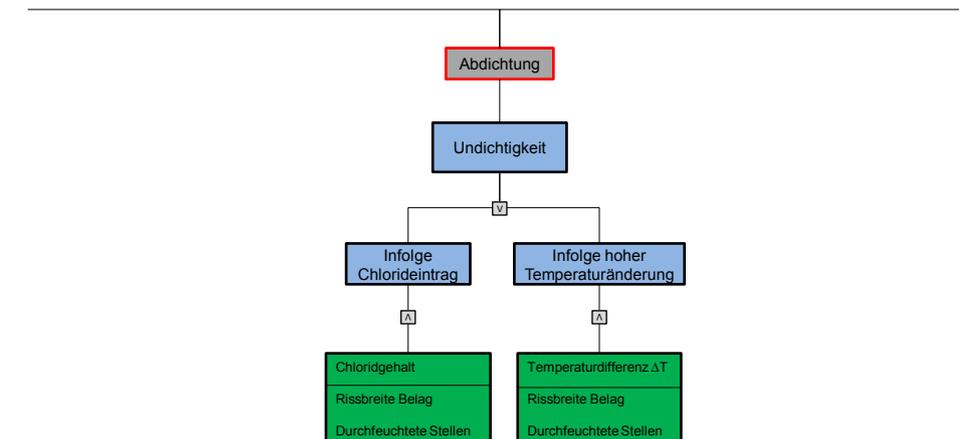
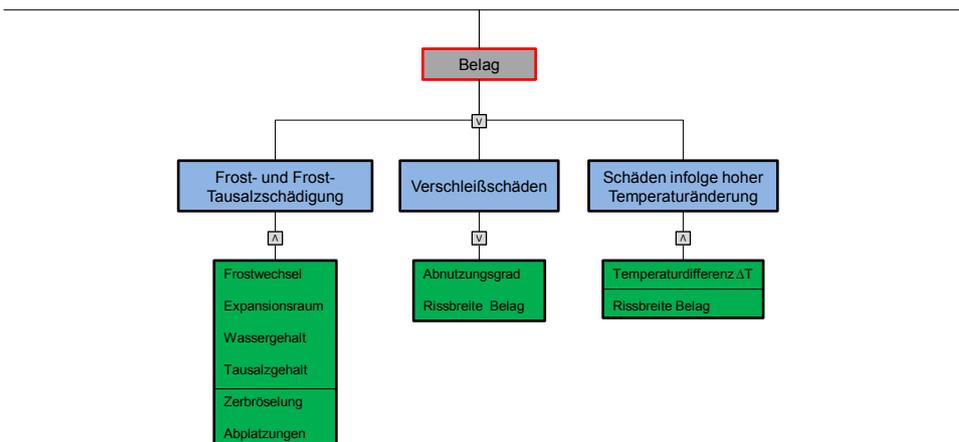
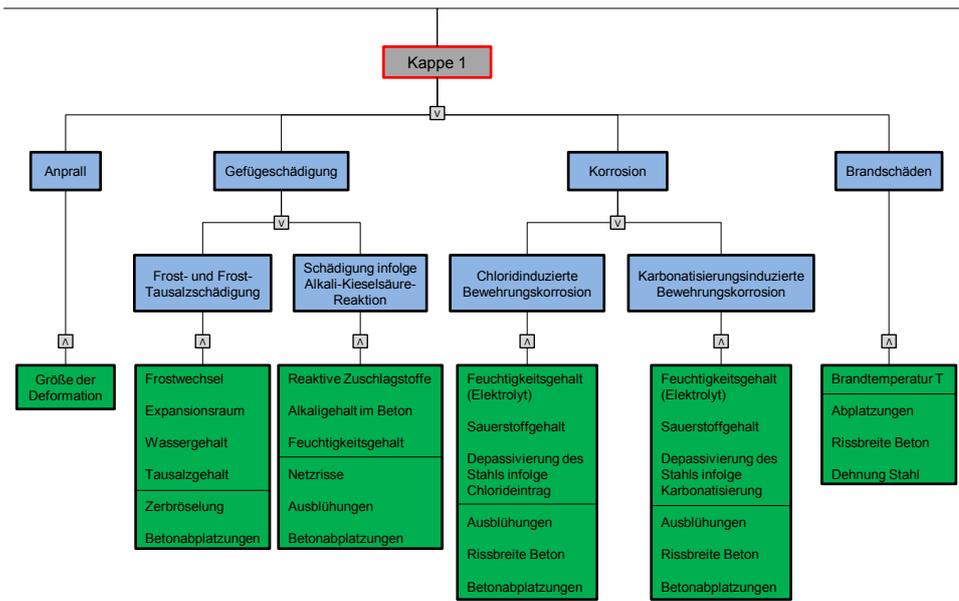
Infolge einer Bauwerksinspektion können messbare und sichtbare Schadensparameter Eingang ins Logische Systemmodell finden. Das Erreichen von Grenzwerten bestimmter Parameter kann zur Entstehung verschiedener Schädigungen und letztendlich zum Versagen einzelner Komponenten führen. Je nachdem welche Art und Anzahl von Komponente versagt, kann es zum Verlust der Tragfähigkeit bzw. der Gebrauchstauglichkeit des Systemelements kommen. Entscheidend dafür sind die logischen „AND“ und „OR“ Verknüpfungen. Durch

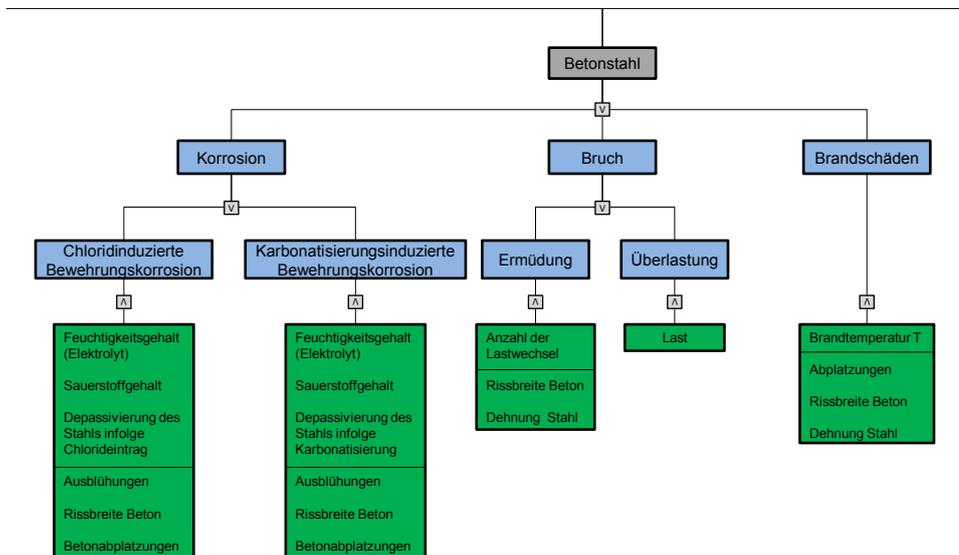
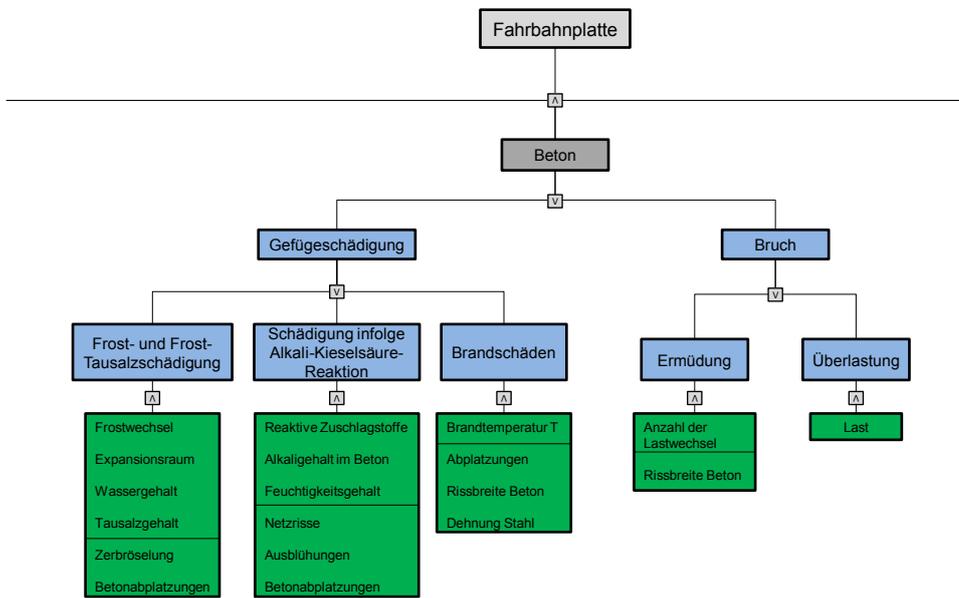
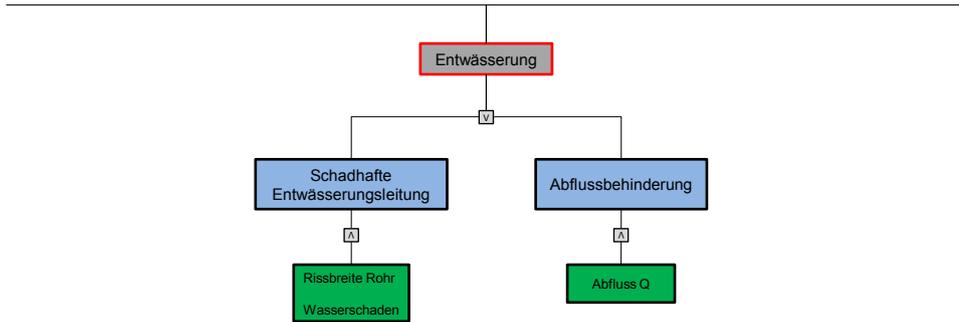
ihre Erfüllung kann sich der Schaden fortpflanzen und eine Kettenreaktion auslösen, die zum Versagen des gesamten Systems führt. Die Verknüpfung zwischen Parametern und Schädigungen, die sich auf Systemelemente auswirken, kann auch z.B. über Schädigungsmodelle, probabilistische Ansätze, Statistik etc. erfolgen.

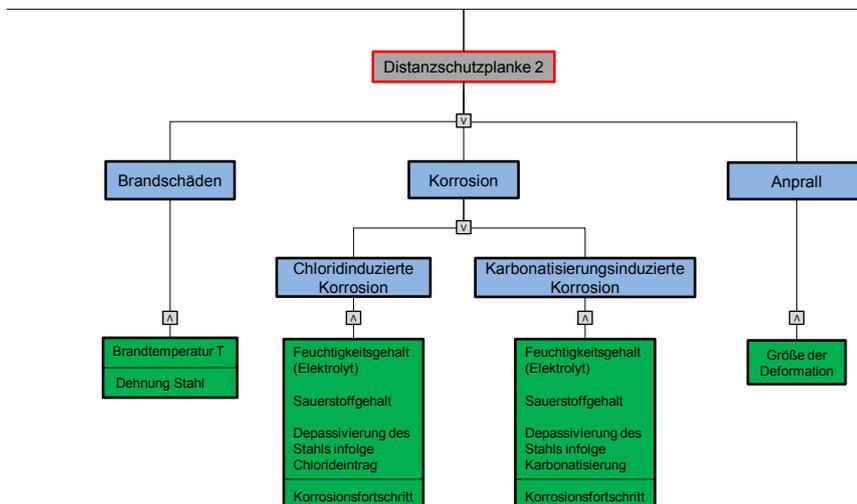
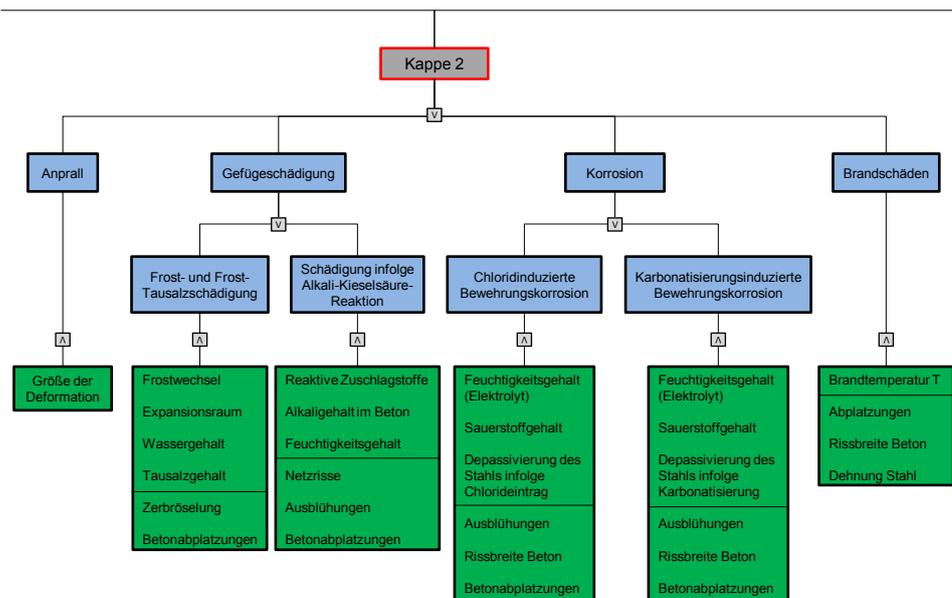
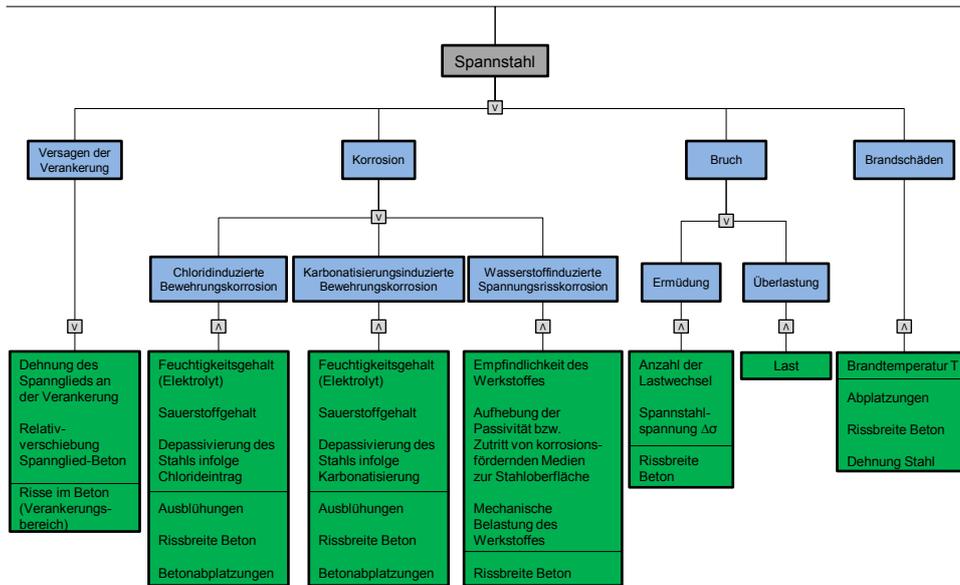
Die folgenden Abbildungen zeigen die logischen Systemmodelle zur Abbildung von Schädigungsmechanismen der einzelnen Systemelemente.

### Fahrbahnplatte









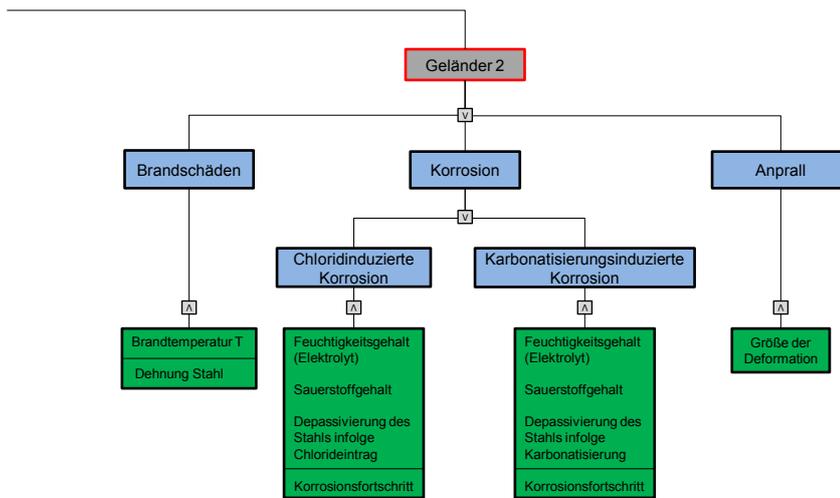
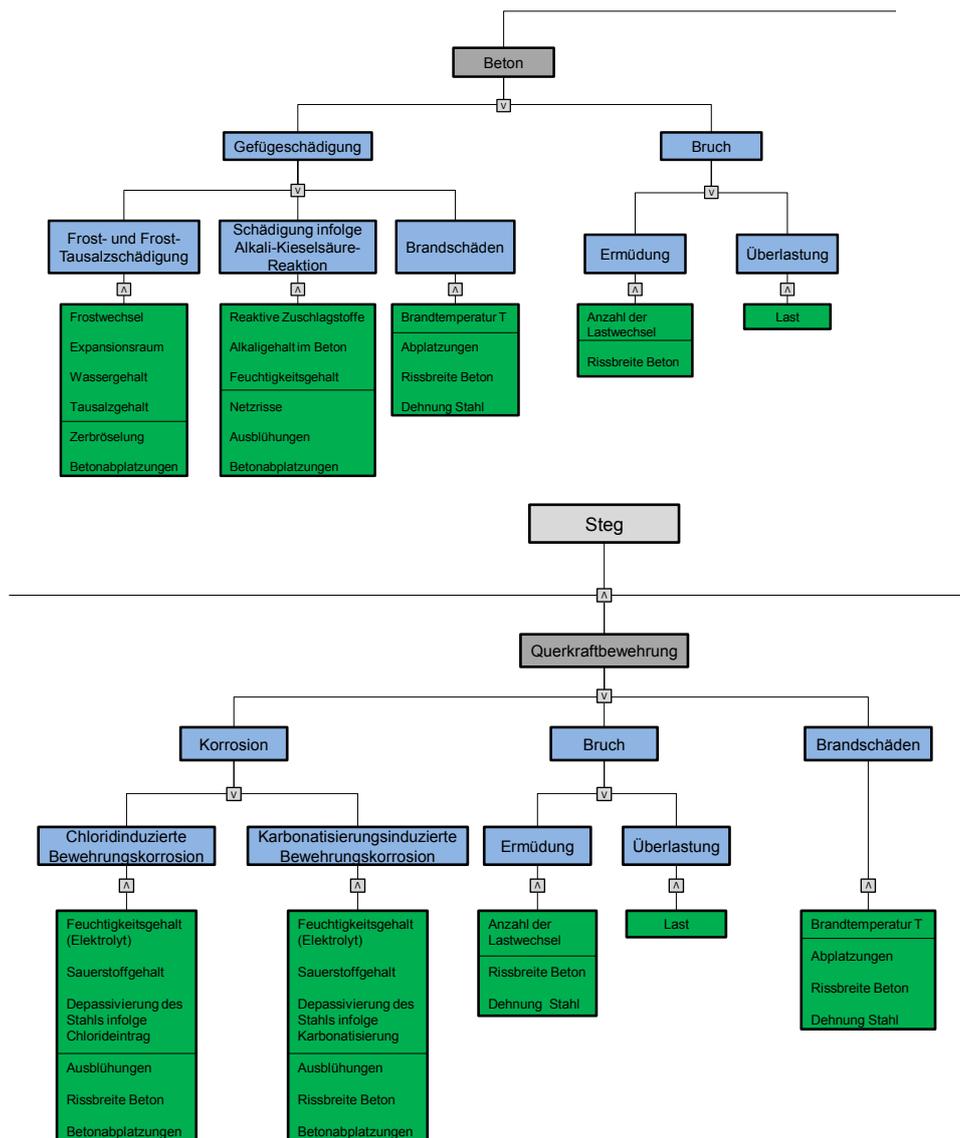


Abbildung 62 - Systemmodell Fahrbahnplatte

S



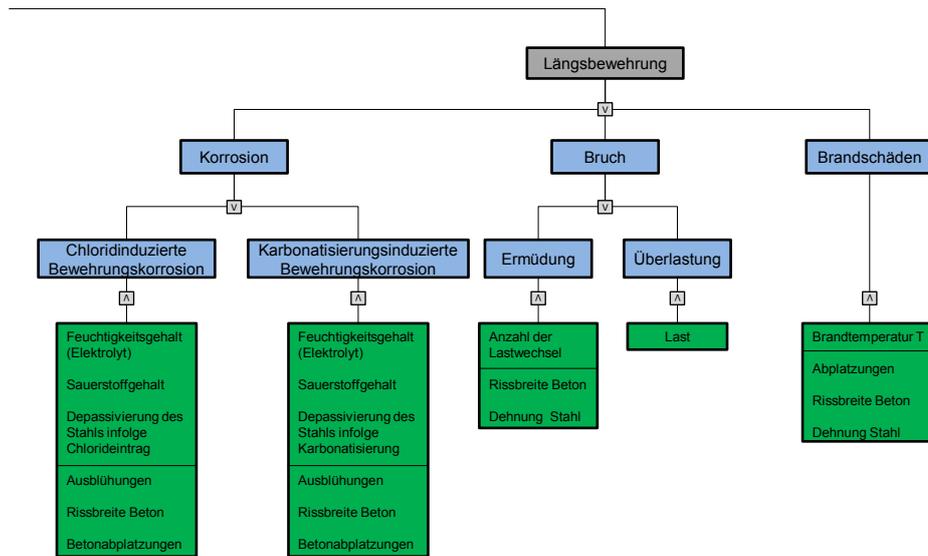
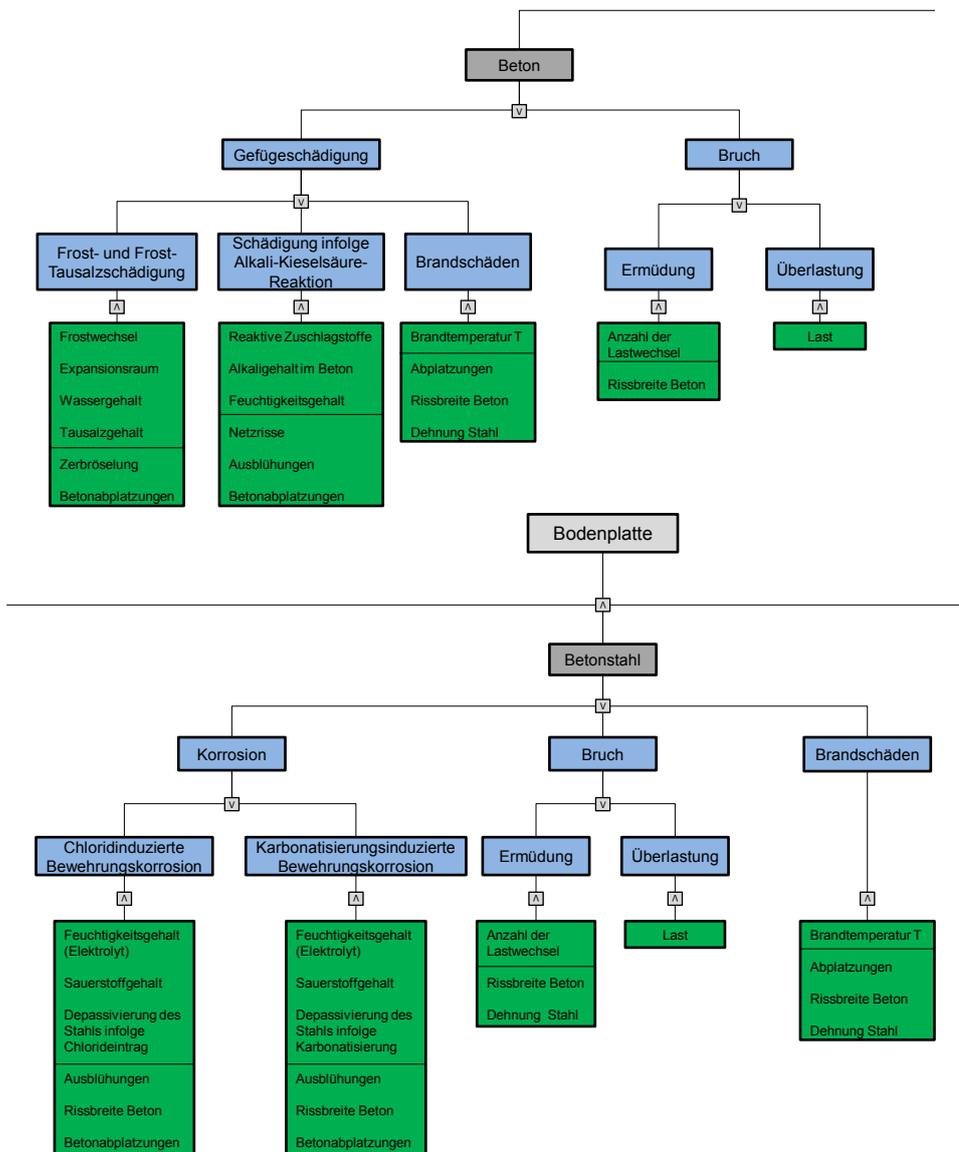


Abbildung 63 - Systemmodell Steg



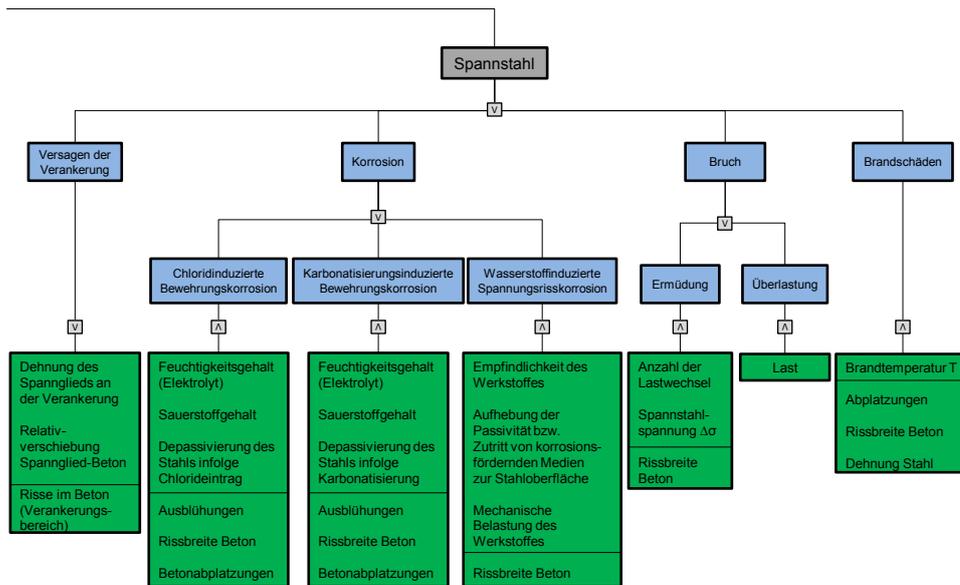


Abbildung 64 - Systemmodell Bodenplatte

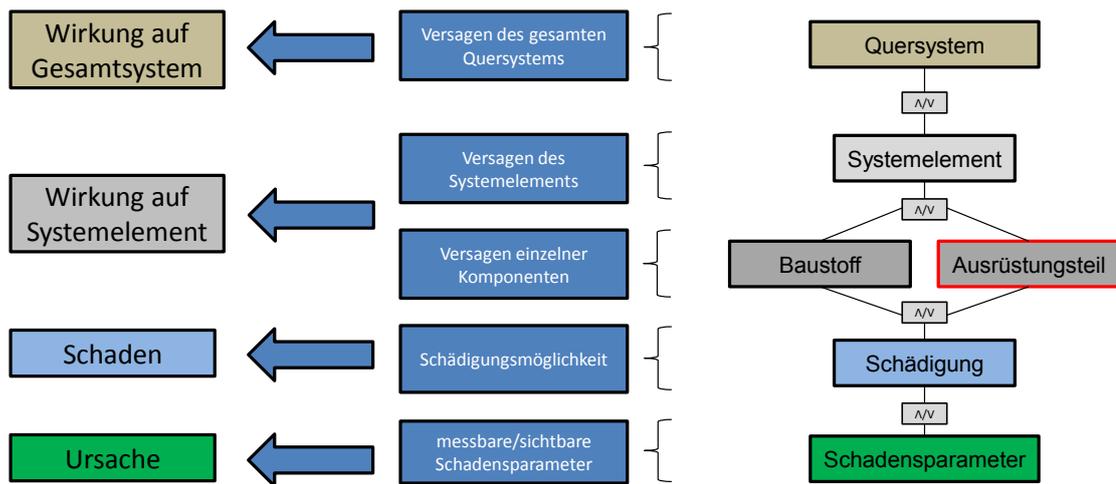


Abbildung 65 - Logisches Systemmodell des gesamten Quersystems

Um das gesamte Quersystem zu betrachten muss das Systemmodell erweitert werden. Dabei werden einzelne Systemelementmodule zu einem Quersystem

zusammengefasst. Durch das Zusammenfügen dieser Systemmodule mit den dazugehörigen Schädigungsmodulen und der Verknüpfung dieser mit den logischen Operatoren „AND“ und „OR“, entsteht ein Logisches Systemmodell zur Abbildung von Schädigungsmechanismen für das gesamte Quersystem.

Die folgenden Abbildungen zeigen die logischen Systemmodelle zur Abbildung von Schädigungsmechanismen der verschiedenen Quersysteme..

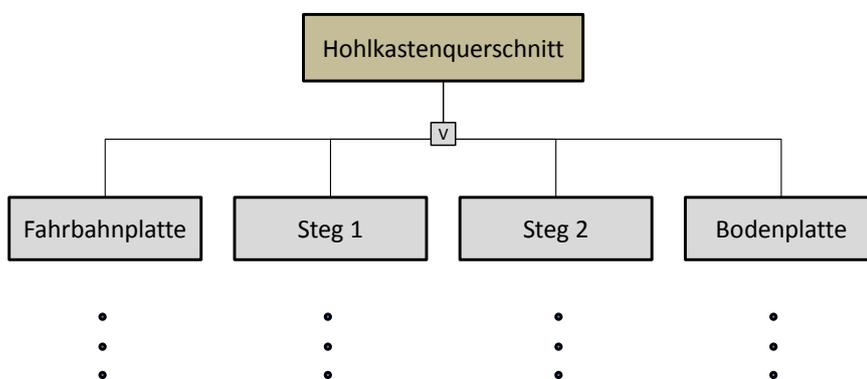


Abbildung 66 – Systemmodell Hohlkastenquerschnitt

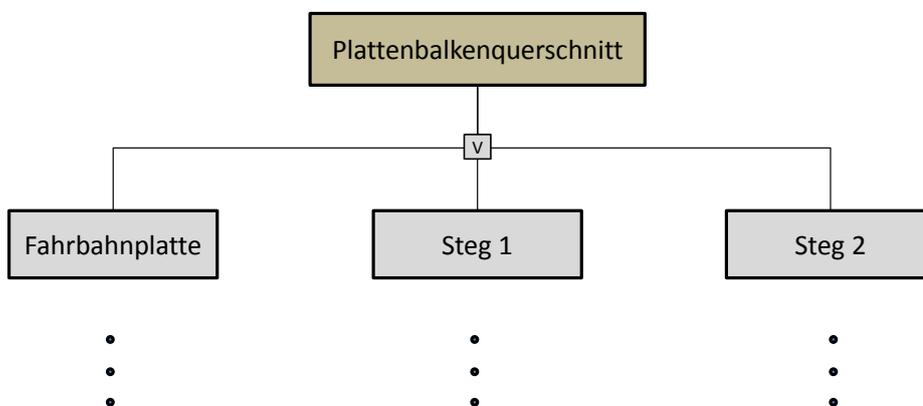


Abbildung 67 – Systemmodell Plattenbalkenquerschnitt

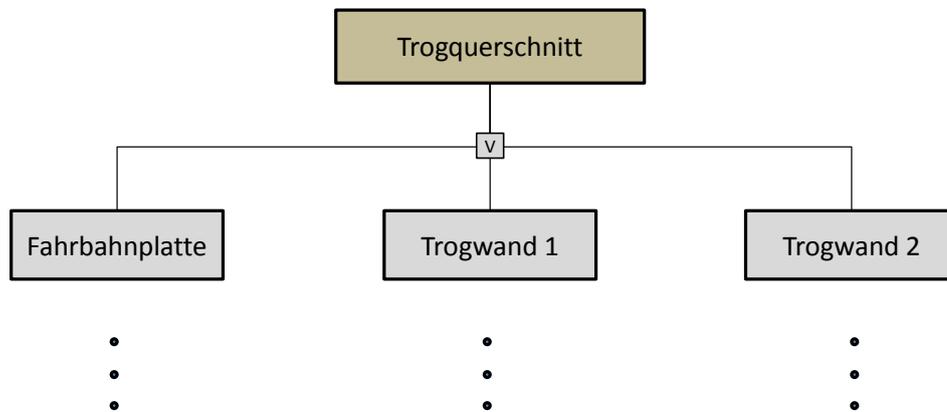


Abbildung 68 – Systemmodell Trogquerschnitt

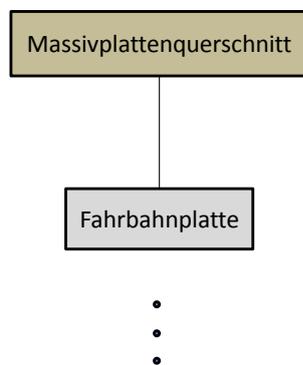


Abbildung 69 – Systemmodell Massivplattenquerschnitt

Abbildung von Schädigungsmechanismen der Quersysteme befinden sich im Anhang unter Anlage 1.

## 7 Zusammenfassung

Zu Beginn werden in Kapitel 2 „Quersysteme“ und im Kapitel 3 „Schädigungsmöglichkeiten“ die Grundlagen geliefert, die für die Modellierung von Systemelement- und Schädigungsmodulen von Bedeutung sind.

Hierfür werden im Kapitel 3 - in Form einer Systembeschreibung - Quersysteme in ihre wesentlichen Systemelemente, die für die Tragfähigkeit und für die Gebrauchstauglichkeit des Systems (Ausrüstungsteile) von Bedeutung sind, zerlegt. Durch die Erhöhung des Detaillierungsgrads werden die verschiedenen tragenden Systemelemente in ihre Grundkomponenten, Baustoffe und Ausrüstungsteile (nichttragende Systemelemente) durch die sie ihre Eigenschaften erhalten, aufgeteilt. Anhand einer Zuordnung der jeweiligen Baustoffe und Ausrüstungsteile zu den tragenden Systemelementen wurden Module der Systemelemente für verschiedene Quersystemtypen definiert. Im Kapitel 4 werden die in Kapitel 3 erklärten Schädigungsmöglichkeiten und Schadensmerkmale zu Schädigungsmodulen zusammengefasst. Das Schädigungsmodul besteht aus den Schädigungsmöglichkeiten und den damit verbundenen Schadensparameter. Ein Schadensparameter dient als Schädigungsindikator und gibt Auskunft über die Entstehung und die damit verbundenen Schadensmerkmale.

Anschließend werden im Kapitel 5 die Schädigungsmodulen den jeweiligen Modulen der Systemelemente zugeordnet und im Kapitel 6 daraus ein Logisches Systemmodell basierend auf einem Fehlerbaum definiert, dass verschiedene Schädigungsmechanismen, die zu einem vollständigen oder teilweisen Versagen des Quersystems führen, abbildet.

Eine Zukunftsprognose bedarf verlässlicher Eingangsparameter. Hierfür kommen für die werkstoffspezifische Beurteilung neben den zerstörungsfreien Verfahren auch minimalinvasive zerstörende Verfahren in Frage. Weiterhin ist ein Kenntnis der Lasten sowie der Umweltbedingungen erforderlich, um letztendlich z. B. mittels eines „Brücken Management Systems“ eine Zustandsprognose ermitteln zu können.

## 8 Literaturverzeichnis

Holst, Karl Heinz: Brücken aus Stahlbeton und Spannbeton: Entwurf, Konstruktion und Berechnung/ Karl Heinz Holst. – 4.Aufl. Berlin: Ernst, 1998.

Joachim Scheer (2001): Versagen von Bauwerken Ursachen und Lehren Band 1: Brücken, Ernst und Sohn Verlag.

Joachim Scheer (2011): Failed Bridges Case Studies, Causes and Consequences, Ernst und Sohn Verlag.

Ernst-August Kracke, Klaus Lodde (2011): Leitfaden Straßenbrücken - Entwurf, Baudurchführung, Erhaltung, Ernst und Sohn Verlag.

Eugen Brühwiler , Christian Menn (2003): Stahlbetonbrücken – Dritte, aktualisierte und erweiterte Auflage, Springer Verlag.

Herzog, Max Schadenfälle im Stahlbeton- und Spannbetonbau: Ursachen und Sanierung/ Max A.M. Herzog-Düsseldorf-Werner-2000.

Wasser- und Feuchteschäden im Stahlbetonbau – Vermeiden, Beurteilen und Instandsetzen (2005). Tagungsband, Fraunhofer IRB Verlag.

Konrad Zilch, Gerhard Zehetmaier (2005) : Bemessung im konstruktiven Betonbau- Nach DIN 1045-1 und DIN EN 1992-1-1, Springer Verlag.

Schießl, P., Gehlen, C., Sodeikat C.: Dauerhafter Konstruktionsbeton für Verkehrsbauwerke: Betonkalender 2004, Ernst und Sohn Verlag.

Hunkeler, F.: Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten. Bundesamt für Straßenbau, Schweiz. Forschungsauftrag 86/90, Bericht VSS Nr.510.1994.

Tuutti, K.: Corrosion of steel in concrete. CBI Research, fo 4:82, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm 1982.

DuraCrete, modeling of degradation – Probabilistic performance based durability design of concrete structures, The European Union- Brite EuRam III, Contract No. BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R4-5, December 1998.

Jan Lingemann (2009): Zum Ankündigungsverhalten von älteren Brückenbauwerken bei Spannstahlausfällen infolge von Spannungsrisskorrosion.

Bertolini, L., Elsener, P., Pedferri, Polder, R.: Corrosion of steel in concrete - Prevention, diagnosis and repair. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004.

Nürnberger, U.: Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen , Band 1. Bauverlag Berlin, 1995.

Isecke, B.; Menzel, K.; Mietzer, J. Nürnberger, U.: Gefährdung älterer Spannbetonbauwerke durch Spannungsrisskorrosion. In: Beton- und Stahlbetonbau 90 (1995), Heft 5.

Grimme, D., Isecke, B., Nürnberger, U., Riecke, E.M. , Uhlig, G.: Spannungsrisskorrosion in Spannbetonbauwerken. Düsseldorf: Stahleisen, 1983

Michael Vogel, Dauerhaftigkeitsbemessung und Lebensdauerprognose als zentrale Bausteine eines effektiven Lebenszyklusmanagements im Betonbau, 2009.

VDI 3822, VDI-Richtlinie Schadensanalyse, Blatt 1: Grundlagen, Begriffe, Definitionen, Ablauf einer Schadensanalyse (03/2004).

Claus Flohrer, Hochtief Construction AG, Mörfelden-Walldorf Ausgewählte Fallbeispiele zur Untersuchung von Spannbeton, 2006.

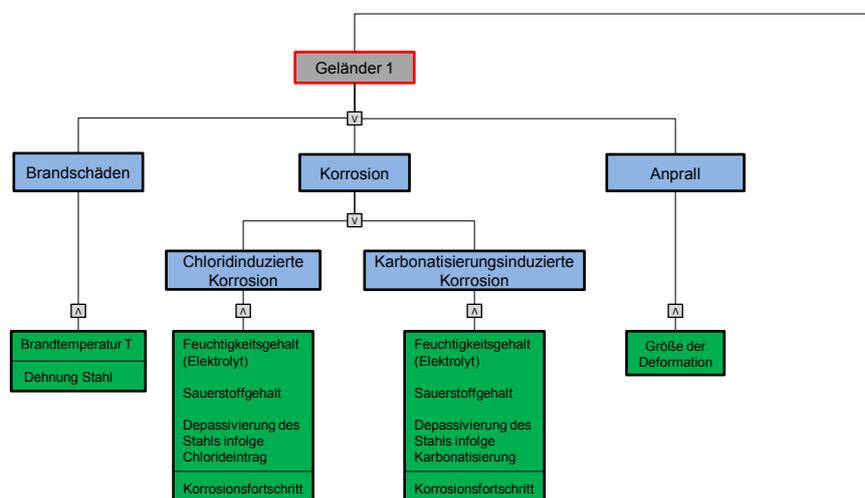
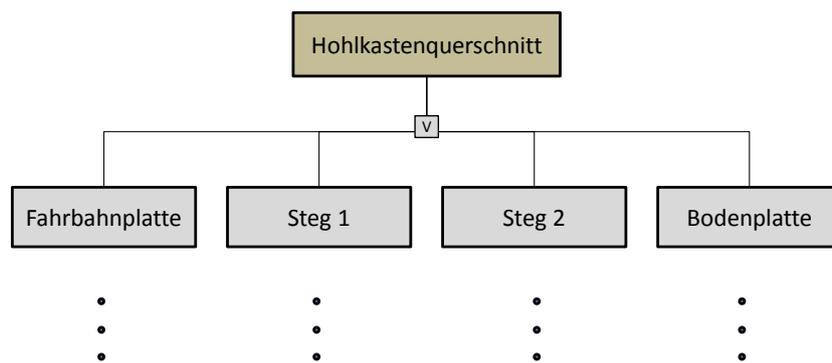
Prof. Dr.-Ing. Robert Schmitt, Vorlesung Qualitätsmanagement, Aachen 2009

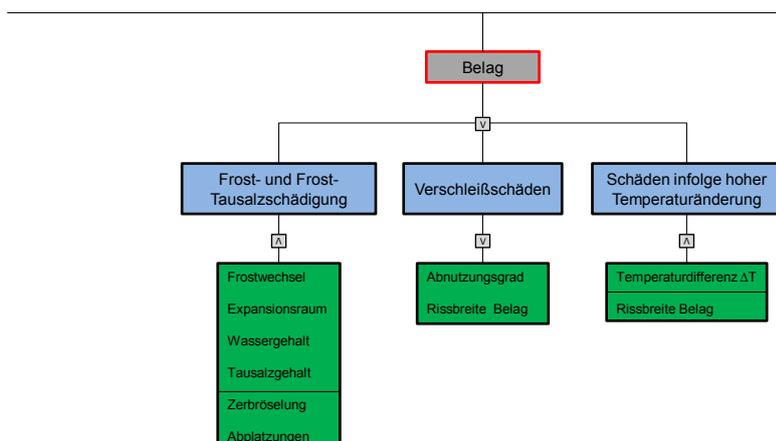
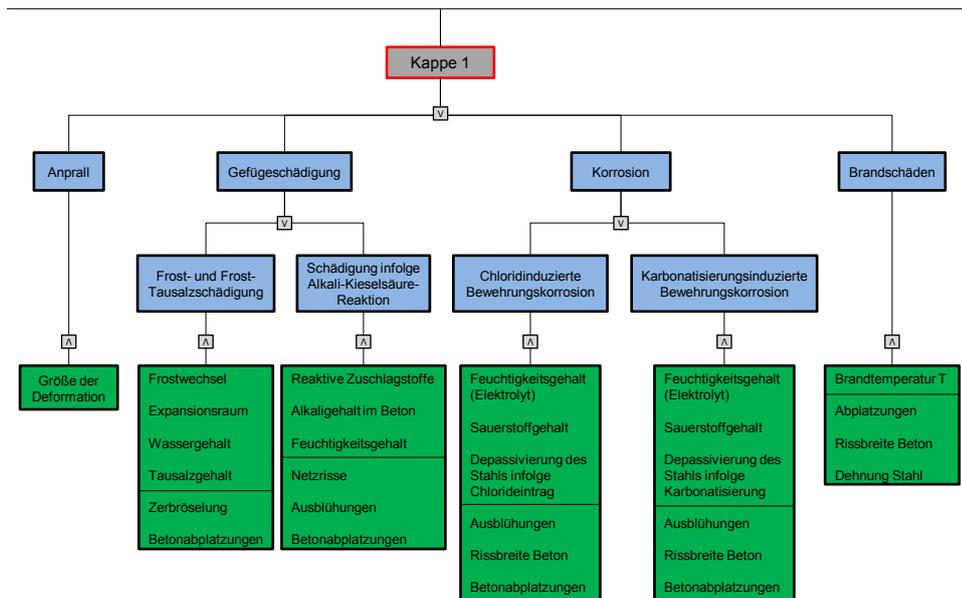
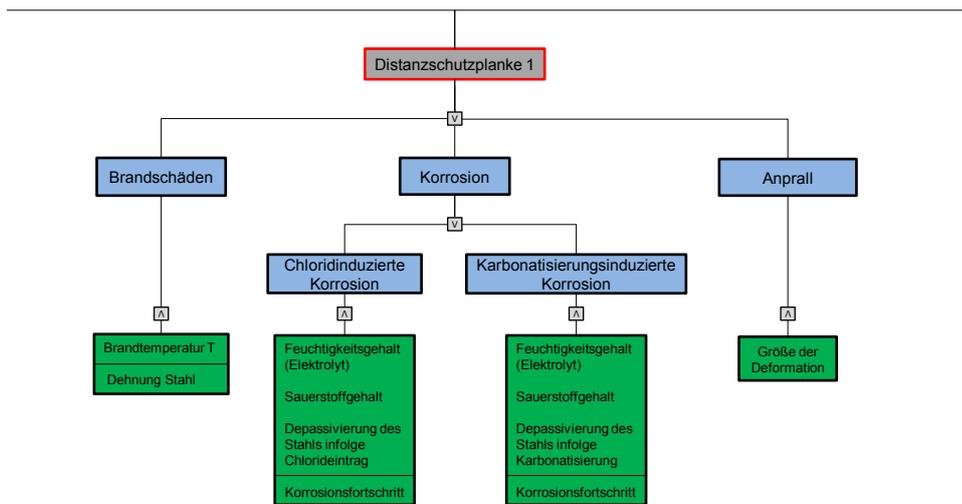
# 9 Anhang

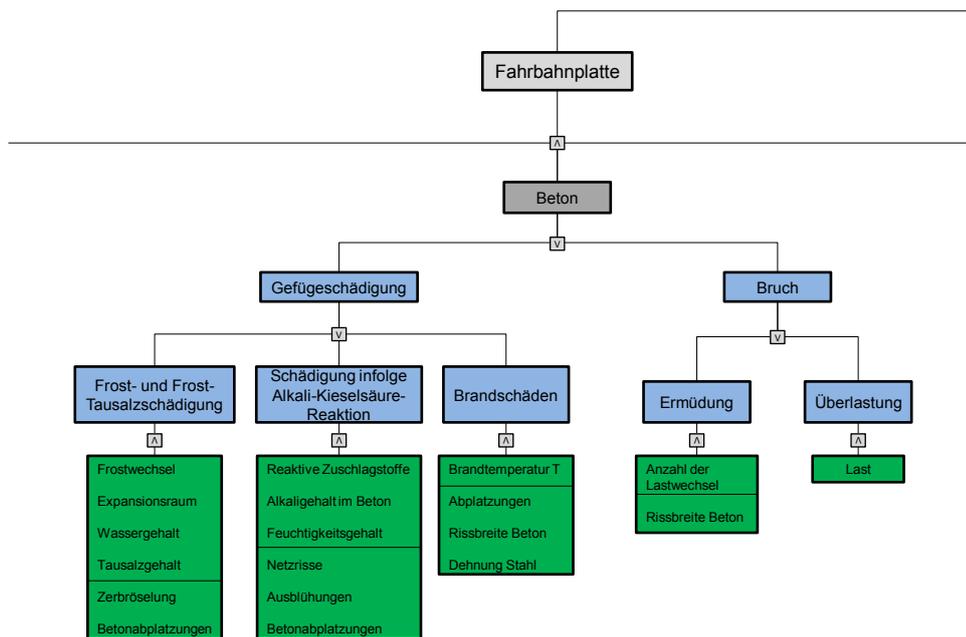
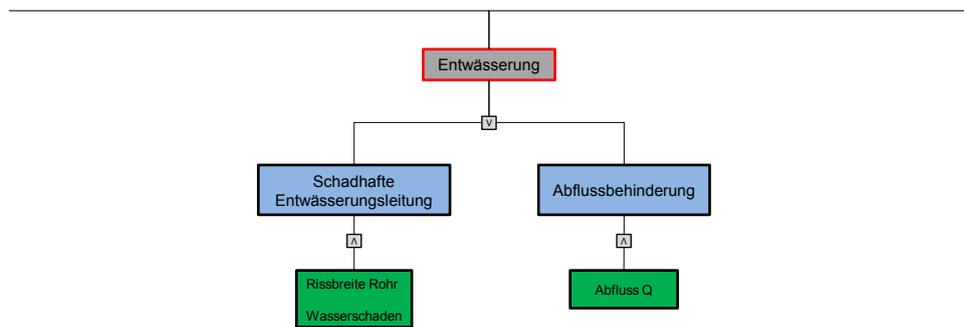
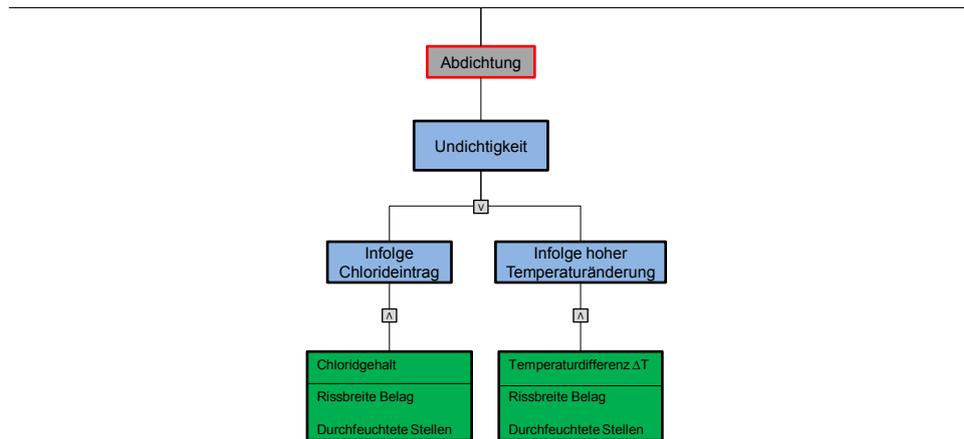
## Anlage 1

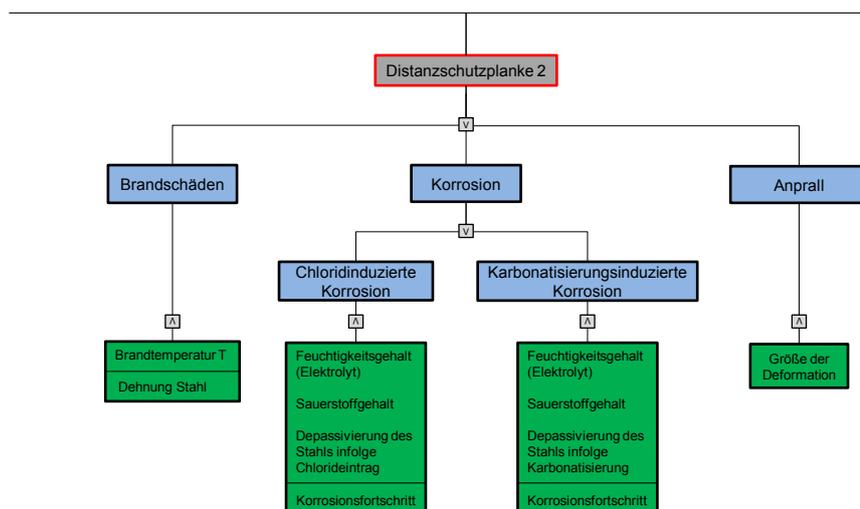
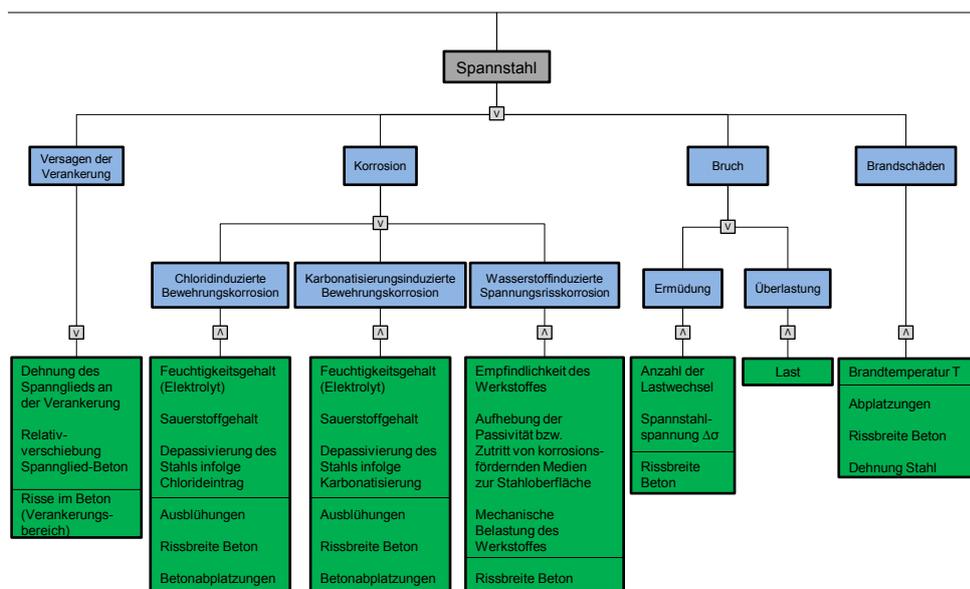
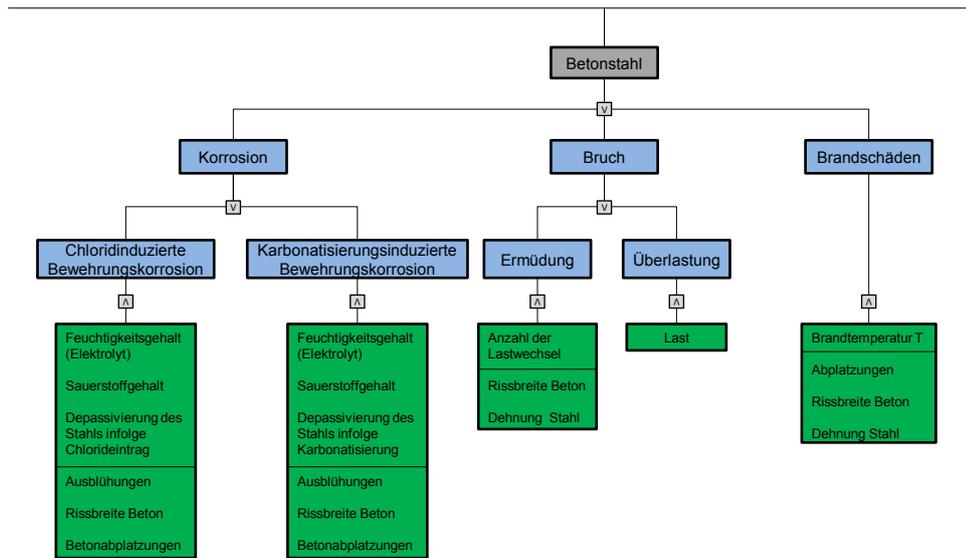
### Logische Systemmodelle zur Abbildung von Schädigungsmechanismen der Quersysteme

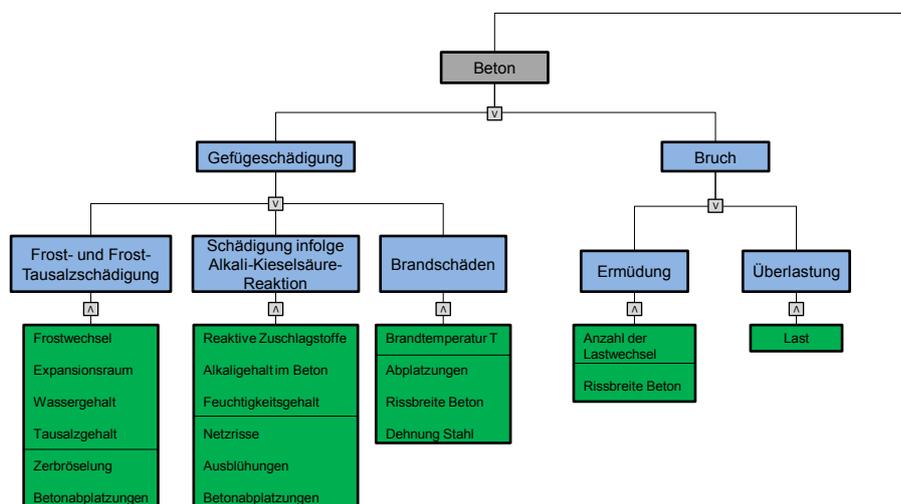
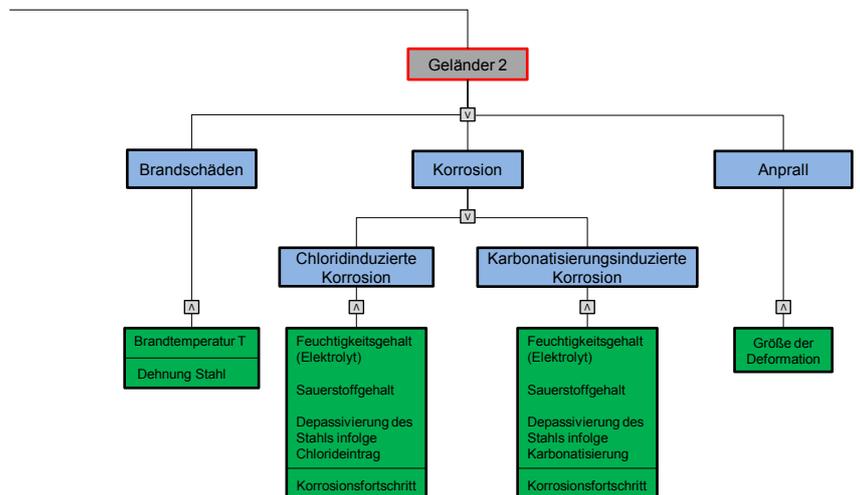
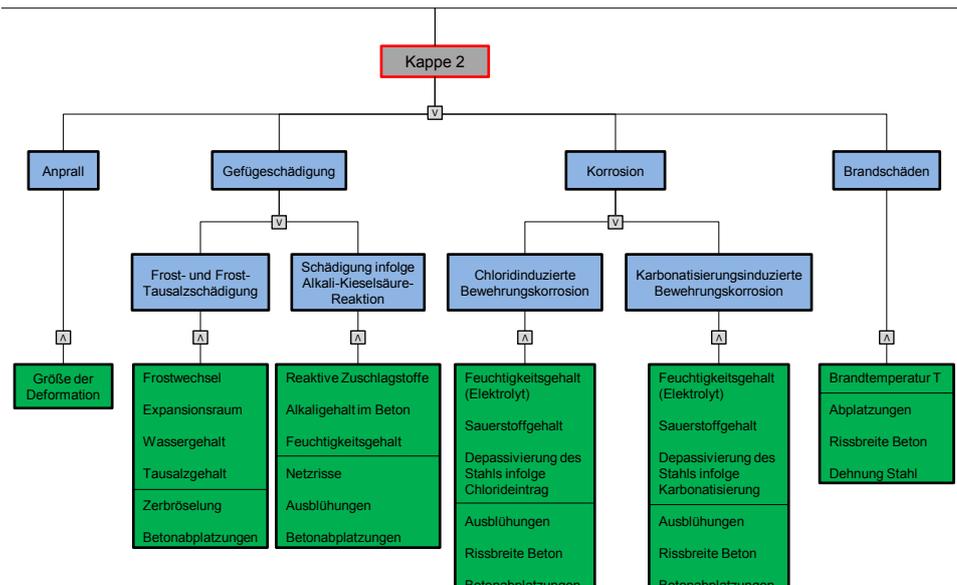
#### 1. Hohlkastenquerschnitt:

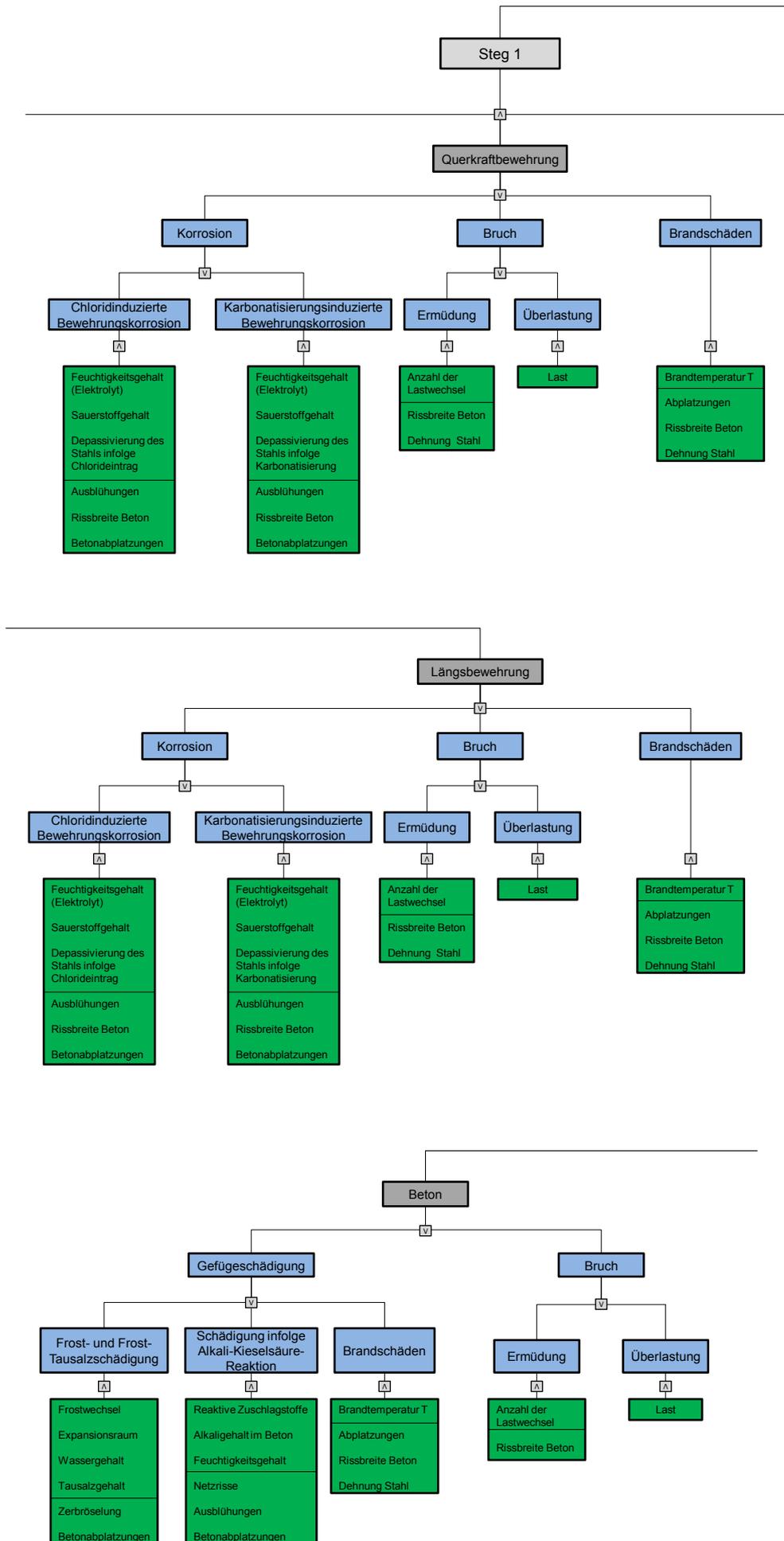


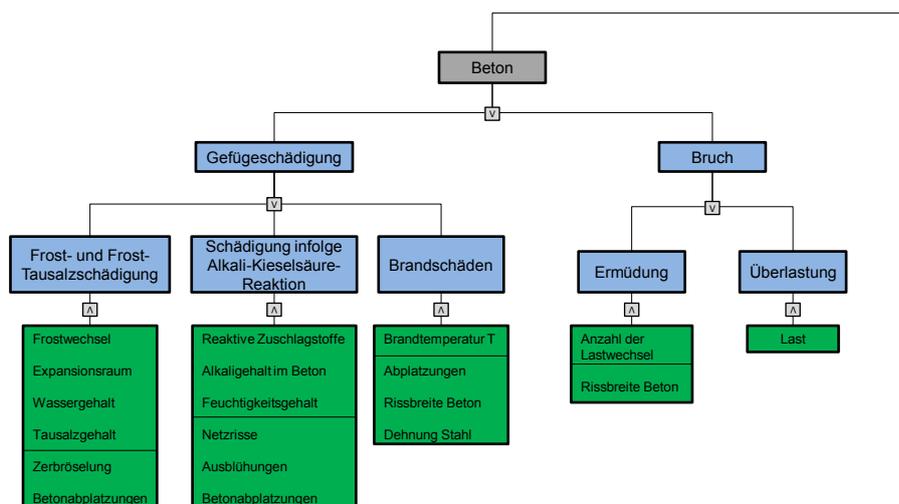
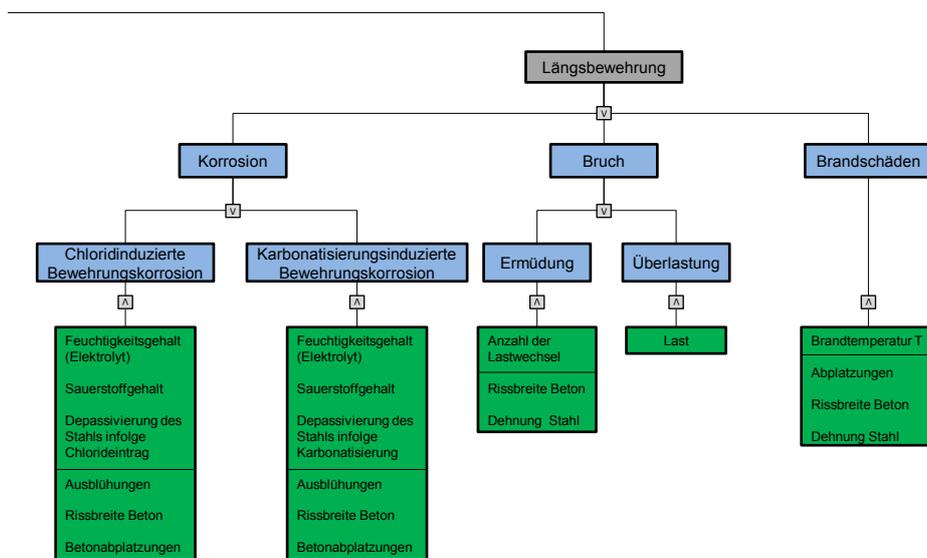
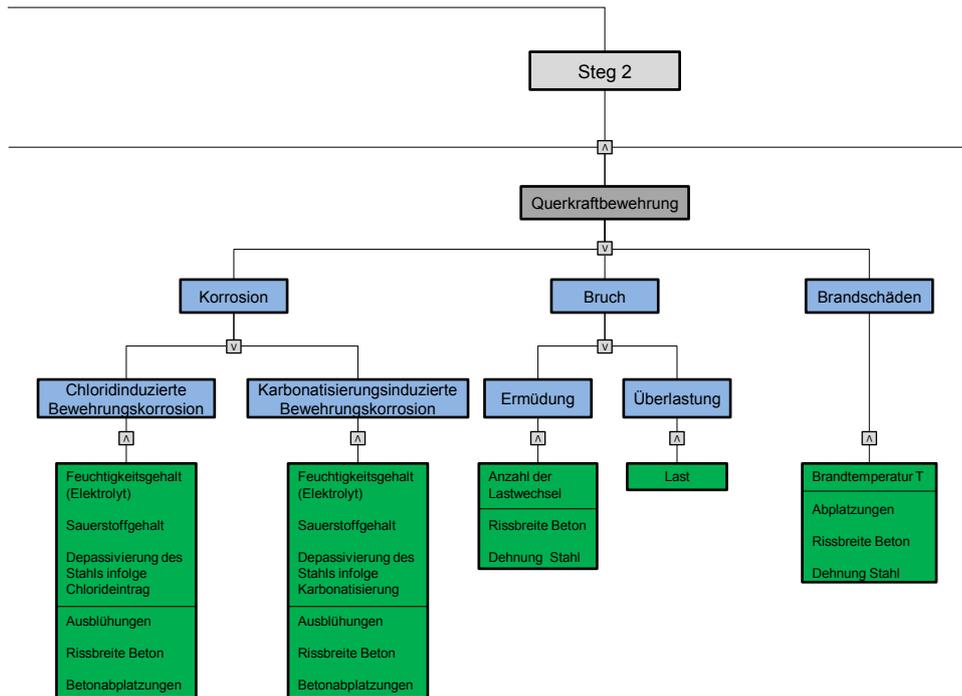


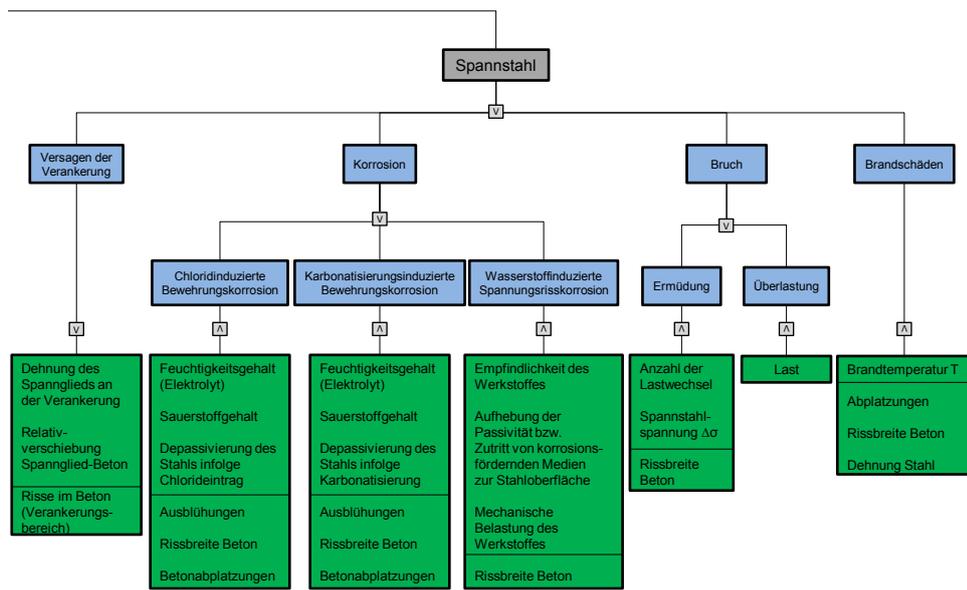
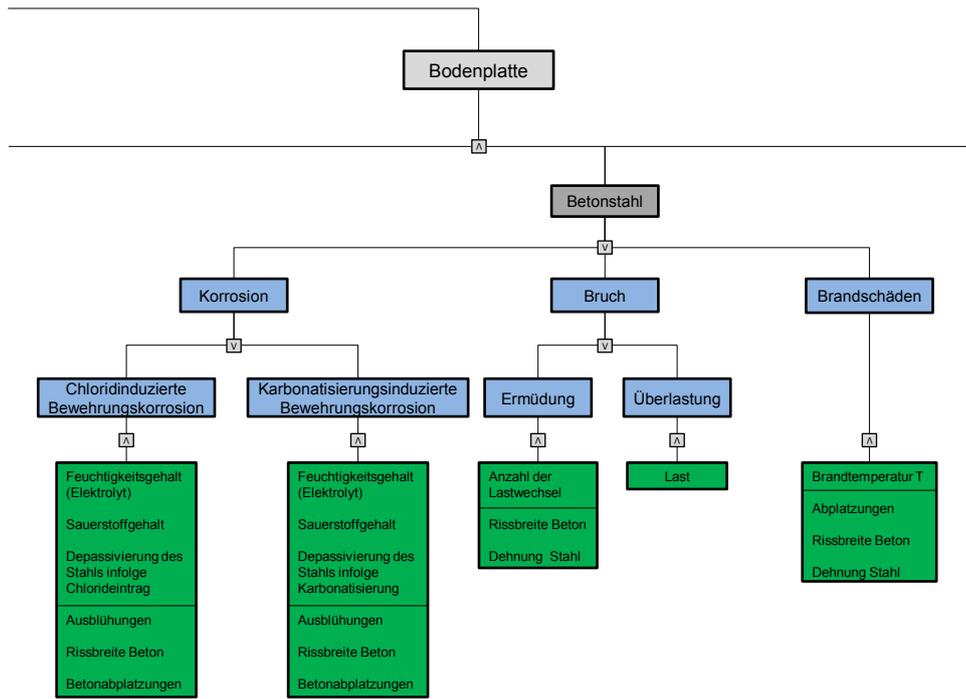




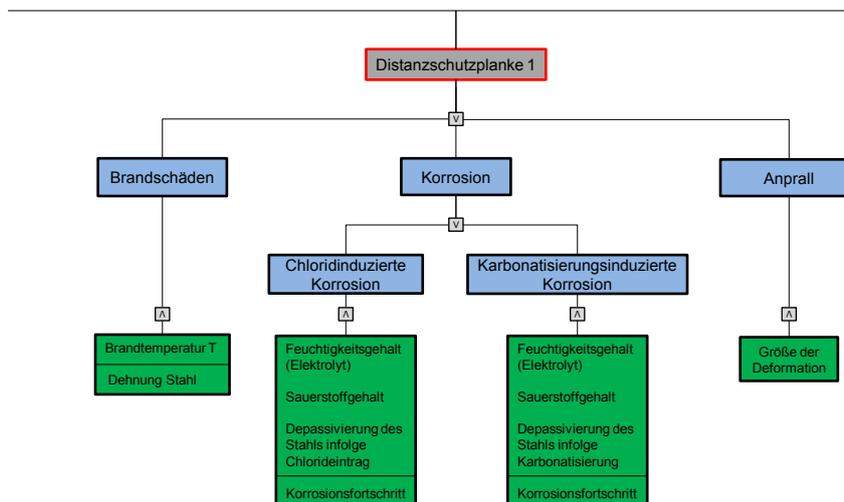
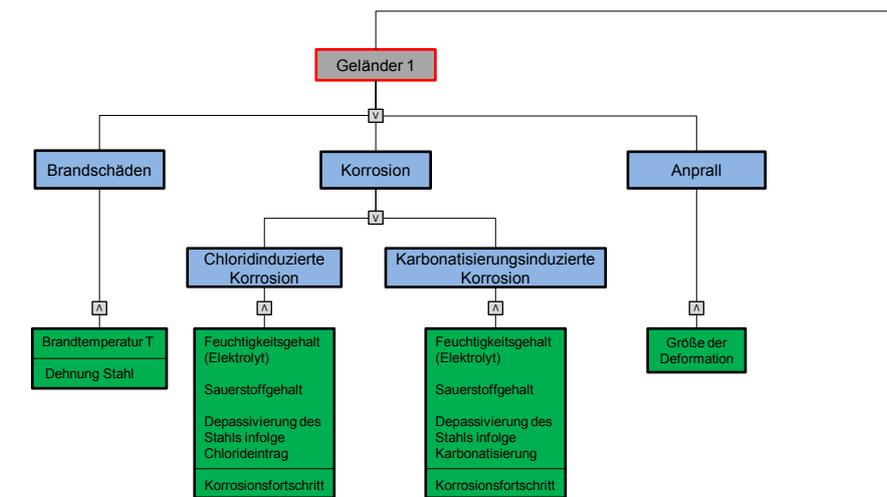
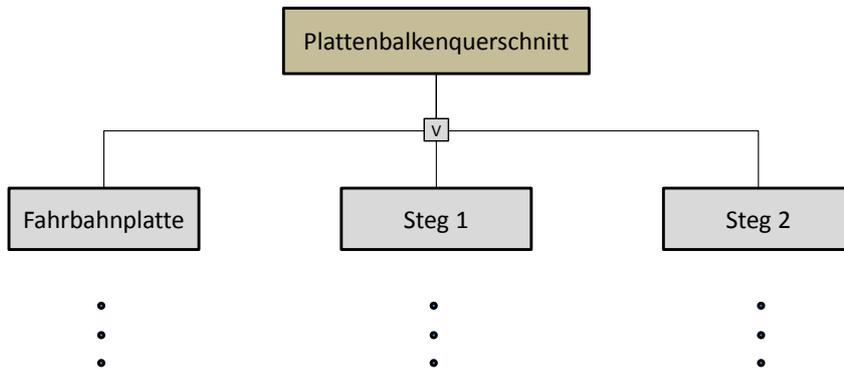


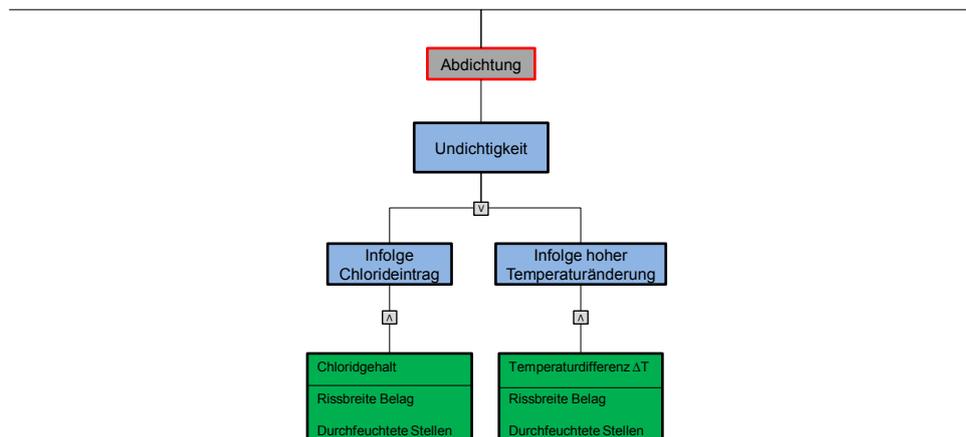
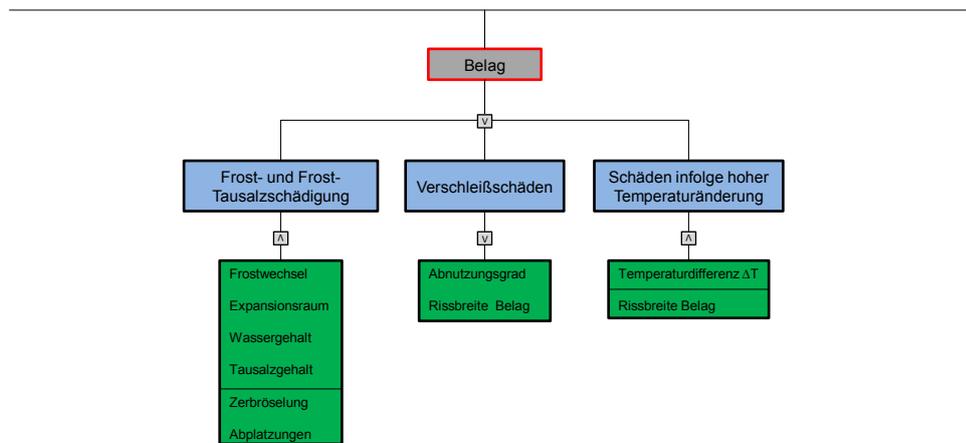
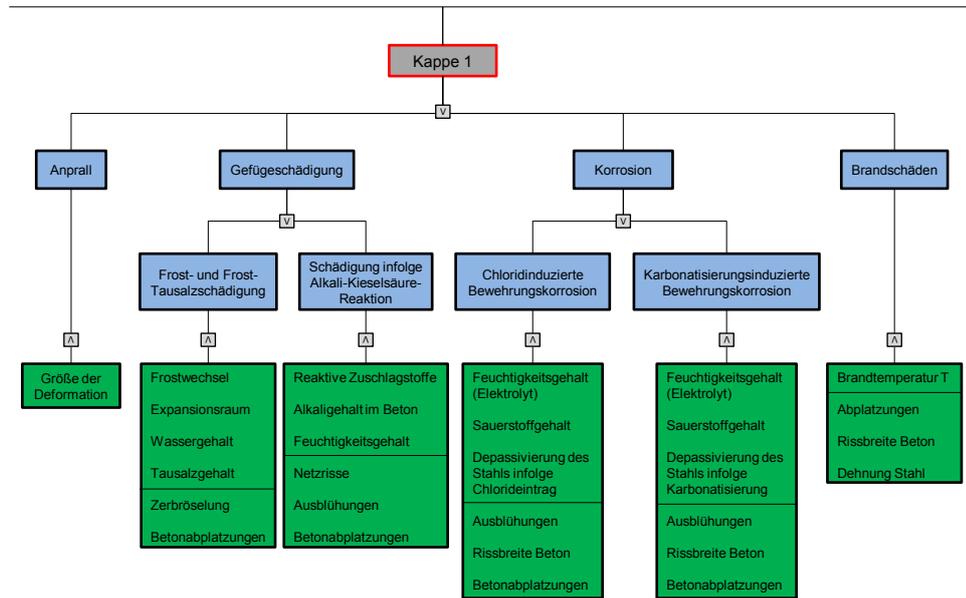


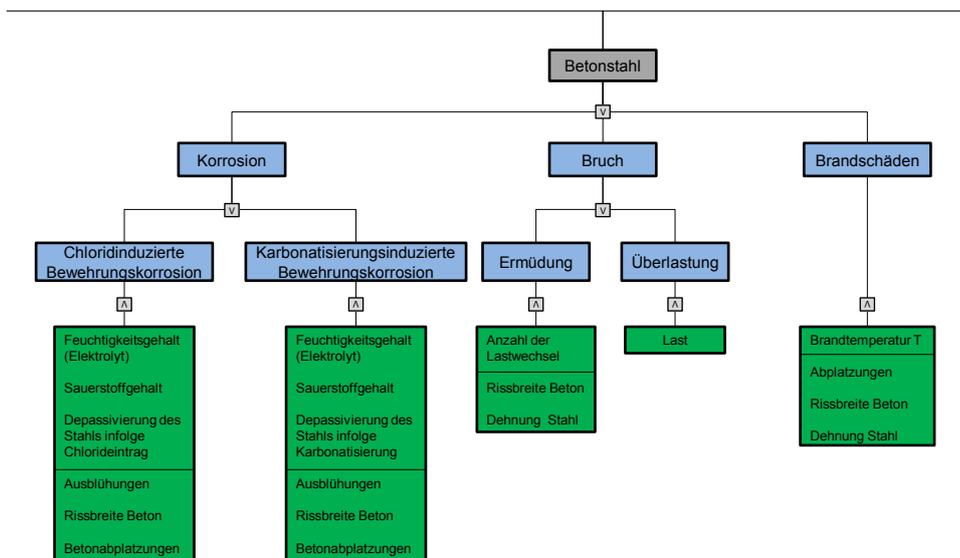
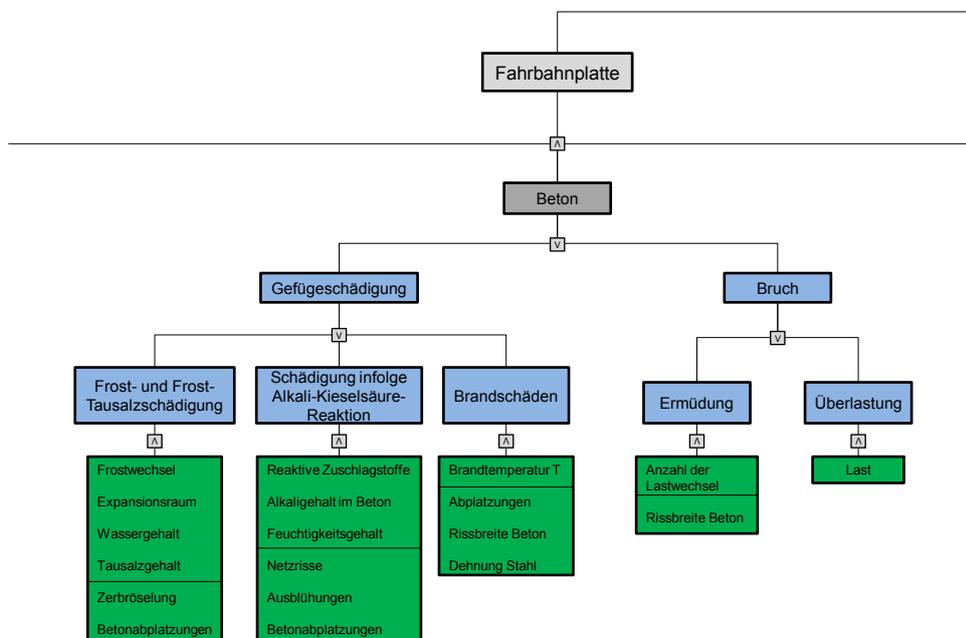
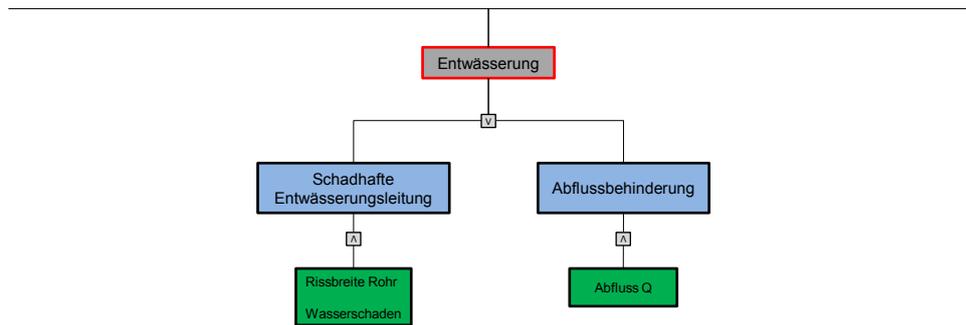


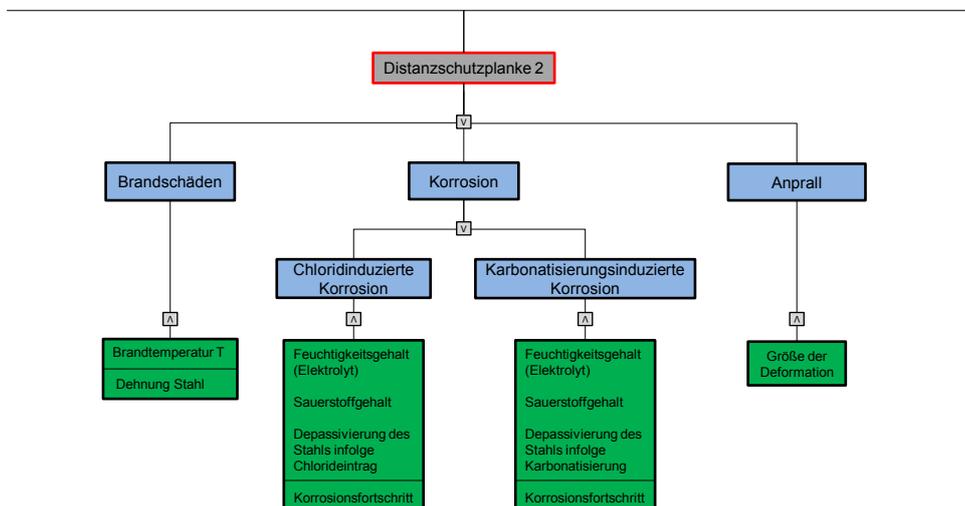
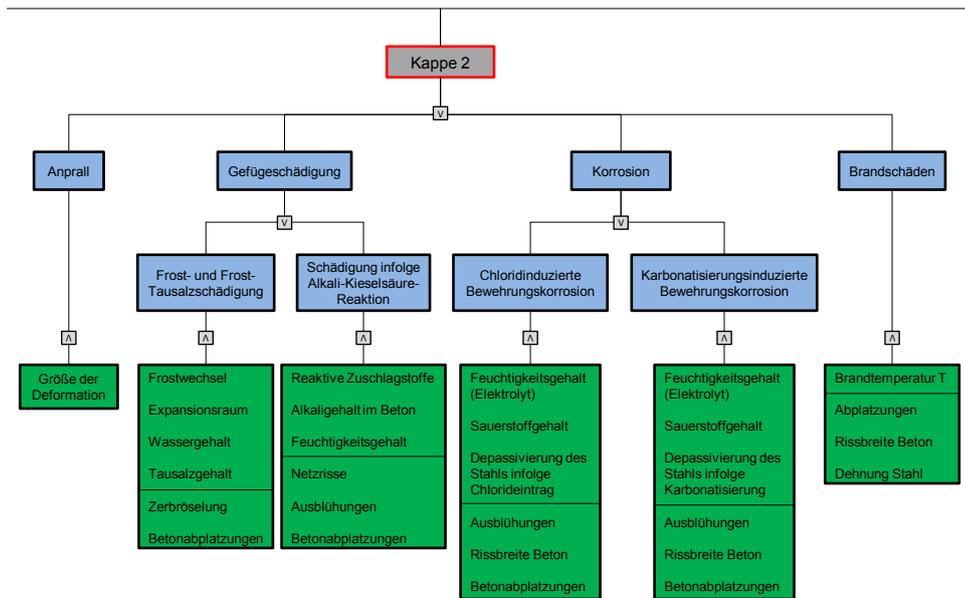
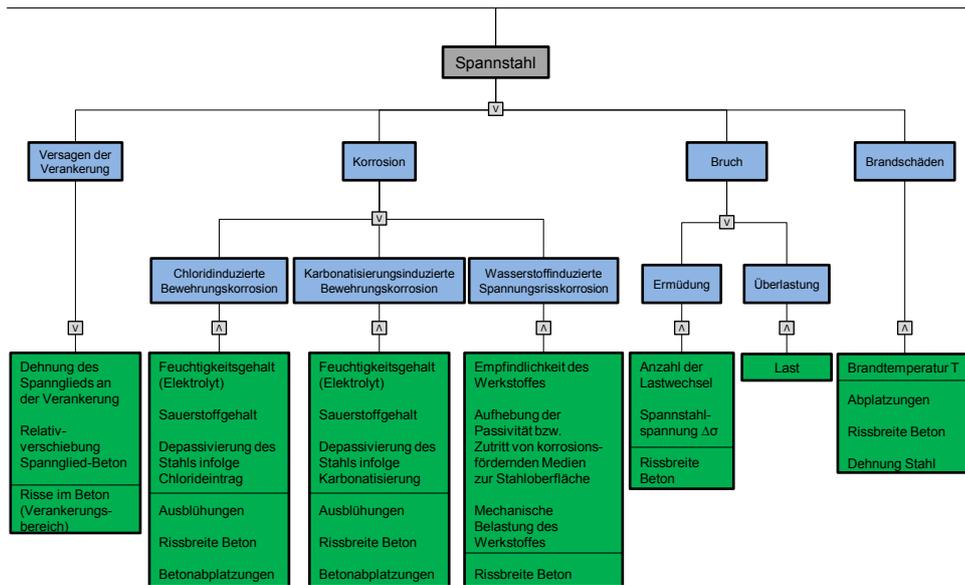


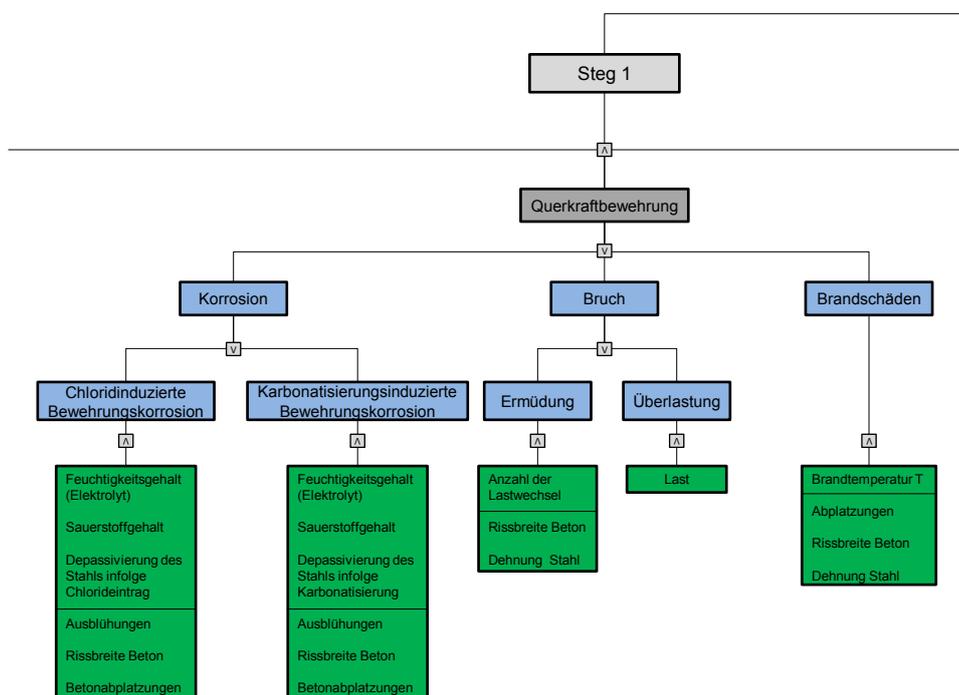
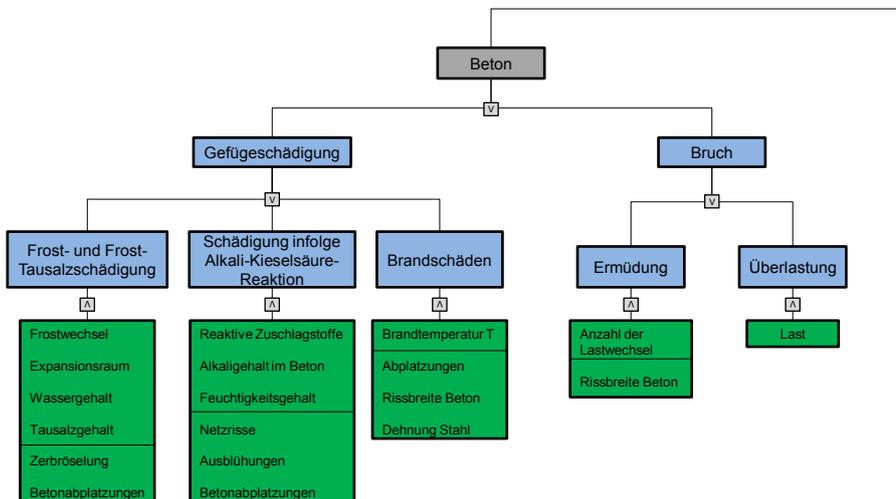
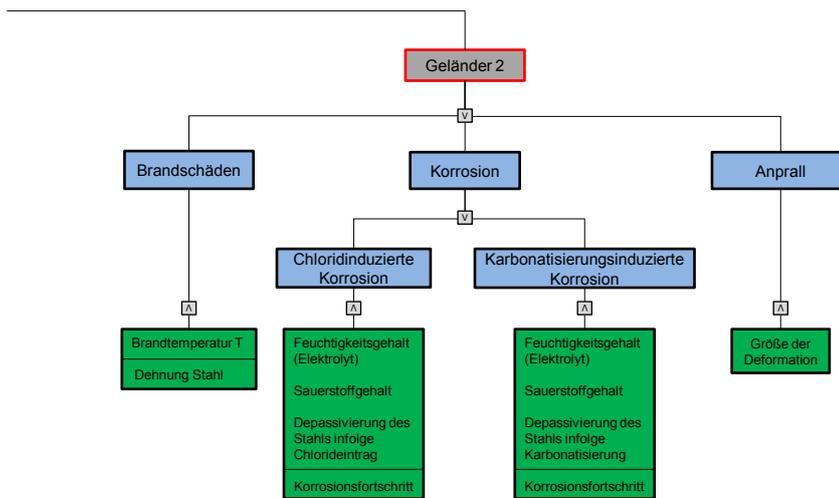
2 Plattenbalkenquerschnitt

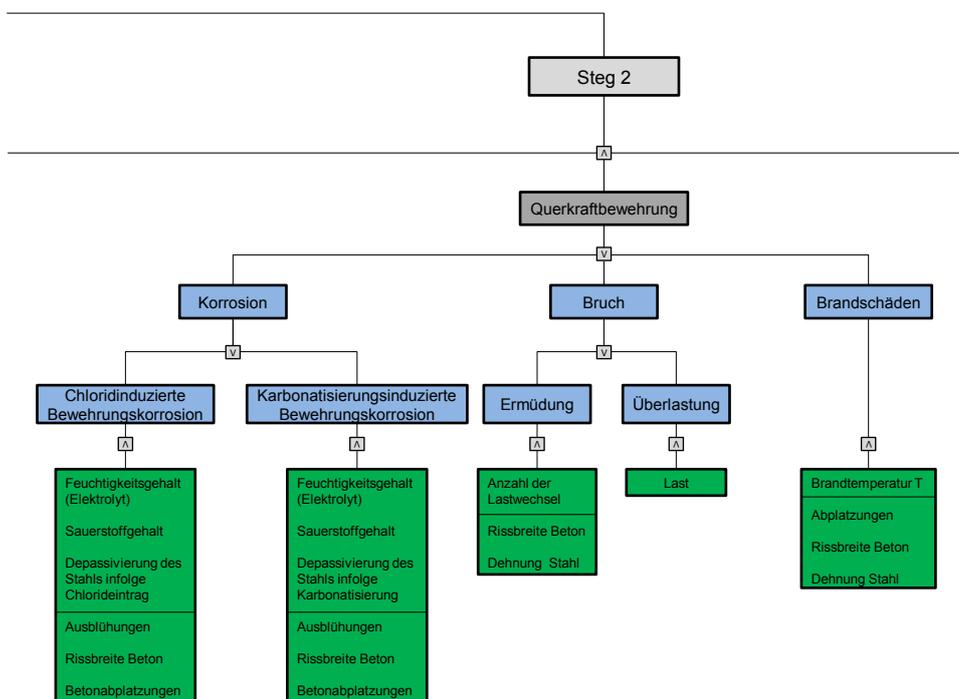
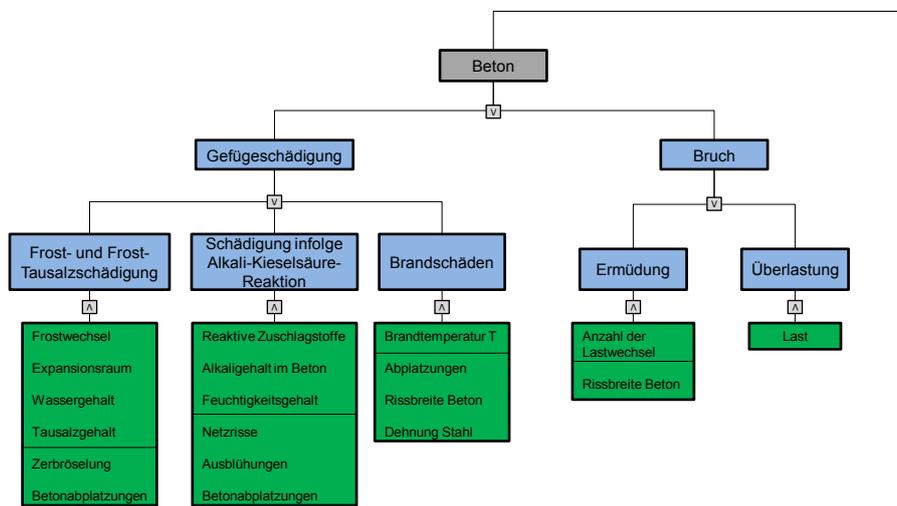
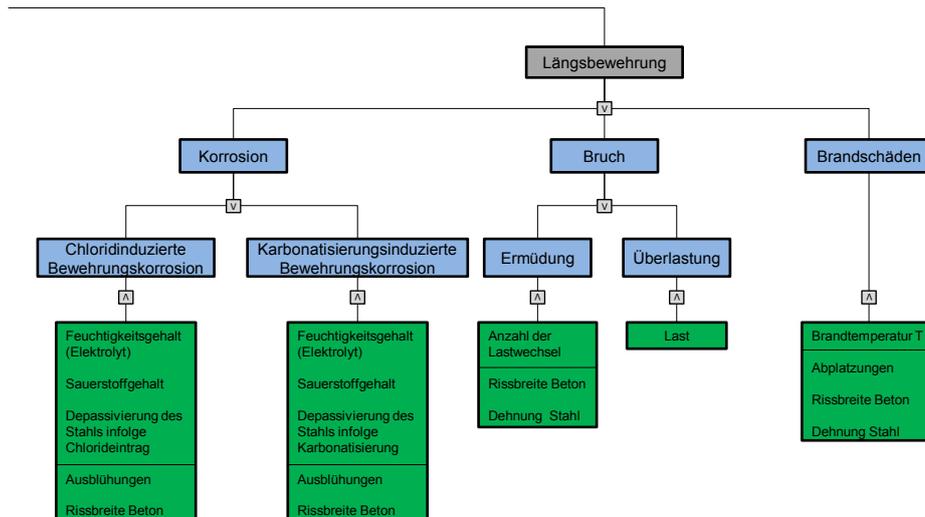


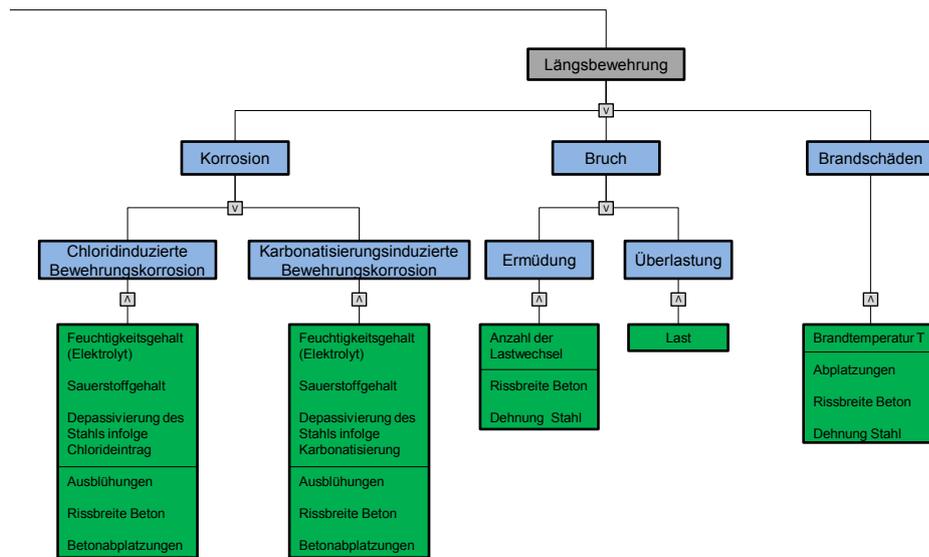




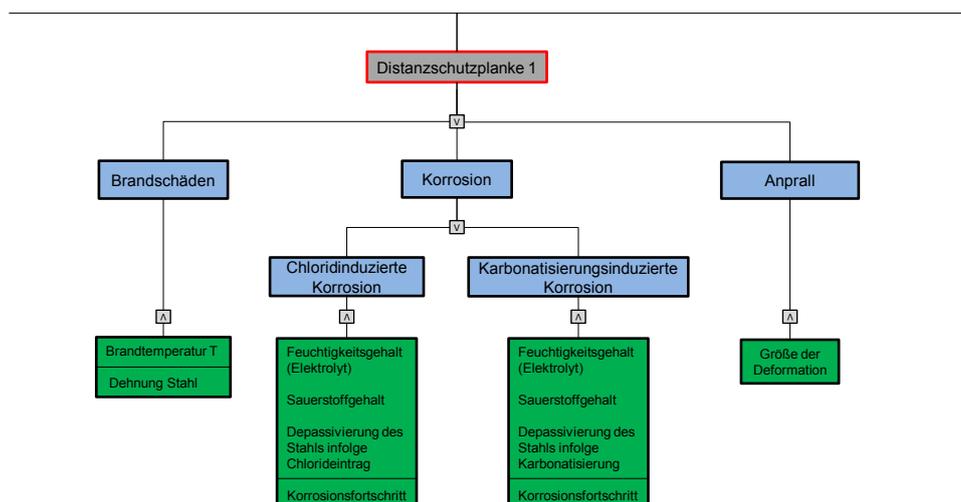
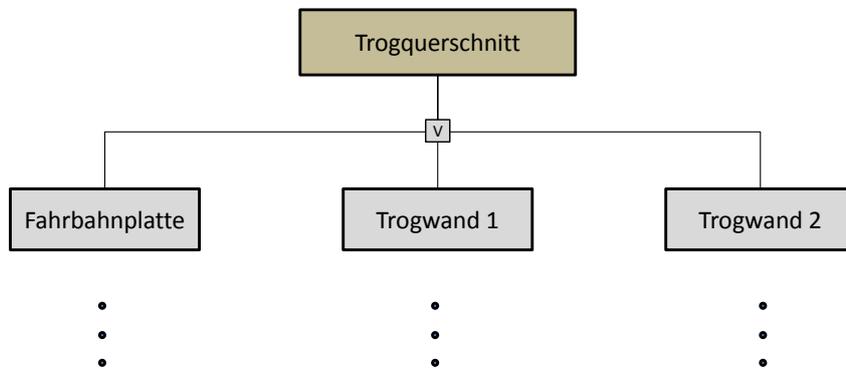


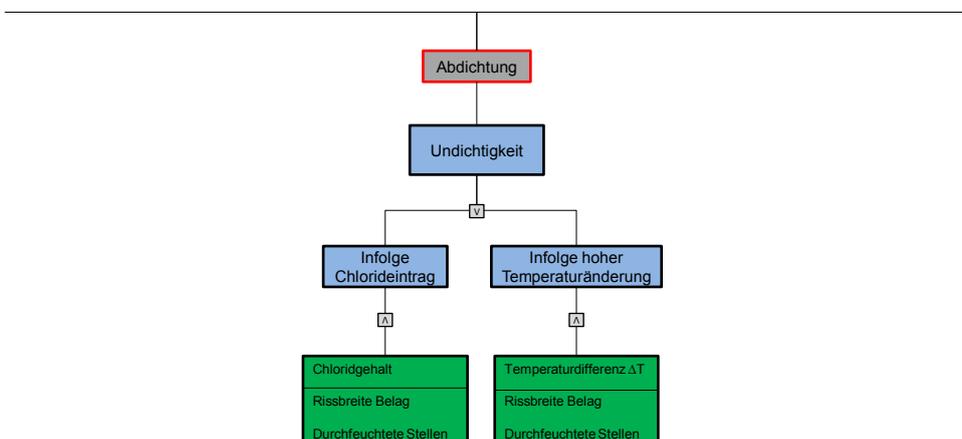
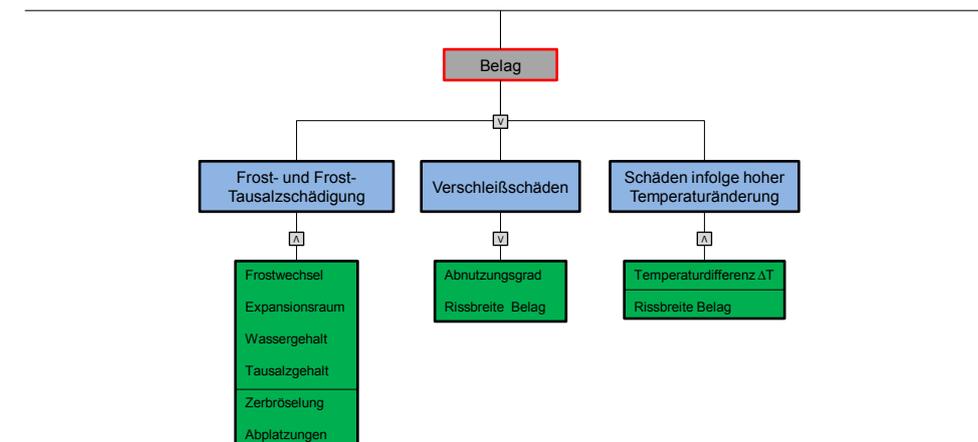
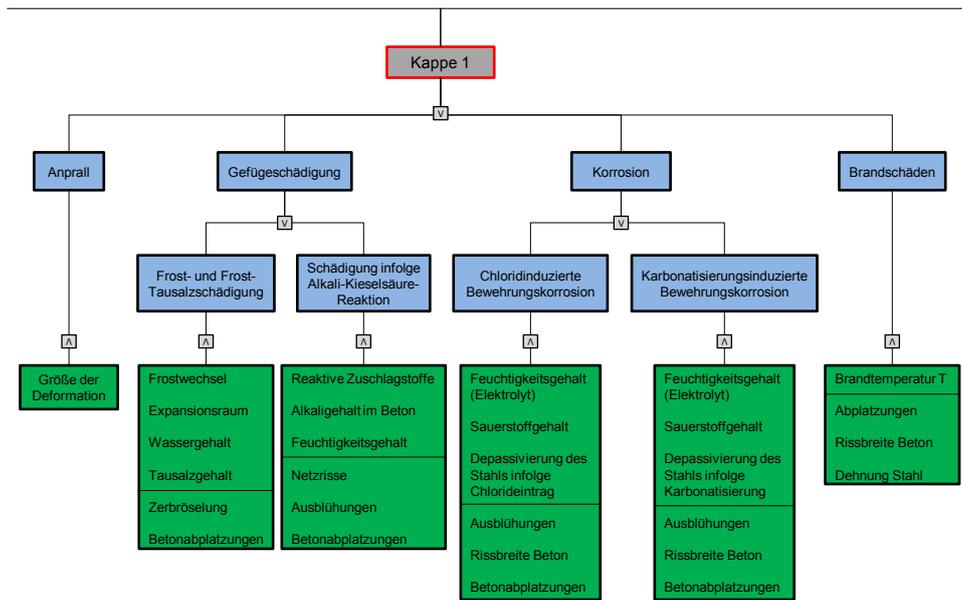


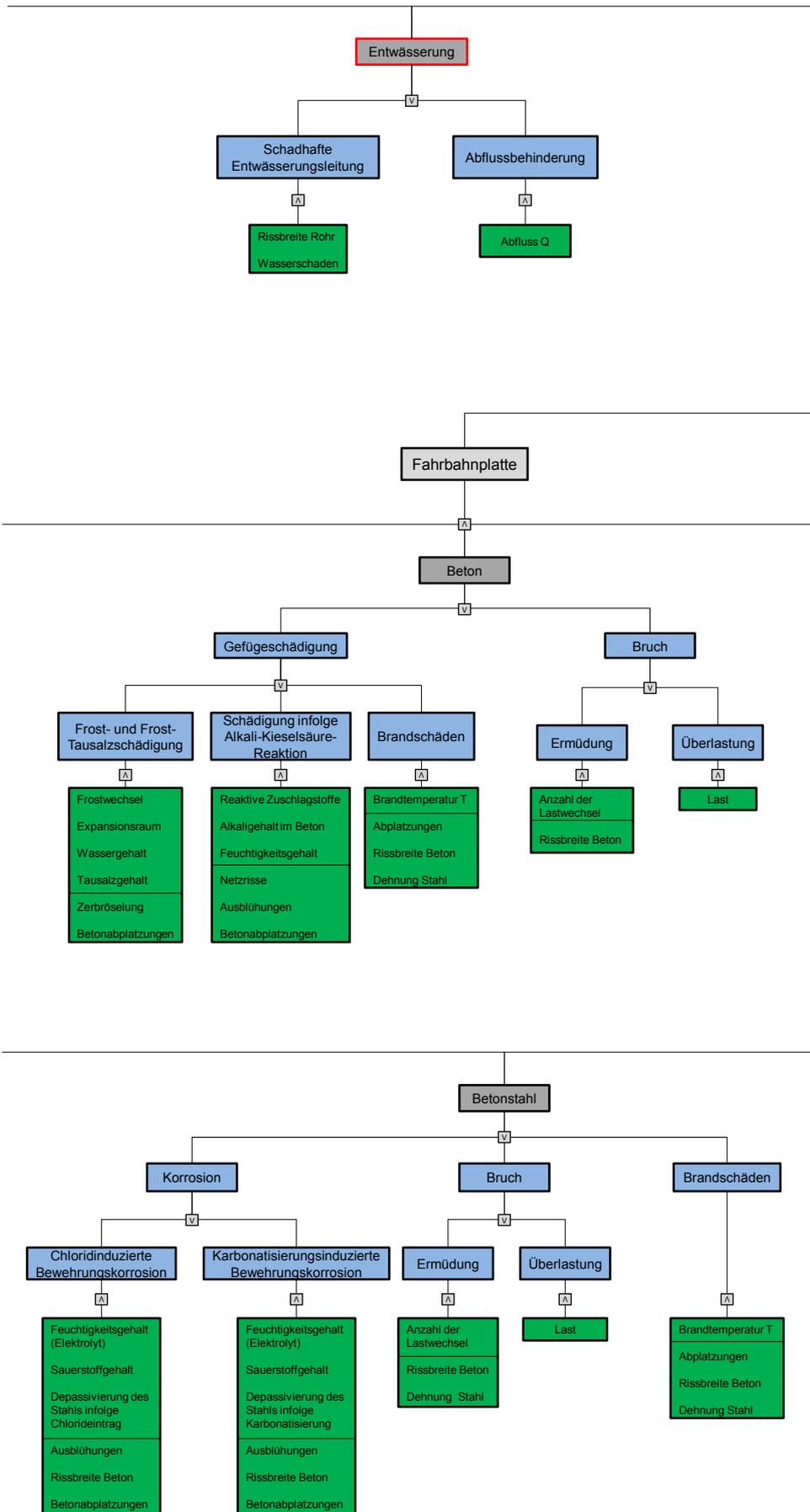


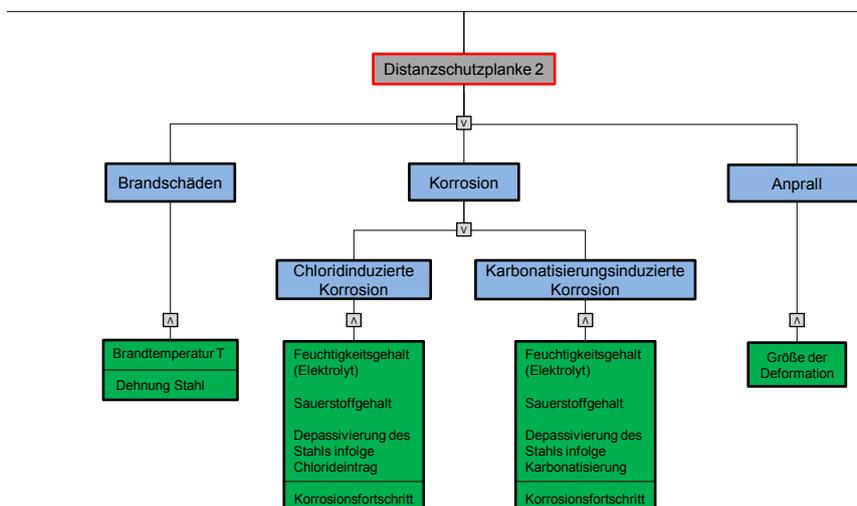
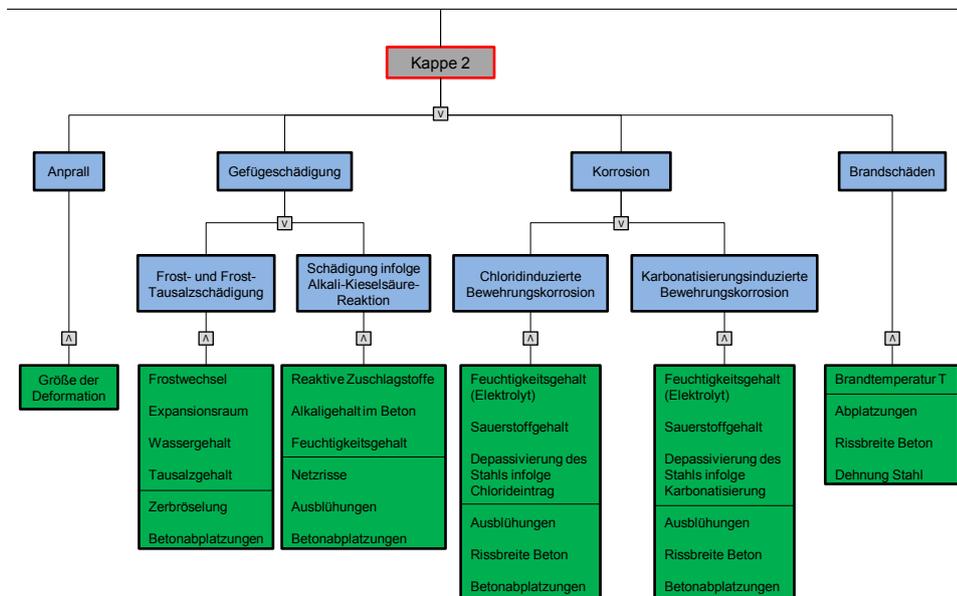
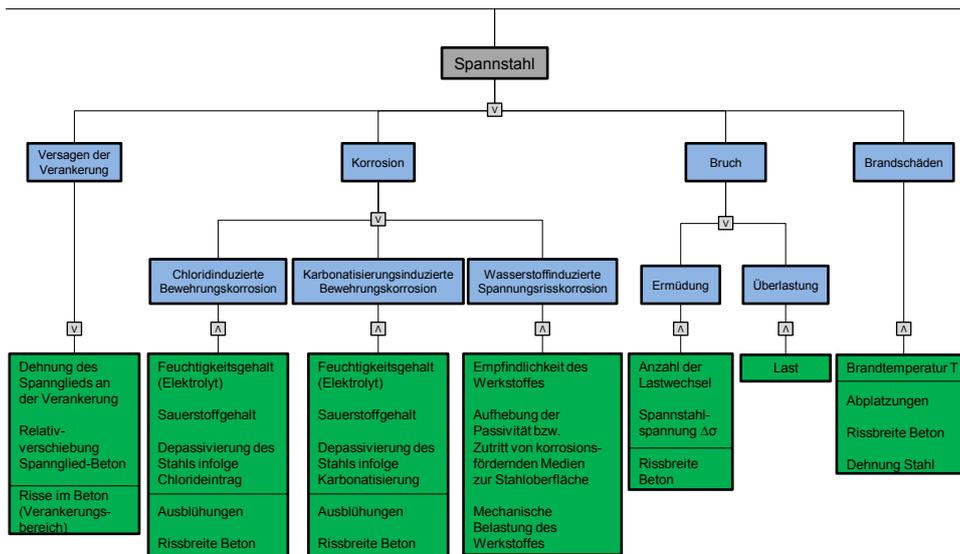


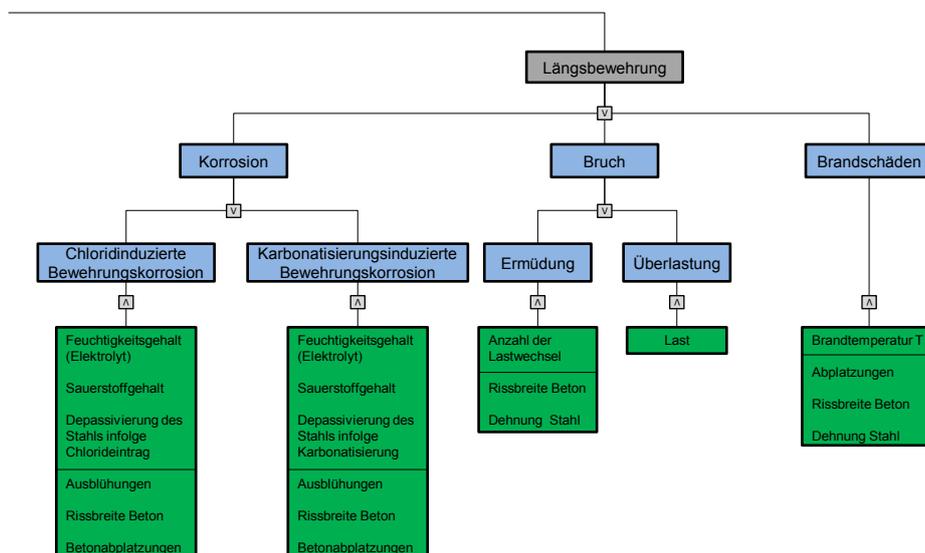
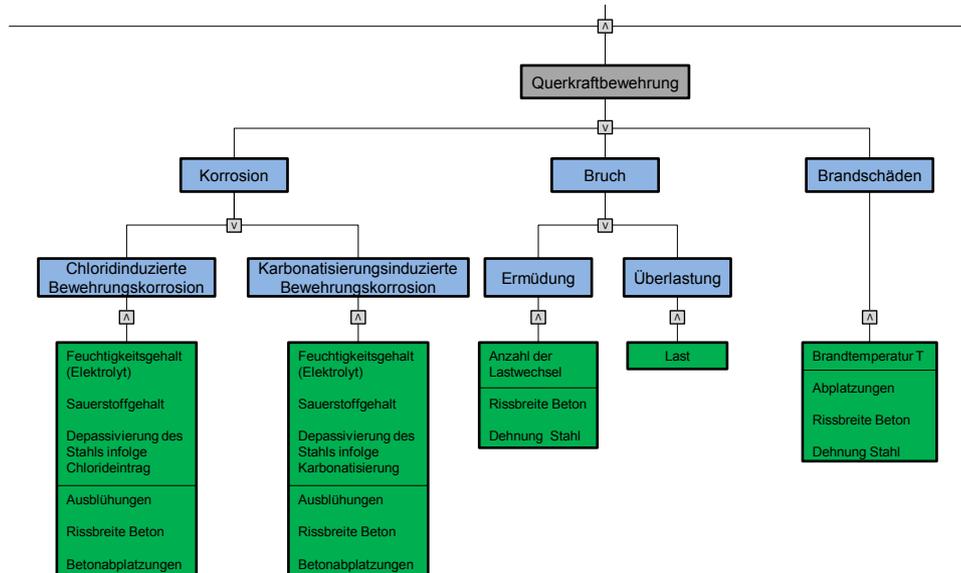
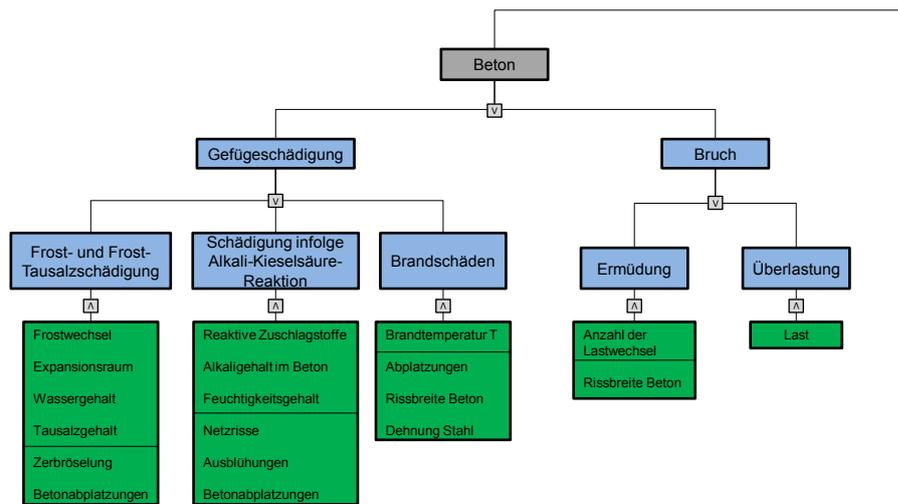
3. Trogerschnitt

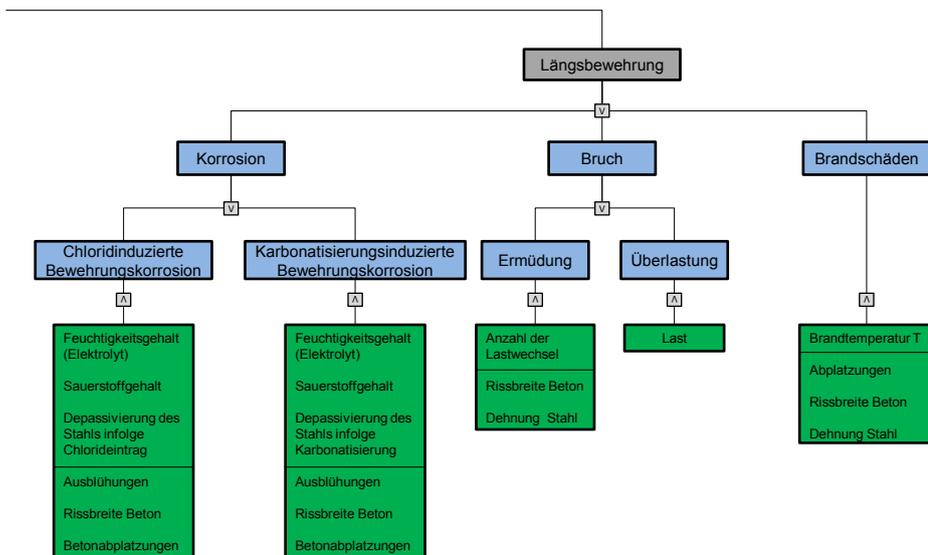
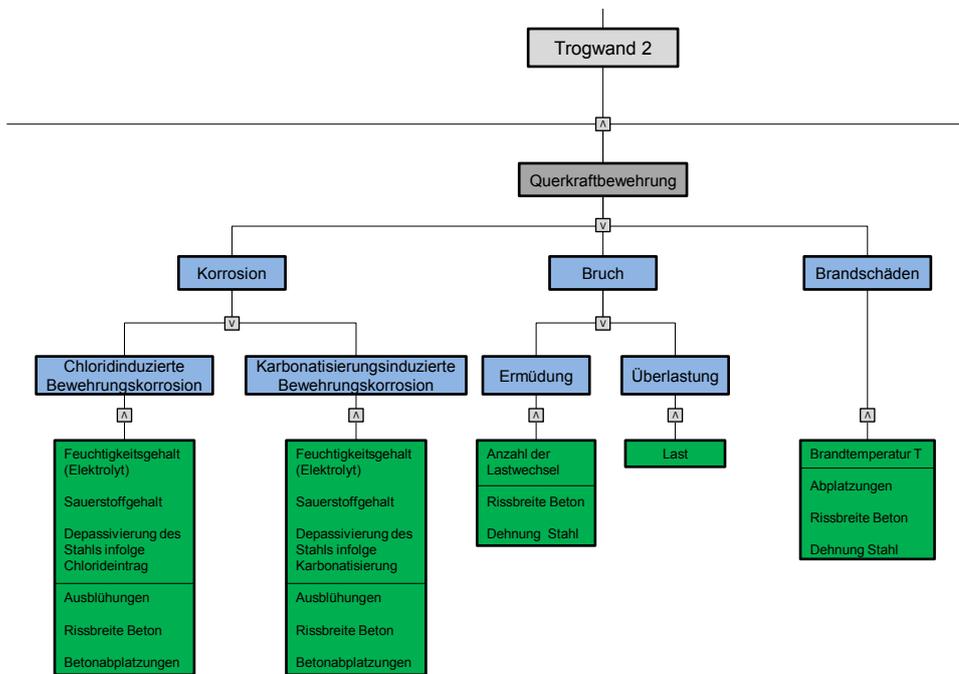
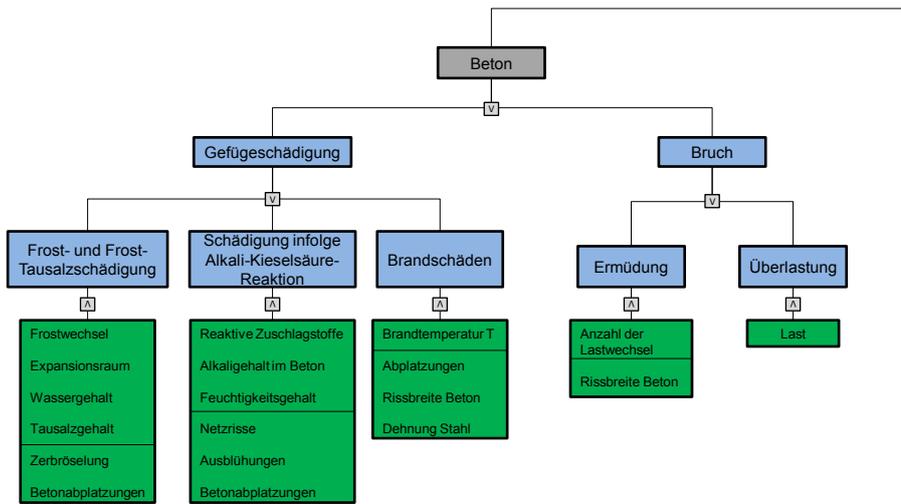












4 Massivplattenquerschnitt

