

# SCHÄDEN UND SCHADMECHANISMEN AN SCHUTZBAUWERKEN DER WILDBACHVERBAUUNG

## Damages and damagemechanism on torrential dams

von/by

SUDA J., HÜBL J.

### Zusammenfassung:

Eine regelmäßige Überwachung von Schutzbauwerken trägt wesentlich zur Erhöhung der Sicherheit von Verbauungssystemen bei. Bei der Begutachtung der Bauwerke ist ein Grundwissen über die Schadmechanismen an Schutzbauwerken und deren Versagensarten unerlässlich, um den derzeitigen und zukünftigen Zustand eines Bauwerkes abschätzen zu können. Dabei sind sowohl prozessspezifische als auch materialspezifische Mechanismen zu beachten. Der vorliegende Artikel beschäftigt sich überblicksmäßig mit den wichtigsten Mechanismen, die zu einer Schädigung eines Schutzbauwerkes führen können.

### Summary:

Periodic inspections of torrent protection structures contribute essentially to the safety of a barrier system. To assess the actual and future condition of a structure during a visual inspection a basic knowledge about the damage and failure mechanism is fundamental. These mechanism are divided into the process caused and the material caused ones. This paper shows the basic characteristics of the damage mechanism of torrential barriers.

## 1. Einleitung

Bauwerke in Wildbächen interagieren während ihrer Lebensdauer mit ihrer Umwelt und somit auch mit den geomorphologischen Verlagerungsprozessen kurzer bzw. langer Einwirkdauer. Durch die dadurch geschaffenen Randbedingungen verändert sich der Zustand der Bauwerke. Als negativ einzustufende Zustandsveränderungen können unbedeutende Beeinträchtigungen oder Schäden auftreten. Ein **Schaden** beschreibt Veränderungen im Bauwerk, in dessen Einbindungen oder Vorfeldern durch externe oder interne Ursachen, welche zu einer Verminderung der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit oder Dauerhaftigkeit des Tragwerkes führen. Schäden an Schutzbauwerken der Wildbachverbauung treten u. a. durch den Einfluss von Umweltbedingungen, durch Belastungen, durch Alterung und Abnutzung und durch eine falsche Dimensionierung des Baukörpers auf.

Die unterschiedlichen Randbedingungen, denen ein Sperrenkörper unterworfen ist, können in die externen und die internen Randbedingungen eingeteilt werden. Sie haben direkten oder indirekten Einfluss auf die zeitliche Veränderung des Sperrzustandes. Die Randbedingungen lassen sich in 7 Gruppen einteilen (Tab 1).

Tab. 1: Randbedingungen des Bauwerkszustandes

Table 1: Boundary conditions of structure condition

Gruppe	Randbedingung	Parameter		
1	<b>Anthropogene Randbedingungen</b>		Externe Randbedingungen	
	1A	Planung		Belastungsniveau
	1B	Ausführung		Baumängel
	1C	Bauunfall		
	1D	Instandhaltung		Inspektionsintervalle, Maßnahmen
	1E	Beschädigung		
2	<b>Pysikalische, klimatische, chemische und biochemische Randbedingungen</b>		(bio-)chemisches Milieu Feuchtigkeit Temperatur	
3	<b>Biogene Randbedingungen</b>		Bewuchs, Wurzeldruck Schädlingsbefall	
4	<b>Geotechnische, geologische und tektonische Randbedingungen</b>		Externe Randbedingungen	
	4A	Außere Standsicherheit		
	4B	Widerstand der luftseitigen Flanken		Einbindetiefe
	4C	Widerstand an der Bauwerkssohle		Auskolkung, Einbindetiefe, Anker
	4D	Verlandung im wasserseitigen Vorfeld		Verlandungshöhe, Erddruck
	4E	Grundwasser, Hangwasser		
	4F	Bewegungen im Untergrund		
	4G	Seitlicher Hangdruck (Bergdruck)		Energieeintrag
	4H	Steinschlag und Felssturz		Energieeintrag
	4I	Rutschung		Energieeintrag
4J	Erdbeben	Energieeintrag		
5	<b>prozessbedingte Randbedingungen</b>		Externe Randbedingungen	
	5A	Tiefenerosion		Kolktiefe, Kolkbreite, Fließgeschwindigkeit, Abflussdauer, Kornverteilung, Geschiebefracht, Feststoffkonzentration
	5B	Seitenerosion		Fließgeschwindigkeit, Abflussdauer, Kornverteilung, Geschiebefracht, Feststoffkonzentration
	5C	Flächenerosion		Niederschlag
	5D	Abfluss		Wasserdruck: statisch, dynamisch Fließgeschwindigkeit, Abflussdauer, Abflusshöhe (Ereignisgröße), Feststoffkonzentration, Kornverteilung, Härte, Geschiebefracht, Stoßbelastung
	5E	Unterströmung des Sperrenkörpers		Gradient, Kornverteilung,
	5F	Durchströmung des Sperrenkörpers		Porenvolumen, Dichte
	5G	Ablagerung von Schwebstoffen und Geschiebe		Korngrösse, Fließgeschwindigkeit
	5H	Ablagerung von Wildholz		Fließgeschwindigkeit, Abflusstiefe, lichte Breite des Abflussquerschnittes
	5I	Lawinen		
5J	unbekannte Prozesse			
6	<b>Strukturelle Randbedingungen des Bauwerkes</b>		Interne Randbedingungen	
	6A	Innere Standsicherheit (Tragfähigkeit der Querschnitte)		Baustoffklasse Bewehrungsgrad bei Stb., Ausnutzungsgrad Materialfehler
	6B	Werkstoff		Beton, Holz, Stahl, Stein
	6C	Dauerhaftigkeit (Materialalter, Abnutzung)		Resttragfähigkeit des Querschnittes Korrosionsgrad der Bewehrung, Betondeckung
6D	Konstruktive Sicherungsmaßnahmen	Kronsteine, Panzerung, Kolkschutz, Fundamenttiefe, Vorfeldwangen, Anker		
7	<b>Funktionale Randbedingungen des Bauwerkes</b>		Interne Randbedingungen	
	7A	Funktionserfüllung		
	7B	Bauwerkstyp		
	7C	Bauwerksform		
7D	Bauwerkslage			

## 2. Schädigungsmechanismen

Einem Großteil der in Tab 1 zusammengestellten Randbedingungen liegen konkrete Mechanismen zu Grunde, die sich entsprechend der externen und internen Randbedingungen in prozessspezifische und materialspezifische Mechanismen einteilen lassen. Erste sind von den geomorphologischen Eigenschaften des Einzugsgebietes, letztere von den Eigenschaften des Bauwerkes abhängig.

### 2.1. Prozessspezifische Mechanismen

Vereinfacht kann man die Wildbachprozesse in die Entstehungsprozesse (Abtrag, Eintrag), die Transportprozesse und die Ablagerungsprozesse einteilen. Diese Grundprozesse laufen großräumig (Sammelgebiet, Ablagerungsgebiet) und lokal im Gerinnesystem ab. Betrachtet man die Prozesse vom Standpunkt des Bauwerkes, kann man jedem Schadensmechanismus einen hauptsächlich beteiligten Grundprozess zuordnen (Abb. 1). Dabei steht in der Abbildung der Schadmechanismus immer auf gleicher Höhe mit dem auslösenden Grundprozess. Strichlierte Linien geben Schadmechanismen an, die durch den Ausgangsmechanismus gefördert werden.

#### 2.1.1. Grundprozesse

Die **Entstehungsprozesse** setzen sich aus den Abtragsprozessen der Erosion und dem Eintrag von Wildholz und Wasser zusammen. Als Erosion wird im Allgemeinen der Abtrag und Transport von Feststoffen durch Wasser, Gletscher, Wind und Wellen bezeichnet.

**Tiefenerosion** bezeichnet einen Erosionsprozess der zur Eintiefung des Gerinnes führt. Die für die Entstehung von Wildbächen charakteristische Form der Tiefenerosion ist die rückschreitende Erosion. Sie besteht in einer höhenmäßigen Änderung der Erosionsbasis, wobei sich das Gerinne an dieses veränderte Niveau durch Eintiefung anpasst. Solche Veränderungen sind im Rahmen von Hochwasserereignissen nur im Lockermaterial möglich. Eine Sonderform ist die Kolkererosion, bei der unterhalb eines Absturzes (Wasserfall) keilförmige Hohlformen (Keilanbrüche) entstehen.

**Seitenerosion** bezeichnet einen Erosionsprozess, der hauptsächlich die Ufer eines Gewässers angreift und dem Gewässer die Möglichkeit gibt sich seitlich zu verlagern. Uferanbrüche entstehen durch die seitliche Erosionswirkung von Wildbächen im Außenbogen oder durch die Verlagerung des Gewässerbettes.

Die **Oberflächenerosion** ist das Abschwemmen von Lockergestein (Gesteinsteilen) von der Landoberfläche und das Eintragen in das Gewässersystem bei Niederschlägen.

Bei den **Verlagerungsprozessen** in Wildbächen können entsprechend ihrer Ausprägung fluviatile und murartige Prozesse unterschieden werden (Abb. 2). Erstere umfassen Hochwasser und fluviatilen Feststofftransport, zu den zweiten zählen murartiger Feststofftransport und Murgang. Weitere Formen der Massenverlagerung sind stürzende (Steinschlag, Felssturz, Bergsturz) und rutschende (Hangmure, Erdstrom, Rutschung) Prozesse.

Der **Reinwasserabfluss** führt nur unerhebliche Feststoffmengen mit sich. Liegt der Pegelstand oder Abfluss über dem langjährigen Mittel ist es ein Hochwasserabfluss. Die Feststoffe werden überwiegend als Schweb mitgeführt, der Geschiebetransport ist im Verhältnis zum Wasserabfluss von untergeordneter Bedeutung. Die Dichte des Wasser-Feststoff-Gemisches ist im Vergleich zu Wasser nicht signifikant erhöht und kann mit  $1000 \text{ kg/m}^3$  angenommen werden. Der Hochwasserabfluss kann turbulent und instationär erfolgen, wenn plötzliche Schwallwellen infolge Durchbruch einer Verklausung auftreten.

Der **fluviatile Feststofftransport** zeichnet sich durch das Vorhandensein eines bedeutenden Feststofftransports, dem Schwebstoff- und dem sohlennahen Geschiebetransport, aus. Während Schwebstoffe bei Hochwasser relativ homogen im Querprofil verteilt sind, wird hier das Geschiebe sohlennah verlagert. Die Dichte des Wasser-Feststoff-Gemisches liegt unter  $1300 \text{ kg/m}^3$ , die volumetrische Feststoffkonzentration erreicht Werte bis zu 20 %. Die Geschwindigkeit des transportierten Geschiebes liegt unter der des turbulenten Wasserabflusses, das Fließverhalten ist newtonisch.

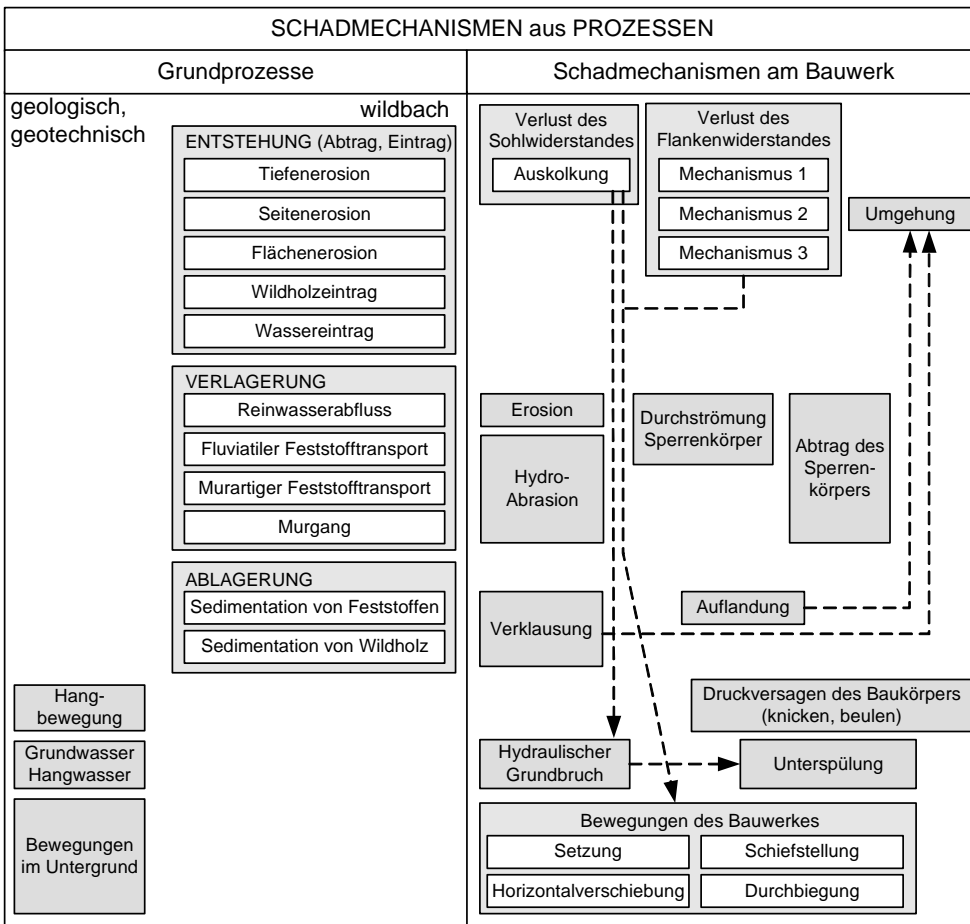


Abb. 1: Grundlegende Prozesse und deren Auswirkungen auf die Schadmechanismen an Bauwerken oder Bauteilen  
 Fig. 1: Basic processes and their effects on damagemechanisms of structures or components

Der **murartige Feststofftransport** umfasst Abflüsse mit hoher Feststoffkonzentration. Die Feststoffe sind unabhängig von der Korngröße über den ganzen Abflussquerschnitt verteilt. Auch größere Kornfraktionen (Geröll) bewegen sich annähernd mit der Geschwindigkeit des Wassers. Die Dichte des Wasser-Feststoff-Gemisches liegt zwischen 1300 und 1700 kg/m<sup>3</sup>, wobei eine volumetrische Feststoffkonzentration zwischen 20 und 40 % erreicht werden kann. Das Fließverhalten kann näherungsweise als newtonisch bezeichnet werden.

Ein **Murgang** ist eine langsam bis schnell abfließende Suspension aus Wasser, Feststoffen und Wildholz. Ein Murgang kann sich aus mehreren Murschüben zusammensetzen, die einer bereits ausgebildeten Tiefenlinie folgen und eine typische Bewegungsform sowie charakteristische Ablagerungsformen aufweisen. Die mittransportierten Feststoffe sind unabhängig von der Korngröße über den ganzen Abflussquerschnitt verteilt. Die Dichte des Wasser-Feststoff-Gemisches liegt zwischen 1700 und 2400 kg/m<sup>3</sup>, wobei eine volumetrische Feststoffkonzentration von 40 bis 70 % typisch ist. Das Fließverhalten ist nicht-newtonisch.



Abb. 2: Übersicht über die Systematik der Verlagerungsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten; aus [1]  
 Fig. 2: Systematic overview of displacement processes in torrents

Die **Ablagerungsprozesse** sind ein geomorphologischer Prozess, bei dem erodierte und vom Wildbach transportierte Feststoffe (Geschiebe, Wildholz) in bestimmter Form deponiert werden. Die Ablagerung ist eine Funktion des Geländes, des bewegten Volumens und der Stoffeigenschaften.

**Bewegungen des Hanges** oder Gebirges können auf Bauwerke als Hangdruck (Bergdruck) einwirken. **Bewegungen im Untergrund** können zu Bauwerksbewegungen führen und haben unterschiedliche Ursachen. So kann das Be- und Entlasten des Bodens, Strukturänderungen (Sackungen), Suffusions und Erosionsvorgänge, Schrumpfen und Quellen des Bodens, Gefrieren und Auftauen, Hangbewegungen, Geländesenkungen, Erdbeben und tektonische Bewegungen zu Veränderungen führen [14].

## 2.1.2. Schadmechanismen am Bauwerk

### 2.1.2.1. Erosion und Hydroabrasion

Den Grundmechanismus der Erosion oder Abrasion beschreibt ein tribologisches System. Ein tribologisches System (Abb. 3 A) besteht aus einem Grundkörper und einem Gegenkörper (fest, flüssig, gasförmig). Durch den Kontakt mit dem bewegten Gegenkörper unterliegt der Grundkörper einem Verschleiß. „In DIN 50 320 wird Verschleiss als ‚fortschreitender Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d.h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers‘ definiert.“ ([12] 3). Die Art und Höhe des Verschleißes ist von den Eigenschaften des Grundkörpers, des Gegenkörpers und der Beanspruchung abhängig.

Wird der Grundkörper durch reines Wasser ohne Feststoffe überströmt spricht man bei einem Materialabtrag von Erosion (Abb. 3 A). Wird der Abtrag durch Wasser mit Feststoffen (z.B. Geschiebe) oder ausschließlich von Feststoffen (z.B. Reifen, Flugsand) verursacht spricht man von Abrasion. Bei der Hydroabrasion ist der Grundkörper (z.B. die Mauerkrone in einer Abflussektion) durch fließendes Wasser mit Feststoffen beansprucht. Je nach Art der beteiligten Stoffe (Flüssigkeit, Feststoffe) und Art der Beanspruchung (Strömen, Stossen, Schwingen) unterscheidet man verschiedene Verschleissvorgänge (Tab. 2). Im Bereich der Wildbachverbauung treten in den meisten Fällen die Beanspruchungsarten stoßend (= prallend = schlagend) und schleifend (strömend) auf (Abb. 3 B). Da beide Verschleißarten in der Regel gleichzeitig auftreten spricht man vom Hydroabrasivverschleiß.

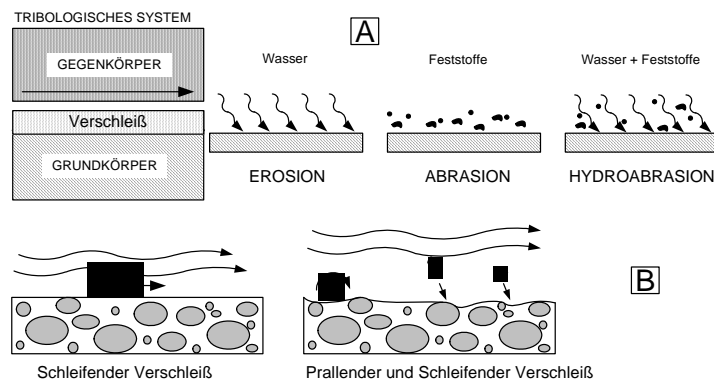


Abb. 3: Tribologische Systeme: (A) Grundmechanismen; (B) Unterschiedliche Arten der Beanspruchung von Werkstoffoberflächen in hydraulischen Systemen

Fig. 3: tribologic systems: (A) basic mechanism; (B) different stresses in hydraulic systems



Abb. 4: Abrasion mit hohem schlagendem Anteil: (A) Hydroabrasion auf Holz; (B) Abrasion einer Stahlbetonkrone im seitlichen Flügelbereich

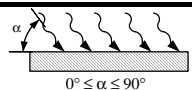
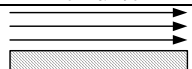
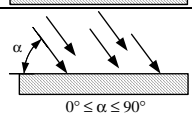
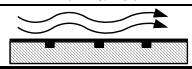
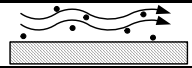
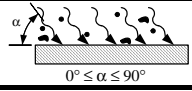
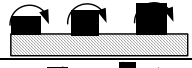


Fig. 4: abrasion with impact component: (A) on timber; (B) on reinforced concrete capstone

Die Höhe der Abrasionsbelastung eines Bauwerkes ist einerseits von der Höhe der hydraulischen Einwirkung (Gegenkörper) und andererseits vom Widerstand des Bauwerkes (Grundkörper) abhängig. Nach [12] lässt sich die hydraulische Einwirkung über die Fließgeschwindigkeit, den Korndurchmesser, die Kornform und die Härte des Geschiebes, sowie der Geschiebefracht beschreiben. Der Widerstand des Bauwerkes ergibt sich aus seiner Form und dem Werkstoff, insbesondere jenem im Bereich der Abflussektion. Laut [12] führt eine rein schleifende Belastung selten zu grösseren Problemen, hingegen sind Orte mit einer hohen Schlagbelastung, besonders wenn sie mit einem schleifenden Anteil kombiniert sind, kritisch.

Die Abrasionsbelastung steigt überproportional mit der Erhöhung der Fließgeschwindigkeit an. Die Fließgeschwindigkeit ist somit der zentrale Parameter. Die Abrasionsbelastung nimmt mit steigendem Durchmesser des transportierten Geschiebes zu. Der Korndurchmesser des transportierten Geschiebes ist abhängig von der Schleppkraft des Wassers und somit der Fließgeschwindigkeit. Nach [12] werden massive Abrasionsschäden meist ab einem  $d_{90}$  von ca. 0,2 m beobachtet. Hartes und/oder kantiges Geschiebe erhöht die Abrasionsbelastung zusätzlich. Harte Gesteinskomponenten weisen in der Regel eine Kantform auf, weichere Gesteine sind öfters gerundet. Die Abrasionsbelastung steigt etwa linear mit der Geschiebefracht.

Tab. 2: Maßgebliche Verschleißvorgänge bei Wasserbauten, nach [13], 870

Table 2: abrasion mechanisms in hydraulic structures

	Systemstruktur	Tribologische Beanspruchung	Verschleißart	Beispiel
Erosion	Festkörper (Beton-Randzone) / Flüssigkeit	Strömen 	Flüssigkeitserosion	Betonrohre und Gerinne in der Abwassertechnik
		Stößen durch implodierende Dampfblasen 	Kavitationserosion	Hochwasserentlastungsanlagen an Talsperren
		Stößen 	Tropfenschlagerosion	Tosbecken, Hochdruckanlagen
		Schwingen 	Ermüdungsbruch	(mit Stahlplatten) gepanzerte Stollen an Wasserkraftanlagen
Abrasion	Festkörper (Beton-Randzone) / Flüssigkeit mit Feststoffpartikel	Strömen 	Spül- oder (Hydro) Abrasivverschleiß	Tosbecken, Wehrkörper, Grundablässe, Umleitungsstollen, befestigte Gerinne
		Strömen, Stoßen 		
	Festkörper (Beton-Randzone) / Feststoffpartikel	Rollen, Wälzen 	Roll-, Wälzverschleiß	Beschicken von Stahlbetonsilos mit Feststoffen, Ausbaggern von Sandfängen
Stößen 		Prall- bzw. Schrägstrahlverschleiß (Zweikörper-Abrasivverschleiß)		
Gleiten 		Furchungverschleiß (Zweikörper-Abrasivverschleiß)		

Ein Bauteil ist gefährdet wenn er an einem Ort mit hoher Abrasionsbelastung liegt. Nach [12] kann man von hoher Gefährdung sprechen wenn zumindest eines der folgenden Kriterien erfüllt ist. An bestehenden Bauwerken am selben Fluss oder an Flüssen mit ähnlichen Einzugsgebieten treten Abrasionsschäden auf. Der Durchmesser des transportierten Geschiebes ist groß. Die spezifische Geschiebefracht ist hoch. Sehr große Schäden treten typischerweise auf bei Werten ab ca. 1000 t Geschiebe pro Meter Breite und Jahr. Zu berücksichtigen ist dabei die über den Querschnitt oft ungleiche Verteilung des Geschiebes. Das Geschiebe ist vorwiegend hart und kantig.

Wenn ein Bauwerk eine hydraulisch ungünstige Form hat, liegt auch bei kleineren hydrologischen Belastungen eine große Abrasionsgefährdung vor. „Die Form des Bauwerkes und seine Anströmung aus dem Oberwasser bestimmen wie und mit welcher Geschwindigkeit das Wasser und damit das Geschiebe über die Bauteile geleitet werden.“ ([12] 79)

Neben der Einwirkung und der Form und Lage des Bauteiles wirken sich auch unterschiedliche Materialien auf die Höhe der Abtragsrate aus. Holz setzt aufgrund seiner niederen Dichte der Abrasion einen relativ geringen Widerstand entgegen. Höhere Widerstände weisen Betone auf. Die technisch höchsten Widerstände werden mit Granit- und Basaltkronen, Stahlpanzerungen, und in Ausnahmefällen Verstärkungen mit Hochfesten (Ultrahochfesten) Betonen erreicht. Die Materialwiderstände sind abhängig von der Dichte (Druckfestigkeitsklasse, Sortierklasse) und der Fähigkeit Energie zu dissipieren (schlagende Abrasion).

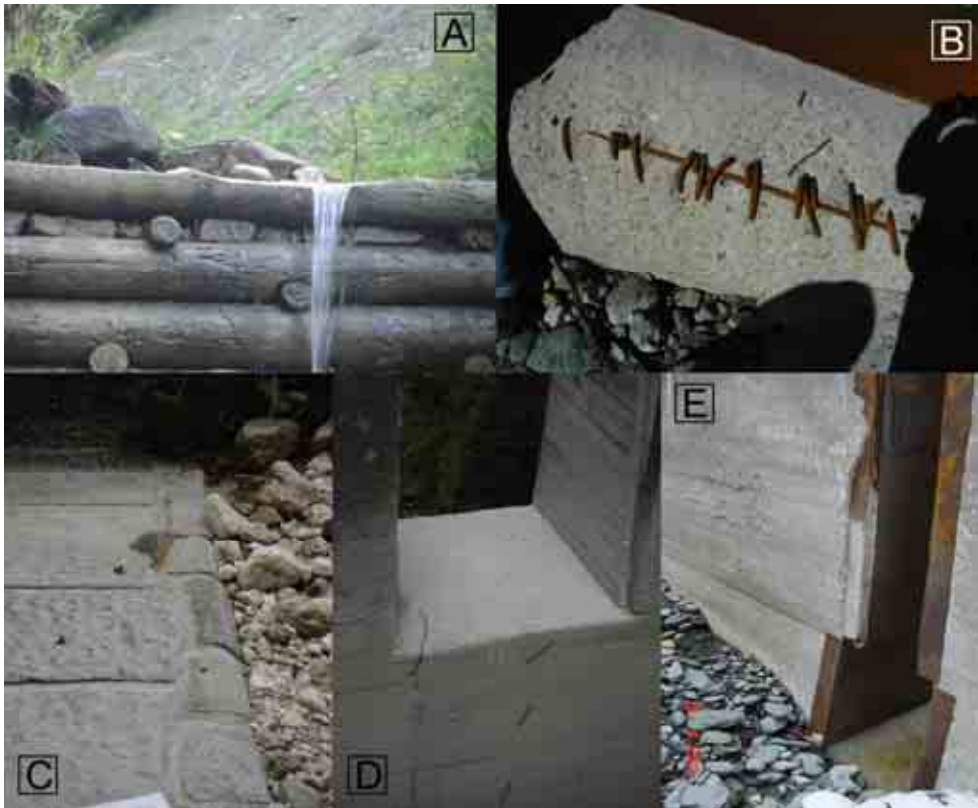


Abb. 5: Abrasion mit hohem schleifendem Anteil: (A) Arasion auf Holz; (B) Abrasion an einer Stahlbetonkrone mit freigelegter Bewehrung; (C) Abrasion von Kronsteinen aus Granit; (D) Abrasion einer Öffnung in einer Stahlbetonsperre; (F) Schlagende Abrasion an einem Kantenschutz aus Stahl (GBL Pinzgau)

Fig. 5: abrasion with high grinding component: (A) on timber; (B) on reinforced concrete capstone; (C) on granite; (D) on an opening of a concrete barrier; (F) on steel

### 2.1.3. Verklausung

Als Verklausung wird die Verstopfung des Wildbaches durch Wildholz, Geschiebe oder anderes Material bezeichnet, die einen Aufstau verursachen kann. Das plötzliche Durchbrechen von Verklausungen kann zu schwallartigen Abflüssen führen, die weit über dem hydrologisch ermittelten, höchsten Hochwasserabfluss liegen können. Verklausungen an Engstellen lösen in der Regel Ausuferungen und Überschwemmung aus und können auch eine Verlagerung des Gewässerbettes bewirken. Somit können Verklausungen indirekt durch schwallartige Abflüsse und direkt durch unerwünschte Verklausung des Bauwerkes selbst zu Schäden führen.



Abb. 6: Verklausungen: (A) durch Geschiebe; (B) durch Wildholz; (C) Vdurch Geschiebe und Wildholz  
 Fig. 6: Blockages: (A) due to bedload, (B) due to deadwood; (C) due to deadwood and bedload

#### 2.1.3.1. Verlust des Sohlwiderstandes (unterwasserseitige Auskolkung)

Als Kolk wird eine örtlich begrenzte, durch Strömungsturbulenzen verursachte Vertiefung im Gewässerbett bezeichnet. Kolke treten häufig unterhalb von Abstürzen oder rund um Einbauten im Gewässer auf. Durch die Tiefenerosion (rückschreitende Erosion) wandern Kolke immer näher zum Bauwerk. In Extremfällen führt dies zu einer Verringerung der Gleitsicherheit und einer Begünstigung des mechanischen oder hydraulischen Grundbruches.



Abb. 7: Auskolkung aufgrund rückschreitender Tiefenerosion: (A) Zerstörter Kolktschutz einer Steinsperre (ZMWK); (B) fehlende untere Einbindung einer Stahlbetonsperre

Fig. 7: scouring

### 2.1.3.2. Verlust des Flankenwiderstandes

Beim Verlust des Flankenwiderstandes kann man drei grundlegende Mechanismen unterscheiden (Abb. 9). Mechanismus 1 wird hauptsächlich durch die Tiefenerosion ausgelöst. Dabei werden durch die Ausbreitung des Kolkes und Seitenerosion die seitlichen Hänge von der Basis her instabil und rutschen ab. Der Mechanismus 2 wird hauptsächlich durch die Seitenerosion verursacht. Wenn die Bachachse z.B. durch Auflandungen im Sperrenvorfeld zu einer Flanke gedrängt wird beginnt der Überfall von oben weg die Flanken abzutragen. Zu flach ausgebildete Anzüge der Sperrenflügel begünstigen diesen Mechanismus. Der 3. Mechanismus beruht auf der Oberflächenerosion, indem die seitlichen Hänge durch Oberflächenwasser allmählich abgetragen werden. Dieser Mechanismus wird durch steile Böschungswinkel und fehlendem Erosionsschutz der Hänge begünstigt.



Abb. 8: Seitlicher Flankenwiderstand: (A) Mechanismus 1; (B) Erosion der seitlichen Flanke durch eine Kombination aus Mechanismus 1 und 3

Fig. 8: collateral slope resistance



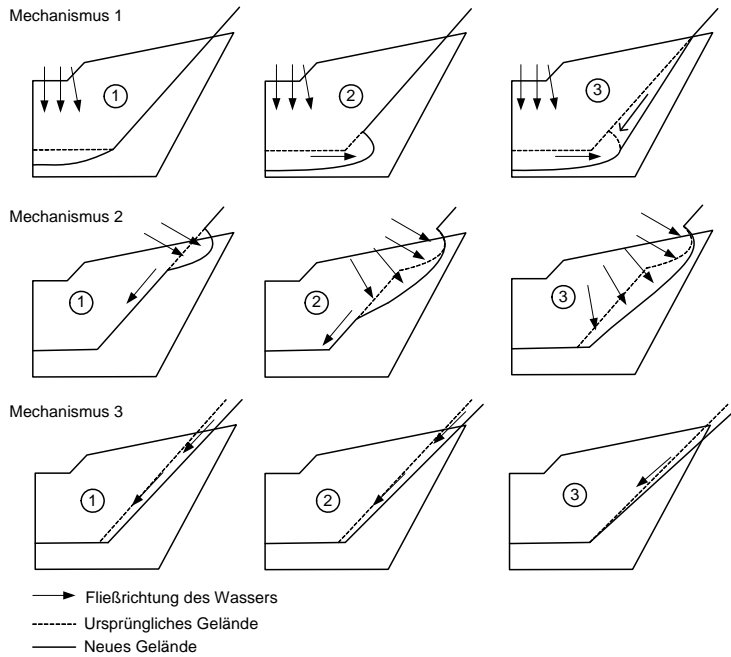


Abb. 9: Mechanismen, die in Lockergestein zum Verlust des seitlichen Flankenwiderstandes führen können  
 Fig. 9: failure mechanism of collateral slope resistance



Abb. 10: Seitlicher Flankenwiderstand: (A) Fehlender Flankenwiderstand bei einer Holzkastensperre (Mechanismus 1); (B) Flächenerosion (Mechanismus 3)

Fig. 10: collateral slope resistance

### 2.1.3.3. Umgehung

Bei der Umgehung wird ein Querbauwerk seitlich vom Bach umgangen. Sie führt zu einem Versagen der Gebrauchstauglichkeit. Der Beginn der Umgehung kann in einem Verlust des Flankenwiderstandes nach dem 2. Mechanismus oder einer Verklausung liegen. Weiters können konstruktive Mängel wie ungenügende seitliche Einbindetiefen, zu gering bemessene Abflusssektionen oder ungünstige Platzierung des Bauwerkes zur Bachachse zu einer Umgehung führen.



Abb. 11: Umgehung: (A) Umgehung aufgrund Anlandung und zu geringer seitlicher Einbindung; (B) Umgehung aufgrund Verklausung des funktionalen Teiles und fehlender seitlicher Einbindung (Foto: Walser Otto)

Fig. 11: damage by bypass

#### 2.1.4. Auflandung

Die Auflandung der Sohle ist eine Materialablagerung in einem Gewässer mit einer dadurch bedingten Hebung der Gewässersohle. Als Schadmechanismus für das Bauwerk ist besonders die Auflandung im Bereich des Sperrenvorfeldes relevant. Sie kann die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerkes beeinträchtigen und zur Verlagerung der Bachachse führen. Diese Verlagerung kann eine Umgehung des Bauwerkes begünstigen.



Abb. 12: Auflandung im wasserseitigen Sperrenvorfeld und Verlagerung der Bachachse an den Gewässerrand

Fig. 12: aggradation in upstream area

#### 2.1.5. Schub- und lokales Druckversagen des Baukörpers

Tektonische Bewegungen des Hanges oder Gebirges wirken auf Widerstände als Hangdruck (Bergdruck) ein. Es gibt dabei zwei grundsätzlich verschiedene Versagensmechanismen, ein Schubversagen und ein lokales Druckversagen.

Beim 1. Mechanismus, dem Schubversagen kommt es zum Abscheren von Flügeln oder Flügelteilen an horizontalen Fugen oder dem Abscheren von keilförmigen Sperrteilen. Die Richtung ist abhängig von der Angriffsrichtung des Hangdruckes. Die Bewehrung in den Schubrisen ist in der Regel gerissen und die Einzelstäbe sind verschoben.



Abb. 13: Hangdruck: Versagensmechanismus 1 (Schubversagen): (A) Abscheren des Flügels an einer horizontalen Fuge (Trennriss) mit anschließender Verkantung; (B) Abscheren mit Verkantung und Verdrehung

Fig. 13: slope preassure: 1<sup>st</sup> failuremechanism (shear failure)

Der 2. Mechanismus, das lokale Druckversagen kann aufgrund des Knickens der Gesamtstruktur oder als Druckversagen in einer Biegedruckzone auftreten. Letzteres ist häufig wenn der Hangdruck in einem Winkel zur Systemachse des Bauteiles angreift und z.B. im Flügelbereich Biegung erzeugt. Man erkennt diesen Mechanismus am ganzen Bauwerk (Knicken des Bauwerkes, Verdrehung der Flügel). Im Druckbereich bilden sich senkrechte oder schräge Risse mit ausgeknickter Bewehrung und plattenartigen Betonabplatzungen. Im Zugbereich sind Biegerisse sichtbar.



Abb. 14: Hangdruck: Versagensmechanismus 2 (lokales Druckversagen): Lokales Druckversagen des Betons mit ausgeknickten Bewehrungsstäben und Betonabplatzungen.

Fig. 14: slope pressure: 2<sup>nd</sup> failuremechanism (lokal compression failure)

### 2.1.6. Grundbruch

Bei Bauwerken mit Flächengründungen können die Bruchmechanismen mechanischer Grundbruch, hydraulischer Grundbruch und Auftriebsbruch vorkommen [14].

Bei einem mechanischen Grundbruch ist die Standsicherheit einer Gründung infolge der Ausbildung von Gleitflächen nicht gegeben. Der Untergrund verformt sich durch die von der Last des Bauwerkes hervorgerufenen Spannungen entsprechend seiner Zusammendrückbarkeit und Scherfestigkeit. Lotrechte Lasten verursachen zunächst vor allem lotrechte Verschiebungen (Setzungen). Mit zunehmender Last bilden sich progressiv vorschreitende Gleitflächen aus und der Boden wird dabei auch seitlich verdrängt. In Abhängigkeit der Lage und Länge der Gleitflächen kann man die Brucharten Globaler Scherbruch Lokaler Scherbruch und Stanzbruch unterscheiden.

Bei zu starker Neigung der Resultierenden gegen die äußere Normale der Sohlfläche tritt durch Überwinden der Scherfestigkeit eine Bewegung ein (Gleiten). Die Gleitgefahr wird durch den passiven Erddruck vor dem Bauwerk verringert.

Wandert der Punkt, in dem die Resultierende der äußeren Kräfte die Sohle trifft, über den Rand des Kerns hinaus, entsteht eine klaffende Fuge und eine rasch anwachsende Sohlspannung im Druckbereich (Kippen).

Wird ein Bauwerk unterströmt (z.B. Sperrenbauwerk, Ufermauer) oder durchströmt (z.B. Erddamm, Trockenmauer) ergibt sich eine Abnahme der Tragfähigkeit infolge der auftretenden Strömungskräfte. Wird der Untergrund infolge einer Zunahme von Porenwasserdrücken instabil, spricht man von einem hydraulischen Grundbruch. Ein hydraulischer Grundbruch kann als Scherbruch, als Verflüssigungsbruch, als Gesteinsaufreißen oder als Erosionsbruch in Erscheinung treten [14].

Ein Auftriebsbruch tritt ein, wenn ein Bauwerk infolge des auf dieses Bauwerk wirkenden Auftriebes aufschwimmt. Dieser Mechanismus kann als Verflüssigungsbruch in der Gründungssohle aufgefasst werden.



Abb. 15: Auftriebsbruch: aufgeschwommene und gekippte Holzkastensperre

Fig. 15: buoyancy failure

#### 2.1.6.1. Unterspülung

Bei der Unterspülung bildet sich durch unter- und oberwasserseitige Auskolkung eine durchgehende Stromröhre (Abb. 16). Die Strömerröhre wird durch innere Erosion aufgeweitet. Im Extremfall fließt der gesamte Abfluss unter der Sperre durch (Abb. 17). Die Voraussetzung dieses Schadmechanismus ist eine tragfähige Verankerung der Sperre in den Flanken, da es sonst zu einem Versagen auf Kippen kommt.

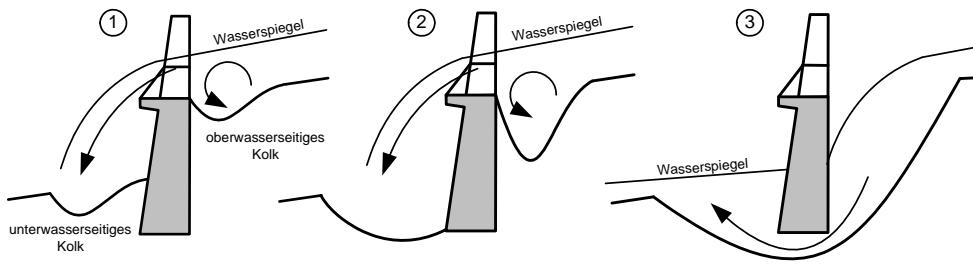


Abb. 16: Ausbildung einer Unterspülung  
Fig. 16: undercutting mechanism



Abb. 17: Unterspülung einer Konsolidierungssperre  
Fig. 17: undercutting of ceckdam

### 2.1.7. Bewegungen des Bauwerkes

Die Bewegung eines Sperrbauwerkes besteht aus dem Anteil der Starrkörperbewegung (Translation und Rotation) und jenem der Verformung. Um die Gesamtbewegung exakt zu beschreiben wird sie in die Komponenten der Setzung (vertikale Translation), der Horizontalverschiebung (horizontale Translation), die Schiefstellung (Kantung, Rotation) und die Durchbiegung (Verformung) zerlegt. Der Begriff Setzung umfasst somit die Summe der lotrechten Komponenten der Bewegung. „Ob sich eine Konstruktion bei einer Bewegung nur verformt, ob sie nur eine Starrkörperbewegung ausführt oder ob beide Bewegungsanteile vorliegen, hängt von der Steifigkeit der Konstruktion, den Untergrundverhältnissen und der Bewegungsursache ab.“ ([14] 304)

### 2.1.8. Zerstörung (Totalschaden)

Bei der Zerstörung eines Bauwerkes oder eines Anlagenteiles kommt es zum schlagartigen Verlust der Tragfähigkeit. Zu einer Zerstörung können unterschiedliche Mechanismen oder eine Kombination aus mehreren Mechanismen führen. Die Zerstörung kann durch primäres Versagen der inneren oder äußeren Standsicherheit eintreten. Ein Versagen der äußeren Standsicherheit zieht meist ein Querschnittversagen mit sich. Bei einem Verlust der äußeren Standsicherheit kommt es beispielsweise zu einem Kippen oder Aufschwimmen (Abb. 15) einer Sperre. Ein Versagen der Inneren Standsicherheit kann auf Schub- und lokales Druckversagen des Baukörpers aufgrund von Hangdruck (Abb. 13, Abb. 14), durch eine Überlastung aus einem Ereignis (Abb. 18) oder aufgezwungenen Verformungen eintreten.



Abb. 18: Zerstörung von Sperren: (A) Totalschaden; (B) Zerstörungen der Sperrenkrone mit anschließender Abrasion des Sperrenkörpers  
Fig. 18: total loss of dams

## 2.2. Materialspezifische Mechanismen

### 2.2.1. Grundlegende Transportmechanismen

Transportvorgänge von Wasser und darin gelösten Stoffen in porösen anorganischen oder organischen Systemen (Beton, Stein, Holz) sind äußerst komplex. Die Transportvorgänge werden vom Volumenanteil der Poren, der Porengrößenverteilung und der Porenform beeinflusst. Neben diesen Faktoren beeinflusst der Aggregatzustand der transportierten Medien die Transportmenge. Die Migration von Wasser, gelösten Stoffen und Gasen in Werkstoffen erfordert treibende Kräfte. Man kann den Kapillarsog, die Diffusion, die Osmose und die Permeation als grundlegende Transportmechanismen unterscheiden (Abb. 19). Die Diffusion bildet die Grundlage der Permeation und Osmose.

Durch das Bestreben, Wasser an der Oberfläche anzulagern (spezifische Oberflächenenergie), kann Wasser auch gegen die Schwerkraft in poröse Systeme gesaugt werden (Abb. 19 (1)). Dieser Grundmechanismus wird als Kapillarsog bezeichnet. Die Kapillare Steighöhe ist vom Durchmesser der Kapillare abhängig. Unter Diffusion versteht man den Stofftransport in einem Medium (Gas, Wasser) in dem diese Stoffe gelöst sind (Abb. 19 (2)). Durch Konzentrationsunterschiede dieser Stoffe (Molekülen, Ionen) im Medium und aufgrund des Bestrebens zum Konzentrationsausgleich entsteht ein Konzentrationsgradient und eine Bewegung. Unter Osmose versteht man Diffusion durch eine semipermeable (halbdurchlässige) Membran (Abb. 19 (3)). Eine solche Membran kann in unbelebten Materialien durch eine Schicht aus sehr kleinen Porenradien entstehen. Durch den Konzentrationsgradienten von der Umgebung in den von der Membrane abgesperrten Bereich kommt es dort entweder zu einer Zunahme des Volumens oder einer Zunahme des Drucks. Unter dem letzten Transportmechanismus, der Permeation versteht man den Stofftransport durch einen porösen Festkörper. Antrieb ist ein Konzentrations- oder ein Druckgradient. (Abb. 19 (4)) In der Regel laufen diese Vorgänge gemeinsam ab.

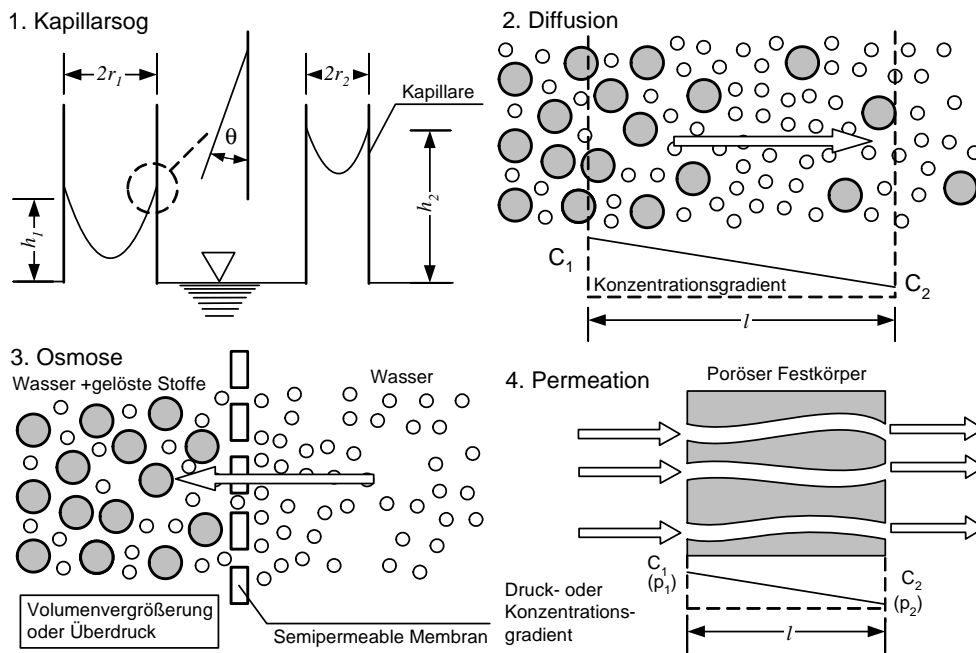


Abb. 19: Grundprozesse für Transportvorgänge in porösen Werkstoffen

Fig. 19: basic migration processes in porous material

2.2.2. Beton

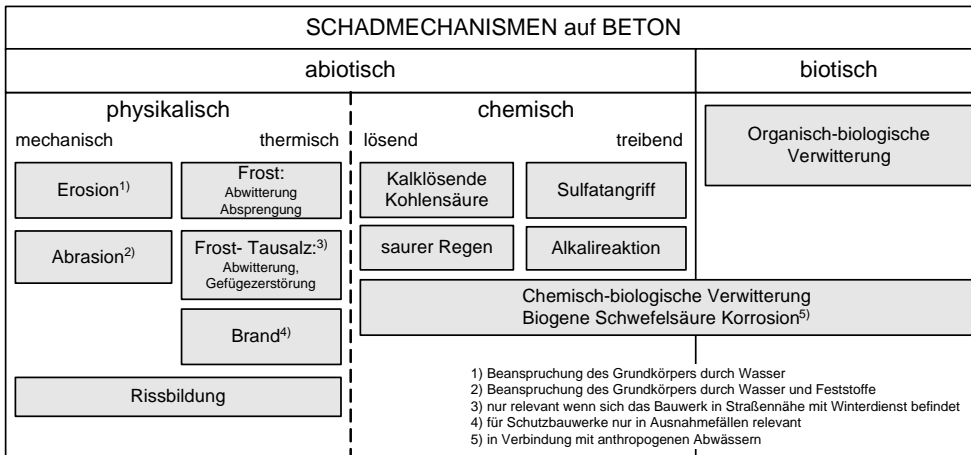


Abb. 20: Grundlegende Schadmechanismen an Bauwerken oder Bauteilen aus Beton (Stahlbeton)  
 Fig. 20: Basic damage processes on concrete (reinforced concrete)

Schädigungsmechanismen von Beton kann man in physikalische (mechanische und thermische Angriffe) und in chemische/elektrochemische/biochemische Mechanismen einteilen (Abb. 20). Viele dieser ablaufenden Mechanismen sind analog zu jenen an Gesteinen. Vereinfacht betrachtet sind Betone künstlich hergestellte Konglomerate (Sedimentgesteine) „Bei allen Schädigungsprozessen spielen die Porenstruktur und damit indirekt die Festigkeit des Betons, Transportprozesse von Flüssigkeiten, Ionen und Gasen im Porensystem sowie Reaktionen im Porensystem zwischen Betonbestandteilen und von außen eingedrungenen Substanzen eine wesentliche Rolle. Neben den Eigenschaften und den Vorgängen im Betongefüge sind die mikroklimatischen Verhältnisse an den jeweils betrachteten Betonoberflächen und die Wechselwirkung mit dem Betongefüge von ganz entscheidender Bedeutung.“ ([4], 158) Praktisch alle Mechanismen, die zu Schäden im Betongefüge führen basieren auf Transportvorgängen von Wasser und Schadstoffen im Beton (Kapitel 2.2.1). „Mit Ausnahme der mechanischen Abriebbeanspruchung (Kapitel 2.1.2.1) ist das Vorhandensein einer ausreichenden Menge von Wasser im Porengefüge immer Voraussetzung für zum Schaden führende Mechanismen.“ ([4], 158)

Analog zur **Frostverwitterung** von Gesteinen führt die Volumsvergrößerung von Wasser in den Poren des Betons zu einer Gefügezerstörung. Man unterscheidet äußere und innere Schäden. „Äußere Schäden treten in Form von Abwitterungen und Absprengungen auf. Innere Schäden sind Gefügeschäden ohne äußerlich erkennbare Veränderungen. Während des Gefrierens von Wasser im Porensystem laufen mehrere Vorgänge ab, die das Gefrierverhalten des Betons entscheidend beeinflussen: Volumenänderung des Wassers, Gefrierpunktniedrigung des Wassers in kleinen Poren, Verdunstungsneigung des Wassers an Porenoberflächen, Diffusionsvorgänge von Wasser im Porensystem.“ ([4], 163)

Der Widerstand gegen Frost eines Betones ist abhängig von der Dichte des Betons, der Frostbeständigkeit der Zuschläge, dem Wassersättigungsgrad, der Porenart (geschlossene, offene Poren) und des Porendurchmessers. Eine kritische Wassersättigung kann die Voraussetzung für die Schädigung von Beton durch Frosteinwirkung bilden.

„Infolge Frosteinwirkung können an der Betonoberfläche schalenförmige Abplatzungen, Rissbildungen und Gefügezerstörungen entstehen. Die Schäden gehen von der Oberfläche aus und sind mehr oder weniger gleichmäßig über diese verteilt. Bei frostunbeständigem, wassergesättigtem Zuschlag werden meist nur einzelne Körner zerstört, die dann den darüber liegenden Beton abdrücken (popouts). Die Schäden zeigen sich an einzelnen Stellen der Betonoberfläche zunächst als strahlenförmige Risse über den Körnern, später als kraterförmige Aussprengungen, an deren Spitze ein frostunbeständiges Korn sitzt.“ ([4], 163)



Abb. 21: Frostverwitterung an Betonsperren: (A) plattenförmige Abplatzungen (Baujahr 1929); (B) Frosssprennung an einer Betonierfuge im Kronenbereich (Baujahr 1996); (C) Verwitterung im Bewehrungsbereich aufgrund Frostverwitterung und Karbonatisierungsinduzierter Korrosion (zu geringe Betondeckung; Baujahr 1929); (D) Verwitterung unmittelbar unter Kronsteinen

Fig. 21: Frost damage on concrete barriers: (A) spalling; (B) damage in construction joint; (C) damage near reinforcement due to frost and carbonate; (D) damage beneath capstone

Neben den physikalischen Prozessen wirken **chemische Prozesse** auf den Beton ein. Es gibt eine Vielzahl von reaktiven Substanzen, die auf die Betonoberfläche einwirken und diese schädigen können. Die Substanzen können aus der Luft in Form von Gasen (z.B.:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ) oder gelöst in Tröpfchen ( $\text{NaCl}$ ) und in Oberflächenwässern und Grund(Hang)wässern gelöst einwirken. Vom Mechanismus unterscheidet man bei chemischen Angriffen zwischen lösendem und treibendem Angriff.

Beim **lösendem Angriff** wird zuerst an der Betonoberfläche der Zementstein in leicht lösliche Verbindungen umgewandelt. Diese werden danach aus dem Betongefüge gelöst. Lösender Angriff tritt beispielsweise beim Einwirken von organischen und anorganischen Säuren und starken Basen (Laugen) auf. Beim Angriff durch Wasser mit freier Kohlensäure löst diese carbonathaltige Zuschläge und Zementstein. „Kalklösende Kohlensäure im Grundwasser, insbesondere in stark fließendem Grundwasser, kann für Gründungsbauteile wie Bohrpfähle oder Fundamente zu einem Problem werden, da der Beton über lange Zeiträume einem lösenden Abtrag ausgesetzt ist.“ ([4], 166) Bei „saurem Regen“ wird die Betonoberfläche durch hoch verdünnte schweflige Säure angegriffen. Da Beton aufgrund seiner Zusammensetzung über eine hohe Pufferkapazität verfügt ist dieser Angriff in der Regel unbedeutend.

Beim **treibenden Angriff** entstehen im inneren des Betongefüges Reaktionsprodukte. Diese Produkte kristallisieren im Porenraum aus. Sind die Hohlräume gefüllt entsteht ein Kristallisationsdruck, der das umgebende Gefüge zerstört. „Zu einem treibenden Angriff auf Betonteile können sulfathaltige natürliche Wässer (Grundwasser, Abwasser, Moorwasser u. Ä.) und Böden führen, wenn die verwendeten Zemente keinen ausreichenden Sulfatwiderstand aufweisen.“ ([4], 166) Dabei kommt es durch die Ettringitbildung zu einer Volumenvergrößerung in den Poren und einem Druck auf das Gefüge. Bei Betonen, deren Gesteinskörnungen alkalireaktive Kieselsäure enthalten, können unter bestimmten Voraussetzungen Gefügeschäden infolge einer Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) auftreten. „Biogene Schwefelsäure kann in Abwassersystemen entstehen. Der erforderliche Schwefelwasserstoff  $\text{H}_2\text{S}$  wird dabei entweder mit dem Abwasser direkt eingeleitet oder er entsteht erst in der öffentlichen Abwasseranlage.“ ([11], 8)

„Ein chemischer Angriff bewirkt bei Fluss- und Kraftwerksbauten – im Gegensatz zu Abwasserbauwerken - selten alleine einen bedeutenden Verschleiss. Eine durch einen chemischen Angriff verursachte Auflockerung des Betongefüges beschleunigt jedoch den abrasiven Verschleiss.“ ([10], 16)

### 2.2.3. Stahl

„Stahlkorrosion kann durch verschiedene Korrosionsmechanismen, z.B. durch sehr niedrige pH-Werte (Säurekorrosion), durch bakterielle Einwirkungen und durch hohe, andauernd wirkende Spannungen (Spannungsrisskorrosion) hervorgerufen werden (Abb. 22). Im Bauwesen, insbesondere im Stahlbetonbau ist jedoch vorwiegend der so genannte Sauerstoffkorrosionstyp von Bedeutung. Dabei werden mit Sauerstoff und Wasser

Eisenhydroxide gebildet, an der Kathode wird Sauerstoff reduziert.“ ([4], 167) Stahl wird bei Schutzbauwerken als Baustahl für Strukturen oder Teile davon und als Bewehrungsstahl eingesetzt.

Damit der Korrosionsprozess beim **Sauerstoffkorrosionstyp** ablaufen kann, müssen laut [4] die folgenden Korrosionsvoraussetzungen gleichzeitig erfüllt sein. Ist nur eine Voraussetzung nicht erfüllt, kann keine Korrosion ablaufen. Die elektrische Leitfähigkeit des Stahls muss gegeben sein. Die Anodische Eisenauflösung muss möglich sein. Es muss ein ausreichend leitfähiger Elektrolyt (Elektrolytische Leitfähigkeit) in Kontakt mit dem Metall sein. Vorhandene Potentialdifferenzen an der Stahloberfläche z.B. infolge von Belüftungsunterschieden durch Kratzer von Geschiebe (Risse im Beton) und Sauerstoffzutritt im kathodischen Bereich sind notwendig.

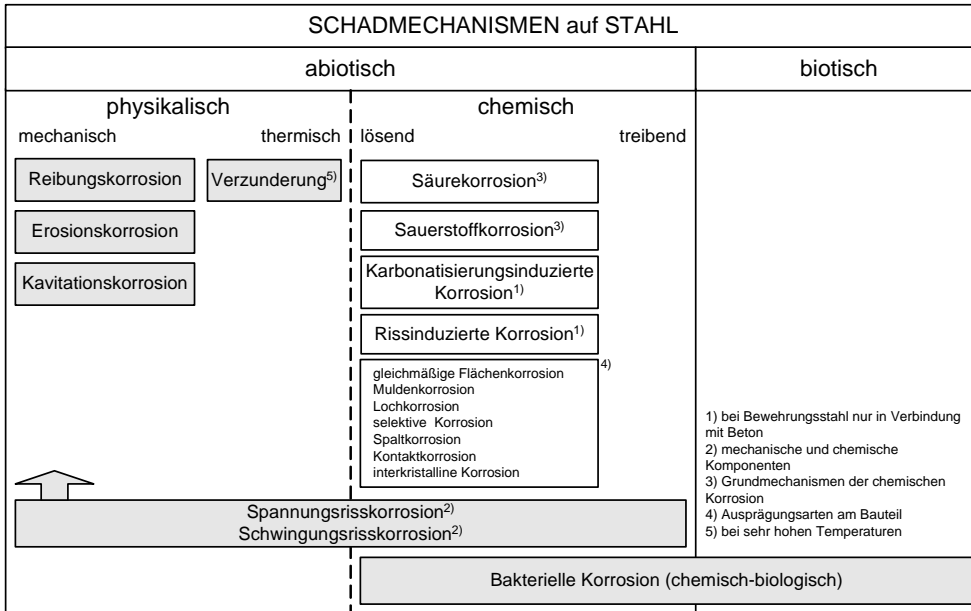


Abb. 22: Grundlegende Schadmechanismen an Bauwerken oder Bauteilen aus Stahl

Fig. 22: Basic damage processes on steel

Die beschriebenen Mechanismen weisen je nach Ort und Art des Auftretens unterschiedliche Erscheinungsbilder auf [5]. Bei der **gleichmässigen Flächenkorrosion** erfolgt der Abtrag kontinuierlich. Die **Muldenkorrosion** tritt bei ungleichmässiger Benetzung durch den Elektrolyt, oder bei ungleichmässigem Gefüge des Werkstoffs auf. Die **Lochkorrosion** läuft an lokalen Schwachstellen ab. Beginnende Löcher korrodieren beschleunigt, da sie kaum noch trocknen und sich der Elektrolyt in ihnen chemisch verändert. Metalle technischer Reinheit enthalten Verunreinigungen wie Schlacketeilchen (Oxide, Sulfide), die an der Oberfläche zur Lokalelementbildung beitragen. Die Korrosion beginnt an den an die Oberfläche austretenden unedlen Phasen (Lokalanode) und wandert lokal begrenzt in die Tiefe, es entsteht Lochfrass. In den Korrosionsvertiefungen verstärkt sich die Korrosion. Bei diesem Mechanismus spricht man von **Selektiver Korrosion**. Die **Spaltkorrosion** tritt in engen Spalten von zusammengefügt Bauteilen auf; hier kann der Elektrolyt nicht trocknen; durch die höhere Sauerstoffkonzentration am Rand des Spalts und die Feuchtedifferenz kommt es zu einer Korrosion. Die **Kontaktkorrosion** entsteht durch leitende Verbindungen zwischen einem edleren und unedlerem Metall. Die **Interkristalline Korrosion** tritt häufig bei „korrosionsbeständigen“ Werkstoffen (Niro-Stähle) auf. Sie ist als sehr gefährlich anzusehen, da ohne äussere Merkmale bereits der gesamte Bauteil korrodiert sein kann.



Abb. 23: Korrosion von Baustahl (Sauerstoffkorrosion): (A) Flächen- bzw. Muldenkorrosion; (B) verstärkte Stahlkorrosion in Abrasionsbereichen

Fig. 23: Steelcorrosion



Wird Baustahl ungeschützt verbaut können die zuvor beschriebenen Schadbilder auftreten. Im Falle von in Beton eingebettetem Bewehrungsstahl kommen noch die Mechanismen der Karbonatisierungsinduzierten und der rissinduzierten Korrosion dazu.

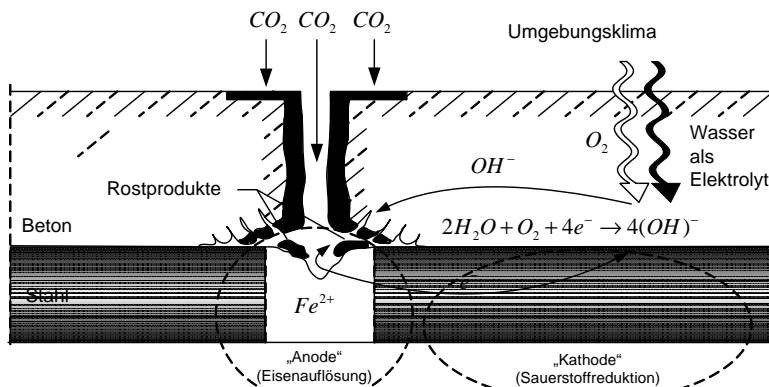


Abb. 24: Korrosion von Bewehrungsstahl: Korrosionsprozess im Rissbereich  
 Fig. 24: Corrosion on reinforcement steel: process of corrosion in cracked area

Bei der **Karbonatisierungsinduzierten Korrosion** laufen vereinfacht folgende Mechanismen ab. In Beton eingebetteter Stahl ist im Regelfall durch den hohen pH-Wert von mehr als 12,5 der durch die Hydrolyse des Zementes entsteht geschützt (Depassivierung). Das aus der Luft in den Zementstein eindiffundierende Kohlendioxid, kann den pH-Wert des Porenwassers auf Werte bis unter 9 verringern. Dadurch geht die Depassivierung des Stahls verloren und er liegt korrosionsbereit vor. Diese Mechanismen werden von der Betonzusammensetzung, der Nachbehandlung und den Umgebungsbedingungen (relative Luftfeuchte, Feuchtigkeitsgehalt des Betons, CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft) beeinflusst. Beginnt der Stahl zu rosten kommt noch ein Sprengdruck aus den Rostprodukten, welche ein größeres Volumen als der blanke Stahl aufweisen dazu. „Diese Volumenvergrößerung wirkt als Sprengdruck, welcher die Betondeckung (d. h. den Beton über der äußersten Bewehrungslage) großflächig absprengen kann.“ ([4], 170)

Risse im Beton begünstigen die zuvor beschriebenen Mechanismen. Reichen Risse von der Betonoberfläche durchgehend bis zur Bewehrung, gelangt die korrosionsinduzierende Karbonatisierung rascher zum Bewehrungsstahl als im Falle rissfreier Betonoberflächen [4].

#### 2.2.4. Holz

Da Holz im Unterschied zu den anderen Werkstoffen ein organisches Material ist, spielen neben den abiotischen Mechanismen die biotischen eine entscheidende Rolle. Zu den maßgeblichen biotischen Schadeinflüssen zählen nach [6] die Holzverfärbenden und holzerstörenden Pilze sowie Insekten und hohe Temperaturen. Neben der Beanspruchung durch Brand können Säureangriffe unter pH 3 und Laugenangriffe über pH 10 zu einer Korrosion des Holzes führen.

Die **pysikalische Verwitterung** von Holz ist vom Umgebungs-klima und besonders vom Wasserangebot und der UV-Strahlung abhängig. Sie führt zu Vergrauung des Holzes (oberflächliche Zerstörung) und Rissbildung. Je nach Länge der Einwirkung wird das Wasser vom Holz entweder in die Fasern adsorbiert oder kapillar in die Zellhohlräume aufgenommen. Nach [7] wird der Feuchtigkeitsgrad im toten Holz von der Aufnahmekapazität (Wasserhaltevermögen), der Wasseraufnahme (durch Niederschläge, Adsorption aus der Luft, kapillares Eindringen,...) und dem Wasserverlust (durch Schwerkraft oder Verdunstung) bestimmt.

Bis zu einer Holzfeuchtigkeit von 30 % wird das Wasser in den Fasern eingelagert, dadurch quillt bzw. schwindet (bei Austrocknung) der Holzquerschnitt. Da Holz ein anisotropes Werkstoffverhalten aufweist schwindet (quillt) es am stärksten in Richtung der Jahresringe (tangential), etwa halb so stark in Richtung der Markstrahlen (radial) und nur wenig in Faserrichtung (longitudinal) [9]. Risse entstehen, wenn durch schnelles Schwinden die Querspannungen im Holz zu groß werden. Solche Risse zerstören die geschlossene Oberfläche und mindern bei tangentialer Lage die Schubsteifigkeit des Querschnittes [8]. Dieses Problem stellt sich vor allem bei großen gedungenen Vollholzquerschnitten.

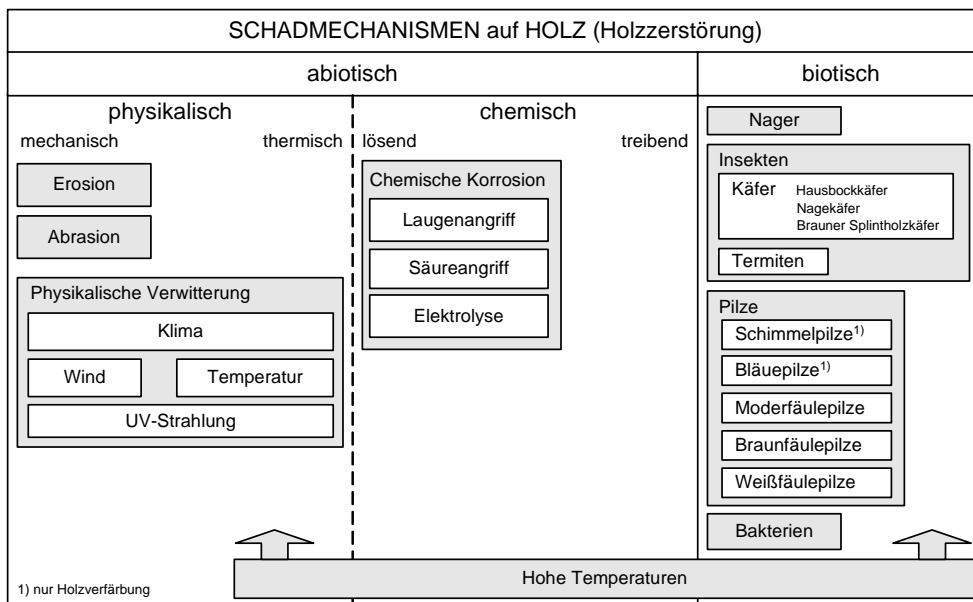


Abb. 25: Grundlegende Schadmechanismen an Bauwerken oder Bauteilen aus Holz

Fig. 25: Basic damage processes on timber

Liegt die Holzfeuchtigkeit über dem Fasersättigungspunkt (i. A. ab 28-30 %), wird das Wasser kapillar gespeichert. Es verursacht kein Quellen und Schwinden mehr, begünstigt jedoch den Befall durch biologische Schädlinge. So entstehen Pilze erst, wenn zumindest stellenweise kapillar eingelagertes Wasser vorhanden ist [8].

Diese Quell- und Schwindrisse begünstigen ein Eindringen von anderen Schädigungsmechanismen und stellen eine zusätzliche Möglichkeit für die Aufnahme von Wasser dar. Bei ausreichender Hitze haben solche Risse die Tendenz, bei jedem Zyklus von trockenen und nassen Perioden tiefer und breiter zu werden. Durch die UV-Strahlung wird Lignin in einer photochemischen Reaktion abgebaut und das Holz braun gefärbt. Die Oberfläche wird dann durch Regen ausgewaschen und es kommt zur Graufärbung. Entscheidend für den Grad der Verwitterung ist die Exposition eines Bauteils.

Bei der **biogenen Holzerstörung** kommt den Pilzen eine besondere Bedeutung zu. Nach [6] werden zwei Drittel der Holzschäden durch Pilze verursacht. Im Regelfall schädigen alle Pilze das Holz indem sie die Zellulose und Hemizellulose abbauen. Eine Ausnahme stellen die Weißfäulepilze dar welche das Lignin abbauen [7]. Nach [6] bewirkt der Abbau des Lignins durch Pilze eine Aufhellung des Holzes (Weißfäule). Wird jedoch die Zellulose der Holzellen abgebaut, kommt es zu einer Braunverfärbung des Holzes (Braunfäule).

Da **Pilze** Lebewesen sind, benötigen sie optimale Lebensbedingungen. Diese Lebensbedingungen sind von der Holzfeuchte, dem Sauerstoffangebot, der Lichtintensität, der Temperatur und dem pH-Wert abhängig. Man unterscheidet zwischen den Schimmelpilzen, den Bläuepilzen, den Moderfäulepilzen (Abb. 26), den Braunfäulepilzen und den Weißfäulepilzen. Jede Pilzart besitzt unterschiedliche Optimas. Nach [7] ist die Holzfeuchte die wichtigste Einflussgröße für den Holzabbau durch Pilze und somit auch für den Holzschutz. Das Wasser dient zur Aufnahme von Nährstoffen, zur Ausscheidung der Enzyme, für den Nährstofftransport innerhalb des Mycel sowie als Lösemittel für Stoffwechselfvorgänge [6]. Das Minimum der Holzfeuchte, für die meisten Holzpilzvertreter, liegt bei etwa 30% (prozentuelle Holzfeuchte). Für einen Pilzbefall und einem Holzabbau ist ein minimales Luftvolumen von 10 bis 20% (Sauerstoff) im Holz notwendig. Pilze leben in einem Temperaturbereich von etwa +3 °C bis +38 °C [6]. Das pH-Wert Optimum ist für die verschiedenen Gattungen und Arten der Holzfäulepilze unterschiedlich, es liegt zwischen pH 2 und 12.



Abb. 26: Moderfäule aufgrund ständiger Durchfeuchtung (Baujahr 1975)

Fig. 26: mouldiness caused by high moisture

Holzschädigende **Insekten** legen ihre Eier in die Risse und Poren des Holzes, wo sie sich bereits ab einer Feuchtigkeit von 8 % entwickeln. Die Larven ernähren sich vom Eiweiß, den Kohlenhydraten und der Stärke des Holzes. Meist handelt es sich um ortstreu Insekten, die sich so lange im Holz aufhalten, bis es vollständig zerstört ist. Als Vertreter von Trockenholz – Insekten können der Splintholz – Käfer, die Nagekäfer und der Hausbock genannt werden [6].

**2.2.5. Stein**

Die unterschiedlichen Schadbilder an Steinsperren (Trockenmauern, Zementmörtelmauerwerk, Stein/Beton-Mauerwerk). Lassen sich auf einige grundlegende Verwitterungsmechanismen reduzieren (Abb. 27). Dabei gibt es drei grundlegende Verwitterungsformen, die physikalische, die chemische und organisch-biologische. Diese sind massgebend durch das Umgebungsklima beeinflusst.

Bei der **physikalischen Verwitterung** unterscheidet man in unseren Breitengraden die Temperatur- und die Frostverwitterung.

Bei der **Temperaturverwitterung** kommt es durch unterschiedliche Temperatúrausdehnungskoeffizienten in Längs- und Querrichtung der Mineralien im Gestein zu Volumenschwankungen, die durch Druck- und Zugspannungen zwischen den Körnern und den Spaltflächen der Minerale zu einer Auflockerung und schliesslich zur Zerstörung des Gesteins führen.

Die **Frostverwitterung** (Abb. 28) basiert auf der Gesetzmäßigkeit, dass sich das Volumen von Wasser beim Übergang von flüssig auf fest um 9 % vergrößert. Dies führt zu Druckspannungen, die das Gestein zerkleinern. Diese Verwitterungsform findet man daher nur in durchfeuchtetem Gestein (umso stärker, je grösser das Porenvolumen ist und je vollständiger die Poren mit Wasser gefüllt sind). Bevorzugt tritt sie in Schichtfugen (Gesteinsfugen in sedimentärem Gestein), Schieferung (durch Druck und Temperatur in metamorphen Gestein) und Klüfte und Spalten (durch tektonische Spannungen und Abkühlen magmatischen Gesteins) auf.

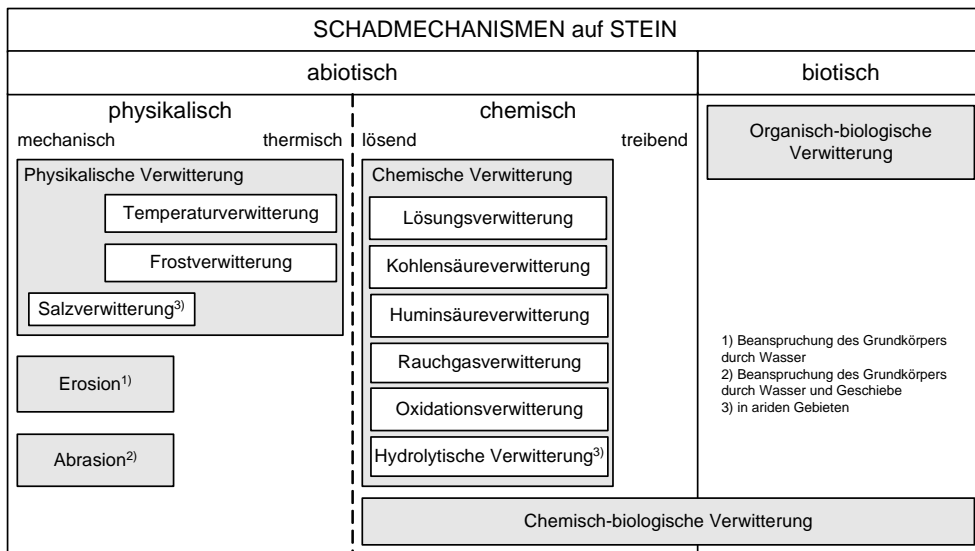


Abb. 27: Grundlegende Schadmechanismen an Bauwerken aus Stein

Fig. 27: Basic damage processes on stone

Die **Organisch-biologische Verwitterung** basiert einerseits auf dem Wurzeldruck von Pflanzen und andererseits auf der Lebenstätigkeit von Organismen (Regenwürmer, Mikroorganismen). Pflanzenwurzeln können durch ihren Turgordruck, Spannungen bis zu 1 N/mm<sup>2</sup> ausüben. Voraussetzung für eine Besiedelung von Gehölzen und Stauden ist ein klüftiger, oder gerissener Sperrkörper (Trockenmauer, Gabionen, gerissenes ZMWK).

Die **chemische Verwitterung** beschreibt die Umsetzung zwischen Gestein und den Lösungen im Kluffgefüge und im Porenraum (Angriff durch Wasser selbst, wie auch von den darin gelösten Stoffen). Abhängig ist die chem. Verwitterung von Faktoren wie dem Klima, dem Ausgangsgestein, der Exposition, der Pflanzendecke und der Zeit.



Abb. 28: Frostverwitterung an einer Sperrrenkrone

Fig. 28: damage due to frost on barrier capstone

Bei der **Lösungsverwitterung** löst sich das Gestein in einem Medium auf und wird abtransportiert, dadurch kommt es zu einer Volumsverringerung, Erhöhung des Porenvolumnes, Klüften und zu dadurch bedingten Instabilitäten (Setzungen, Einbrüche, Durchbrüche). Von Bedeutung ist sie hauptsächlich für salz- und gipshaltige Gesteine. Im Regen- und Sickerwasser gelöstes Kohlendioxid führt zur **Kohlensäureverwitterung**. Dabei greift die gebildete Kohlensäure das Gestein an. Bedeutung besteht für kalkhaltige Gesteine wie Dolomit und Kalke. Die **Rauchgasverwitterung** wird durch beträchtliche Mengen von  $\text{CO}_2$  und  $\text{SO}_2$  aus Industrieabgasen verursacht und ist im Prinzip eine künstlich gesteigerte Form der Säureverwitterung. Durch den Regen dringen diese Säuren ein und bilden Salze, die den Stein weiter zermürben und zum Zerfall bringen. Über den in Wasser gebundenen Luftsauerstoff geht bei der **Oxidationsverwitterung** das in vielen Mineralien enthaltene 2-wertige Ferroeisen in ein 3-wertiges Eisen über. Dies führt zur Bildung von Limonit (Brauneisenstein). Weiters gibt es noch die chemisch-biologische Verwitterung, welche durch Boden- und Gesteinsorganismen wie Bakterien, Pilze, Flechten und Moose entsteht.

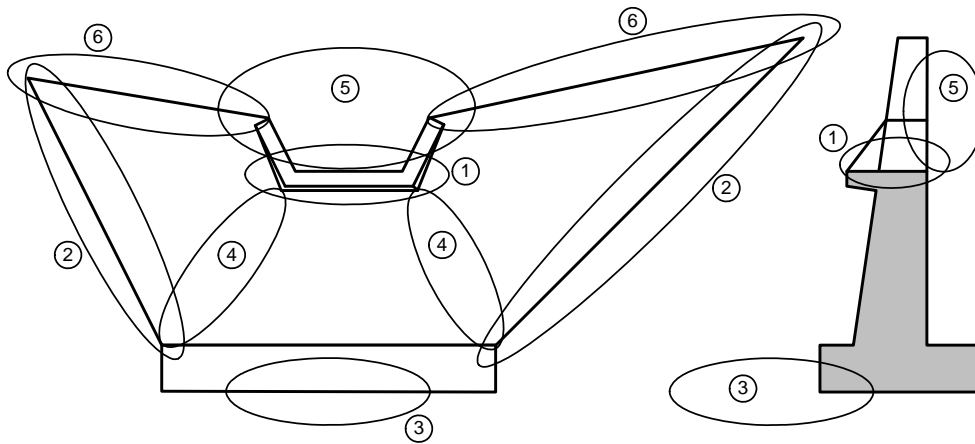
In der Natur laufen diese Mechanismen nicht getrennt voneinander ab sondern beeinflussen (begünstigen einander). Auf mechanischem Weg werden Sperrkörper oder Einzelsteine durch Risse und Spalten in kleinere zerteilt. Dies kann über die Mechanismen der physikalischen Verwitterung geschehen oder aus externen Zwängen resultieren, wie beispielsweise aus Setzungen im Untergrund oder dem Verlust von geotechnischen Widerständen und dadurch bedingte Bauwerksbewegungen. Durch diese Umstände wird die Gesteinsoberfläche vergrößert und ein chemischer Angriff erleichtert - chemische Verwitterung. Durch Besiedelung der Sperre oder von Einzelsteinen können auch zusätzlich Organismen (höhere/niedere Pflanzen, Bakterien) an der Zerlegung beteiligt sein - organisch-biologische Verwitterung. Da diese Prozesse gefügezerstörend oder -auflockernd wirken, begünstigen sie die Abrasion oder Erosion der überströmten Sperrteile.

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

Der Zustand von Schutzbauwerken und dessen Veränderung über die Lebensdauer des Bauwerkes sind von den vorhandenen Randbedingungen abhängig. Die Randbedingungen kann man in die externen und internen Randbedingungen einteilen. Diesen Randbedingungen lassen sich Mechanismen zuordnen. Diese Mechanismen unterteilen sich in die prozessspezifischen Mechanismen und die materialspezifischen Mechanismen. Die prozessspezifischen Mechanismen liegen den externen Randbedingungen, die materialspezifischen den internen Randbedingungen zu Grunde.

Die dadurch bedingten Veränderungen im Tragwerk und dessen Vorfeldern müssen nicht automatisch zu einem Schaden führen. So können beispielsweise Verklausungen an Auslaufbauwerken von Ablagerungsbecken durchaus erwünscht sein. Das abgelagerte Holz verhindert allerdings einen selbstständigen Abtransport des abgelagerten Geschiebes und bedingt eine Intervention des Erhalters (Räumung). Die Auswirkungen auf das Tragwerk können in die unbedeutenden Beeinträchtigungen und die Schäden eingeteilt werden. Ein Schaden liegt bei einer Verringerung der Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit oder Dauerhaftigkeit des Bauwerkes vor. Ob eine Veränderung zu einer Beeinträchtigung oder einem Schaden führt ist von der Art des Bauwerkes und der Lage, der Art und Größe der Veränderung abhängig. In Abb. 29 sind die stark beanspruchten Bereiche an einer Konsolidierungssperre und der dort vorherrschenden einwirkenden Mechanismen dargestellt.

Durch eine regelmäßige Kontrolle solcher sensibler Bereiche lassen sich potentielle Schäden schon im Frühstadium erkennen und im Bedarfsfall durch entsprechende Maßnahmen verhindern. Um diese beginnenden Schäden zu erkennen ist bei den Begutachtern ein Verständnis über die zu Grunde liegenden Mechanismen und deren typischen Ausprägungen im Gerinnesystem oder am Bauwerk selbst notwendig.



- 1) Erosion und Abrasion
- 2) Verlust der Seitlichen Einbindung (Verlust der Standsicherheit, Umgehung)
- 3) Verlust der unteren Einbindung (Verlust der Standsicherheit, hydraulischer Grundbruch)
- 4) Risse im Sperrkörper (aufgrund ungleicher Setzung Flügel, Sperrkörper oder seitlichem Hangdruck)
- 5) Verkläusung
- 6) Physikalische Verwitterung (Frost)

Abb. 29: Beispiel Konsolidierungssperre: Stark beanspruchte Bereiche und dort vorherrschende potentielle Schädmechanismen  
 Fig. 29: Example checkdam: exposed parts and potential damage mechanism

#### 4. Literatur

- [1] Hübl, J. (2006): Vorläufige Erkenntnisse aus 1:1 Murenversuchen: Prozessverständnis und Belastungsannahmen; In: FFIG, G. Reiser, Hrsg., Geotechnik und Naturgefahren: Balanceakt zwischen Kostendruck und Notwendigkeit, Institut für Geotechnik, BOKU Wien, Geotechnik und Naturgefahren, 19.10.2006, Wien.
- [2] ÖNORM EN 1990 – Eurocode 0– Grundlagen der Tragwerksbemessung, Ausgabe 2003-03-01, Österreichisches Normungsinstitut
- [3] Dröge, G. (2003): Schäden an Holztragwerken. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag
- [4] Schiessl, P.; Gehlen, C.; Sodeikat, C. (2004): Dauerhafter Konstruktionsbeton für Verkehrsbauwerke. In: Bergmeister, K.; Wörner J.-D. (Hrsg): Betonkalender 2004. Berlin: Ernst und Sohn, 155-220
- [5] Gobrecht, J. (2001): Werkstofftechnik Metalle. München, Wien: Oldenburg Verlag
- [6] Kempe, K. (2001): Dokumentation Holzschädlinge - Holzzerstörende Pilze und Insekten an Bauholz, 2. Auflage. Berlin: Verlag Bauwesen
- [7] Böll, A.; Gerber, W.; Graf, F.; Rickli, Ch. (1999): Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Rensenverbau. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
- [8] Lange, A. (1999): Holzschutz bei Brücken. Diplomarbeit an der Technischen Universität Graz
- [9] Eder, A. (1997): Baulicher Holzschutz - Informationsheft für Baufachleute. Wien: PROHOLZ
- [10] Jacobs, F. (2003): Betonabrasion im Wasserbau. Beton 1/2003. Düsseldorf: Verlag Bau und Technik. 16-23; Quelle: [www.verlagbt.de/fwbau/pdf/2-2003-01-02.pdf](http://www.verlagbt.de/fwbau/pdf/2-2003-01-02.pdf). Letzter Zugriff: 22.08.2006
- [11] Thienel, Ch. (2006): Bauschäden Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Skript Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität Münschen. [www.unibw.de/bauv3/lehre/skripten/bauschaden-beton2006.pdf](http://www.unibw.de/bauv3/lehre/skripten/bauschaden-beton2006.pdf). Letzter Zugriff 22.8.2006
- [12] Jacobs, F.; Winkler, K.; Hunkeler, F.; Volkhart, P. (2001): Betonabrasion im Wasserbau – Grundlagen, Feldversuche, Empfehlungen. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich. Zürich: Eigenverlag
- [13] Helbig, U.; Horlacher, H.; Schnutterer, C.; Engler, T. (2005): Möglichkeiten zur Erhöhung der Festigkeit abrasionsbeanspruchter Betonoberflächen bei Wasserbaulichen Anlagen. Die Bautechnik 82-12, 869-877
- [14] Pregl, O. (1999): Handbuch der Geotechnik – Erd- und Grundbau I – Auszug für die Lehrveranstaltung. Wien: Institut für Geotechnik, Universität für Bodenkultur

#### Autoren:

##### DDipl.-Ing. Jürgen Suda

Universität für Bodenkultur Wien  
 Department für Bautechnik + Naturgefahren  
 Institut für Konstruktiven Ingenieurbau  
 1190 Wien, Peter Jordan Straße 82

##### Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Hübl

Universität für Bodenkultur Wien  
 Department für Bautechnik + Naturgefahren  
 Institut für Alpine Naturgefahren  
 1190 Wien, Peter Jordan Straße 82