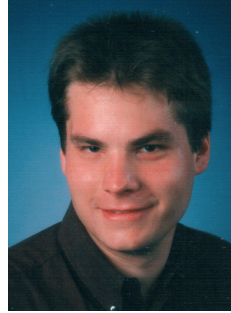


Bewertung und Sicherheit von Ingenieurbauwerken in der Natur



DI Dr. Alfred Strauss
alfred.strauss@boku.ac.at



DDI Jürgen Suda
juergen.suda@boku.ac.at

Universität für Bodenkultur
Department für Bautechnik und Naturgefahren
Institut für konstruktiven Ingenieurbau
Peter Jordan-Straße 82
1190 Wien

Tel.: +43-1-47654-5254; Fax: +43-1-47654-5299 (Strauss), Tel.: +43-1-47654-5256; Fax: +43-1-47654-5299

Um das gestiegene Sicherheitsbedürfnis in der Gesellschaft zu decken werden von der Ingenieurs- Forschungsgemeinschaft in Monitoring- und Bewertungssysteme große Erwartungen gelegt. In den letzten Jahrzehnten wurden zahlreiche Systeme, Methoden und Ansätze dazu entwickelt und erprobt. Die einzelnen Systeme und Methoden müssen dabei immer auf die Eigenheiten des überwachten Objektes angepasst werden. Im folgenden Artikel wird ein Bewertungskonzept für Ingenieurbauwerke aus dem Bereich der Wildbachverbauung vorgestellt.

1 Einleitung

Zeitgemäße Ingenieurbauwerke sollten die Anforderungen an einen wirtschaftlichen Entwurf, Konstruktion und Betrieb von Strukturen unter Beachtung des gesellschaftlichen Sicherheitsbedürfnisses und der Umwelt in sich vereinen. Um dieses Ziel zu erreichen müssen möglichst alle Interaktionen des Bauwerkes mit seiner Umwelt während seiner gesamten Lebensdauer in Betracht gezogen werden.

Ingenieurtragwerke werden auf vordefinierte Bemessungsgrößen hin ausgerichtet. Diese Bemessungsgrößen sind in der Regel aus Statistiken abgeleitet. Für Bemessungsgrößen die aus Naturprozessen resultieren stehen nur in einigen Bereichen Zeitreihen über längere Zeiträume zur Verfügung aus denen verlässliche Größen von Extremereignissen ableitbar sind. Trotz des im Laufe der menschlichen Entwicklung gestiegenen Verständnisses der Naturprozesse können Konsequenzen aus Extremereignissen meist nur nach dessen Eintritt beurteilt werden. Die Auswirkungen von Extremereignissen sind jedoch wesentliche Faktoren, welche bei der Optimierung, Dimensionierung und Erhaltung von Strukturen und Systemen zu berücksichtigen sind.

Um verlässlichere Prognosen und Risikobewertungen zu erhalten werden die zu Grunde gelegten Modelle ständig erweitert und verfeinert und die Datensätze erwei-

tert. Die für Ingenieurtragwerke relevanten Modellansätze kann man in die Einwirkungsmodelle aus dem Prozessbereich (globalen und lokalen Naturprozessen) und die Widerstandsmodelle aus dem Ingenieurbereich (Bemessungsmodelle der Standsicherheit,...) unterscheiden. Legt man als Einwirkung dynamische Prozesse aus komplexen Systemen zu Grunde, werden die Bauwerkswiderstände durch die Einwirkung und umgekehrt beeinflusst.

Eine Möglichkeit Einwirkungs- und Widerstandsmodelle kontinuierlich zu erweitern und zu kalibrieren ist es Monitoringsysteme zu installieren, die kontinuierlich neue Daten liefern. Durch die Kalibrierung erhöht sich die Zuverlässigkeit der abgeleiteten Bemessungsgrößen und somit die Sicherheit des Gesamtsystems. Ein Teilgebiet der Zuverlässigkeits- und Sicherheitsforschung in alpinen Räumen ist die Problematik der Überwachung und Bewertung von Schutzbauwerken der Wildbachverbauung, auf welche hier näher eingegangen werden soll.

2 Schutzbauwerke

Schutzbauwerke sind Ingenieurbauwerke, die dazu gebaut werden um menschlichen Siedlungsraum vor Naturgefahren zu schützen. Besonders intensiv werden Wildbachsperrungen beansprucht. Diese Bauwerke sind durch statische und dynamische Wasserlasten, mit und ohne Geschiebe, Erdrücke und dynamische Stöße aus Mur- und Lawinengängen [1] belastet. Ein Großteil der Standsicherheit dieser Bauwerke hängt von der Form, dem Eigengewicht und den mobilisierbaren geotechnischen Widerständen ab.

Um Siedlungen, die sich im Wirkungsbereich eines Einzugsgebietes eines Wildbaches befinden, ausreichend zu schützen, ist in der Regel ein komplexes Verbauungssystem in den Bächen und Abzugsgräben erforderlich.



Bild 1: Externe und interne Randbedingungen der Sicherheit eines Ingenieurbauwerkes in der Natur am Beispiel einer Wildbachsperre



Bild 2: Beispiel für ein Versagen der Tragfähigkeit: Bruch im Flügel durch fehlende seitliche Einbindung (geotechnische R.) und fehlende horizontale Bewehrung (Bauwerkseigenschaft); Foto: Jürgen Suda



Bild 3: Beispiel für ein Versagen der Gebrauchstauglichkeit (Funktionsversagen) durch Verklauung der Abflusssektion und Umgehung des Bauwerkes; Foto: Walser Otto

Die Komponenten eines Einzugsgebietes (Bachläufe, Abzugsgräben, Geschiebeherde, Speicherseen, Schutzbauwerke,...) stehen durch die Prozessdynamik (Abtrags-, Transport und Ablagerungsprozesse) in einer komplexen Wirkungsbeziehung zueinander [2].

Bei der Beurteilung der Sicherheit eines Einzelbauwerkes ist somit zwingend erforderlich das gesamte Verbauungssystem zu betrachten, da beispielsweise das Versagen eines Einzelbauwerkes durch die Wirkungsbeziehungen Auswirkungen auf die restliche Verbauung und die geschützten Bereiche hat. Der Begriff Versagen umfasst dabei neben dem Versagen der Tragfähigkeit (Bild 2) auch das Versagen der Gebrauchstauglichkeit (Bild 3) eines Einzelbauwerkes oder des Gesamtsystems. Ein Versagen der Gebrauchstauglichkeit liegt vor wenn das Einzelbauwerk oder das Gesamtsystem nicht in der Lage war Geschiebe, Hochwasser, Muren, Lawinen ausreichend zurückzuhalten um die maximalen Bemessungsmengen im Siedlungsbereich nicht zu überschreiten.

Somit ist die Sicherheit eines solchen Ingenieurbauwerkes neben der Standsicherheit wesentlich von dessen Gebrauchstauglichkeit (Funktionserfüllung) abhängig. Bild 1 zeigt die wesentlichen externen und internen Randbedingungen denen ein Schutzbauwerk unterliegt.

Die Sicherheit eines Schutzbauwerkes ist neben der Standsicherheit wesentlich von dessen Gebrauchstauglichkeit abhängig

3 Instandhaltung

Um die Sicherheit eines Bauwerkes beurteilen zu können sind Kenntnisse über den vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Zustand des Bauwerkes notwendig. Basis für Aussagen über den Zustand einer Struktur ist eine regelmäßig stattfindende Inspektion des Bauwerkes. Um Bauwerke über die geplante Lebensdauer standsicher und funktionsfähig zu halten sind neben der Inspektion regelmäßige bauliche oder organisatorische Erhaltungsmaßnahmen erforderlich.

Das in der ONR 24303 [3] vorgeschlagene Instandhaltungskonzept läuft formal in zwei Stufen ab. Die erste

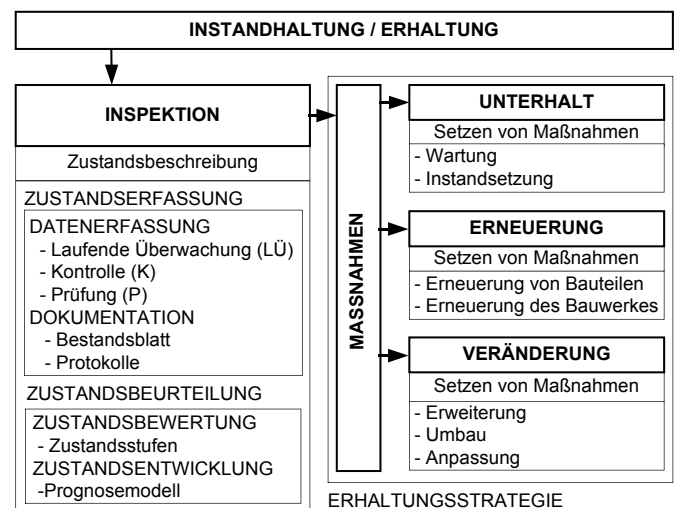


Bild 4: Übersicht über die Teile der Instandhaltung von Schutzbauwerken auf Basis der ONR 24303 [3]

Stufe, die Inspektion, dient dazu den augenblicklichen Zustand des Bauwerkes zu beurteilen. Die zweite Stufe beinhaltet die konkreten baulichen oder organisatorischen Maßnahmen (Bild 4). Die Entscheidung über Art und Umfang der auszuführenden Maßnahmen wird in Abhängigkeit der Zustandsbeurteilung und der gewünschten Erhaltungsstrategie getroffen.

4 Inspektion

Die Tätigkeiten im Zuge der Inspektion gliedern sich in die Zustandserfassung und die Zustandsbeurteilung (Bild 4, Bild 5). Im Zuge der Zustandserfassung wird der aktuelle Zustand und die bisherige Entwicklung des Bauwerkes erhoben. Dazu gehört die Erhebung der verwendeten Werkstoffe und deren Eigenschaften, der geometrischen Abmessungen, der Einwirkungen und des statischen Systems.

Im Zuge der Zustandsbeurteilung werden die erfassten Daten bewertet und analysiert. Dies geschieht, auf Basis der Zustandserfassung und -bewertung (aktueller Zustand), und einer Prognose der weiteren Zustandsentwicklung und deren Konsequenzen im Laufe einer festgelegten Restnutzungsdauer. In Verbindung mit der Erhaltungsstrategie werden Maßnahmen abgeleitet.

Da die Anzahl der Schutzbauwerke im österreichischen Bundesgebiet sehr groß ist und die finanziellen und personellen Ressourcen beschränkt sind, ist es notwendig die vorhandenen Mittel auf die sicherheitsrelevanten Bereiche zu konzentrieren.

4.1 Instrumente der Inspektion

Innerhalb der Wirkungsbeziehung eines Verbauungssystems gibt es Schutzbauwerke und Bachabschnitte deren Versagen höhere und geringere negative Auswirkungen auf die Sicherheit des restlichen Systems und die geschützten Bereiche haben. Eine ökonomische Betrachtung der Inspektionsroutinen zeigt die Notwendigkeit sicherheitstechnisch relevante Bauwerke und Bachabschnitte in kürzeren Intervallen zu überwachen.

Die Entscheidung über Art und Umfang der Maßnahmen wird in Abhängigkeit der Zustandsbeurteilung und der Erhaltungsstrategie getroffen

Die Wertigkeit definiert sich über die Auswirkungen eines Versagens eines Einzelbauwerkes oder eines Bachabschnittes auf das restliche Verbauungssystem oder auf die durch die Verbauung geschützten Bereiche.

Bei den Bauwerken unterscheidet man die Kategorien der Standard- und Schlüsselbauwerke. Die Einteilung kann, basierend auf den Schadensfolgeklassen der ÖNORM EN 1990 [4], nach Tabelle 1 erfolgen. Schlüsselbauwerke sind Bauwerke deren Versagen entscheidende Auswirkungen auf die geschützten Bereiche, oder das Verbauungssystem haben.

Betrachtet man die Instrumente der Inspektion (Bild 5) werden diese beiden Kategorisierungen als Entscheidungshilfen zusammengefasst, da sie entscheidend den weiteren Aufwand der Inspektion beeinflussen.

Neben diesen Entscheidungshilfen und den operativen Instrumenten gibt es noch jene der Dokumentation. Sie dienen der Protokollierung und Speicherung der erhobenen Daten, Einteilungen und getroffenen Vereinbarun-

Tab. 1: Zusammenhang zwischen den Auswirkungen auf das Verbauungssystem und der geschützten Bereiche bei Versagen eines Bauwerkes und den Schadensfolgeklassen nach ÖNORM EN 1990. grau: Bauwerke

Auswirkungen auf das Verbauungssystem	Auswirkungen auf die geschützten Bereiche		
	hoch ¹⁾	mittel ²⁾	gering ³⁾
hoch ⁴⁾	CC3	CC3	CC3
mittel	CC3	CC3	CC2
gering ⁵⁾	CC3	CC2	CC1

1) dicht besiedelte Gebiete, Siedlungskerne, wichtige Infrastruktureinrichtungen, überregionale Verkehrswege; hohes Personenrisiko
 2) locker besiedelte Gebiete, Einzelgebäude, regionale Verkehrswege; mittleres Personenrisiko
 3) Nebengebäude, untergeordnete Infrastruktur, Nebenverkehrswege; geringes Personenrisiko
 4) Auswirkungen auf die gesamte Verbauung (Serienversagen)
 5) nur lokale Auswirkungen, keine Auswirkung auf das versagen weiterer Bauwerke

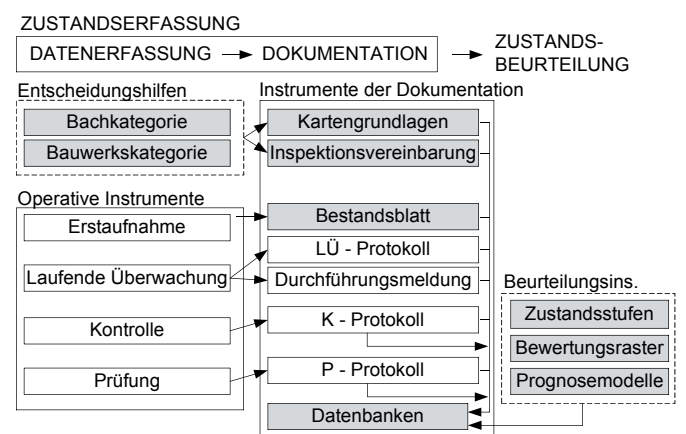


Bild 5: Instrumente der Inspektion

gen. Die Beurteilungsinstrumente, dienen dem Zweck der Zustandsbewertung (Bild 5).

4.1.1 Operative Instrumente

Die Operativen Elemente stellen die Basis der Inspektion dar. Im Zuge dieser Instrumente werden die Bauwerke besichtigt und Daten für den weiteren Entscheidungsprozess gesammelt. Um die Kapazität der Experten auf die sicherheitstechnisch relevanten Bereiche zu konzentrieren wird ein dreistufiges Inspektionsverfahren vorgeschlagen. Die unterste Stufe bildet die Laufende Überwachung (LÜ), welche in regelmäßigen Abständen von geschultem forsttechnischem Personal für alle Bauwerke durchzuführen ist. Werden an einem Bauwerk Mängel festgestellt ist eine Kontrolle (K) zu veranlassen. Diese Kontrolle ist von fachkundigen Experten durchzuführen. Schlüsselbauwerke sind, unabhängig von der LÜ, alle 5 Jahre zu kontrollieren. Im Zuge der Kontrolle wird auch eine Zustandsbeurteilung durchgeführt. Ist ein Bauwerk aufgrund einer Kontrolle, welche nur mit visuellen Methoden durchgeführt wird nicht beurteilbar ist eine Prüfung (P) zu veranlassen.

Tab. 2: Übersicht über die im Zuge der Inspektion durchzuführenden Inspektionsarten

Inspektionsart	Zeitraum	Ergebnis
Laufende Überwachung	Bauwerke in der Bachkategorie A und Schlüsselbauwerke: jährlich alle übrigen Bauwerke: mind. alle 5 Jahre	LÜ-Protokoll bei Beschädigung
Kontrolle (K)	Schlüsselbauwerke alle 5 Jahre oder Sonderkontrolle	K-Protokoll

Die Inspektionsarten und zugehörigen Intervalle sind in Tabelle 2 dargestellt.

4.1.2 Bewertungsinstrumente

Das Ziel der Zustandsbewertung ist es das Bauwerk in eine der sieben Zustandsstufen einzuordnen (Tabelle 3). Je niedriger die Zustandsstufe desto besser der Bauwerkszustand. Aus diesen Zustandsstufen werden die Sanierungsmaßnahmen und deren Dringlichkeit abgeleitet. Da die Dringlichkeit der Maßnahmen von der Wertigkeit des Bauwerkes abhängt gibt es eigene Klassen für Standardbauwerke und Schlüsselbauwerke.

5 Erhaltungsstrategien

5.1 Kostenoptimierungskonzepte

Welche Maßnahmen in welchem Umfang und zu welchem Zeitpunkt gesetzt werden, hängt von der gewählten Erhaltungsstrategie ab. Versucht man Bauwerke konstant auf einer niederen Zustandsstufe zu erhalten werden relativ oft kleinere bis mittlere Maßnahmen (Investitionen) zu tätigen sein. Beginnt man erst bei einer höheren Zustandsstufe einzuschreiten entfallen über einen längeren Zeitraum die Investitionen. Die Kosten einer Maßnahme sind jedoch viel höher, da im Extremfall eine Erneuerung des Bauwerkes notwendig sein kann. Daher gilt es im Zuge der Erhaltung, über die Lebenszeit der Strukturen eine Optimierung der einzusetzenden Kosten unter Wahrung einer geforderten Sicherheit zu erreichen. Die Kosten der

Tab. 3: Zustandsstufen von Schutzbauwerken

Zustandsstufen		
Standardbauwerke	Schlüsselbauwerke	Bauwerkszustand
0	-	Bauwerk ist entbehrlich
1	S1	sehr guter Erhaltungszustand
2	S2	guter Erhaltungszustand
3	S3	ausreichender Erhaltungszustand
4	S4	mangelhafter Erhaltungszustand
5	S5	schlechter Erhaltungszustand
6	S6	Zerstörung (Totalschaden)

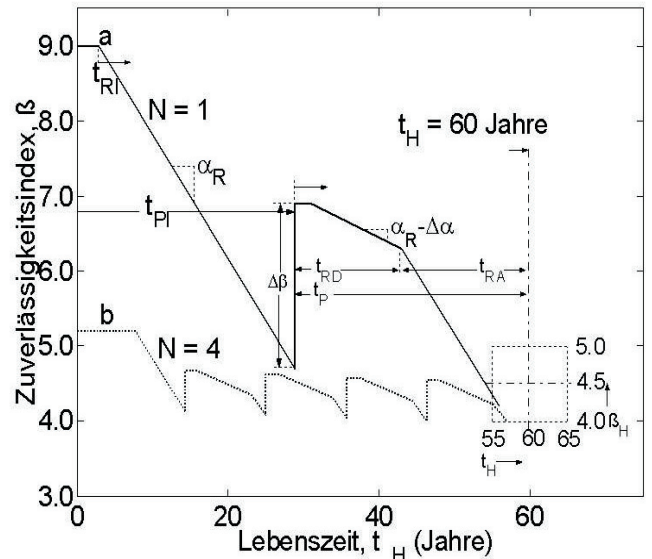


Bild 6 Kostenoptimierte Zuverlässigkeitsprofile:

Kurve A beschreibt ein neuwertiges Bauwerk mit einer Erhaltungsmaßnahme (N=1) während seiner Lebensdauer; Kurve B beschreibt ein Bauwerk auf einem geringeren Sicherheitsniveau mit vier Erhaltungsmaßnahmen (N=4) während seiner Lebensdauer

Instandhaltung werden neben den operativen Erfordernissen der Inspektion, der Erhaltung und der Einteilung der Strukturen in Zustandsstufen durch die gezielte Planung von Maßnahmen beeinflusst.

Stellt man diese Planung auf eine nachvollziehbare Basis benötigt man die Definition von Zuverlässigkeitsprofilen bzw. Zustandsprofilen über die geplante Lebensdauer der Struktur. Das Zuverlässigkeitsprofil einer Struktur – oder einer Gruppe von Strukturen – kann aus dem sich verändernden Sicherheitsindex β und den Degradationsprozessen konstruiert werden. Die Degradationsprozesse beschreiben die Alterung und Abnutzung des Bauwerkes und werden von den getroffenen Maßnahmen beeinflusst. In Bild 6 ist der Zuverlässigkeitsverlauf einer Struktur in Anhängigkeit einer kostenoptimierten Erhaltungs- und Interventionsplanung dargestellt.

Ziel ist es die Kosten von Maßnahmen im Bereich der Wartung, Instandsetzung und Erneuerung über die Lebensdauer des Bauwerkes zu optimieren. Das kostenoptimierte Zuverlässigkeitsprofil gliedert sich in (a) den anfänglichen Sicherheitsindex β_{01} (b) den Zeitpunkt an dem eine Verschlechterung einsetzt t_{RI} , (c) die Verschlechterungsrate ohne Erhaltungsmaßnahmen α_R , (d) der Zeitraum bis zur ersten Erhaltungsmaßnahme t_{PI} , (e) den Zeitraum der wiederholten Erhaltungsmaßnahme t_p , (f) die Dauer der Erhaltungsmaßnahme t_{RD} , (g) die Veränderung der Verschlechterungsrate nach der Erhaltungsmaßnahme $\Delta\alpha$ und (h) der Steigerung des Zuverlässigkeitsindex $\Delta\beta$. Alle diese Bestandteile verursachen direkte oder indirekt Kosten (Maßnahmen: Investitionskosten, Degradation: Wertabnahme durch Alterung und Abnutzung). Den Bestandteilen des Zuverlässigkeitsprofils können nach [7] die Kosten der Wartung, Instandhaltung und Erneuerung zugeordnet werden. Die Optimierung dieser Kosten, bezogen auf die Lebenszeit t_H , liefert die geeigneten Zeitpunkte

an denen eine Instandsetzung bzw. Erneuerung oder Wartung unter Wahrung eines geforderten Sicherheitsniveaus durchzuführen ist.

Die *Wartung* beeinflusst: (a) den Zeitpunkt an dem eine Verschlechterung einsetzt t_{RI} , (b) die Verschlechterungsrate ohne Erhaltungsmaßnahmen α_R , (c) den Zeitraum der wiederholten Erhaltungsmaßnahmen t_p , (d) die Dauer der Erhaltungsmaßnahme t_{RD} und (e) die Veränderung der Verschlechterungsrate nach der Erhaltungsmaßnahme $\Delta\alpha$.

Die *Instandsetzung* bzw. Erneuerung beeinflusst: (a) den Sicherheitsindex β , (b) den Zeitraum der wiederholten Erhaltungsmaßnahmen t_p , (c) die Dauer der Erhaltungsmaßnahme t_{RD}

Diese Optimierungsansätze können auf einzelne Strukturen aber auch auf Strukturgruppen angewendet werden. Um eine realitätsnahe Kostenplanung durchführen zu können müssen die Kosten der einzelnen Erhaltungsmaßnahmen bekannt sein. Weiters ist eine Anpassung der Degradationsfunktionen an den Bauwerkstyp, das Baumaterial und die einwirkende Prozessdynamik notwendig.

6 Identifikationskonzepte

Um Degradationsprozesse in Modellen analytisch beschreiben zu können müssen die wichtigsten Parameter und Wirkungen bekannt sein. Identifikationssysteme (IS) für die Schadensentwicklung können je nach den Identifikationsgrößen, Messgrößen bzw. Vergleichsgrößen gegliedert werden in:

- IS basierend auf quasi statischen Messgrößen, wie Durchbiegungen, Neigungen, Dehnungen etc. [11]
- IS basierend auf dynamischen Messgrößen [12]

Identifikationssysteme nach a.) benötigen neben den Messgrößen Einwirkungen, welche auf das System wirken. Diese Einschränkung ist zum Teil für Systeme nach b) nicht vorhanden. Da z. B. Eigenfrequenzen, Eigenformen, Dämpfungen aus ambienten Erregungen ermittelt werden können und keine eindeutige Lastzuordnung notwendig ist. Somit ist eine einfachere Gestaltung der IS möglich.

Die Identifikationssysteme verfolgen vornehmlich das Ziel, in der Struktur Fehler (Materialinhomogenitäten, Risse, Bruchstellen, etc.) aufzufinden. Die meisten der IS stützen sich auf die Bestimmung von Steifigkeitsänderungen. Die am häufigsten angewandten IS sind FEM oder System up-dating Verfahren, Direkt Stiffness Methode ([13]), Neural Network Ansätze ([14]) und auf Sensitivitätsfaktoren basierende IS.

Um aus einem Identifikationssystem potentielle Schadstellen an Sperren der Wildbachverbauung zu ermitteln sind neben dem eigentlichen Bauwerk auch die umliegenden Anlagenbereiche (Bild 8) und die komplexen Randbedingungen, besonders jene der Prozessdynamik (Bild 1) zu berücksichtigen. Das wasser- und luftseitige Vorfeld haben wesentlichen Einfluss auf die Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit des Bauwerkes.

Trotz der vorhandenen Schwierigkeiten der Anpassung bestehender Monitoringsysteme welche bereits auf Brückenstrukturen erprobt und angewendet werden, können diese unter Berücksichtigung obiger Punkte auch im

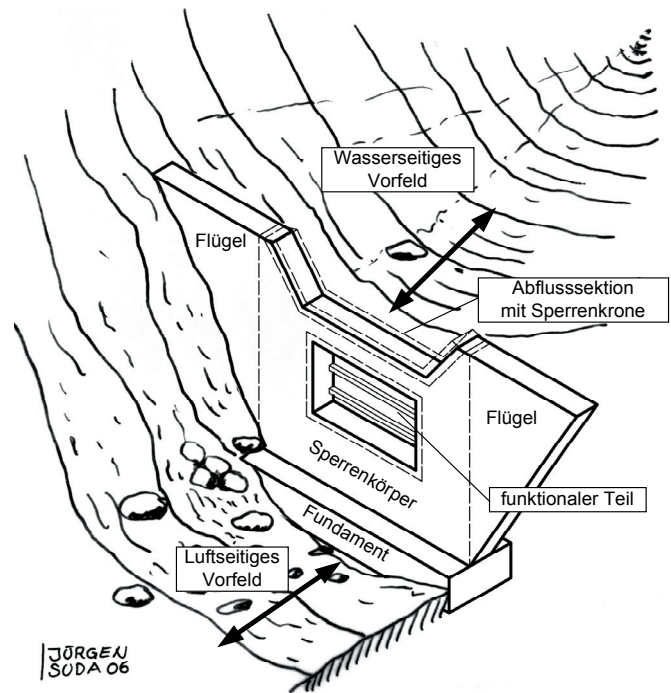


Bild 7: Anlagenteile

Bereich der Wildbachverbauung wertvolle kontinuierliche Informationen über den Erhaltungszustand liefern.

7 Fazit

Die Grundlage der Beurteilung der Sicherheit eines Ingenieurtragwerkes setzt die Kenntnis von dessen Tragstruktur, der vorhandenen Einwirkungen und der bisherigen Entwicklung voraus. Um vergangene Entwicklungen beurteilen zu können und zukünftige vorwegzunehmen ist eine laufende Bauwerksüberwachung und Datenspeicherung notwendig. Um Schutzbauwerke in teilweise schwer zugänglichen alpinen Gebieten überwachen zu können bedarf es einer an die vorhandenen finanziellen und personellen Ressourcen angepassten Inspektionsroutine. Um nach und nach kalibrierte Prognosemodelle der Zustandsentwicklung von Schutzbauwerken zu entwickeln und einzelne geologische Gebiete miteinander zu vergleichen bedarf es einer zumindest bundesweit einheitlichen Vorgehensweise. Dies führte zur Einrichtung eines Normungsausschusses für „Schutzbauwerke der Wildbachverbauung“. Das vorgestellte Konzept der Inspektions- und Erhaltungsplanung basiert auf in diesem Normungsausschuss diskutierten Kriterien und Vereinheitlichungen. Da die Entwicklung in enger Zusammenarbeit mit einzelnen Gebietsbauleitungen der WLW und der zuständigen Stelle im BMFLUW konnte auch auf Belange der Praxis eingegangen werden.

Literatur

- [1] Suda, J.; Strauss, A.; Rudolf-Miklau, F.; Huebl, J. (2007): Safety assessment of barrier structures. In: Structure and Infrastructure Engineering (SIE).
- [2] BMLFUW (2003): Gesamtheitliche Erfassung und Bewertung von Erosions- und Transportvorgängen in Wildbacheinzugsgebieten (ETAlp-Erosion, Transport in Alpinen Systemen)

- [3] *ONR 24803* – Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Betrieb, Überwachung, Instandhaltung und Sanierung, Voraussichtlicher Erscheinungstermin: Ende 2007
- [4] *ÖNORM EN 1990* – Eurocode 0 – Grundlagen der Tragwerksbemessung, Ausgabe 2003-03-01, Österreichisches Normungsinstitut
- [5] *BAUT 5.4* (2005). „Manual – Building Database“, Austrian Highway Financing Agency, ASFINAG, <http://www.asfinag.at>, Vienna.
- [6] *W. Robert, A. Marshall, S. Hwang and J. Aldayuz* (2006). „The next generation of the Pontis Bridge management system“. In P.J.S. Cruz, D.M. Frangopol and L.C. Neves, editors, *Bridge Maintenance, Safety Management, Life Cycle Performance and Cost*, IABMAS 2006, Taylor & Francis Group, London, UK.
- [7] *Estes, A.C. and D.M. Frangopol* (1996). „Life-cycle reliability-based optimal repair planning for highway bridges: A case study“ In D.M. Frangopol and G. Hearn, editors, *Structural Reliability in Bridge Engineering*, McGraw-Hill, New York, 54–59.
- [8] *Santa, U., Bergmeister, K.* (2001). Global Monitoring Concepts for Bridges. *Structural Concrete. Journal of the fib*, 2.
- [9] *Kong, J. S.; Frangopol, D. M.* (2003): Evaluation of Expected Life-Cycle Maintenance Cost of Deteriorating Structures. *J. Struct. Engrg., ASCE*, 129, 682–691
- [10] *Schröder, M.*; DIN Deutsches Institut für Normung e.V (Hrsg.) (2005): *Der Wartungsvertrag, Vertragsgestaltung der Inspektion – Wartung – Instandsetzung von baulichen Anlagen und Rechtsfolgen*. 1. Auflage. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich
- [11] *Santa, U; Bergmeister, K* (2005): *Zustandsüberwachung und Bewertung von Betontragwerken*. *Beton und Stahlbetonbau Spezial* 2005, 82–88
- [12] *Wenzel, H.; Pichler.-Chichester, D.* [u. a.] (2005): *Ambient vibration monitoring*. Wiley
- [13] *Maeck, J.* 2003. *Damage Assessment of Civil Engineering Structures by Vibration Monitoring*. Phd thesis Katholieke Universiteit Leuven. Heverlee (Belgium)
- [14] *Novák, D. & Lehký, D.* 2004. Neural network based identification of material model parameters to capture experimental load-deflection curve. *Acta Polytechnica*, Prague, Czech Republic.