Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft
Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage
Istituto federale di ricerca per la foresta, la neve e il paesaggio
Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research
WSL FNP

Holzkonstruktionen

im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau



Albert Böll
Werner Gerber
Frank Graf
Christian Rickli

Holzkonstruktionen

im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau

Albert Böll
Werner Gerber
Frank Graf
Christian Rickli

Herausgeber
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf, 1999

Verantwortlich für die Herausgabe:
Dr. Mario F. Broggi, Direktor WSL

Herausgeberkommission WSL:
Dr. Simon Egli, Konrad Häne, Dr. Bruno Jans,
Dr. Walter Keller, Dr. Nino Kuhn, Dr. Ruth Landolt,
Dr. Christoph Scheidegger, Dr. Josef Senn

Herstellung:
Publikationen WSL

Kommissionsverlag:
F. Flück-Wirth, Internationale Buchhandlung für
Botanik und Naturwissenschaften
CH-9053 Teufen
Fax 071 333 16 64

Preis sFr. 26.–

Anschrift für den Tauschverkehr:
Bibliothek WSL
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
Fax 01 739 22 15
E-mail: bibliothek@wsl.ch

© Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald,
Schnee und Landschaft, Birmensdorf, 1999

Titelbild:
Mit Holzkastensperren gesichertes Steilgerinne im
Einzugsgebiet des Gangbaches, Schächental (UR)

Böll, A.; Gerber, W.; Graf, F.; Rickli, C., 1999:
Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau.
Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald,
Schnee und Landschaft. 60 S.

ISBN 3-905620-76-6
DK 627.47 : 624.011.1, 624.137.2 : 624.011.1
FDK 384

Abstracts

Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau
Die Tragsicherheit von Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau ist von verschiedenen Einflüssen abhängig. Die umfassende Beurteilung der natürlichen Prozesse, die sich in einem Einzugsgebiet, in Gerinnen und an Hängen abspielen, bildet die Grundlage für alle Planungs- und Projektierungsarbeiten. Sie entscheidet somit auch darüber, ob Holzkonstruktionen überhaupt in Frage kommen.

Die Berücksichtigung der standörtlichen Gegebenheiten, die unter anderem den Holzabbau durch Pilze beeinflussen, sowie konstruktive und baustatische Überlegungen entscheiden über die Wahl des Konstruktionstyps, der zu verwendenden Holzarten und Holzabmessungen. Sie liefern zudem auch Angaben über zusätzlich zu treffende Schutzmassnahmen kleintechnischer und biologischer Art.

Die technisch und handwerklich saubere Ausführung hat bei Holzkonstruktionen eine besonders grosse Bedeutung. Überwachung, Unterhalt und Erneuerung gewährleisten schliesslich die Funktionstüchtigkeit in der Zukunft. Diese Publikation stellt verschiedene Probleme und mögliche Lösungen dar.

Keywords: Naturgefahren, Wildbäche, Rutschungen, Schutzmassnahmen, Holzkonstruktionen, Holzabbau durch Pilze

Le bois utilisé pour la correction des torrents, la consolidation des pentes et la stabilisation des ravins
L'efficacité des constructions en bois dans les torrents, sur les pentes et dans les ravins dépend de différents facteurs. Toute planification et étude de projet passe par une analyse détaillée des processus naturels qui se déroulent dans un bassin versant, dans le lit de ses cours d'eau et sur sa pente. C'est à partir de cette analyse qu'il sera décidé si le bois est approprié à la construction envisagée.

Les conditions de la station, leur influence sur la décomposition du bois par des champignons entre autres ainsi que des considérations d'ordre technique déterminent le type de construction, l'essence ligneuse et la dimension des bois à choisir. Elles fournissent aussi des informations sur la nécessité d'envisager des mesures biotechniques additionnelles.

Afin d'assurer leur fonctionnement à long terme, les ouvrages en bois exigent une construction des plus soignées, des contrôles réguliers ainsi qu'un entretien adéquat. Cette publication décrit différents problèmes et des solutions possibles.

Keywords: dangers naturels, torrents, glissements de terrain, mesures de protection, constructions en bois, décomposition du bois par les champignons.

Costruzioni in legno nelle opere di correzione di torrenti e di consolidamento di pendii

L'efficienza strutturale delle costruzioni in legno nel campo della sistemazione di torrenti e del consolidamento di alvei e pendii è influenzata da diversi fattori. Una valutazione dettagliata dei processi naturali che avvengono nei bacini imbriferi, negli alvei dei corsi d'acqua e sui rispettivi versanti costituisce una base indispensabile per qualunque lavoro di pianificazione e di progettazione. Essa fornisce inoltre gli elementi determinanti per decidere se le costruzioni in legno siano o meno fattibili ed auspicabili.

Le caratteristiche specifiche di un dato luogo, i cui fattori influiscono sull'azione dei funghi che decompongono il legno, nonché considerazioni tecniche sulle costruzioni e sulla loro statica risultano determinanti per la scelta della tipologia e delle dimensioni delle costruzioni e della specie legnosa da utilizzare. Tali indicazioni sono inoltre utili per individuare provvedimenti supplementari e dettagli esecutivi concernenti la protezione dei manufatti e le opere biotecniche di stabilizzazione.

Una grande importanza è comunque da attribuire ad una esecuzione manuale delle opere curata e tecnicamente corretta. Una volta realizzate, il controllo regolare, la manutenzione ed il risanamento delle opere hanno infine un'importanza decisiva per assicurarne la funzionalità anche in futuro. La presente pubblicazione descrive i diversi problemi e le possibili soluzioni che possono presentarsi in questo ambito.

Parole chiave: pericoli naturali, correzione di torrenti, opere di protezione e di stabilizzazione, consolidamento di pendii, costruzioni in legno, decomposizione del legno da parte di funghi

Timber Structures in Torrent Control and Slope Stabilisation

The efficiency of timber structures in torrent control and slope stabilisation depends on various factors. A detailed analysis of the natural processes that occur in a catchment, in its torrents and on its slopes, should form the basis of all the planning and design of protective measures. It yields, among other things, the answer to the question of whether timber structures are feasible.

The particular characteristics of a given site that influence the growth of wood decomposing fungi, as well as technical considerations provide the basis for choosing suitable structures, wood species and log dimensions. Furthermore, they provide help in deciding whether additional biotechnical stabilisation measures are necessary.

In order to fulfil their task, timber structures have to be built with all possible care, and they have to be regularly inspected and properly maintained. This publication describes some of the different problems and possible solutions involved in selecting the best protection measures.

Keywords: natural hazards, torrent control, slope stabilisation, structural measures, timber structures, wood decomposition by fungi

Vorwort

Die Verwendung von Holz für Schutzbauwerke im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau erlebt derzeit einen Aufschwung. In der Vergangenheit gab es jedoch auch Zeiten, da Holz von vielen als minderwertiger Baustoff betrachtet wurde. Mit der vorliegenden Publikation soll ein Beitrag dazu geleistet werden, dass Holz langfristig als wertvoller Baustoff anerkannt wird. Wichtige Voraussetzung dafür ist eine an die örtlichen Verhältnisse angepasste Projektierung, Konstruktion und Ausführung der Verbauungen unter Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften des Holzes. Wird diesen Aspekten nicht ausreichend Gewicht beigemessen, können bereits nach kurzer Zeit gravierende Mängel an den Bauwerken auftreten. Dies kann dazu führen, dass diese Bauweise grundsätzlich als ungeeignet beurteilt wird. Die Folge davon wäre eine erneute Bevorzugung anderer, weniger naturnaher Methoden. Deshalb wurde 1997 im Rahmen des Herbstkurses der forstlichen Arbeitsgruppe Naturgefahren (FAN) der Verwendung von Holz im forstlichen Bachverbau besonderes Gewicht beigemessen. Die entsprechenden Unterlagen und Erkenntnisse werden nachfolgend in einem erweiterten Rahmen dargestellt.

Die Wirksamkeit und die Sicherheit dieser Schutzsysteme werden bestimmt durch einen Gesamtproblemkreis, der verschiedenste Bereiche umfasst. Dazu gehören einerseits die Prozesse, die sich im Gelände abspielen, andererseits aber auch konstruktive, ingenieurmässige sowie ausführungstechnische Aspekte. Nicht zuletzt ist auch die Lebensdauer des Bauwerkes zu erwähnen, die zu einem grossen Teil von der Resistenz gegen holzabbauende Pilze abhängig ist. Im Rahmen der nachfolgenden Ausführungen werden diese Aspekte und Zusammenhänge umfassend dargestellt.

Albert Böll

Dank

Für wertvolle Hinweise aus der Praxis danken wir den Herren Fritz Ammann, Nüesch+Ammann, Bollingen; Beat Annen, Kreisoberförster, Altdorf; Andri Bischoff, Leiter des Amtes für Wasserbau, Kanton Graubünden; Urs Braschler, Kantonsoberförster, Stans; Herbert Duss, DUWAPLAN, Altdorf; Dr. Rolf Ehrbar, Kreisoberförster, Rieden SG; Henri Gétaz, Leiter des Amtes für Wasserbau, Kanton Fribourg; Jürg Trümpler, Kreisoberförster, Sevelen; Dr. M. Winkler, Kantonsoberförster, Zug

Dr. Ottmar Holdenrieder, Professor für Forstschutz und Dendrologie, ETH-Zürich danken wir für die Durchsicht des mykologischen Teils. Besonderen Dank gilt auch Dr. Peter Greminger, der sich als Leiter der Sektion Naturgefahren an der Eidg. Forstdirektion immer sehr für den Holzverbau einsetzt. Dr. Walter Keller und Dr. Dieter Rickenmann, WSL, danken wir für die Durchsicht des Manuskriptes. Für die Aufarbeitung des Textes und der Abbildungen danken wir Bruno Crivelli und Verena Fataar. Dr. Ruth Landolt, Leiterin der Abteilung Publikationen und Bibliothek, WSL, danken wir für ihre Unterstützung in verlegerischer Hinsicht.

Inhalt

Abstracts		3
Vorwort		5
Dank		6
1	**Einleitung**	9
2	**Grundlagen**	10
2.1	Natürliche Prozesse in Wildbächen, Hängen und Runsen	10
2.2	Mechanische Eigenschaften von Holz	12
2.3	Biologischer Holzabbau	13
2.3.1	Abbaumechanismen	14
2.3.2	Rahmenbedingungen	14
2.3.3	Fäuletypen	17
2.3.4	Wechselwirkungen	18
2.4	Natürliche Dauerhaftigkeit von Holz	19
2.4.1	Holzart	19
2.4.2	Jahrringbau	20
2.5	Kriterien für die Verwendung von Holz für Schutzbauwerke	21
2.5.1	Holzschutz	21
2.5.2	Bedingungen am Standort der Verbauung	21
2.5.3	Baustoff Holz	23
2.5.4	Einsatzmöglichkeiten von Holzbauwerken	25
3	**Holzbauwerke**	26
3.1	Wildbach- und Runsenverbau	26
3.1.1	Einwandige Systeme	26
3.1.2	Doppelwandige Systeme	27
3.1.3	Varianten	31
3.2	Hangverbau	33
3.2.1	Einwandige Systeme	33
3.2.2	Doppelwandige Systeme	33
3.2.3	Hangroste	34

4	**Projektierung**	36
4.1	Allgemeines	36
4.2	Anordnung der Holzbauwerke	37
4.2.1	Anordnung von Sperren in Gerinnen	37
4.2.2	Anordnung von Stützwerken an Hängen	39
4.3	Baustatische Bemessung von Holzkonstruktionen	42
4.3.1	Bemessung einwandiger Holzwerke	44
4.3.2	Bemessung von zweiwandigen Holzkastenkonstruktionen auf Kippen und Gleiten	45
4.4	Kostenschätzung	49
5	**Ausführung**	50
6	**Langzeitverhalten**	54
6.1	Lebensdauer	54
6.2	Überwachung, Unterhalt und Erneuerung	57
7	**Literatur**	59

1 Einleitung

Während langer Zeit wurde im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau namentlich für Werke kleinerer bis mittlerer Nutzhöhe sehr häufig Holz eingesetzt. Mit dem Aufkommen des Betons verringerte sich ab den 40er Jahren vor allem beim Wildbachverbau die Bedeutung der Holzbauweise. Verloren gingen damit im Verlaufe der Jahrzehnte auch die entsprechenden Kenntnisse und handwerklichen Fähigkeiten. In neuerer Zeit werden wieder vermehrt Verbauungen in Holz ausgeführt, sei es aufgrund der meistens guten Integration von Holzverbauungen in das Landschaftsbild oder auch aufgrund der momentan vielerorts schwierigen finanziellen Lage. In diesem Zusammenhang ist auch Artikel 19 des Waldgesetzes (WaG) von Bedeutung: «Wo es der Schutz von Menschen oder erheblichen Sachwerten erfordert, sichern die Kantone die Anrissgebiete von Lawinen sowie Rutsch-, Erosions- und Steinschlaggebiete und sorgen für den forstlichen Bachverbau. Für die Massnahmen sind möglichst naturnahe Methoden anzuwenden». Daraus ergibt sich einerseits die Aufgabe, mit Hilfe einer Beurteilung der Gefahrensituation das Schutzbedürfnis auszuweisen und andererseits die Möglichkeit, ja die Verpflichtung, vermehrt Holzkonstruktionen anzuwenden.

Wie alle Schutzmassnahmen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau sind auch Holzkonstruktionen aufgrund von Untersuchungen und Erhebungen zu planen und zu projektieren. Diese Arbeiten dienen als wichtige Entscheidungsgrundlage und beziehen sich auf Prozesse und Interaktionen im Einzugsgebiet eines Wildbaches, auf Fragen zur Entwicklung der Hangstabilität sowie auf Probleme in Runsen. Es gibt Verhältnisse, in denen sich Holzkonstruktionen sehr gut eignen und solche, wo sie nur bedingt tauglich sind oder überhaupt nicht eingesetzt werden dürfen. Zudem sind nicht alle Konstruktionstypen im gleichen Masse angepasst an die betreffenden Bedingungen am Einsatzort und an die Einwirkungen aus den Prozessen. Mängel in bezug auf Planung, Bemessung und Ausführung bewirken eine deutlich verringerte Funktionstauglichkeit und Lebensdauer der Bauwerke und führen zu Misserfolgen, die generell das Vertrauen in Holzverbauungen einschränken. Ob eine Verbauung in Holz ausgeführt werden soll, muss deshalb im Rahmen eines Variantenstudiums nachvollziehbar und begründet entschieden werden. Schliesslich nimmt der Unterhalt bei Holzbauwerken eine zentrale Stellung ein. Für die Planung der Unterhaltsarbeiten sind somit Kenntnisse über die zu erwartende Lebensdauer sowie Instrumente der Kontrolle notwendig.

Mit den folgenden Ausführungen soll ein Beitrag geleistet werden zur technisch korrekten und an die örtlichen Verhältnisse angepassten Verwendung von Holz im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau. Dabei werden zunächst Grundlagen zu den natürlichen Prozessen und deren Einwirkung auf die Bauwerke erläutert sowie einige Aspekte zum Holz als Baustoff diskutiert. Weiter wird das Spektrum der verschiedenen Verbautypen mit den entsprechenden Vor- und Nachteilen ausgeleuchtet. Abschliessend folgen Aspekte der Projektierung, Ausführung und des Unterhaltes von Holzbauwerken.

2 Grundlagen

Im nachfolgenden Kapitel werden Grundlagen und Zusammenhänge beschrieben, die für das Verständnis der weiteren Ausführungen von Bedeutung sind. Zunächst werden die hydrologischen und geomorphologischen Prozesse sowie die entsprechenden Wechselwirkungen erläutert, wie sie sich in Wildbächen, Hängen und Runsen natürlicherweise abspielen. Anschliessend erfolgt im Hinblick auf die baustatische Bemessung eine kurze Beschreibung der mechanischen Eigenschaften von Holz. Da die Lebensdauer von Holzbauwerken durch Zersetzungsprozesse begrenzt wird, kommt der Beschreibung des biologischen Holzabbaus besondere Bedeutung zu. Abschliessend sind Kriterien aufgeführt, die es beim Entscheid für oder gegen den Verbau in Holz zu berücksichtigen gilt.

2.1 Natürliche Prozesse in Wildbächen, Hängen und Runsen

Fachliche Grundlagen zu den Aspekten der Gefahrenbeurteilung, d.h. der Beurteilung der natürlichen Prozesse in Wildbächen, Hängen und Runsen, finden sich unter anderem in Böll (1997a), BWW, BRP und BUWAL (1997), BUWAL, BWW, BRP (1997), Heinimann *et al.* (1998), Kienholz (1993) und Rickli *et al.* (1997). Im allgemeinen lassen sich die Verhältnisse, bei denen Verbauungen aus Holz zur Anwendung kommen, etwa wie folgt charakterisieren:

- Die zu betrachtenden Wildbacheinzugsgebiete weisen Flächen von einigen Hektaren bis maximal etwa 8 bis 10 km^2 auf und liegen meistens in den Voralpen oder Alpen.
- Die Interaktionen zwischen dem Gerinne und den seitlichen Einhängen sind stark ausgeprägt. Häufig dient der Wildbachverbau der Hangfussstabilisierung und beeinflusst somit den Geschiebeeintrag in das Gerinne.
- Bezüglich der Wasserführung bestehen erhebliche Schwankungen:

$$\frac{\text{Höchsthochwasser}}{\text{Mittelwasser}} = \frac{\text{HHQ}}{\text{MQ}} = \geq 150$$

  Beispiel: Erlentobel im Alptal mit E = 0,7 km^2; $HHQ_{(25.7.84)}$: $MQ_{(1978–96)}$= 10 m^3/s : 0,04 m^3/s = 250. Besonders in kleinen Runsengerinnen sind die Verhältnisse noch extremer bzw. kaum anzugeben.

- Häufig sind, mindestens im unverbauten Gerinne, Geschiebetransportprozesse massgebend.
- Die Neigung der unverbauten Gerinnesohle beträgt in der Regel weit mehr als 10%; in Extremfällen – insbesondere in Runsen – kann sie im Bereich der bodenmechanisch bedingten Geländeneigung liegen (Abb. 1).
- Die Vorfluter sind in den meisten Fällen verbaut und von der Betrachtung ausgeschlossen. Selbstverständlich sind diesbezüglich, aber auch in vielen anderen Belangen, zeitgerechte Absprachen mit den Wasserbauern zu treffen.
- Bei Hanginstabilitäten kann es sich um Versagen entlang oberflächennaher oder tiefverlaufender Gleitflächen handeln. Ferner können z.B. auch Erosionsrutschprozesse, Kriechprozesse, kontinuierliche Bewegungen oder spontaner Kollaps unterschieden werden. Häufig spielt das Wasser im Boden eine entscheidende Rolle.



Abb. 1. Natürliche Prozesse in unverbauter Runse (Dallenwil/NW).

- In Runsen sind häufig die bodenmechanischen Verhältnisse für die globale Stabilität massgebend. Verantwortlich für die Neigungsverhältnisse zwischen sowie unterhalb von Verbaumassnahmen (Runsensperren) sind hydraulische Prozesse und solche, die den Geschiebetransport betreffen.
- Im Wildbachverbau kommen grundsätzlich Konstruktionen aus Holz (kleine einwandige Systeme und grössere doppelwandige Holzkasten), Drahtsteinkörben, Beton (Gewichtsmauersperren) und Stahlbeton (gerade Wildbachsperren) in Frage. Dabei wird die Wahl der Werkstoffe massgeblich durch die Geschiebetransportprozesse beeinflusst.
- Im Hangverbau ergeben sich die Anforderungen an die Werke in erster Linie aus den Rutschmechanismen. Somit unterscheidet man zwischen flachfundierten Werken und verankerten Konstruktionen, gegebenenfalls in Kombination mit Pfählen. Neben zweidimensional wirkenden Stützwerken aus Holz, Drahtsteinkörben, Stahl und Beton kommen allenfalls auch flächenhaft wirkende Hangroste aus Holz zum Einsatz.
- Im Runsenverbau kommen grundsätzlich die gleichen Konstruktionen in Frage wie im Wildbachverbau. Allerdings spielen dort Geschiebetransportprozesse (auch im verbauten Gerinne) meistens eine noch grössere Rolle. Dies hat einschneidende Konsequenzen in bezug auf die geeigneten Werkstoffe, Werkshöhen und Werkabstände sowie auf die Gestaltung der Abflusssektionen.
- Im Hang- und Runsenverbau, mindestens teilweise aber auch bei der Stabilisierung von Uferböschungen an Wildbächen, spielen die ingenieurbiologischen Bauweisen eine wichtige Rolle. Auf extrem steilen, rauhen und unbestockten Geländepartien haben wohl nur Kombinationen von technischen und biologischen Massnahmen Aussicht auf Erfolg.

Die Untersuchung der Prozesse dient bis heute vorwiegend der Gefahrenbeurteilung und als Grundlage für die Projektierung von Schutzmassnahmen. In Zukunft wird der Einbezug

vorhandener oder projektierter Schutzmassnahmen in die allgemeine Gefahrenbeurteilung stark an Bedeutung gewinnen. Dies wird unter anderem auch Konsequenzen haben für die Überwachung, den Unterhalt und die Instandstellung der Schutzsysteme (Böll 1997b). Zudem werden Fragen der Lebensdauer und Langzeitwirkungen von Schutzmassnahmen in erweitertem Umfang zu untersuchen sein (vgl. Kap. 6).

Im folgenden sollen die Prozesse und ihre Interaktionen nur noch soweit erwähnt werden, als sie für die Projektierung und die Wahl von Schutzmassnahmen, insbesondere von Holzbauten, relevant sind. Im Zentrum stehen verschiedene Holzkonstruktionen sowie Möglichkeiten, welche zur Verbesserung des allgemeinen Tragverhaltens, der Gebrauchstauglichkeit und der Lebensdauer solcher Systeme beitragen.

2.2 Mechanische Eigenschaften von Holz

Die weiträumige Verfügbarkeit von Holz in geeigneten Dimensionen, die einfache Bearbeitbarkeit auf der Baustelle sowie die vergleichsweise hohe Festigkeit bei geringem Gewicht machen das Holz zum idealen Baustoff für Verbauungen in schlecht erschlossenen Gebieten. Zu erwähnen sind jedoch auch die zum Teil einschneidenden Nachteile von Holz: namentlich die eingeschränkte Lebensdauer und die weiten Streuungen in bezug auf die Festigkeitseigenschaften. Die Festigkeitseigenschaften sind insbesondere von Bedeutung im Hinblick auf die Bemessung von Schutzbauten aus Holz.

Massgebend für die mechanischen Eigenschaften ist insbesondere die Raumdichte r_u (kg/m^3). Wie die meisten technologischen Kennwerte von Holz variiert auch die Raumdichte beträchtlich. Einerseits bestehen Unterschiede zwischen den verschiedenen Holzarten (Tab. 1), andererseits streuen sie aber auch innerhalb der gleichen Baumart. Zum Beispiel werden für die Raumdichte r_o von absolut trockenem Fichtenholz Werte von 300 bis 640 kg/m^3 gemessen (enge oder weite Jahrringe, Stamm-, Ast- oder Wurzelholz, etc.). Mit steigender Raumdichte nimmt die Festigkeit im allgemeinen zu. Dagegen verringern sich die Bruchfestigkeiten mit zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt u des Holzes (u = Gewichtsanteil des Wassers in % des absolut trockenen Holzgewichtes). Die Abnahme ist besonders stark im Bereich zwischen absolut trocken (u = 0%) und der Fasersättigung bei einer Feuchtigkeit von ungefähr 30%.

Tab. 1. Mittelwerte für die Raumdichte r_o (u = 0%) verschiedener Baumarten sowie Bruchfestigkeiten bei u = 15% und astfreiem Holz (nach Kollmann 1951).

Baumart	Raumdichte r_o (kg/m^3)	Bruchfestigkeiten			
		Zug $\sigma_{\parallel}$ (N/mm^2)	Druck $\sigma_{\parallel}$ (N/mm^2)	Biegung $\sigma_{\perp}$ (N/mm^2)	Schub $\tau_{\parallel}$ (N/mm^2)
Fichte	430	88	49	76	6,6
Tanne	410	82	46	72	4,9
Lärche	550	105	54	97	8,8
Douglasie	470	103	46	77	7,7
Föhre	490	102	54	98	9,8
Buche	680	132	61	121	7,8
Eiche	650	88	64	97	11,0
Edelkastanie	590	132	49	76	7,8

Die in Tabelle 1 aufgeführten Bruchfestigkeiten müssen für Bemessungsaufgaben abgemindert werden, einerseits aufgrund der weiten Streuung der vorkommenden Festigkeiten, andererseits damit eine Sicherheit gegen Versagen eingeführt werden kann. In der

SIA Norm 164 «Holzbau» (SIA 1992) werden deshalb zulässige Spannungen festgelegt. Für feuchte Bauteile sowie für im Wasser verbautes Holz sind diese zulässigen Spannungen mit einem Holzfeuchtebeiwert von c_W = 0,6 zu multiplizieren. Im Lawinenverbau wird bei der Tragkonstruktion ein Holzfeuchtebeiwert von c_W = 0,7 eingesetzt (BUWAL und WSL 1990). Im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau wird eine derartige Reduktion der zulässigen Spannungen aufgrund der Holzfeuchte jedoch in der Regel nicht berücksichtigt, da sich dadurch zu konservative Werte ergeben würden. Wir empfehlen, bei der Bemessung von Holzbauwerken mit Nadel-Rundholz für Biegung sowie Druck und Zug parallel zur Faser einen Wert von σ_{adm} = 7 N/mm^2 als zulässige Spannung einzusetzen (vgl. auch Kap. 4.3).

2.3 Biologischer Holzabbau

Im Aussenbau eingesetztes Holz wird durch verschiedenste Faktoren in seiner Funktion beeinträchtigt. Diese reichen von klimatischen Einflüssen (Niederschlag, Wind, Temperaturschwankungen, UV-Strahlung) über Nager und Insekten bis hin zu den Bakterien und Pilzen. Bezüglich Holzzerstörung im Aussenbau haben letztere wirtschaftlich die grösste Bedeutung, wobei die mannigfaltigen Wechselwirkungen mit anderen Organismen nicht unterschätzt werden dürfen. Innerhalb der immensen Vielfalt der Pilze ist es insbesondere die Gruppe der Saproben, welche natürlicherweise für den Abbau des Holzes verantwortlich ist und somit der anthropogenen Forderung nach Dauerhaftigkeit und Funktionalität massgeblich entgegenwirkt (Abb. 2). Damit verbautes Holz trotzdem langfristig bautechnischen Ansprüchen gerecht wird, ist es notwendig, den holzabbauenden Pilzen möglichst widrige Lebensbedingungen entgegenzusetzen. Die Grundlagen dazu liefern genaue Kenntnisse der beteiligten Pilzarten und deren Lebensansprüche im Rahmen der Besiedlung und Zersetzung des Holzes.



Abb. 2. *Fomitopsis pinicola* (Rotrandiger Baumschwamm) an einem Pfosten einer einwandigen Holzsperre.

2.3.1 Abbaumechanismen

Holz besteht zu etwa 45% aus Cellulose und je nach Baumart aus 20 bis 30% Hemicellulosen und 20 bis 30% Lignin. Innerhalb des komplexen Substrates «verholzte Zellwand» sind diese drei Hauptkomponenten eng miteinander vergesellschaftet. Vereinfacht dargestellt werden aus gebündelten Cellulosesträngen durch Verknüpfung mit Hemicellulosen übergeordnete Komplexe geformt. An deren Oberfläche bilden wiederum Hemicellulosen eine Matrix als Brücke zum Lignin.

Die Enzyme für den Abbau der Hemicellulosen und Cellulose des Holzes gehören überwiegend zu den Hydrolasen, welche glykosidische Bedingungen unter Einbau von Wasser spalten. Die Lignin-Peroxidasen (Ligninasen) sind Oxidoreduktasen, welche Lignin mittels H_2O_2 oxidativ angreifen. Hemicellulosen, Cellulose und Lignin sind als Makromoleküle (Polymere) für eine direkte Aufnahme in die Pilzhyphe zu gross. Sie werden daher zuerst durch ausgeschiedene Ektoenzyme extrazellulär in kleinere Fragmente gespalten, die aufgenommen und intrazellulär enzymatisch zu Energie und Pilzbiomasse umgeformt werden. Einerseits sind Zusammensetzung und Regelung des Enzymapparates verantwortlich für die individuellen Holzzersetzungsfähigkeiten der Pilze. Andererseits wird die Erreichbarkeit der einzelnen Holzkomponenten für die ensprechenden Enzyme, und somit die Abbaueffizienz, von den strukturellen Verhältnissen im Holz beeinflusst.

Der Abbau von Hemicellulosen ist bei Holzpilzen weit verbreitet und äusserst effizient. Auch Cellulose kann unter aeroben Verhältnissen von vielen Vertretern sehr gut aufgeschlossen werden. Ein Grossteil dieses Strukturelementes ist jedoch durch Wasserstoffbrücken zu kristallinen Einheiten (kristalline Cellulose) verbunden. Die Zunahme an Kristallinität führt in der Regel zu einer Erschwernis des Zersetzungsprozesses. Dessen ungeachtet können unter gewissen Voraussetzungen verschiedene Arten selbst gegen Celluloseabbau vorbehandeltes Holz angreifen und zerstören (Morris 1992).

Lignin ist im Gegensatz zu Kettenmolekülen wie Cellulose ein dreidimensionales polyphenolisches Makromolekül. Es erhöht die Zellwandhärte und die Resistenz gegen Makroorganismen und reduziert die Hygroskopizität von Holz. Lignin stellt für die meisten Mikroorganismen eine kaum angreifbare Substanz dar. Sein Abbau mit Veratmung von C-Atomen aus dem aromatischen Ring erfolgt wohl ausschliesslich durch Weissfäulepilze (Tab. 2).

Tab. 2. Abbau verschiedener Bausteine einer verholzten Zellwand durch Mikroorganismen (nach Schmidt 1994, verändert).

Organismengruppe	Hemicellulosen	Cellulose	Lignin
Bakterien	+	+	–
Schimmelpilze	+	+	–
Bläuepilze	+	–	–
Moderfäulepilze	+	+	(+?)
Braunfäulepilze	+	+	–
Weissfäulepilze	+	+	+

2.3.2 Rahmenbedingungen

Nährstoffe:

Pilze bestehen aus etwa 90% Wasser und 10% Trockenmasse. Im Gegensatz zu Pflanzen können sie keine Photosynthese betreiben. Bei Holzpilzen erfolgt die Ernährung daher durch den Abbau von organischem Material, namentlich durch die Zersetzung des Substrates Holz. Die Abbauer des Frühstadiums, wie beispielsweise Schimmelpilze, Bläueerreger sowie andere Pilze dieser Initialphase, ernähren sich vorwiegend von Zuckern und anderen Bestandteilen der Holzparenchymzellen und des Splintholzkapillarwassers. Braun-, Weiss-

und Moderfäulepilze entnehmen Kohlenstoff zusätzlich aus den makromolekularen Bestandteilen Hemicellulosen, Cellulose und Lignin der verholzten Zellwand.

Luft:
Als aerobe Organismen erzeugen Holzpilze durch Atmung CO_2, Wasser und Energie. Sie benötigen daher Luftsauerstoff. Eine Ausnahme bilden Hefepilze, die fakultativ anaerob leben und ihre Energie durch Gärung gewinnen können. Sauerstoff kann bei der Holzzersetzung limitieren, da viele Holzfäulepilze nur wenige Tage unter anaeroben Bedingungen überleben können. Durch den Holzabbau kommt es zu einer Erhöhung der CO_2- und somit einer Reduktion der O_2-Konzentration. Das minimale Luftvolumen im Holz für den Abbau durch Pilze liegt zwischen 10 und 20%. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass verbrauchter Sauerstoff von aussen nachdiffundieren kann. Bezüglich Sauerstoff bilden die Moderfäuleerreger unter den Holzpilzen eine Ausnahme. Sie sind auch bei geringem O_2-Angebot im wassergesättigten Holz noch aktiv. Weiterhin können anaerobe Bakterien im wassergesättigten Holz die nicht-lignifizierten Tüpfel des Splintholzes abbauen.

Holzfeuchtigkeit:
Pilze brauchen Wasser für die Aufnahme von Nährstoffen, den Transport innerhalb des Mycels sowie als Lösemittel für Stoffwechselvorgänge. Ohne Wasser ruht der Stoffwechsel und somit der enzymatische Holzabbau. Bei Pilzen kann eine solche Ruhephase durch Sporenbildung sowie in verschiedenen Fällen durch Trockenstarre des Mycels überbrückt werden (Tab. 3). Die Feuchtigkeit ist wohl die wichtigste Einflussgrösse für den Holzabbau durch Pilze und somit auch für den Holzschutz. Den Mikroorganismen steht nur ein Teil des Gesamtwassers des Substrates zur Verfügung. Es handelt sich dabei um jenen Anteil, der nicht von gelösten Substanzen wie Salzen oder Zuckern gebunden ist. Das Minimum liegt für die meisten Holzpilze bei einer prozentualen Holzfeuchte von etwa 30%, was als Fasersättigungspunkt oder -bereich bezeichnet wird. Im toten Holz wird der Feuchtigkeitsgrad von drei Faktoren bestimmt:

- **Aufnahmekapazität**: Weniger dichtes Holz und somit auch solches, das von Pilzen abgebaut wird, hat ein grösseres Wasserhaltevermögen.
- **Wasseraufnahme**: Sie erfolgt durch Niederschläge, Absorption aus der Luft, kapillares Eindringen von Wasser bei Holz mit Erdkontakt oder durch Kondenswasser. Im weiteren findet Wassertransport durch das Mycel statt und zusätzliche Wasserbildung resultiert aus dem Stoffwechsel der Pilze.
- **Wasserverlust**: Bei grossen Poren geht Wasser rein durch die Schwerkraft verloren. Dazu kommt der Verlust durch Verdunstung sowie den Abtransport via Pilzmycel.

Wie bei vielen Einflussfaktoren liegt bei der Holzfeuchtigkeit eine Optimumkurve vor mit minimaler, optimaler und maximaler Feuchte. Das Optimum ist je nach Pilz verschieden und beeinflusst das Vorkommen bestimmter Arten in unterschiedlich feuchten Biotopen (Tab. 3).

Tab. 3. Kardinalwerte der prozentualen Holzfeuchtigkeit für das Mycelwachstum (nach Schmidt 1994, verändert).

Pilzart	Trockenstarre	Minimum	Optimum	Maximum
Coniophora puteana (Kellerschwamm)	+	24–30	30–70	60–80
Daedalea quercina (Eichenwirrling)			40	
Gloeophyllum spp.	+	25–30	40–60	80–210
Heterobasidion annosum (Wurzelschwamm)	+/–		45	
Lentinus lepideus (Schuppiger Sägeblättling)	+		35–60	
Paxillus panuoides (Muschelkrempling)			35–70	
Phlebiopsis gigantea (Grosser Rindenpilz)			100–130	
Serpula lacrymans (Echter Hausschwamm)	+	17–30	30–60	55–90

Temperatur:
Die Abhängigkeit der Pilzaktivität von der Temperatur folgt ebenfalls einer Optimumkurve. Für das Mycel von Holzpilzen gilt allgemein, dass sich die Minimumtemperatur etwa beim Gefrierpunkt befindet, da darunter das für Enzymaktivität nötige flüssige Wasser fehlt. Das Optimum bewegt sich artspezifisch häufig zwischen 20 und 40 °C. Darüber wird die Proteindenaturierung durch Hitze schneller als die Neusynthese von Enzymen (Tab. 4). Die Temperaturkurven des Mycelzuwachses müssen nicht mit jenen der Abbauaktivität übereinstimmen. Meist ist der Temperaturbereich für die Hyphenproduktion breiter als jener für die Holzzersetzung (Wälchli 1977). Die Mycelien einiger Holzpilze überdauern Extremwerte ausserhalb von Maximum und Minimum durch Hitze-, beziehungsweise Kältestarre.

Tab. 4. Minimal-, Optimal-, Maximal- und Letaltemperaturen (°C) für das Mycelwachstum; [a] : bei 30 Minuten Einwirken (nach Schmidt 1994, verändert).

Pilzart	letal	min.	opt.	max.	letal[a]
Armillaria mellea (Honiggelber Hallimasch)			25–26	33	
Coniophora puteana (Kellerschwamm)	–20/–30	0–5	20–32	29–40	65
Fomes fomentarius (Zunderschwamm)			27–30	34–38	
Gloeophyllum abietinum (Tannenblättling)		0–4	26–30	36–38	
Gloeophyllum trabeum (Balkenblättling)			35	40	>80
Heterobasidion annosum (Wurzelschwamm)		2–4	22–25	30–34	
Lentinus lepideus (Schuppiger Sägeblättling)		4–8	27–33	37–40	90
Phellinus pini (Kiefernfeuerschwamm)			24–27	30–35	55
Polyporus squamosus (Schuppiger Porling)			24–25	30–38	60
Schizophyllum commune (Spaltblättling)			30–36	44	60
Serpula lacrymans (Echter Hausschwamm)	–6	0–5	17–23	26–28	55
Trametes versicolor (Schmetterlingstramete)			24–33	34–40	55
Trichaptum abietinum (Tannentramete)			22–28	35–40	

pH-Wert:
Im Zusammenhang mit der Holzzersetzung dürfte die wichtigste physiologische Bedeutung des pH's in der Beeinflussung der Enzymaktivität liegen. Allgemein liegt bei Holzpilzen das Optimum im leicht sauren Bereich bei pH 5–6. Basidiomyceten haben einen Optimalbereich von etwa pH 4–6 bei einer Gesamtspanne von ungefähr pH 2,5–9 (Thörnqvist *et al.* 1987). Ascomyceten und insbesondere Moderfäulepilze tolerieren alkalische Substrate bis etwa pH 11. Unter etwa pH 2 und oberhalb 12 kommt normalerweise die mikrobielle Aktivität zum Erliegen.

Innerhalb eines Baumes können unterschiedliche pH-Werte auftreten. So ist beispielsweise das Kernholz von Eiche und Douglasie saurer als der Splint. Viele Pilze können mit ihrer Stoffwechselaktivität pH-Werte nahe den Extremen durch pH-Regulation (pH-Drift) verändern (Tab. 5). Braunfäulepilze säuern ihr Substrat meist stärker an als Weissfäuleerreger.

Tab. 5. pH-Wert-Regulation durch Pilze (B = Braunfäule, W = Weissfäule); [a] : kein Wachstum (Schmidt 1994, verändert).

pH bei Kulturbeginn: / nach Kultivierung von:	2,2	3,6	5,0	5,8	6,9	7,1
Coniophora puteana (B) (Kellerschwamm)	2,2[a]	3,5	3,7	3,8	3,8	6,7[a]
Lentinula edodes (B) (Shi-take)	2,2[a]	3,3	3,6	3,8	4,3	6,8[a]
Schizophyllum commune (W) (Spaltblättling)	2,2[a]	6,8	7,7	7,8	7,8	7,5
Serpula lacrymans (B) (Echter Hausschwamm)	2,2	2,2	2,9	2,7	3,1	6,7[a]



Abb. 3. *Gloeophyllum sepiarium* (Zaunblättling) auf der Stirnfläche eines Querholzes im Längsverbau.

2.3.3 Fäuletypen

Braunfäule:

Braunfäule wird durch Basidiomyceten hervorgerufen, welche Kohlenhydrate, Hemicellulosen und Cellulose abbauen, Lignin jedoch nahezu unverändert zurücklassen, was die Braunfärbung verursacht. Aufgrund des Celluloseabbaus nimmt die Dimensionsstabilität besonders axial stark ab, und durch Schwinden beim Trocknen entstehen Quer- und Längsrisse mit dem charakteristischen würfeligen Zerfall. Im Endstadium des Abbaus lässt sich braunfaules Holz mit den Fingern zu Pulver zerreiben. Die meisten Braunfäulepilze greifen bevorzugt Nadelbäume an, gleichgültig ob es sich um stehendes oder geschlagenens Holz handelt, und sind sowohl im Splint als auch im Kern aktiv (Abb. 3), (Tab. 6).

Tab. 6. Einige wichtige Braunfäulepilze und ihr hauptsächliches Vorkommen.

Pilzart	Hauptsächliches Vorkommen				
	lebender Baum	Holz im Aussenbau	Holz im Innenbau	Nadelholz	Laubholz
Laetiporus sulphureus (Schwefelporling)	x			x	x
Phaeolus spadiceus (Kiefern-Braunporling)	x			x	
Piptoporus betulinus (Birkenporling)	x				x
Sparassis crispa (Krause Glucke)	x			x	
Gloeophyllum spp.		x		x	
Daedalea quercina (Eichenwirrling)		x			x
Lentinus lepideus (Schuppiger Sägeblättling)		x		x	
Paxillus panuoides (Muschelkrempling)		x		x	
Coniophora puteana (Kellerschwamm)			x	x	
Antrodia vaillantii (Weisser Porenschwamm)			x	x	
Tyromyces placenta (Rosafarb. Saftporling)			x	x	
Serpula lacrymans (Echter Hausschwamm)			x	x	

Weissfäule:
Weissfäule bezeichnet den Abbau von Hemicellulosen, Cellulose und Lignin meist durch Basidiomyceten und vereinzelte Ascomyceten. Es wird die Simultanfäule (Korrosionsfäule) und die sukzessive Weissfäule unterschieden (Liese 1970, Blanchette *et al.* 1985). Bei ersterer werden alle Holzkomponenten annähernd gleichzeitig und mit gleichen Raten abgebaut. Bei letzterer verläuft der Ligninabbau mit Beginn der Zersetzung schneller, so dass sich Cellulose zunächst relativ anreichert. Bei beiden Fäuletypen verringern sich die Holzfestigkeiten weniger stark als bei der Braunfäule, da bei gleichem Masseverlust weniger Cellulose abgebaut wird. Ebenso ist hier die Dimensionsstabilität weniger herabgesetzt, und es kommt nicht zu Rissbildung oder Würfelbruch. Bei fortgeschrittenem Befall ist das Holz sehr leicht, weich und faserig oder schwammig. Weissfäulepilze greifen überwiegend Laubbäume an, sowohl als Pionierorganismen als auch in späteren Sukzessionsstadien (Tab. 7).

Tab. 7. Einige wichtige Weissfäulepilze und ihr hauptsächliches Vorkommen.

Pilzart	Typ	Hauptsächliches Vorkommen			
	simultan/ sukzessiv	lebender Baum	Holz im Aussenbau	Nadel- holz	Laub- holz
Armillaria mellea (Honiggelber Hallimasch)	?	x		x	x
Fomes fomentarius (Zunderschwamm)	sim	x			x
Heterobasidion annosum (Wurzelschwamm)	suk	x		x	
Meripilus giganteus (Riesenporling)	?	x			x
Phellinus pini (Kiefernfeuerschwamm)	sim	x		x	
Polyporus squamosus (Schuppiger Porling)	?	x			x
Schizophyllum commune (Spaltblättling)	?		x	x	x
Trametes versicolor (Schmetterlingstramete)	sim		x		x

Moderfäule:
Als Erreger für die Moderfäule sind bis heute vorwiegend Ascomyceten und Deuteromyceten bekannt. Moderfäulepilze können Holz unter extremen Bedingungen abbauen, welche für Basidiomyceten ungeeignet sind. Die Holzfeuchtetoleranz dieser Pilze reicht denn auch von nahezu Wassersättigung bis zur Trockenstarre.

Moderfäulepilze bauen Hemicelluolsen und Cellulose ab. Lignin wird zumindest im Anfangsstadium nicht oder kaum angegriffen. Das in der Regel ligninreichere Nadelholz ist allgemein resistenter als das ligninärmere Laubholz (Nilsson *et al.* 1988; Eriksson *et al.* 1990). Bei Nadelholz erfolgt der Abbau bevorzugt im ligninärmeren und cellulosereicheren Spätholz.

Holz mit Moderfäule wird häufig mit blossem Auge zunächst nicht als verfault erkannt. Auch die Hammerprobe ergibt nicht den hohlen Klang von zerstörtem Holz (Liese 1959). Feuchtes Holz färbt sich dunkel und wirkt an der Oberfläche moderig-weich; trockenes Holz zeigt Würfelbruch mit feinrissiger, holzkohleähnlicher Oberfläche. Ähnlich wie bei der Braunfäule kommt es schon bei relativ geringem Masseverlust zu einer starken Abnahme der Dimensionsstabilität.

2.3.4 Wechselwirkungen

Der Holzabbau ist bei weitem nicht nur eine Angelegenheit zwischen Substrat und Pilz. Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei diesem Zersetzungsprozess um ein zeitlich und räumlich komplexes Zusammenwirken verschiedenster Organismengruppen. Innerhalb dieser Gemeinschaften kommt es zu diversen synergistischen und antagonistischen Beziehungen.

Insekten zerstören Holz vorwiegend im Larvenstadium durch das Bohren von Gängen. Die dadurch entstehenden Strukturveränderungen können das Eindringen von Fäulepilzen

erleichtern. Zudem ist bekannt, dass verschiedene Arten, zum Teil effiziente Holzabbauer, zufällig oder als Teil einer Insekten-Pilz-Beziehung via Eiablage in die Larvenstuben der Insekten kommen und sich von dort ausbreiten (Himes und Skelly 1972; Whitney *et al.* 1987).

Die Tatsache, dass ein tiefer Sauerstoffgehalt im Holz dem Abbau durch Pilze entgegenwirkt, wird bei der Nasslagerung ausgenutzt, indem das Holz in Gewässer getaucht oder auf Polterplätzen berieselt wird. Bakterien können jedoch, insbesondere im letzteren Fall, unter wassergesättigten Bedingungen die nicht lignifizierten Tüpfel des Splintholzes abbauen. Dadurch wird das Holz poröser und stellenweise trockener, was das Eindringen holzzersetzender Pilze ermöglicht. Gewisse Eisensulfat reduzierende Bodenbakterien wiederum können durch die Anreicherung von Eisen die Aktivität von Braunfäulepilzen erhöhen. Andere tragen zur Ansäuerung oder Alkalisierung des Holzes bei, was die Rahmenbedingungen für spezifische Holzpilze beeinflusst und insbesondere im Zusammenhang mit Pilzsukzessionen wichtig ist. Bei der Sukzession im Holzabbau sind die Erstbesiedler häufig Bakterien, Schleimpilze, Hefen und Schimmelpilze. Diese bleiben überwiegend auf der Holzoberfläche, respektive in den äusseren Bereichen, wo sie als Holzbewohner das Substrat für die tiefer eindringenden Bläue- und Rotstreifepilze sowie für die holzzerstörenden Braun-, Moder- und Weissfäulepilze vorbereiten (Levy 1975).

Andererseits hemmen beispielsweise spezifische Bodenbakterien das Mycelwachstum sowie die Rhizomorphenbildung bei *Armillaria* spp. (Dumas 1992). In ähnlicher Weise vermindern verschiedene Bakterienkombinationen das Verblauen durch *Ceratocystis* sp., das Verschimmeln durch *Trichoderma* sp. sowie den Abbau durch *Trametes versicolor* und *Tyromyces placenta* (Benko und Highley 1990). Ebenso konnten Highley und Ricard (1988) eine hemmende Wirkung (z.T. mycelabtötend) von *Trichoderma*-Arten bei den Braunfäulepilzen *Gloeophyllum trabeum*, *Lentinus lepideus* und *Tyromyces placenta* nachweisen. Weissfäulepilze reagieren im allgemeinen auf die «Behandlung» mit *Trichoderma* spp. weniger sensibel.

2.4 Natürliche Dauerhaftigkeit von Holz

Die natürliche Dauerhaftigkeit wird oft als Widerstandsfähigkeit des Holzes gegenüber holzzerstörenden Organismen, insbesondere gegen Pilze bezeichnet (Butin 1983). Die hierzu in der Literatur zur Verfügung stehenden Angaben sind nach wie vor uneinheitlich. In erster Linie liegt dies im äusserst komplexen Prozess der biologischen Holzzersetzung begründet, welcher von zahlreichen Einflussfaktoren abhängt. Selbst unter kontrollierten Laborbedingungen kann der Abbau von Proben einer Holzart beträchtlich streuen. Am verbauten Holz treten solche Unterschiede noch deutlicher zu Tage, da hier zusätzlich verschiedenste Umgebungseinflüsse einwirken. Die natürliche Dauerhaftigkeit ist hauptsächlich abhängig von der Holzart, aber mindestens teilweise auch von den Wuchsbedingungen am Standort des Baumes und den damit verbundenen Variationen der Raumdichte r_u des Holzes.

2.4.1 Holzart

Die natürliche Dauerhaftigkeit wird massgeblich durch das holzartenspezifische Vorhandensein oder Fehlen bestimmter Verkernungsstoffe bestimmt (Bosshard 1984). Bei der Umwandlung von Splint- in Kernholz findet neben der Nekrobiose des Speichergewebes auch eine Umlagerung von Zellinhaltsstoffen sowie eine Inkrustierung von Zellwänden statt. Beim Ausgangsmaterial dieser Stoffe handelt es sich um Sekundärmetabolite mit phenolischem Charakter. Diese werden je nach Art der Kernbildung mehr oder weniger polymerisiert. Im Falle der Bildung eines obligatorischen Farbkernes ist zum Zeitpunkt der Nekrobiose der Speicherzellen die Polymerisation dieser Substanzen nur wenig fortgeschritten. Entsprechend können die niedermolekularen Kernholzstoffe die Zellwandfilter passieren und die Zellmembranen des Festigungs- und Wasserleitgewebes inkrustieren. Dadurch erhöht sich einerseits die Strukturfestigkeit und andererseits die Resistenz gegen Holzzer-

setzung, insbesondere durch Pilze. In den anderen Fällen der Umwandlung von Splint- in Kernholz kommt es hingegen nicht zu einer solchen Inkrustierung und entsprechend unterscheidet sich die Dauerhaftigkeit des Kernholzes bei diesen Baumarten nur unwesentlich von jener des Splintes. Das fakultative Farbkernholz weist ungefähr die gleiche Dauerhaftigkeit auf wie das Splintholz. Das Splintholz der verschiedenen Baumarten unterscheidet sich bezüglich der Dauerhaftigkeit nur unwesentlich und ist allgemein sehr wenig resistent.

Die zeitliche Abhängigkeit der Veränderung des Stoffwechsels im Bereich der Splint-/Kernholz-Umwandlung scheint, insbesondere bei Hölzern mit obligatorischem Farbkern, auch durch die Nährstoffversorgung beeinflusst zu werden. So verkernen beispielsweise Föhren auf wüchsigen Standorten weniger schnell als unter kargen Bedingungen (Trendlenburg und Mayer-Wegelin 1955). Das wiederum wirkt sich auf das Verhältnis Splint-/Kernanteil und somit direkt auf die natürliche Dauerhaftigkeit aus.

Die natürliche Dauerhaftigkeit von Holz hängt jedoch nicht nur von der Verkernung ab, sondern auch von weiteren Faktoren wie zum Beispiel der holzartenspezifischen Raumdichte (Tab. 1). Im Hinblick auf die Verwendung im Aussenbau wurde die Pilzresistenz der verschiedenen Baumarten beispielsweise von Wälchli (1973, 1976) basierend auf Erfahrungen und Laborversuchen sowie von Findlay (1962) mittels Feldversuchen (Tab. 8) beurteilt.

Tab. 8. Dauerhaftigkeit einiger einheimischer Holzarten, eingeteilt in Klassen aufgrund der Lebensdauer von Holzstäben (5 x 5 cm) in Berührung mit dem gewachsenen Boden (nach Findlay 1962, zit. in Bosshard 1984).

Dauerhaftigkeit (Klassen)	sehr dauerhaft	dauerhaft	mässig dauerhaft	nicht dauerhaft	hinfällig
Lebensdauer bei Feldversuchen	>25 Jahre	15–25 Jahre	10–15 Jahre	5–10 Jahre	<5 Jahre
Holzart	Eibe	Edelkastanie Eiche Robinie	Lärche Douglasie Föhre	Fichte Tanne Esche Ulme Pappel	Splintholz allgem. Erle Buche Hagebuche Birke Ahorn Weide

Die Dauerhaftigkeit einiger einheimischer Baumarten ist aus Tabelle 8 ersichtlich. Als vereinfachende Faustregel kann etwa die folgende Reihenfolge mit abnehmender Pilzresistenz formuliert werden:

1) Kernholz obligatorischer Farbkernholzarten Laubholz
2) Kernholz obligatorischer Farbkernholzarten Nadelholz
3) Holzarten ohne obligatorische Farbkernholzbildung

Der überwiegende Teil aller Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau in der Schweiz wird mit den Baumarten Fichte und Tanne ausgeführt. Diese Baumarten werden als nicht dauerhaft beurteilt. Somit wird deutlich, dass den Aspekten Lebensdauer, Zustandsbeurteilung und Unterhalt bei Holzverbauungen ein grosses Gewicht beigemessen werden muss.

2.4.2 Jahrringbau

Die Dauerhaftigkeit ist nicht nur von der Baumart abhängig, sondern variiert zusätzlich auch innerhalb der gleichen Baumart. Der Grund dafür ist insbesondere in den unterschiedlichen Wuchsbedingungen zu suchen, denen ein Baum ausgesetzt sein kann. Die natürliche Dauerhaftigkeit ist positiv mit der Raumdichte r_u korreliert, welche ihrerseits abhängig ist

von der Jahrringbreite bzw. dem Spätholzanteil (Bosshard 1984). Diese Faktoren werden beeinflusst vom Standort, von der soziologischen Stellung im Bestand, dem Alter des Baumes sowie den waldbaulichen Massnahmen. Bezüglich Standort ist einerseits die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit massgebend, andererseits spielen Klima, Höhenlage, Exposition und Länge der Vegetationsperiode eine wichtige Rolle. Je härter die Lebensbedingungen für den Baum sind, desto langsamer entwickelt er sich und entsprechend enger sind die Jahrringe. Der Zusammenhang zwischen Jahrringbreite und Raumdichte ist abhängig von der Holzart:

Nadelholz:	Zunahme der Raumdichte mit abnehmender Jahrringbreite
Laubholz, ringporig:	Zunahme der Raumdichte mit zunehmender Jahrringbreite
Laubholz, zerstreutporig:	Raumdichte nicht abhängig von der Jahrringbreite

Damit ergeben sich für das mit Abstand am häufigsten verbaute Nadelholz folgende Konsequenzen: feinjähriges, engringiges Holz weist eine erhöhte Raumdichte und damit auch eine tendentiell erhöhte natürliche Dauerhaftigkeit auf. Engringiges Holz kann beispielsweise erwartet werden in höheren Lagen, von unterdrückten bis mitherrschenden Bäumen sowie auf mässig bis schlecht wüchsigen Standorten. Neben der Wahl einer geeigneten Holzart ist es somit grundsätzlich auch möglich, durch eine gezielte Auslese der geeigneten Individuen beim Holzschlag einen möglichst optimalen Baustoff für die Verbauungen in Wildbächen, Runsen oder Hängen bereitzustellen.

2.5 Kriterien für die Verwendung von Holz für Schutzbauwerke

2.5.1 Holzschutz

Der Holzschutz steht im Spannungsfeld zwischen dem natürlichen Abbau des Holzes durch verschiedenste Organismen und der Forderung, die Funktionalität eines Holzbauteiles während einer bestimmten Dauer zu garantieren (Graf 1997). Der eigentliche Besiedlungsprozess von Bäumen durch saprobe Holzabbauer beginnt mit dem Fällen. Gewisse Organismen können auch schon an lebenden Bäumen latent vorhanden sein. Um die Holzzersetzung möglichst langfristig zu minimieren, sollten deshalb geeignete Massnahmen ohne grosse Verzögerung zur Anwendung kommen, insbesondere wenn das Holz nicht unmittelbar nach dem Schlag verbaut wird. Um Holz vor der Zersetzung durch Pilze zu schützen, wird allgemein versucht, die Lebensbedingungen im Holz so zu verändern, dass die Entwicklung von Holzpilzen unmöglich oder zumindest stark gehemmt wird. Weitverbreitete Schutzmethoden sind Nasslagerung (Sauerstoffentzug), Trocknung (Wasserentzug) sowie chemische Konservierung (Vergiftung). Im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau sind die Strategien Trocknung nicht und die chemische Konservierung nur in ganz seltenen Fällen anwendbar. Zwar kann durch Imprägnierung die Dauerhaftigkeit von Holz deutlich gesteigert werden. Diese in Österreich vereinzelt angewandte Massnahme (Neuschmid 1997) wird jedoch in der Schweiz nicht empfohlen: kaum abschätzbare Gefahren für die Gewässer, Holztransporte zwischen Baustelle und Imprägnierwerk, Entsorgungsproblematik. Im Hangverbau kommen unter Umständen gebrauchte Eisenbahnschwellen in Frage. Eine Art natürlichen Schutz ergibt sich für Wildbachsperren in Kalkgebieten – mindestens für den Bereich der Abflusssektion – oft durch die Versinterung. Diese reguliert die Feuchtigkeit und stellt eine mechanische Barriere dar. Die besten Möglichkeiten bieten sich durch den Sauerstoffentzug, insbesondere in dauernd wasserführenden Gerinnen, wo mindestens ein Teil des Holzbauwerkes über längere Zeit in wassergesättigtem Zustand verbleibt.

2.5.2 Bedingungen am Standort der Verbauung

In Kapitel 2.3.2 sind Faktoren beschrieben, die den Abbauprozess von Holz durch Pilze beeinflussen. Damit übereinstimmend stellten Wälchli *et al.* (1986) bei Untersuchungen an

temporären Lawinenverbauungen aus Holz fest, dass insbesondere die Faktoren Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschläge, Sonnenstrahlung und die Luftbewegung für die Pilzentwicklung von Bedeutung sind. Somit wird deutlich, dass die Beurteilung des Verbaustandortes wichtig ist, um die Erfolgsaussichten einer Holzverbauung bzw. deren Lebensdauer abzuschätzen. Die nachfolgenden Ausführungen konzentrieren sich auf die Standortfaktoren Feuchtigkeit und Temperatur.

Feuchtigkeit: Wie in Kapitel 2.5.1 ausgeführt, ist Holz ohne chemischen Schutz entweder völlig nass oder aber in getrocknetem Zustand über längere Zeit konservierbar. Der für den Holzabbau gefährliche Bereich der Holzfeuchtigkeit liegt bei Fichte oder Tanne zwischen der Fasersättigung bei ungefähr u = 30% und einem Wert von etwa 120%. Mit dem Boden in Berührung stehende Holzbauteile weisen oftmals Feuchtigkeiten in diesem Bereich auf und ein Wassergehalt unter der Fasersättigung kann nicht dauerhaft erreicht werden. Deshalb müssen die Bestrebungen auf eine andauernd hohe Holzfeuchte ausgerichtet sein. Dieser Forderung kann im Wildbachverbau zum Beispiel Folge geleistet werden, indem Holz nur in dauernd wasserführenden Gerinnen verbaut wird. Auch dort sind jedoch exponierte Bauteile wie Sperrenflügel und -einbindungen der Wechselfeuchtigkeit ausgesetzt (Abb. 4). Durch gewisse konstruktive Massnahmen am Bauwerk und durch eine ausreichende Beschattung – indem zum Beispiel die Einhänge nach dem Bau sofort bepflanzt werden – können die Verhältnisse etwas verbessert werden. Längere Perioden mit Holzfeuchten im gefährlichen Bereich können dadurch umgangen werden. Für den Verbau von Holz in Runsen und Hängen lassen sich diese Bedingungen nicht erfüllen. Somit ist hier mit einer reduzierten Lebensdauer zu rechnen. Die Erfahrungen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau zeigen, dass an nord- bis ostexponierten Lagen längere Lebensdauern zu erwarten sind als bei Expositionen Süd bis West.

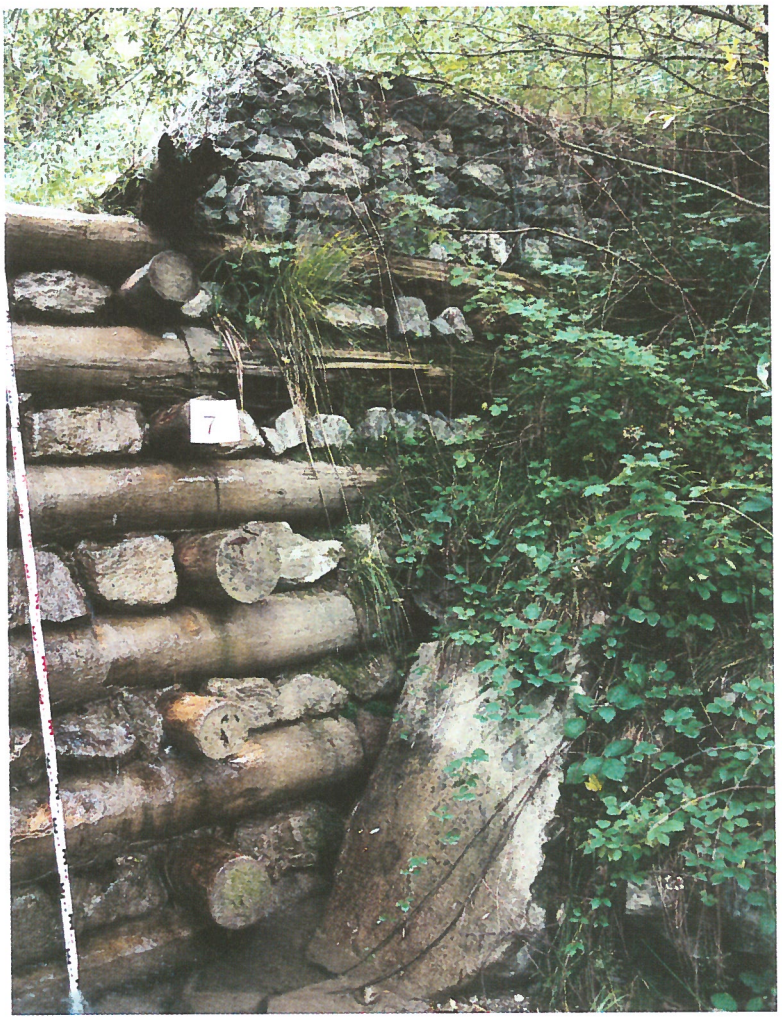


Abb. 4. Holzabbau durch Pilze im Bereich der seitlichen Einbindung einer Wildbachsperre.

Temperatur: Mit abnehmender Temperatur verringert sich die Entwicklungsgeschwindigkeit der Pilze (Kap. 2.3.2). Es ist deshalb anzunehmen, dass mit zunehmender Höhenlage die Abbaugeschwindigkeit tendentiell abnimmt. Eine gute Beschattung sowie eine vorteilhafte Exposition dürften sich aufgrund der dadurch bewirkten Temperaturreduktion positiv auf die Lebensdauer von Holzbauwerken auswirken.

2.5.3 Baustoff Holz

Nachfolgend werden einige Aspekte erwähnt im Bereich der Auswahl des Baustoffes sowie dessen Qualität und Verarbeitung. Sie sind von Bedeutung im Zusammenhang mit der Zustandsentwicklung und der Lebensdauer der Bauwerke.

Auswahl der Holzart: In der Schweiz werden für Holzverbauungen weitaus am häufigsten die Baumarten Fichte und Tanne eingesetzt; dies vor allem aus Gründen der Verfügbarkeit sowie der Schaftform. Holztechnologisch und in Bezug auf die Dauerhaftigkeit bestehen keine wesentlichen Unterschiede zwischen diesen beiden Baumarten. Allerdings wird die Tanne allgemein im Vergleich zur Fichte als etwas dauerhafter beurteilt und traditionell wird sie im Wasserbau der Fichte vorgezogen. Auch aus wirtschaftlichen Gründen wird die Tanne im Wildbach- und Hangverbau häufiger eingesetzt. Baumarten wie Föhre, Lärche oder Douglasie wären in Bezug auf die Dauerhaftigkeit besser geeignet. Vergleichsweise höhere Preise und die eingeschränkte Verfügbarkeit führen dazu, dass sie nur ausnahmsweise eingesetzt werden. Auch Eiche oder Kastanie (Abb. 5) weisen Vorteile gegenüber der Fichte oder Tanne auf. Insbesondere im Hangverbau kann mit einer verlängerten Lebensdauer gerechnet werden. Leider sind sie in den entsprechenden Dimensionen nicht immer verfügbar. Denkbar ist auch eine Kombination verschiedener Holzarten innerhalb des gleichen Bauwerkes, d.h. zum Beispiel im Bachverbau Tanne für den Sperrenkörper und Lärche oder Eiche für die erfahrungsgemäss rasch vermorschenden Sperrenflügel und seitlichen Einbindungen. Wo die Möglichkeiten bestehen, sollte insbesondere für Bauteile, die wechselnden Feuchtigkeitsbedingungen ausgesetzt sind, vermehrt dauerhafte Holzarten mit obligatorischem Farbkern verwendet werden.

Qualität: Besondere Bedeutung kommt der Holzqualität zu. Es soll nur gesundes, bei Nadelbäumen möglichst feinjähriges Holz verwendet werden (BUWAL 1992). Mancherorts wird jedoch auch Rotholz verbaut. Dabei ist Vorsicht angezeigt, da der Abbau von Rotholz im wechselfeuchten Milieu im Vergleich zu gesundem Holz schneller verläuft. Solange eine



Abb. 5. Bau eines Holzkastens aus Kastanienholz entlang der Bahnlinie SBB (Villangeaux, FR).

ausreichende Festigkeit gewährleistet ist und das Holz ausschliesslich im dauernd wassergesättigten Boden verwendet wird, kann im Notfall Rotholz toleriert werden. Von der Verwendung von Rotholz im Hangverbau muss jedoch abgeraten werden. Käferholz kann verbaut werden, sofern die Holzfeuchte noch nicht zu stark abgesunken ist und der Abbau durch Pilze noch nicht eingesetzt hat.

Lagerung/Zeitpunkt des Holzschlages: Wie bereits erwähnt, beginnt der Besiedelungsprozess von Bäumen durch saprobe Holzabbauer mit dem Fällen bzw. mit dem Absterben beispielsweise aufgrund eines Käferbefalls. Damit verbunden setzt auch der Abbauprozess durch Pilze ein. Am besten eignet sich somit frisch geschlagenes Holz mit hoher Holzfeuchte. Nach Arnold und Sell (1992) beginnt der Abfall der Holzfeuchte zwei bis drei Monate nach dem Holzschlag und ab diesem Zeitpunkt steigt auch der Qualitätsverlust. Da die Rinde als Schutz gegen Austrocknung und Rissbildung wirkt, sollte das Holz erst unmittelbar vor dem Verbau an Ort und Stelle entrindet werden. Es sind keine Angaben bekannt zur Frage, ob die Resistenz gegen Pilzbefall abhängig davon ist, ob das Holz im Saft oder in der Saftruhe geschlagen wird. Bei Lagerversuchen konnten keine eindeutigen Unterschiede im Qualitätsverlauf zwischen winter- und sommergeschlagenem Holz festgestellt werden (Kuhn 1992). Hingegen ist für manchen im Zusammenhang mit dem richtigen Zeitpunkt für den Holzschlag der Stand der Gestirne von Bedeutung. Nähere Angaben dazu macht Briemle (1997).

Verbau in Rinde bzw. ohne Rinde: Zu den Fragen, ob das Holz für den Wildbach-, Hang- und Runsenverbau entrindet werden soll, und welchen Einfluss die Entrindung auf die Lebensdauer der Schutzbauten ausübt, existieren verschiedene Ansichten; Hinweise aus der Literatur sind spärlich. Traditionellerweise wird jedoch beim Bachverbau das Holz entrindet. In der Regel werden alle Bauteile entrindet, teilweise aber auch nur jene Teile, die der Luft ausgesetzt sind. In Einzelfällen erfolgt die Entrindung sogar erst nach Abschluss der Bauarbeiten. Für eine Entrindung sprechen neben der Tradition insbesondere die Präzision der Verbindungen und der etwas geringere Befall durch Insekten. Gegen eine Entrindung sprechen der höhere Arbeitsaufwand bzw. die damit verbundene Kostenerhöhung sowie auch die Arbeitssicherheit beim Bau: die frisch entrindeten Stämme sind nur schwer begehbar. Von einer maschinellen Entrindung sollte aufgrund der dabei entstehenden Holzkörperverletzungen abgesehen werden (Abb. 6). Folgendes Verfahren wird empfohlen: Entrindung des Holzes von Hand. Falls keine vollständige Entrindung möglich ist: mindestens die luftseitigen Teile sowie alle Verbindungsstellen entrinden.



Abb. 6. Längsverbau: Verletzungen des Holzes durch maschinelle Entrindung und Probleme durch Ausschwemmungen von Feinmaterial.

2.5.4 Einsatzmöglichkeiten von Holzbauwerken

Ob eine Verbauung mit Holz sinnvoll ist, muss unter Berücksichtigung verschiedenster Gesichtspunkte und Rahmenbedingungen untersucht werden. Dabei werden die Gerinne- bzw. Hangtopographie, die Gefährdungsbilder und Schutzziele, die Standortsverhältnisse, die Erschliessung und weitere Aspekte in die Überlegungen einbezogen. In Tabelle 9 sind übersichtsweise Kriterien aufgelistet, die bei einem Entscheid für oder gegen eine Verbauung in Holz zu berücksichtigen sind.

Tab. 9. Einsatzmöglichkeiten von Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau: positive und negative Aspekte in Abhängigkeit der Verwendung (nach ZELLER und RÖTHLISBERGER 1987, verändert).

Verwendung	Verbau in Holz	
	positive Aspekte	negative Aspekte
Holzverbau allgemein	wenig abhängig von Erschliessung gute Einpassung in die Landschaft kostengünstige Erstellung unempfindlich gegenüber leichten Setzungen und Verschiebungen im Baugrund gute Akzeptanz in der Bevölkerung geeignet im Rahmen von Sofortmassnahmen	gegenüber Betonbauwerken reduzierte Lebensdauer. Diese ist abhängig von den Standortsbedingungen; günstige Standorte: Expositionen Nord bis Ost, möglichst dauernde Wassersättigung, gute Beschattung (vgl. Kap. 2.5.2) Werksabmessungen sind beschränkt erhöhter Unterhaltsbedarf
Bach- und Runsenverbau	geeignet für Konsolidierungssperren, Schwellen und Längsverbau geeignet für Sperren mit Spannweiten <25 m und Nutzhöhen <5 m	nicht geeignet für Geschiebesammler oder Dosiersperren und ähnliche Werke weniger geeignet bei Wildbächen und Runsen mit Murgängen (u.a. konsequenter Schutz der Abflusssektion)
Hangverbau	geeignet überall dort, wo flachfundierte Stützwerke eingesetzt werden können geeignet als verankerte Konstruktionen Holzausfachungen bei verankerten Pfahlwänden	gegenüber Bauwerken im Bachverbau reduzierte Lebensdauer (wechselfeucht) Schutz gegen Steinschlag erforderlich (gilt auch für Bauwerke aus Drahtsteinkörben oder Beton)

3 Holzbauwerke

3.1 Wildbach- und Runsenverbau

3.1.1 Einwandige Systeme

Einwandige Holzsperren (Abb. 7 und 8) werden aus Rundhölzern aufgebaut, die möglichst fugenlos aufeinandergelegt und in der Regel miteinander vernagelt werden. Da die Sperren von Flanke zu Flanke tragen, ist eine gute Einbindung der Rundhölzer in die seitlichen Böschungen besonders wichtig, wobei beidseitig mindestens 1 m verlangt werden. Zusätzlich sind auch die Abmessungen der Abflusssektion so zu wählen, dass bei Hochwasser die Böschungen unterhalb der Sperre nicht unterspült werden. Aus offensichtlichen Gründen sind Stösse (Abb. 30) bei dieser Sperrenkonstruktion nicht zulässig. Einwandige Konstruktionen werden bis zu Höhen H_S von 2 bis 3 m gebaut. Darüber kommen mehrheitlich zweiwandige Systeme zur Anwendung. Obwohl der Anzug der Sperre aus der Sicht der Bemessung nicht massgebend ist, soll er aus Gründen einer guten Benetzung nicht steiler als 10 : 1 ausgebildet werden. Die einwandigen Holzsperren haben gegenüber zweiwandigen Systemen neben dem geringeren Bau- und Materialaufwand den wesentlichen Vorteil, dass der Aushub auf ein Minimum beschränkt werden kann. Dieser Aspekt kann insbesondere in steilen Runsen, bei instabilen Flanken oder dort, wo von Hand gearbeitet werden muss, Bedeutung erlangen. Der einschneidende Nachteil gegenüber doppelwandigen Holzkastenkonstruktionen liegt in den eingeschränkten Werksabmessungen.

Einwandige Holzsperren sind in verschiedenen Ausbildungen möglich, welche sich insbesondere hinsichtlich der Ausbildung der Abflusssektion, der Verwendung von Pfosten und weiterer Details unterscheiden.

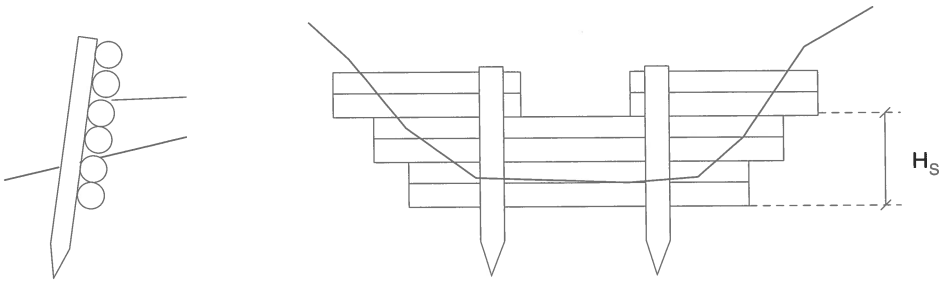


Abb. 7. Einwandige Bachsperre aus Rundholz.

Abflusssektion: In kleinen Gerinnen mit geringem Sohlengefälle und entsprechend kleiner Schleppkraft wird teilweise auf die Ausbildung einer Abflusssektion verzichtet. Eine solche ist jedoch unbedingt notwendig, wenn die Gefahr einer Erosion der seitlichen Einbindungen nicht ausgeschlossen werden kann. Die aufgrund der Abflusssektion generell eher tieferen Kolke können im Falle des von Flanke zu Flanke tragenden Systems eher verkraftet werden als bei der Gewichtskonstruktion des Holzkastens (sofern die Böschungen stabil bleiben). In den meisten Fällen wird die Abflusssektion aus einer oder zwei Rundholzlagen aufgebaut. Dabei dienen entweder Pfosten als Auflager oder aber die Hölzer werden auf das oberste durchgehende Holz genagelt. Im letzteren Fall ist besondere Aufmerksamkeit auf eine gute Kanalisierung des Abflusses in Richtung der Überfallsektion zu legen, da die



Abb. 8. Einwandige Holzsperren kurz nach der Fertigstellung (Buochs/NW).

Sicherheit gegen Abscheren der Flügel relativ gering ist. Bei entsprechender Anordnung der Pfosten kann die Abflusssektion auch als Trapezprofil ausgebildet werden. Teilweise wird die Abflusssektion auch aus Steinen aufgebaut, die auf der künstlichen Hinterfüllung der Sperre verlegt werden. Bei genügend grossen Rundholzdurchmessern und in Kleinstgerinnen (z.B. Sammler von Entwässerungen) kann unter Umständen die Abflusssektion in das oberste Längsholz eingesägt werden. Sie wird teilweise auch aus zwei Rundhölzern mit etwas grösserem Durchmesser gebildet, die beidseits des Gerinnes in Fliessrichtung verlegt werden und den Abfluss am gewünschten Ort über die Sperre leiten.

Pfosten: Einwandige Holzsperren werden mit oder ohne Pfosten gebaut, wobei die Pfosten hauptsächlich als Auflager für die Flügel dienen. Zu beachten ist jedoch die zum Teil wesentlich geringere Lebensdauer der Pfosten, da sich diese nicht in dauerndem Kontakt mit dem Wasser befinden. Um ihre Dauerhaftigkeit wenigstens geringfügig zu verbessern, wird ein Stirnflächenschutz zum Beispiel mit Blechen (Abb. 8) empfohlen. Das Einschlagen der Pfosten ist schwierig: ab einer bestimmten Dimension ist dies nur maschinell möglich und insbesondere bei geneigten Sperren kann die Einschlagrichtung nur schwer eingehalten werden; zudem ist ein Ersatz der schnell vermorschenden Pfosten sehr aufwendig. Zum Teil kommen Konstruktionen zur Ausführung, bei denen sowohl vor als auch hinter der Sperrenwand Pfosten eingerammt werden, die dann zum Beispiel mit Drahtseilen gegenseitig verbunden werden.

Verschiedenes: An der Sperrenrückwand kann zur Vermeidung von Ausschwemmungserscheinungen – insbesondere bei unregelmässigen Schaftformen der Rundhölzer und bei feinem Sohlenmaterial – ein Geotextil angebracht werden. Häufig werden einwandige Systeme auch als Schwellen zur Vermeidung von Tiefenerosion, zum Schutz eines Längsverbaus, als Gegenschwelle zur Begrenzung eines Kolkes oder zum Schutz von Sohlenabpflästerungen eingesetzt.

3.1.2 Doppelwandige Systeme

Die doppelwandige Holzkastensperre (Abb. 9) besteht grundsätzlich aus zwei parallel angeordneten Wänden mit Längshölzern, die durch Querhölzer miteinander verbunden sind. Bei Sperren in Gerinnen werden die Querhölzer übereinander angeordnet, bei Werken

im Hangverbau manchmal auch versetzt. Holzkastensperren wirken als Gewichtskonstruktion und der Kasten erhält die notwendige Steifigkeit durch die Verfüllung (vgl. Kap. 4.3.2).

In Abbildung 9 ist das Prinzip der doppelwandigen Holzkastensperren dargestellt. Je nach Region und Anforderungen an das Bauwerk kommen die verschiedensten Werktypen zur Anwendung. Sie unterscheiden sich in bezug auf die Ausfachungsart, die Sperrenflügel, das Verfüllungsmaterial, die Fundation, das verwendete Baumaterial und weitere Aspekte.

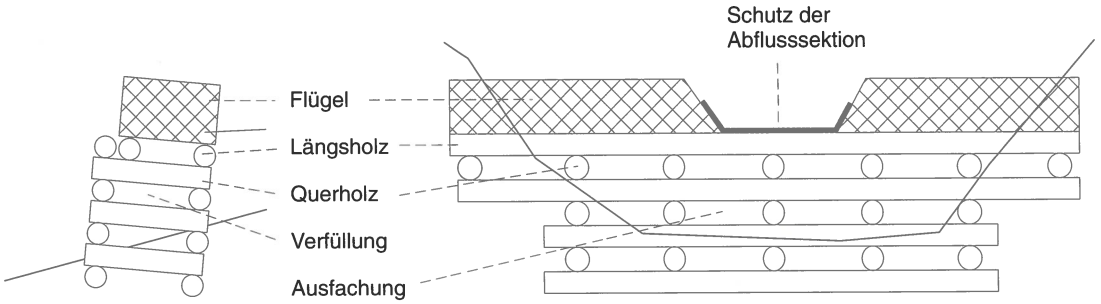


Abb. 9. Zweiwandige Holzkastensperre.

Ausfachung:

- Stein-Ausfachung (Abb. 10 und 12): Die Steine werden so zwischen die Längshölzer eingebracht, dass sie nicht nach vorne herausfallen können. Aus Gründen des Horizontaldruckes im Kasten (vgl. Kap. 4.3.2) sowie allfälligen Auswaschungen soll die Öffnung zwischen den zwei Längshölzern nicht mit mehreren plattigen Steinen, sondern nur mit einem Stein ausgefacht werden, der sich gut verkeilen lässt. Idealerweise wird hinter den Ausfachungssteinen eine durchgehende Wand aus Steinen trocken aufgemauert. Der Vorteil einer Stein-Ausfachung im Vergleich zur Holzvariante liegt in einer höheren Steifigkeit sowie einer vergleichsweise höheren Lebensdauer. Das Fehlen geeigneter Steine führt dazu, dass häufig andere Ausfachungsarten gewählt werden. Wird der Holzkasten nicht mit grobem Steinmaterial, sondern mit Aushubmaterial mit grossem Feinanteil ausgefüllt, muss bei Wildbach- und Runsensperren mit Auswaschungsproblemen gerechnet werden.
- Holzausfachung parallel zu Längsholz (Abb. 11 und 12): Bei Holzausfachungen werden zwei verschiedene Varianten gebaut. Bei der ersten werden Füllhölzer gesucht, die den gleichen Durchmesser wie der Abstand zwischen den Längshölzern aufweisen. Diese

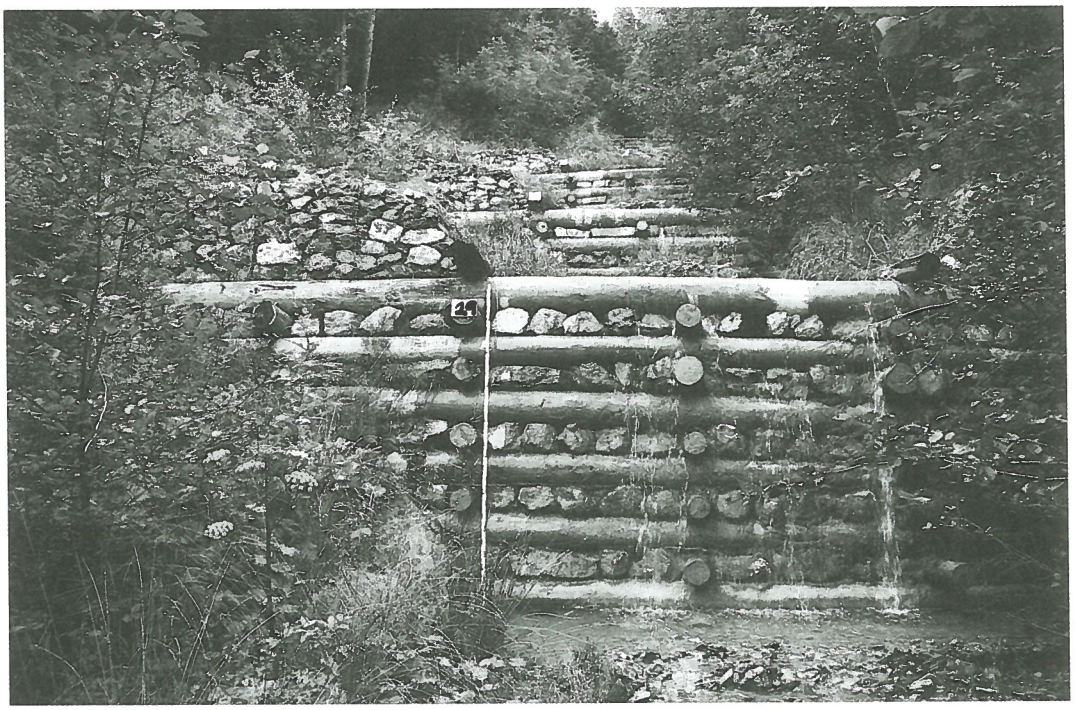


Abb. 10. Zweiwandige Holzkastensperren mit Steinausfachung und Flügeln aus Drahtsteinkörben (Gams/SG).



Abb. 11. Zweiwandige Holzkastensperren kurz nach Fertigstellung. Ausfachung mit Füllhölzern parallel zu den Längshölzern (Studen/SZ).

werden auf die Längshölzer genagelt. Im zweiten Fall werden Füllhölzer mit grösserem Durchmesser gewählt und damit der Zwischenraum von hinten geschlossen. Dort sind weniger Nagelstellen notwendig und es muss etwas weniger auf ein sauberes Einpassen der Füllhölzer zwischen die Längshölzer geachtet werden. Dagegen hat die zweite Variante den Nachteil, dass sich die Füllhölzer bei unvorsichtigem Einbau oder bei nachträglichen Setzungen im Kasteninnern verschieben können.

– Holzausfachung parallel zu Querholz (Abb. 12 und 13): Bei dieser Konstruktionsweise liegen die Ausfachungshölzer sowohl auf dem vorderen wie auf dem hinteren Längsholz auf. Somit besteht ein wesentlicher Anteil der Kastenverfüllung aus Holz. Daraus lassen sich leicht die Folgen für das Raumgewicht der Kastenkonstruktion ableiten (vgl. Kap. 2.3.2). Durch die parallel zu den Querhölzern verlegten Füllhölzer sind in der Ansicht des Kastens die Quer- und Füllhölzer kaum mehr voneinander zu unterscheiden. Es ist jedoch auch bei diesem Ausfachungstyp wesentlich, dass immer ein Gerüst aus Längs- und Querhölzern mit technisch einwandfreien Knoten gebaut wird! Die Lebensdauer muss etwas kürzer angenommen werden – insbesondere bei wechselfeuchten Standorten. Die Tatsache, dass hier wesentlich weniger Verfüllmaterial benötigt wird, kann in einzelnen Fällen (zum Beispiel bei schlechtem Baugrund) vorteilhaft sein.

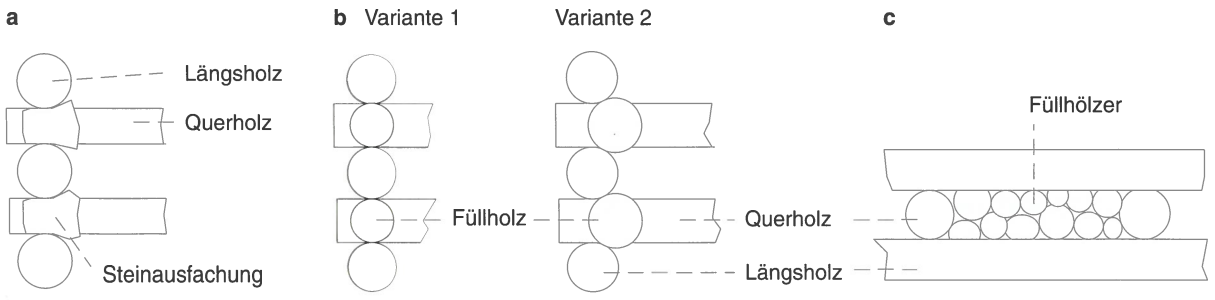


Abb. 12. Unterschiedliche Ausfachungsarten bei zweiwandigen Holzkastensperren (Ausfachungen schraffiert): a) Ausfachung mit Steinen, b) zwei Varianten der Ausfachung mit Füllhölzern parallel zu den Längshölzern, c) Ausfachung mit Füllholzern parallel zu den Querhölzern.

Sperrenflügel:

- Sperrenflügel aus Holz (Abb. 11 und 13): Die Bauweise der Sperrenflügel aus Holz entspricht zumeist jener des Sperrenkörpers, insbesondere auch was die Ausfachung betrifft. Der Vorteil von Holzflügeln besteht darin, dass kein zusätzliches Baumaterial transportiert werden muss und die Kosten somit niedrig gehalten werden können. Hingegen ist zu berücksichtigen, dass die Lebensdauer der Sperrenflügel aufgrund der nicht zu umgehenden Wechselfeuchtigkeit teilweise massiv reduziert ist. Die Holzflügel werden sowohl mit horizontal verlegten Längshölzern als auch mit Gefälle zur Abflusssektion hin gebaut. Im letzteren Fall darf dies jedoch nicht auf Kosten einer auf das Bemessungsereignis ausgelegten Abflusssektion geschehen, da ansonsten die Ufereinbindungen gefährdet sind. Wie bei den einwandigen Holzsperren wird bei kleineren Werken zum Teil die Abflusssektion aus zwei Rundhölzern mit grossem Durchmesser gebildet.



Abb. 13. Zweiwandige Holzkastensperren; Ausfachung mit Füllhölzern parallel zu den Querhölzern (Plaffeien/FR).

- Sperrenflügel aus Drahtsteinkörben (Abb. 9 und 10): Aufgrund der grösseren Lebensdauer und der guten Stabilität werden die Sperrenflügel oft aus Drahtsteinkörben gebaut. Wichtig ist eine sorgfältige Verfüllung der Körbe (mindestens an den Rändern von Hand geschichtet). Da die Drahtsteinkörbe sehr empfindlich auf Verletzungen sind, ist insbesondere in Gerinnen mit Geschiebetransport dem Schutz der Abflusssektion grosse Bedeutung beizumessen. Bei brüsken Belastungen durch Geschiebekomponenten sowie bei Deformationen durch Hangbewegungen sind doppelt geflochtene Körbe mit grosser Drahtstärke (≥3,0 mm) besonders geeignet. Sperrenflügel aus Drahtsteinkörben sind im Vergleich zu der Ausführung in Holz teurer, insbesondere wo das Steinmaterial für die Verfüllung der Körbe zugeführt werden muss. Ein weiterer Nachteil liegt in der schlechten Reparaturmöglichkeit bei Schäden durch Hochwasser, Geländebewegungen oder Windwurf sowie im höheren Gewicht. Die Drahtsteinkörbe müssen gut mit dem Sperrenkörper verbunden werden.

- Sperrenflügel aus Steinblöcken (Kap. 6.1, Abb. 34): Bis ungefähr in die 30er Jahre baute man oft Sperrenflügel aus kunstvoll zusammengefügten Steinblöcken. Zum Teil wurde damals die Holzkastensperre gegen oben auch mit einer über die gesamte Spannweite verlaufenden Schicht aus Steinblöcken abgeschlossen. Diese Technik wird heute nur noch selten angewendet. Falls Steinblöcke zum Einsatz kommen, werden diese mit dem Bagger verlegt, was entsprechend grosse Fugen zur Folge hat. Besonders dort, wo die Sperren nicht mit Steinen verfüllt werden, besteht ein wesentlicher Nachteil der Steinblöcke in ihrem hohen Gewicht. Die sowieso auf Vermorschung anfälligen Bereiche der Einbindung des Holzkastens werden durch derartige Sperrenflügel schwer belastet.

Verfüllung: In bezug auf die Steifigkeit der Kastenkonstruktion ist eine Verfüllung mit grobem Steinmaterial ideal. Oft fehlen jedoch Steine in der geeigneten Grösse und Anzahl an Ort und Stelle. Zudem sollten die Steine nicht aus dem Bachbett entnommen werden (ausser im Verlandungsbereich). Kann aufgrund mangelnder Erschliessung kein Steinmaterial oder wenigstens kiesiges Material zugeführt werden, bietet sich keine andere Möglichkeit als die Verfüllung mit dem anstehenden Aushubmaterial. Die Verfüllung soll im Kasten gut verdichtet werden, d.h. beispielsweise mit einem Grabenstampfer. Im Bachverbau ist die Stabilisierung von vernässtem, feinkörnigem Material mit Kalk nur in Ausnahmefällen möglich. Bei andauerndem Regenwetter mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Qualität des Verfüllmaterials (Verunmöglichung der Verdichtung, nachfolgende Setzungs- und Auswaschungserscheinungen) muss der Bau unterbrochen werden!

Fundation: Die Fundation erfolgt auf einer sauber ausgeglichenen Fläche, die im rechten Winkel zum Anzug des Kastens geneigt ist. Darauf wird in der Regel eine unterste Längsholzlage verlegt, was insbesondere in bezug auf die Stabilität gegen Gleiten vorteilhaft ist. Zum Teil werden die ersten Längshölzer auch auf Querhölzern oder ganzen, in Fliessrichtung verlaufenden Prügellagen gebaut (letzteres insbesondere häufig bei zusammenhängenden Sperrentreppen). In Wildbächen werden Fundationen auf Steinpackungen oder sogar auf Magerbeton nur in seltenen Fällen ausgeführt. Im Hang- und manchmal auch im Runsenverbau werden zur Erhaltung der Bodentragfähigkeit oft Plastikfolien oder Geotextilien und gelegentlich auch Magerbetonschichten eingebracht (vgl. Kap. 4.2.2). Die Fundation auf Magerbeton ist aber nur bei gut tragfähigem, wenig setzungsempfindlichem Baugrund zu empfehlen.

3.1.3 Varianten

Verankerung der Sperre in der Auflandung: Eine Verankerung der Holzkastensperren als zusätzliche Sicherheit gegen Kippen und Gleiten ist nur dann notwendig, falls aus irgendwelchen Gründen die Bemessungsregel bezüglich dem Verhältnis Breite zu Höhe nicht eingehalten werden kann (vgl. Kap. 4.3.2). Am ehesten wird dies allenfalls bei Sperren mit dem Ausfachungstyp «Holz parallel zu Querholz» notwendig. In einer früher oft gebauten Variante werden als Querhölzer ganze Rauhbäume eingelegt, die durch die grössere Reibungslänge und die Krone in der Auflandung eine zusätzliche Stabilität bewirken (Abb. 14). Eine weitere Möglichkeit besteht darin, dass auf einer oder mehreren Lagen die

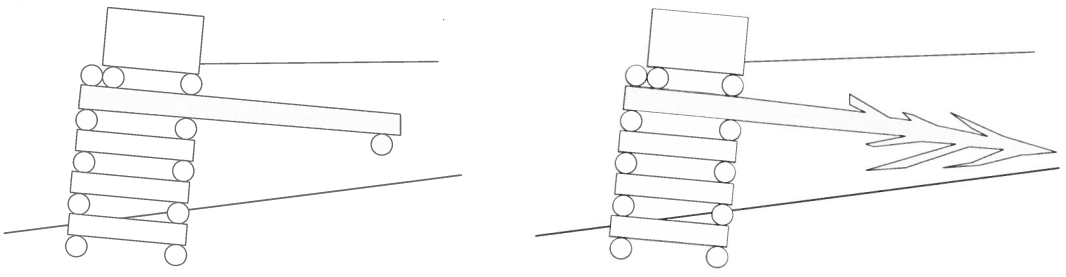


Abb. 14. Sperrenverankerung in der Auflandung mit verlängerten Querhölzern bzw. Rauhbäumen.

Querhölzer länger ausgehalten und durch eine dritte Reihe von Längshölzern verbunden werden. Die Nachteile derartiger Verankerungen liegen insbesondere im grösseren Platzbedarf beim Sperrenbau (Aushub) oder aber bei Setzungserscheinungen in der Auflandung.

Verstärkung des Einbindungsbereiches: Wie in Kapitel 2.3 dargelegt und durch Erfahrung bestätigt (Abb. 2), ist der Übergang Luft/Erde in bezug auf den Holzabbau durch Pilze am anfälligsten. In der Regel ist der Bereich der seitlichen Einbindung der Sperren am stärksten vermorscht, wodurch oft die Lebensdauer der gesamten Sperre limitiert wird. Um diesen Teil des Bauwerks zu verstärken, können verschiedene Massnahmen in Betracht gezogen werden (Abb. 15). Dabei sind mehrere Varianten denkbar. Die aufgedoppelten Längshölzer werden möglichst so befestigt, dass sie ausgewechselt werden können, d.h. allenfalls mit Bauklammern oder durchgehenden Schrauben. Eventuell sind bei den Stössen zusätzliche Querhölzer anzubringen. Diese Bauweise erfordert einen grösseren Arbeitsaufwand. Obwohl das System nicht erprobt ist, kann davon ausgegangen werden, dass durch die Möglichkeit der Auswechslung von vermorschten Längshölzern die Lebensdauer bei einem tragbaren Aufwand ansteigt.

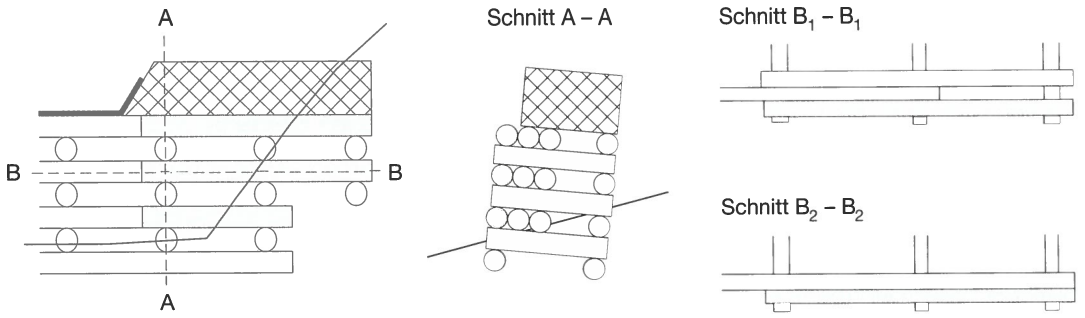


Abb. 15. Verstärkung der Sperrenkonstruktion im Bereich der seitlichen Einbindung. Verschiedene Varianten sind möglich (vgl. beispielsweise Schnitt B_1 und B_2).

Massnahmen gegen «Entleerung» des Holzkastens: Bei starker Unterkolkung einer Sperre kann es zu Entleerungen des Holzkastens mit oft verheerenden Folgen kommen. Um dies zu verhindern, wird häufig auf der untersten Längsholzlage ein durchgehender Prügelboden angeordnet, der jedoch nicht zu schwach bemessen sein darf (Gewicht der Verfüllung). Um die Entleerung bei Umfliessen der Sperre zu verhindern, werden manchmal auch die Seitenwände der Holzkastensperren gegen die Böschungen hin ausgefacht oder bei den Fundamentstufen in den Einhängen Prügellagen angeordnet.

Längsverbau in Holzkastenbauweise: Grundsätzlich sind beim Längsverbau in Holzkastenbauweise die gleichen Prinzipien zu beachten wie bei den doppelten Holzkastensperren. Neben einer ausreichenden Fundationstiefe kann der Längsverbau durch einen Vorgrund mit Blöcken gesichert werden. Diese Blöcke sind jedoch nicht mit Seilen oder ähnlichem am Holzkasten zu befestigen. Bis zu einer Sohlenneigung von 5–10% können die Längshölzer parallel zur Bachsohle verlegt werden. Auch hier sind die Stösse zu minimieren und konstruktiv sauber auszubilden. Bei überlappenden Stössen soll die Fliessrichtung beachtet werden. Die Querhölzer müssen beim Längsverbau bündig abgelängt werden, um im Falle von Geschiebetrieb möglichst wenig Angriffsstellen zu bieten. Zum Teil werden auch einwandige Holzkasten und viele weitere Konstruktionstypen als Erosionsschutz entlang des Gerinnes eingesetzt.

Treppenkonstruktionen: Bei steilen Gerinnen werden manchmal die Querwerke auf verschiedene Arten miteinander verbunden: a) über Längswerke aus Holz, b) über einen von Sperre zu Sperre verlaufenden Sohlenschutz aus Holz (dieser ist allerdings bei starkem Geschiebetrieb einer hohen Belastung ausgesetzt und verhindert zudem die gute Energieumwandlung im Kolk) oder c) über lange ausgehaltene Querhölzer der unteren Sperre, die

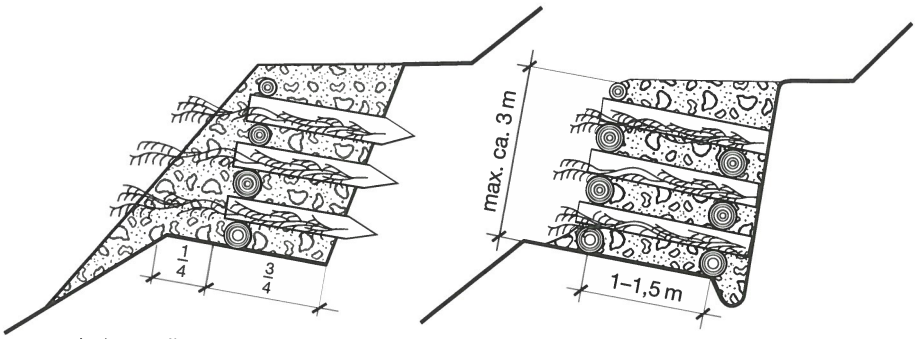
in die Kastenkonstruktion des nächstoberen Bauwerkes integriert werden. Ein Nachteil einer zu starren Verbindung der Werke besteht in der Gefahr, dass Setzungen von einer Sperre auf die andere übertragen werden.

3.2 Hangverbau

3.2.1 Einwandige Systeme

Im Hang- und Runsenverbau werden kleine einwandige Werke – meistens in Kombination mit ingenieurbiologischen Methoden – für verschiedene Stabilisierungs- und Sicherungsaufgaben verwendet. Sie werden als kleintechnische Massnahmen bezeichnet. Ihre Befestigung im anstehenden Boden erfolgt entweder traditionell durch luftseitig eingeschlagene Pfähle (Abb. 25) oder durch leichte Seilanker (vgl. auch Kap. 4.2.2). Die Seilankerbefestigung hat unter anderem den wesentlichen Vorteil, dass das Bodenmaterial weniger gestört wird und dass weniger Wasser im Untergrund versickert. Grössere verankerte Pfahlwände, wie die nach Ehrbar (1986), ermöglichen häufig elegante Lösungen. Recht anspruchsvoll in ihrer Projektierung und Ausführung, sind sie sehr einfach in bezug auf die konstruktiven Details ihrer Holzelemente.

Als weiterer Konstruktionstyp ist der einwandige Holzkasten zu erwähnen (Abb. 16). Er besteht aus luftseitigen Längshölzern, die mit Querhölzern nach hinten verankert werden, ohne dass diese ihrerseits durch eine zweite Längsholzlage miteinander verbunden sind. Besonderes Augenmerk ist beispielsweise auf die Verbindung zwischen Längs- und Querholz zu legen sowie auf eine gute Verankerung der Querhölzer im Baugrund durch enge Bauschlitze und indem das dicke Ende der Querhölzer bergseitig angebracht wird (Wenzel 1990). Diese Konstruktionsart, die mehrheitlich im Hangverbau verwendet wird, ist allenfalls auch in steilen Runsengerinnen denkbar, wo einwandige Holzsperren aufgrund der Abmessungen nicht mehr möglich sind und bei doppelwandigen Holzkastensperren Probleme bezüglich der Aushubkubatur bestehen. Im Zusammenhang mit der Ausfachung gilt das gleiche zu beachten wie bei den doppelwandigen Holzkastensperren.



a) einwandig b) doppelwandig

Abb. 16. Einwandiges und doppelwandiges Stützwerk im Hangverbau nach Kuonen (1983). Begrünte Werke sind mit einem möglichst grossen Anzug nach hinten zu versehen. Der minimale Wert ist 5 : 1. Wenn möglich sind solche Werke einzudecken.

3.2.2 Doppelwandige Systeme

Das Grundprinzip der Holzkastenkonstruktion im Hangverbau (Abb. 16) entspricht jenem des Gerinneverbaus (Abb. 9), mit dem Unterschied, dass die Sperrenflügel entfallen. In Runsen mit ausgeprägtem Gerinnecharakter, aber geringer Murgangtätigkeit werden Holzkastensperren mit Flügeln angeordnet. Meistens werden die Flügel im Bereich der Abflusssektion mit einem flacheren Anzug ausgebildet, so dass sie bei kleinen Murgangereignissen weniger gefährdet sind. Selbstverständlich sind dabei die Kriterien des Schluckvermögens einzuhalten und ein Überfliessen der Flügel im Einbindungsbereich ist zu verhindern. Während im Bachverbau die Querhölzer übereinander angeordnet sind, können sie im Hangverbau auch versetzt eingebaut werden.

Um die Lebensdauer zu erhöhen, die aufgrund der Wechselfeuchtigkeit in Hängen kürzer ist als in den Gerinnen, werden Holzkästen im Hang häufig eingedeckt oder bepflanzt (Abb. 16). Soll ein Werk eingedeckt werden, muss ein flacher Anzug vorgesehen werden. Wird ein Holzkasten nicht begrünt, müssen auch hier die Lücken zwischen Längs- und Querhölzern gegen Ausschwemmung von Feinmaterial durch Ausfachungen geschützt werden. Wenn immer möglich, werden die Holzkästen seitlich in gewachsenes Terrain eingebunden. Bezüglich der Verfüllung gelten die gleichen Prinzipien wie beim Gerinneverbau. Im Hangverbau besteht zudem die Möglichkeit, das Verfüllmaterial durch eine Stabilisierung mit Kalk zu verbessern (Ammann 1997).

Im Hangverbau sowie in Runsen, die sich nach den Kriterien des Hangverbaus stabilisieren lassen, ist die Entwässerung von Stützwerken von besonderer Bedeutung (vgl. Kap. 4.2.2). Bei der Drainage wird entlang der hinteren Kastenwand, parallel zum Längsholz ein Sickerrohr geführt (Abb. 25). Darin wird das Hangwasser, welches durch den hinter dem Kasten eingebrachten Filterkies sickert, gefasst und in unter dem Kasten durchgeführten Rohren abgeleitet. Manchmal wird zwischen dem Filterkieskörper und der beim Kastenaushub entstandenen Böschungsfläche noch ein Geotextilgewebe eingelegt. Dabei ist unbedingt darauf zu achten, dass das Geotextil wasserdurchlässig bleibt. Geotextilien (Fliesmatten), wie sie zum Schutz der Fundamentsohle gegen eindringendes Wasser verlegt werden, eignen sich nicht, da sie undurchlässig sind, beziehungsweise im Laufe der Zeit undurchlässig werden. Durch zusätzliche Massnahmen, wie zum Beispiel Holzkännel, wird schliesslich das gefasste Wasser so über den Hang abgeleitet, dass keine Erosionsschäden entstehen können.

3.2.3 Hangroste

Hangroste (Abb. 17 und 18) sind flächig wirkende Systeme und dienen insbesondere als Stützbauten für Erdmaterial, das zum Schliessen von Böschungsanbrüchen verwendet wird. Dabei ist eine gute, talseitige Abstützung sowie eine möglichst rasche Begrünung durch Saaten und Aufforstungen von grosser Bedeutung (Kuonen 1983). Bei der Konstruktionsweise bestehen die verschiedensten Varianten, die sich unterscheiden bezüglich der Anzahl der Lagen, der Verankerung und des verwendeten Materials. Um die Stabilität des Bauwerkes zu gewährleisten und für eine erfolgreiche Begrünung darf die Neigung nicht zu



Abb. 17. Rutschsanierung: Stützmauer aus Steinblöcken, Holzkasten und Hangrost (Elm/GL).

steil ausgebildet und eine Gitterlänge von ungefähr 2 m nicht überschritten werden. Zu erwähnen sind im weiteren auch Probleme, die bei Hangrosten wie bei vielen flächenhaft wirkenden Systemen entstehen, indem sie oft schlecht auf der Böschungsfläche anliegen und dabei mindestens stellenweise in der Luft hängen.

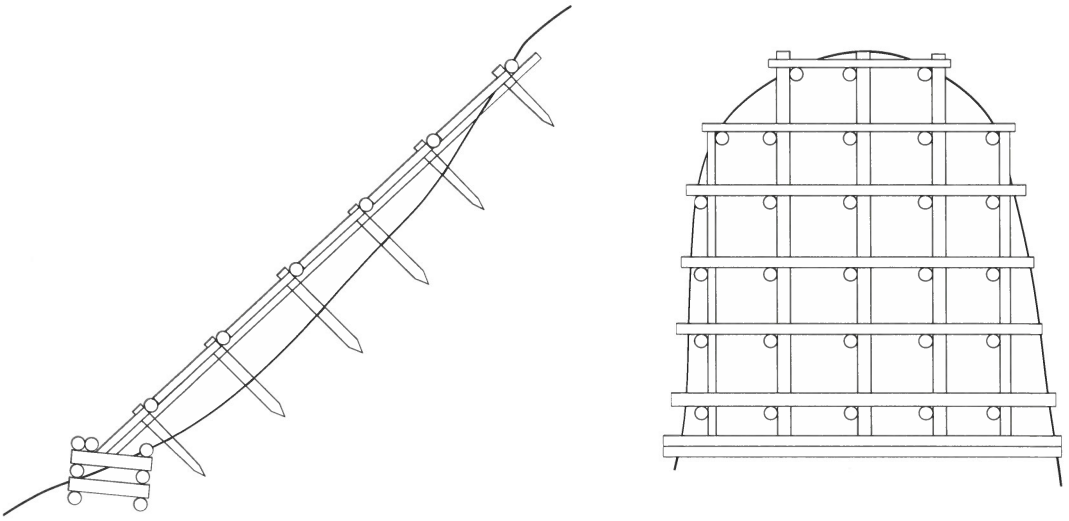


Abb. 18. Schematische Darstellung eines Hangrostes; Längenprofil und Aufsicht.

4 Projektierung

4.1 Allgemeines

Fachliche Grundlagen für die Projektierungsarbeiten und das allgemeine Vorgehen bei der Planung finden sich in Böll (1997a), Rickli *et al.* (1997) sowie in Ammann (1997) speziell für Holzkasten und Hangroste. Nachfolgend sind lediglich ein paar grundsätzliche Fakten dargestellt.

Es ist eine bekannte Tatsache, dass detaillierte theoretische Fachkenntnisse zwar notwendig, aber nicht hinreichend sind für das gute Gelingen einer Arbeit. Etliche theoretische Grundlagen können bekanntlich Prozesse, die sich in steilen Gerinnen und Hängen abspielen, nur annähernd beschreiben. Lehrbuchmässige Lösungen lassen sich aus verschiedenen Gründen nicht immer realisieren. Bei den Projektierungsarbeiten kommt man daher manchmal nicht um Kompromisse herum. Man muss sich aber bei jedem fachlichen Kompromiss, den man eingeht, im Klaren sein, dass man einen Fehler gemacht hat, der unter Umständen gravierende Schäden zur Folge haben kann. Es gilt deshalb, die Auswirkungen dieses Fehlers möglichst klein zu halten. Für die Praxis bedeutet das in der Regel, zusätzliche Massnahmen vorzusehen und zu projektieren.

Beispiele:

- Ein typisches Problem stellt sich in manchem Steilgerinne im Zusammenhang mit dem Sperrenverbau. Massgebend für die Sperrenanordnung ist bekanntlich das Grenzgefälle des Geschiebes bei Hochwasserabfluss. Die korrekte Lösung ist der auf dieses Grenzgefälle ausgelegte Sperrenvollverbau. Dies ist jedoch beispielsweise aufgrund der Gerinnegeometrie nicht immer möglich. Falls nun die Sperren nicht nach den Regeln für den Vollverbau angeordnet werden können, bestehen erhebliche Gefahren für die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit des Systems. Zur erforderlichen Erhöhung der Sicherheitsreserve des Systems sind daher spezielle Massnahmen wie z.B. Vorsperren oder durch kleine Querwerke gesicherte Blocksätze zu projektieren und die einzelnen Sperrenstandorte sind ganz besonders sorgfältig festzulegen.
- Holzkastentragwerke sind grundsätzlich mit groben, möglichst quaderförmigen Steinen zu verfüllen. Dabei dürfen aber keine Blöcke und groben Steine aus dem Gerinne entnommen werden – es sei denn, man beschränke sich auf den Verlandungsbereich hinter den Sperren. Auch an Hängen dürfen Blöcke im allgemeinen nicht beliebig gesprengt oder ausgegraben werden, da sonst die Gefahr eines unkontrollierten Nachrutsches besteht. Falls auf Zuführen von entsprechendem Material verzichtet werden soll, bleibt mancherorts nur die Verfüllung mit dem relativ feinen, in der Umgebung vorhandenen Lockermaterial. Dadurch ergeben sich manchmal Tragwerke geringer Steifigkeit und reduzierter Lebensdauer.
- Stösse (Verbindungen zweier Hölzer in Längsrichtung) sollten bei Holzkästen möglichst vermieden werden. Dies ist jedoch bei doppelwandigen Sperren nicht immer und bei Holzkästen am Hang meistens gar nicht möglich. Der konstruktiv und handwerklich sauberen Ausführung von Stössen ist daher bei der Detailprojektierung und bei der Bauausführung ganz besondere Beachtung zu schenken. Falls auch nur die geringste Möglichkeit besteht, dass bei der Ausführung irgendwo Stösse auftreten können, ist in

den Planunterlagen ein fachlich korrekter Stoss darzustellen (Kap. 5, Abb. 30). Auf keinen Fall darf die Lösung dieses wichtigen Problems an unausgebildetes Personal delegiert werden.

Auf allen Stufen der Projektierung – aber auch nachher bei der Bauausführung und später bei der Überwachung und beim Unterhalt – sind die Interaktionen zwischen den Verbaumassnahmen und den im Gelände sich abspielenden natürlichen Prozessen beziehungsweise die in bezug auf die Geländestabilisierung positiven und negativen Auswirkungen der Verbaumassnahmen zu untersuchen und zu berücksichtigen (Böll 1997a).

Im Wildbach- und Hangverbau zeichnen sich die Prozesse und ihre Interaktionen durch ihre Langfristigkeit aus. Sie sind daher nicht immer auf Anhieb in ihrem ganzen Umfang zu erkennen. Aus diesem Grund können die definitiven Überwachungs- und Unterhaltspläne für die Verbauung unter Umständen erst nach Abschluss der Bauarbeiten verfasst werden.

4.2 Anordnung der Holzbauwerke

4.2.1 Anordnung von Sperren in Gerinnen

Wir gehen grundsätzlich vom Konzept des Sperrenvollverbaus für die betrachtete Gerinnestrecke aus. So früh wie möglich sollte deshalb abgeklärt werden, ob sich ein solcher aufgrund der Gerinnegeometrie überhaupt realisieren lässt. Dazu sind Überlegungen zu den Sperrenhöhen ($H_S + H_A$) und den Sperrenabständen L anzustellen (Abb. 19) und es ist abzuklären, wie sich die Sperren in die Gerinnequerprofile einpassen lassen (Abb. 20).

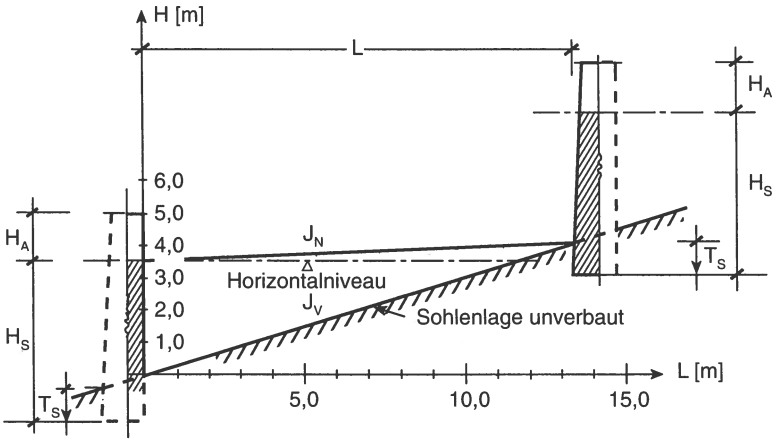


Abb. 19. Sperrenanordnung im Längenprofil.

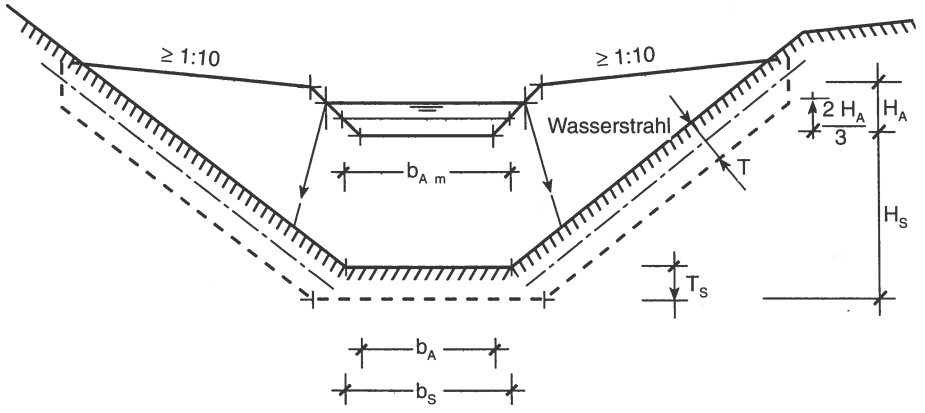


Abb. 20. Gerinnequerprofil und Sperrenhöhen.

Ein in bezug auf die Steilheit und/oder auf die Form des Querprofiles massgebender Abschnitt des Gerinnelängenprofils wird unverzerrt, zum Beispiel im Massstab 1 : 100 aufgezeichnet. Für eine erste Beurteilung genügt oft ein aufgrund von Karten- oder Planunterlagen erstelltes Längenprofil. Ein Koordinatensystem Länge L/Höhe H wird so gelegt, dass der Ursprung auf dem Längenprofil liegt. Die Rückwand der ersten (unteren) Sperre wird vom Ursprung aus auf der H-Achse nach oben eingezeichnet. Im allgemeinen kann die Einbindetiefe T_S an der Sohle (vom Ursprung aus nach unten) dort vorerst noch nicht genau angegeben werden, weil die Sperrenstärke noch nicht bekannt ist. Geht man zum Beispiel von der häufig angeordneten Sohleneinbindetiefe T_S = 1,0 m an der Luftseite der Sperre aus, muss die Einbindetiefe an der Rückwand entsprechend der Sperrenstärke und Sohlenneigung etwas grösser sein. Vom Ursprung aus wird deshalb eine «vernünftige» Sperrenrückwandhöhe abgetragen. Von dieser Höhe aus wird dann das Horizontalniveau und, falls man nicht auf dieses verbauen will, das Grenzgefälle J_N eingezeichnet. Im Schnittpunkt der Horizontalniveaulinie, oder eben der Grenzgefällslinie mit dem Gerinnelängenprofil, liegt dann die Luftseite der zweiten (oberen) Sperre. Dort kann nun die Sohleneinbindetiefe T_S (meistens T_S = 1,0 m) und die Höhe H_S des Sperrenkörpers abgetragen werden. Die luftseitige Höhe $\Delta h = H_S - T_S$, auch Sperrennutzhöhe genannt, ist dabei etwas grösser als der entsprechende Wert an der Rückwand der unteren Sperre. Wie nachfolgend erläutert, entspricht bei Holzkastensperren die Sperrenstärke (Breite B der Sperre am Fundament) etwa der halben Sperrenhöhe $H_S + H_A$. Bei solchen Werken lassen sich somit die definitiven Masse ziemlich genau angeben.

Im Zusammenhang mit dem Begriff der Sperrennutzhöhe Δh ist anzumerken, dass diese unter anderem auch Eingang in die Kolkberechnung findet und dort, unter Annahme von Normalabfluss, der Energielinienhöhendifferenz zwischen Oberwasser und Unterwasser entspricht. Die Beziehung $\Delta h = H_S - T_S$ darf deshalb nur in vollverbauten Gerinnen angeschrieben werden. Falls nämlich nicht auf das Grenzgefälle J_N des Geschiebes (wenige Prozent) beziehungsweise auf das Horizontalniveau verbaut wird, ist bei Hochwasserabfluss mit einer luftseitigen Sohlenabsenkung zu rechnen. Die effektive Sperrennutzhöhe wird dann entsprechend grösser; gegebenenfalls ist $\Delta h = H_S$ zu setzen.

Aus der Darstellung der Sperrenanordnung im Längenprofil kann der Sperrenabstand L herausgemessen werden. Dieser sollte nicht kleiner als die doppelte Kolklänge sein, in der Praxis etwa 8 bis 10 m. Bei steilen (Runsen-)Gerinnen müssen manchmal auch kleinere Sperrenabstände gewählt werden. Da dort kleine Sperrenabstände häufig trotzdem noch mit grossen Sperrenhöhen korreliert sind, ergeben sich ausser der Kolkproblematik und ungünstigen Abflussbedingungen noch weitere, für die Verbaupraxis relevante Nachteile:

- Die Auflast der oberen Sperre kann sich ungünstig auf die Stabilität der unteren Sperre auswirken. Dieser Umstand ist insbesondere auch während der Bauphase zu berücksichtigen.
- Durch das starke Anheben der Gerinnesohle ergibt sich bei den hinterfüllten Sperren eine erhebliche Verbreiterung des (verbauten) Bachbettes. Falls im verbauten Zustand noch Geschiebetransport herrscht, kommt es häufig zu starken Geschiebeablagerungen im Bereich der Gerinnelängsachse. Dadurch kann die Abflusskapazität der Sperrenabflusssektion stark eingeschränkt werden, was bei Hochwasserabfluss zu Überflutungsgefahr an den Sperrenflügeln führen kann. Eine starke Gerinneverbreiterung kann ferner auch zum Mäandrieren und damit zum Unterspülen der seitlichen Böschungen führen.

Falls bis zu diesem Zeitpunkt der Arbeiten noch keine Daten von Gerinnequerprofilen vorliegen, sind nun solche zu beschaffen. Im Zusammenhang mit den Abklärungen über die Sperrenhöhen interessieren vor allem Querprofile, welche die Sperrenhöhe einschränken, wie beispielsweise in Abbildung 20 der in Fliessrichtung linke Böschungsverlauf. Für die Wahl des Sperrentyps und des statischen Systems spielen somit Gerinnebreite und Böschungsgeometrie eine wichtige Rolle.

Die Bemessung der Abflusssektion in Abhängigkeit der Hochwasserabflussmenge Q erfolgt nach der Formel von Poleni und die Angaben gelten somit für reinen Wasserabfluss (Böll 1997a). Aus Abbildung 21 ergeben sich mit dieser Formel berechnete Angaben über die Höhe H_A der Abflusssektion aus den Eingangsgrössen Q (Abfluss) und b_A (Breite der Abflusssektion an der Überfallkante) für einen Anzug der Abflusssektion von 1 : 1 und einen Beiwert μ zur Poleni-Formel $\mu = 0{,}55$. Normalerweise setzt man für $b_A \cong (0{,}8 \text{ bis } 0{,}9) \cdot b_S$, wobei b_S die Breite an der Sohle des unverbauten Gerinnes ist. Dabei werden jedoch in der Regel Massnahmen zum Schutz der unterwasserseitigen Uferböschungen erforderlich. Grundsätzlich sind die Abflusssektionen möglichst grosszügig zu gestalten, insbesondere wenn auch im verbauten Gerinne mit Geschiebetransport zu rechnen ist. Häufig limitiert allerdings das Gerinnequerprofil die Masse der Abflusssektion.

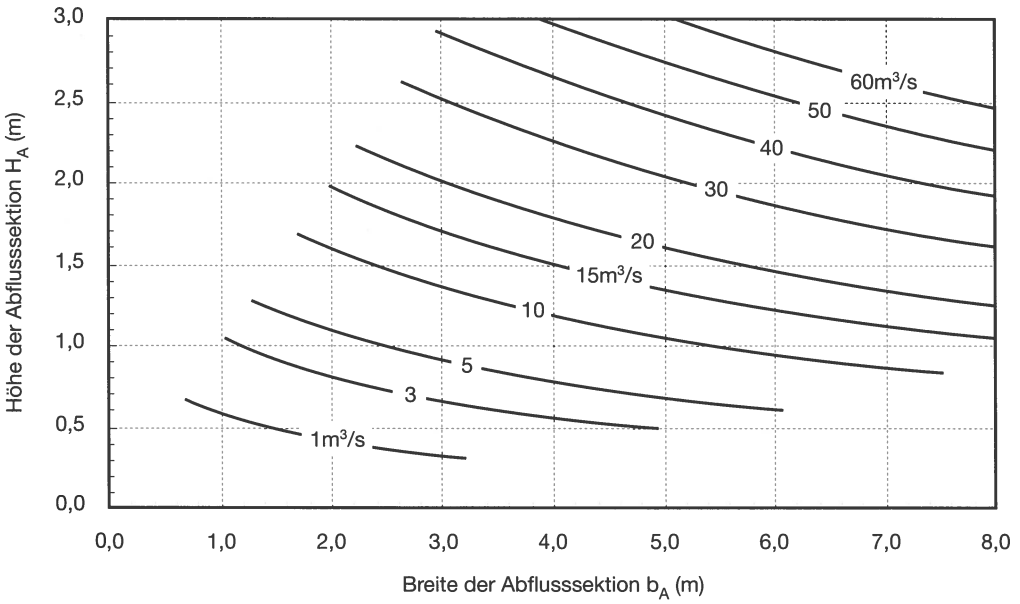


Abb. 21. Schluckvermögen Q von Abflusssektionen in Abhängigkeit der Breite b_A und Höhe H_A der Abflusssektion (Anzug = 1 : 1, Beiwert $\mu = 0{,}55$).

Aufgrund der beschriebenen Überlegungen und Abklärungen lässt sich nun angeben, ob beziehungsweise auf welchen Gerinnestrecken ein Sperrenvollverbau möglich ist und wie die entsprechenden Sperren etwa aussehen könnten. Falls sich kein Vollverbau realisieren lässt, werden die Projektierungsarbeiten relativ schwierig. Die Problematik und Lösungsmöglichkeiten sind beschrieben in Böll (1997a).

4.2.2 Anordnung von Stützwerken an Hängen

Die Rutschungsmechanismen sind massgebend für die Wahl der Stabilisierungsmassnahmen. So hat insbesondere die Fundationstiefe von Stützwerken der Lage der Gleitfläche zu entsprechen. Oberflächennahe Rutschungen lassen sich häufig mit flachfundierten Stützwerken stabilisieren, die meistens als Gewichtsmauern aus Drahtsteinkörben, Holz oder Beton konzipiert werden. Einfachere Fälle werden mit ingenieurbiologischen Methoden stabilisiert. Bei schwierigeren Problemen ordnet man kombinierte technisch-biologische Systeme an. Die Fundationstiefe der Stützwerke ist in der Regel durch die Frosteindringungstiefe bestimmt.

Rutschungen entlang tiefverlaufender Gleitflächen lassen sich mit flachfundierten Stützwerken (Abb. 22) nicht stabilisieren. Solche Werke würden zusammen mit der Rutschmasse bewegt – ja würden durch ihr Gewicht noch zur Instabilität beitragen. Um eine tiefgründige Rutschung zu stabilisieren, müssen die Kräfte hinter der Gleitfläche in den standfesten Untergrund eingeleitet werden. Dies kann durch Anker und/oder Pfähle geschehen, deren Anwendung übrigens nicht auf Probleme mit tiefliegenden Gleitflächen beschränkt ist. Weil die verankerten Stützkonstruktionen (Abb. 23) wie beispielsweise die verankerte Pfahlwand

wesentlich leichter sind als Gewichtsmauern, sind häufig elegante Lösungen möglich (Ehrbar 1986). In schlecht zugänglichem Gelände stellen sich bei grösseren Systemen allerdings erhebliche Probleme, weil für die Bohrarbeiten schwere Geräte erforderlich sind.

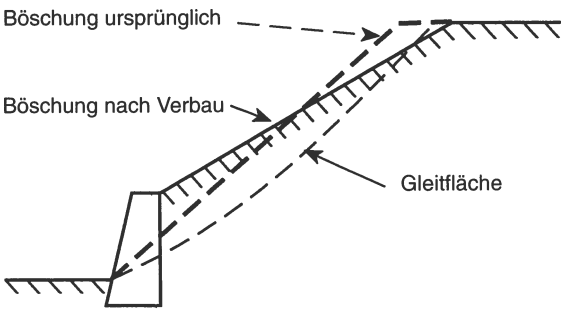


Abb. 22. Flachfundiertes Stützwerk bei oberflächennaher Gleitfläche.

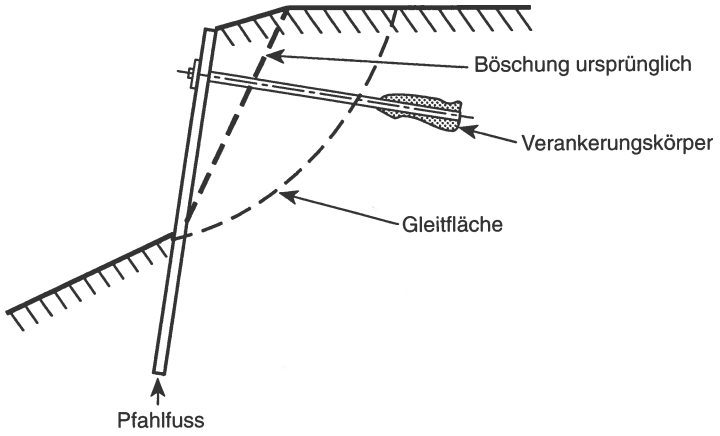


Abb. 23. Verankerte Konstruktion schematisch.

Zur Verbesserung der Tragwirkung, z.B. von Holzkonstruktionen bei oberflächennahen Rutschungen, stehen heute verschiedene leichte Seilankersysteme zur Verfügung. Namentlich durch die Seilankertechnik nach dem System «Duckbill» oder «Manta Ray» ergeben sich vielfältige Möglichkeiten der Verankerung von ein- und zweiwandigen Stützbauwerken oder auch von flächig wirkenden Systemen wie Hangroste oder Abdecknetze (Wenzel 1995, Erni und Jecklin 1998). Die Bedeutung dieser Hilfsmittel, u.a. auch bei der Erneuerung von Holzkonstruktionen, dürfte in Zukunft stark zunehmen.

Neben der Lage der Gleitfläche sind bei der Planung von Stabilisierungsmassnahmen noch weitere Punkte zu beachten, die sich aus bodenmechanischen Zusammenhängen ergeben:

- Meistens spielt das Wasser im Boden eine stark rutschungsfördernde Rolle. Man versucht deshalb, das Wasser am Einsickern in den Boden zu hindern, indem man es fasst und ableitet. Besonders wichtig ist die Entwässerung der Stützwerke und die geordnete Ableitung dieses Wassers.
- Bewegungen in Kriechhängen lassen sich in der Regel nicht stoppen. Bauwerke in Kriechhängen werden so bemessen, dass sie den hohen Kriechdrücken widerstehen (was aber nicht immer gelingt), oder so angeordnet, dass sie Verschiebungen mitmachen können.
- Eine echte Stabilisierung tiefverlaufender Rutschungen ist technisch sehr aufwendig und in grossen Rutschgebieten kaum durchführbar.
- Eine notwendige Voraussetzung für alle Stabilisierungsarbeiten ist die Sicherung des Hangfusses vor Bodenabtrag.

Aus bodenmechanischer Sicht bestehen verschiedene Ähnlichkeiten zwischen Hängen und Runsen. Durch den mehr oder weniger stark ausgeprägten Gerinnecharakter von Runsen ergeben sich jedoch zum Teil aus hydraulischer Sicht sehr unterschiedliche Bedingungen. Weil die spezifischen Bedingungen von Fall zu Fall ganz verschieden sind,

gibt es keine allgemeingültigen Rezepte für die Projektierung von Massnahmen. Für jedes Projekt sind die Prozesse und Mechanismen separat zu beurteilen. Aufgrund allgemein gültiger Zusammenhänge umfasst eine Stabilisierung aber immer folgende grundsätzliche Massnahmen (Böll 1997a):

- Hangfussicherung
- Zulässige Hangneigung bestimmen und sicherstellen
- Oberflächenschutz
- Zusätzliche Massnahmen

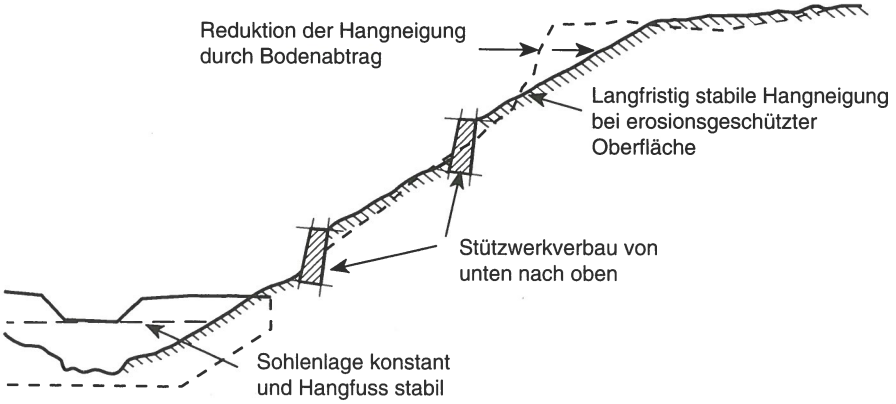


Abb. 24. Hangverbau mit Stützwerken nach erfolgter Stabilisierung der Gerinnesohle.

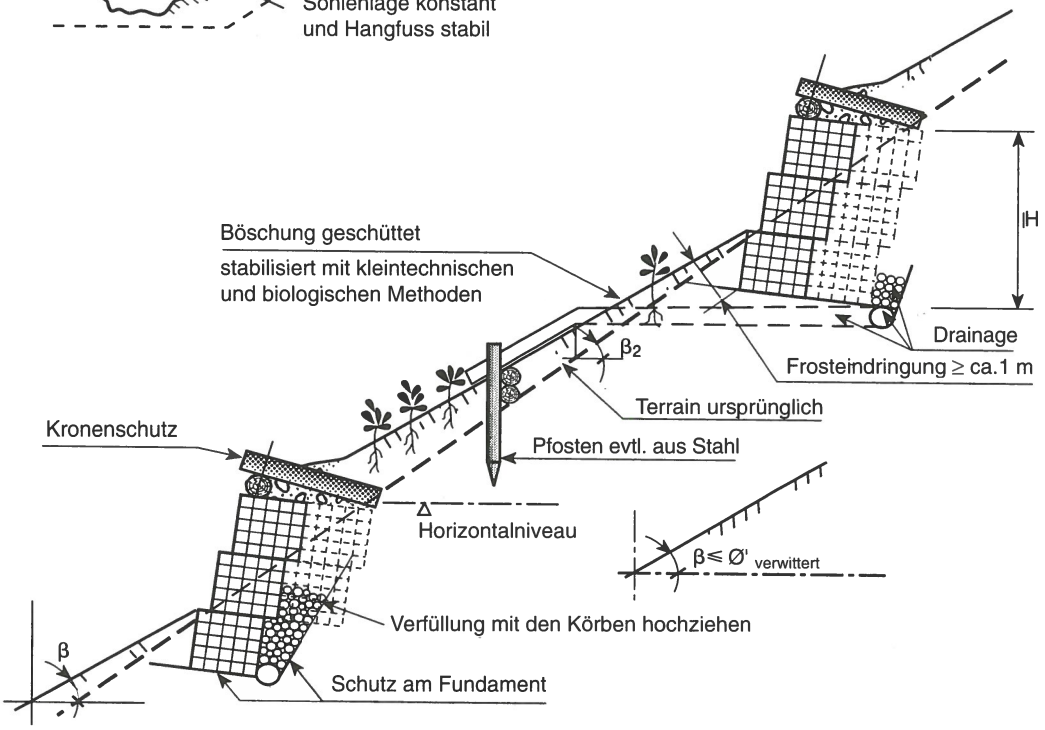


Abb. 25. Stützwerke am Hang bzw. in der Runse.

In den Abbildungen 24 und 25 sind die Verhältnisse, wie sie sich nach Durchführung dieser Massnahmen ergeben, schematisch dargestellt. Dabei wird der ursprüngliche Neigungswinkel β_2 durch den Stützwerkverbau auf den Winkel β zwischen den Stützwerken reduziert. Der Winkel β muss kleiner oder maximal gleich dem Scherwinkel Φ' des verwitterten bzw. aufgelockerten oder gestörten Bodenmaterials sein. Zur Erhöhung der Sicherheit und zum Schutz vor Erosion sind alle Oberflächen mit kleintechnischen und ingenieurbiologischen Massnahmen zu stabilisieren. Zu den Problemen, die sich in der Praxis ergeben können, zählen unter anderem folgende:

- Zur Beurteilung der Hangstabilität und allgemein der bodenmechanischen Bedingungen stehen meistens nur einfachste Hilfsmittel und Verfahren zur Verfügung. Häufig gelingt es aber trotzdem, die Verhältnisse recht gut zu erfassen und Lösungen vorzuschlagen (Böll 1997a).

- An Hängen und in weiten Runsen mit wenig ausgeprägtem Gerinnecharakter lassen sich manchmal Stützwerke der gewünschten Höhe nicht realisieren, weil die seitliche Anpassung (Einbindung) ans Gelände nicht oder nur schwer zu bewerkstelligen ist. Bezüglich der Neigungen lässt sich mit niedrigen Werken in geringen Abständen derselbe Effekt erzielen. Im steilen Gelände stösst man aber mit flachfundierten, als Gewichtsmauern tragenden Werken schnell an Grenzen. Die Aushubkubatur soll daher in einem vernünftigen Verhältnis zur effektiv wirksamen (über die Geländeoberfläche herausragenden) Kubatur stehen und die gegenseitige Beeinflussung der Werke durch ihr Gewicht möglichst gering sein. Kompromisse bezüglich der Werkshöhen wirken sich direkt auf die Böschungswinkel zwischen den Werken aus. Mit standortgemäss ausgeführten kleintechnischen und ingenieurbiologischen Massnahmen lassen sich die Probleme mehr oder weniger entschärfen, jedoch selten beseitigen. Mit verankerten Leichtbaukonstruktionen in Kombination mit ingenieurbiologischen Methoden lassen sie sich dagegen häufig lösen.
- Oft ergeben sich auch Schwierigkeiten beim Erstellen der endgültigen Böschungslinie zwischen den einzelnen Stützwerken. Die Problematik sowie verschiedene Lösungsmöglichkeiten sind in Böll (1997a) beschrieben. Holzkonstruktionen, insbesondere mit feinem Bodenmaterial verfüllte Systeme von geringer Steifigkeit, sollten unmittelbar nach dem Bau hinterfüllt und fertig ausgeböscht werden. Die Hinterfüllung inklusive der Stützwerkentwässerung ist bei dieser Bauweise gewissermassen ein Teil des Tragsystems. Unter Umständen scheiden deshalb Holzkonstruktionen aus, beziehungsweise kommen sie nur als temporäre Massnahmen in Frage, beispielsweise zum Schutz von Stützwerksfundamenten.
- Durch den Aushub für die Werke wird das anstehende Bodenmaterial meistens stark gestört. Die Böschungskante vor dem Fundament wird dadurch stark verwitterungsanfällig. Alle Stützkonstruktionen sind deshalb in genügendem Abstand von dieser Kante anzuordnen. Gemäss Abbildung 25 ergibt sich dieser Abstand aus der Frosteindringungstiefe. Ganz allgemein ist der Erhaltung der Bodentragfähigkeit am Fundament grösste Beachtung zu schenken. Insbesondere soll vermieden werden, dass Wasser durch die ziemlich durchlässigen Holzkonstruktionen sickert und in den Boden eindringt. Der notwendige Schutz des Fundamentbereiches erfolgt durch eine saubere Stützwerkentwässerung und allenfalls durch eine starke Plastikfolie oder ein Geotextil zwischen Boden und Stützwerk.
- Im Hang- und Runsenverbau muss leider ab und zu festgestellt werden, dass Holzkonstruktionen aufgrund ungenügender Planung gebaut werden. Der natürliche, heute erfreulicherweise wieder sehr populäre Werkstoff Holz darf nicht zu unsorgfältigen Arbeiten verführen. Holzkonstruktionen werden nur dann auch in Zukunft Verwendung in unseren Verbauungen finden, wenn heute die grundlegenden Punkte der Projektierung beachtet werden.

4.3 Baustatische Bemessung von Holzkonstruktionen

In der Verbaupraxis werden Holzsperren kaum bemessen, denn es hat sich gezeigt, dass für das Verhalten und insbesondere für die Lebensdauer in der Regel konstruktive und ausführungstechnische Belange massgebend werden. Auf der anderen Seite ist aber immer wieder festzustellen, dass ein Nachteil sogenannt naturnaher Verbaumethoden und Verbausysteme darin besteht, dass sie sich nicht immer bemessen lassen. Manche potentielle Kunden werden dadurch verunsichert und ziehen schliesslich klassisch-ingenieurmässige Lösungen vor. Im folgenden wird gezeigt, dass unsere Holzkonstruktionen in der Regel die Kriterien der Tragsicherheit erfüllen, dass sich aus der Bemessung aber auch interessante Folgerungen für den Entwurf und die Ausführung ergeben. Die nachfolgenden Aussagen beruhen auf Berechnungen, die an der WSL durchgeführt wurden. Zum Teil sind diese in Rickli *et al.* (1997) enthalten.

Von gewissen Ausnahmen abgesehen, unterscheiden sich Stützwerke im Hangverbau nicht wesentlich von Konstruktionen im Gerinneverbau. Bei letzteren ist der Ausbildung der Abflusssektion besondere Beachtung zu schenken. Weitere Unterschiede gibt es bei einwandigen Systemen. Im Bachverbau wird bei den einwandigen Sperren die seitliche Einbindung der einzelnen Rundhölzer in den Uferböschungen, beziehungsweise den Talflanken in Rechnung gesetzt (Abb. 26). Man spricht von einer horizontalen Tragwirkung, bei der sich die Rundhölzer unter Belastung senkrecht zur Sperrenwand nach vorne biegen und die Lasten entsprechend auf die Flanken abtragen. Baustatisch gesehen wirkt das Tragwerk ähnlich einer Platte.

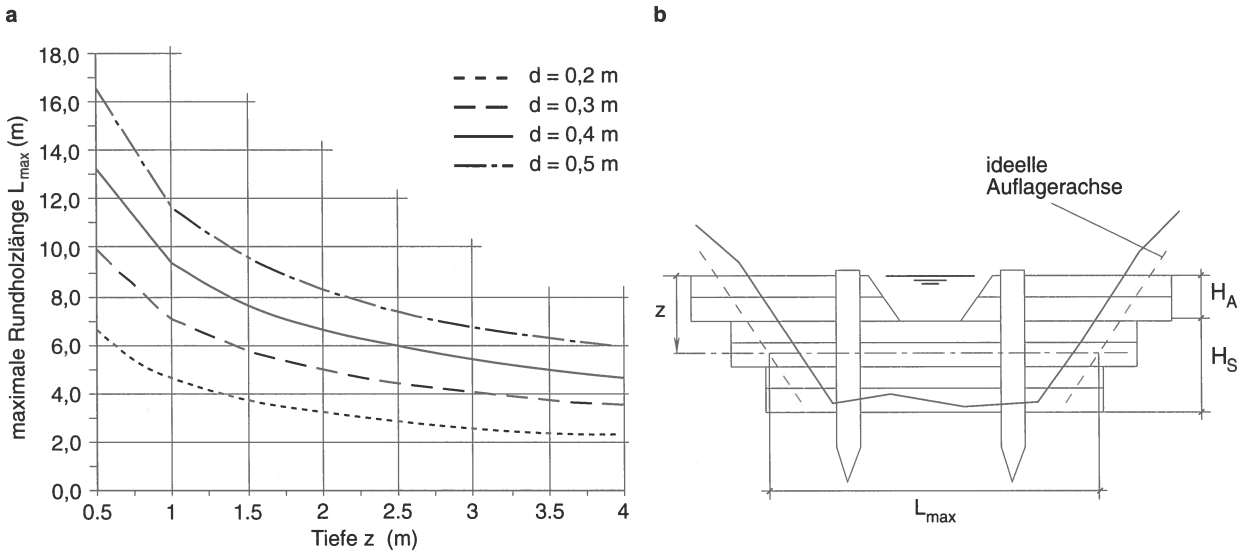


Abb. 26. a) Maximale Spannweite L_{max} der einzelnen Rundhölzer mit σ_{adm} = 7,0 N/mm² in Tiefe z unter dem ideellen Wasserspiegel in $H_A + H_S$ in Abhängigkeit des Rundholzdurchmessers d; b) Sperrenansicht mit Abmessungen.

Im Hang- und häufig auch im Runsenverbau werden dagegen auch die einwandigen Systeme wie Holzkästen ausgebildet, die als Gesamtsystem vorwiegend vertikal tragen (Abb. 16). Sie haben unter anderem die Tendenz, unter Belastung um den vorderen Fusspunkt nach vorne zu kippen. Dadurch werden die Lasten vorwiegend in der vertikalen Querschnittsebene in den Untergrund eingeleitet. Baustatisch gesehen ist die Tragwirkung eines Holzkastens ähnlich der einer Scheibe. Die luftseitigen Längshölzer, die beim einwandigen Holzkasten durch Querhölzer (Zangen) nach hinten im Baugrund verankert und beim doppelwandigen Holzkasten mit der Rückwand verbunden sind, wirken als durchlaufende Biegeträger. Die Biegespannungen sind aber wesentlich kleiner als bei der einwandigen Sperre im Bachverbau; für die Tragwirkung des Holzkastens sind sie in der Regel nicht massgebend.

Entsprechend dieser baustatischen Betrachtungsweise werden die Elemente der Tragwerke definiert: Unter Längshölzern versteht man die Hölzer in der grössten Längenausdehnung des Werkes. Sie liegen somit senkrecht zur Einwirkung und in Gerinnen senkrecht zur Fliessrichtung des Wassers.

Im Bachverbau werden die Sperren meistens auf den hydrostatischen Wasserdruck bemessen. Angaben dazu finden sich in ASF (1973) und Böll (1997a). Bei Stützwerken am Hang stellt in der Regel der Erddruck die Leiteinwirkung dar. Falls sich hinter den Werken ein Wasserdruck aufbauen kann, ist dieser zusätzlich einzuführen. Mit der Stützwerkentwässerung, die bei Holzkonstruktionen im allgemeinen wenig Probleme stellt, soll diese ungünstige Lastkombination vermieden werden.

Im Gegensatz etwa zum Gewichtsmauerquerschnitt aus Beton stellt der mit Steinen und (grobkörnigem) Lockermaterial verfüllte Holzkastenquerschnitt ein recht kompliziertes statisches System dar. Beim Holzkasten beschränkt man sich deshalb nicht auf die

Nachweise der Gesamtstabilität (Kippen und Gleiten), sondern es werden auch die einzelnen Kastenelemente untersucht (innere Statik). Die folgenden Aussagen beziehen sich vor allem auf Holzkonstruktionen im Bachverbau. Sofern nichts anderes vermerkt ist, gelten sie sinngemäss auch für die entsprechenden Werke im Hang- und Runsenverbau.

4.3.1 Bemessung einwandiger Holzwerke

Einwandige Holzsperren werden aus einzelnen, übereinandergelegten und häufig durch Nägel miteinander verbundenen Rundhölzern aufgebaut. Diese einzelnen Rundhölzer tragen als horizontale Balken von Flanke zu Flanke und können auch als solche bemessen werden (Böll 1997a sowie Rickli *et al.* 1997). Als Einwirkung wird nach ASF (1973) der hydrostatische Wasserdruck unter der Wasserspiegelhöhe $H = H_A + H_S$ angenommen. Als zulässige Spannung auf Biegung wird gemäss Ausführungen in Kap. 2.2 ein Wert von $\sigma_{adm} = 7{,}0$ N/mm² empfohlen. Abbildung 26 gibt Hinweise über die maximale Spannweite von Rundhölzern eines bestimmten Durchmessers in Abhängigkeit der Tiefe unter dem ideellen Wasserspiegel. Von besonderer Bedeutung bei diesem von Flanke zu Flanke tragenden System ist eine ausreichende Einbindung der Rundhölzer in die seitlichen Böschungen. In der Regel wird eine Einbindung von mindestens 1,0 m verlangt. Für die Bemessung werden ideelle Auflagerachsen in 50% der Einbindetiefe angenommen. Allfällige Pfosten dienen – obwohl sie je nach Verhältnissen einen Teil der Einwirkung in den Untergrund leiten können – hauptsächlich als Auflager für die Sperrenflügel und werden bei der Bemessung einwandiger Holzsperren nicht eingerechnet.

Beispiel für die Anwendung von Abbildung 26: Bemessung eines Rundholzes in Tiefe z = 2,5 m und Durchmesser d = 0,4 m. Es ergibt sich eine maximale Länge (Spannweite) zwischen den Auflagern von $L_{max} \cong 6$ m. Unter Einrechnung der vollen Einbindungstiefe von beidseitig 1 m wird die Länge des verbauten Rundholzes 7 m und der sichtbare Teil zwischen den beiden seitlichen Böschungen misst 5 m.

Falls die Holzsperren über die gesamte Sperrenhöhe mit Rundhölzern des gleichen Durchmessers gebaut werden, wird die Form des Gerinnequerprofiles massgebend für die maximale Sperrenspannweite. Die Grenzen für den Einsatz von einwandigen Holzsperren können aus Tabelle 10 abgeschätzt werden. Als Sperrenspannweite wird im vorliegenden Fall die Spannweite in Höhe der Abflusssektion und zwischen den ideellen Auflagerachsen in ½ der Einbindetiefe bezeichnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Höhe der Abflusssektion $H_A \leq 1{,}0$ m beträgt. Im obersten Rundholz allenfalls eingesägte Niederwasserrinnen müssen separat berücksichtigt werden.

Tab. 10. Maximale Sperrenspannweiten in Abhängigkeit des Rundholzdurchmessers und der Böschungsneigung (gemessen in Höhe der Abflusssektion; Abstand zwischen den beiden ideellen Auflagerachsen, unabhängig von der Sperrenhöhe).

Rundholzdurchmesser	Böschungsneigung		
	steil (2:1)	mittel (1:1)	flach (1:2)
0,2 m	4,3 m	4,7 m	4,7 m
0,3 m	5,9 m	6,8 m	7,0 m
0,4 m	7,4 m	8,6 m	9,4 m
0,5 m	8,8 m	10,3 m	11,6 m

4.3.2 Bemessung von zweiwandigen Holzkastenkonstruktionen auf Kippen und Gleiten

Holzkastensperren werden als Gewichtskonstruktionen betrachtet und die seitliche Einbindung in die Flanken wird bei der Bemessung nicht berücksichtigt. Wie bei den einwandigen Holzsperren wird auch auf die Kastenkonstruktionen im Bachverbau der hydrostatische Wasserdruck eingeführt. Das Modell und formelmässige Vorgehen der Bemessung auf Kippen und Gleiten ist in Rickli *et al.* (1997) dargestellt. Grundlagen dazu finden sich zudem in Böll (1997a).

Holzkastensperren werden in der Praxis nur in seltenen Fällen bemessen. Meistens ergibt sich eine genügende Sicherheit, falls die Sperrenbreite (Basisbreite) $B = 1/2\ H$ beträgt, mit $H = H_A + H_S$ (Böll 1988). In Abbildung 27 ist das erforderliche Verhältnis B : H in Abhängigkeit des Raumgewichtes γ des Holzkastens und des Reibungsfaktors f im Detail dargestellt. Bei diesen Berechnungen wurde von folgenden Annahmen ausgegangen:

- *Kipp- und Gleitsicherheitsfaktoren* η: Bei Betonsperren wird nach ASF (1973) normalerweise gegen die beiden Grenzzustände Kippen und Gleiten ein Sicherheitsfaktor $\eta \geq 1{,}2$ eingesetzt. Bei Holzkasten mit den doch relativ grossen Unsicherheiten empfehlen wir Sicherheitsfaktoren von $\eta \geq 1{,}3$.
- *Haftreibungskoeffizient* f: Für den Gleitsicherheitsnachweis ist der Grenzwert f der Haftreibung zwischen Holzkasten und Fundament einzuführen. Bei Holzkästen in anstehendem Material kann ein Wert von f = 0,8 in die Rechnung eingeführt werden. Bei Holzkästen auf in Richtung der Einwirkung unter dem Kasten verlegten Prügelböden wird ein Wert von f = 0,7 eingesetzt.

Aus Abbildung 27 ist ersichtlich, dass bei einem Anzug von 5 : 1 und den bei unseren Holzsperren vorkommenden Raumgewichten ein Verhältnis B : H = 0,5 praktisch immer ausreichend ist. Bei grossen Raumgewichten könnte sogar etwas schlanker gebaut werden. Hingegen ist bei einem steilen Anzug von 10 : 1 Vorsicht angezeigt: insbesondere falls eine Haftreibungszahl f von 0,7 eingesetzt werden muss und bei Kastenkonstruktionen mit geringem Raumgewicht.

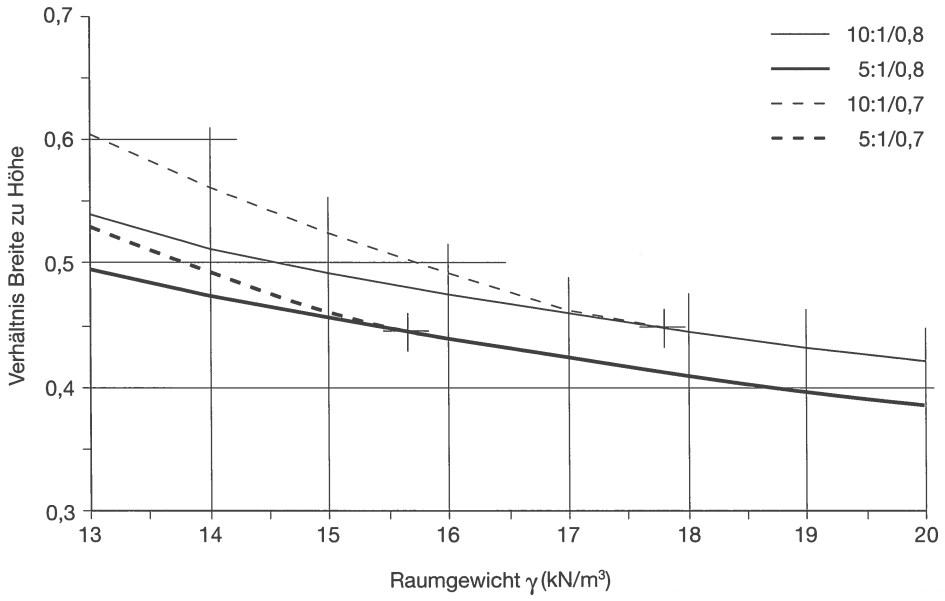


Abb. 27. Erforderliches Verhältnis Fundamentbreite zu Sperrenhöhe ($H_A + H_S$) in Funktion des Raumgewichtes γ des Sperrenkörpers, des Anzuges (10 : 1 bzw. 5 : 1) und des Reibungsfaktors f (0,8 bzw. 0,7).

Das Raumgewicht des Sperrenkörpers fliesst als wichtige Eingangsgrösse in die Bemessung ein und ist abhängig von der Konstruktionsart und vom Raumgewicht der einzelnen Komponenten. In Tabelle 11 sind Richtwerte für verschiedene Kastentypen angegeben. Die Werte wurden aufgrund folgender Annahmen berechnet:

- Raumgewicht Holz: 8 kN/m³ (gesättigt)
- Raumgewicht Steinpackung: 18 kN/m³ (Annahme Porenvolumen: ca. 30%)
- Raumgewicht Bodenmaterial: 22 kN/m³ (gesättigt)

Holzkastenkonstruktionen im Hangverbau sollten nicht steiler als 5 : 1 gestellt werden. Bei doppelwandigen Konstruktionen gelten im Prinzip die gleichen Aussagen zum Verhältnis von Breite B zu Höhe H, sofern nicht Erd- und Wasserdruck gleichzeitig wirken. In dieser Beziehung ist bei nicht frostbeständigem Verfüllungsmaterial ganz besondere Vorsicht geboten. Hinter dem Holzkasten (in gefrorenem Zustand undurchlässig) kann sich beispielsweise bei Schneeschmelze ein Wasserdruck aufbauen, welcher dann zusätzlich zum Erddruck wirkt.

Sofern mit alleinigem Erddruck gerechnet werden kann, ergeben sich in bezug auf Gleiten bei Werken mit B : H ≅ 0,5 kritische Verhältnisse falls:

- mit f = 0,8 bei gleichem Böschungswinkel β der Hinterfüllung und Scherwinkel φ' des Hinterfüllungsmaterials, der Scherwinkel φ' kleiner als etwa 33° und das Mauerraumgewicht kleiner als etwa 15 kN/m³ ist.
- mit f = 0,7 und sonst gleichen Bedingungen der Scherwinkel φ' kleiner ist als etwa 35°.

Es ist dies ein interessantes Resultat, dessen Diskussion grundsätzlich Zusammenhänge beleuchtet, welche sich zwar nicht generell so ergeben, in einigen Fällen jedoch zutreffen. Aus statisch-konstruktiven Gründen sollten Holzkasten möglichst nicht auf Prügelböden gestellt werden. Die unterste Lage sollte vielmehr eine Längsholzlage sein (Böll 1988). Prügelböden drängen sich unter Umständen bei schlecht tragfähigem, setzungsempfindlichem Baugrund auf. Unter solchen Bedingungen ist auch der Scherwinkel φ' des Hinterfüllungsmaterials meistens wesentlich kleiner als 35° und der Erddruck auf den Holzkasten wird entsprechend gross. Wird der Kasten noch mit Aushubmaterial desselben Bodens verfüllt – was unter diesen Umständen allerdings nicht empfehlenswert ist – ergibt sich in der Regel ein niedriges Raumgewicht γ (Tab. 11). Falls die Böschungswinkel β zwischen den einzelnen Stützwerksreihen gleich dem Scherwinkel φ' gesetzt werden, wird die Gleitsicherheit bei schlanken Werken kritisch. In der Projektierungspraxis koinzidiert dieses Resultat meistens mit den folgenden Randbedingungen: an Hängen mit schlecht tragfähigem, setzungsempfindlichem Baugrund sind die Voraussetzungen für ein Verbaukonzept mit flachfundierten Stützwerken allgemein ungünstig. In der Regel wird man dort mit tiefverlaufenden Gleitflächen rechnen müssen und flachfundierte Werke kommen bestenfalls im Hangfussbereich in Frage.

Tab. 11. Raumgewichte γ verschiedener Kastenkonstruktionen.

Beschreibung der Kastenkonstruktion	Raumgewicht γ
Ausfachung mit grobem Steinmaterial oder mit Füllhölzern, Verfüllung des Kasteninhaltes mit Aushubmaterial (Abb. 11)	18–19 kN/m³
Ausfachung zwischen den vorderen Längshölzern sowie Verfüllung im Kasten mit grobem Steinmaterial (Abb. 10)	16–17 kN/m³
Durchgehende Lage zwischen den Längshölzern aus Holz, dazwischen Aushubmaterial (Abb. 13)	13–14 kN/m³

Auf gut tragfähigen Böden ist – in bezug auf das Tragwerksverhalten und die Ausführung – die Kippsicherheit wichtiger als die rechnerische Gleitsicherheit. Im Gegensatz zur Kippsicherheit kann dort die Gleitsicherheit durch konstruktive Massnahmen, wie zum Beispiel eingeschlagene starke Armierungseisen, verbessert werden.

In Zusammenhang mit der inneren Statik von Holzkastenkonstruktionen wurden an der WSL umfangreiche Berechnungen durchgeführt (Rickli *et al.* 1997). Die wichtigsten Resultate werden nachfolgend zusammengefasst und diskutiert. Das Verfüllungsmaterial im Holzkasten übt, wie in einem Silo, einen Innendruck auf die Wände aus. Dieser Druck ist insbesondere vom Winkel ϕ' der inneren Reibung des Verfüllungsmaterials abhängig und kann in einen vertikalen und in einen horizontalen Anteil zerlegt werden. Die Wände haben das Bestreben, sich unter dem Horizontaldruck auseinander zu verschieben. Die Querhölzer (Zangen) wirken dieser Tendenz entgegen, indem sie die Längshölzer, aus denen die Wände bestehen, in ihrer gegenseitigen Lage fixieren. Die Querhölzer wirken somit als Zugbänder, und die Anschlüsse (Knoten) zwischen den Längshölzern und den Querhölzern sind entsprechend auszubilden. Die einer Längsholzlage zugeordneten Querhölzer liegen auf der Längsholzlage. Ein Teil der Schubbeanspruchung am Knoten wird durch Reibung infolge des Vertikaldrucks aufgenommen. Die Querhölzer sind daher auf ihrer Unterseite auszukehlen. Das System wird zusätzlich durch Nägel aus Armierungsstahl verbunden.
Es lässt sich zeigen, dass die Spannungsverhältnisse im Bereich der Knoten praktisch immer massgebend werden und entsprechende Konsequenzen auf die Konstruktion, die Ausführung und die Lebensdauer haben. Dies gilt jedoch nicht für aussergewöhnliche Einwirkungen wie beispielsweise Steinschlag.

Am Knoten in Tiefe z unter der Krone wirkt, infolge des Horizontaldruckes, die Kraft $F_{h(z)}$ und, infolge des Vertikaldruckes, die Kraft $F_{v(z)}$ (Abb. 28). Die Horizontalkraft $F_{h(z)}$ wird durch die Nagelverbindung und durch Reibung am Knoten aufgenommen. Die Vertikalkraft $F_{v(z)}$ wird durch Druckkräfte beziehungsweise Druckspannungen im Holz am Knoten abgetragen. Bei Holzkästen mit Maximalhöhen von etwa 5 m werden – falls für die Längshölzer und für die Querhölzer jeweils durchgehend die gleichen Rundholzdurchmesser t_2 und t_1 verwendet werden – die Beanspruchungen in maximaler Tiefe z massgebend – für die Vertikalkraft immer, für die Horizontalkraft meistens. Falls die Durchmesser über die Höhe abgestuft sind, sind die Verhältnisse in verschiedenen Tiefen z zu untersuchen beziehungsweise die entsprechenden Nachweise zu führen. Nähere Angaben finden sich in Rickli *et al.* (1997).

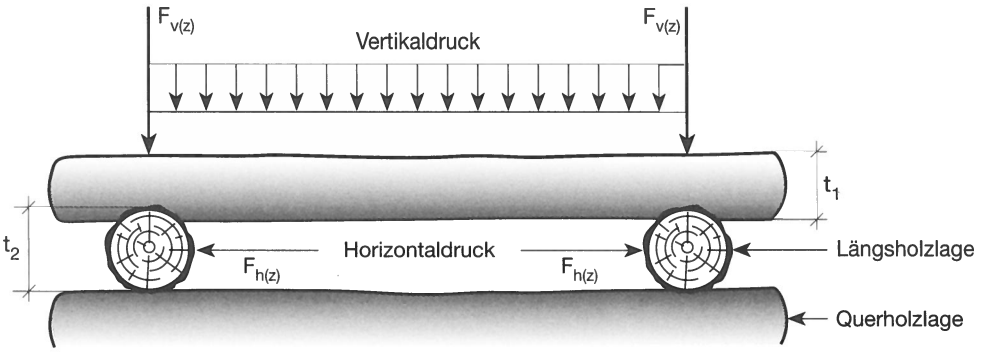


Abb. 28. Knoten Längsholz/Querholz; Längsholzlage mit zugeordneter Querholzlage.

Bei der Nagelverbindung auf Horizontalschub wird in der Regel Versagen im Grundmaterial, das heisst im Holz massgebend. Dabei verformt sich der Nagel (Armierungsstahl oder dergleichen) und im Holz werden die Spannungen so gross, dass es zu lokalem Quetschen oder zum Aufreissen quer zur Faser kommt. Bei neu erstellten Konstruktionen dürfte indessen die rechnerische Tragsicherheit auf Horizontallast am Knoten in den meisten Fällen gut erfüllt sein. Durch Setzungen und andere Bodenbewegungen sowie durch die Abnahme der Holzfestigkeit können aber – insbesondere bei schlecht, respektive mit feinkörnigem Material verfüllten Kästen – im Laufe der Zeit empfindliche Schäden auftreten.

Meistens reisst dabei die Zange im Bereich des Knotens quer zur Faser. Bei der Herstellung der Nagelverbindung ist durch Vorbohren dafür zu sorgen, dass das Holz weder gequetscht noch gespalten wird. Ferner sollten die überstehenden Enden der Querhölzer nicht zu knapp bemessen werden. Bei Einbauten in Gerinnen – insbesondere in geschiebeführenden – besteht allerdings ein Interessenkonflikt. Dort sind über die Luftseite herausragende Querhölzer unerwünscht.

Die unter der Vertikallast $F_{v(z)}$ am Knoten auftretende Querdruckspannung ist vom Betrag dieser Kraft $F_{v(z)}$ und von der Grösse der Kontaktfläche zwischen Längs- und Querholz abhängig. In der Praxis dürfte die Tragsicherheit auf Vertikallast am Knoten in manchen Fällen kritisch sein. Die erforderliche Grösse der Kontaktfläche ist wohl insbesondere bei nicht ausgekehlten Rundhölzern mit Durchmessern um 0,3 m kaum gegeben. Bei einer Kastenhöhe von 4 m rechnet sich die erforderliche Kontakfläche A zu etwa 35'000 mm^2 ($\sqrt{A}$ = 185 mm). Im Bereich konzentrierter Pressungen darf man zwar grundsätzlich etwas höhere Grenzspannungen auf Druck voraussetzen, wird aber doch in vielen Fällen mit einem Überschreiten der Grenzspannung im Bereich der Knoten von unteren Knotenlagen rechnen müssen. Im Zusammenhang mit diesen Berechnungen ist auch die Tatsache zu erwähnen, dass wir die Eigenlast der Wand nicht eingeführt haben und somit mit unseren Vertikallasten F_v eher auf der unsicheren Seite liegen. Im weiteren haben wir das Tragverhalten des Systems soweit idealisiert, dass die äussere Statik und die innere Statik voneinander unabhängig betrachtet werden konnten; das heisst, es wurden völlig starre Systeme untersucht. In Wirklichkeit verhält sich das System natürlich nicht vollkommen starr; so ergeben sich zum Beispiel aus der Kipptendenz des Holzkastens Deformationen, die ihrerseits Druckkräfte und damit eine zusätzliche Erhöhung der Druckspannungen an den unteren Knotenlagen der vorderen Kastenwand bewirken.

Durch das lokale Überschreiten der Grenzspannungen an den Knoten wird das System kaum kollabieren, weil sich die Kontaktflächen durch Einsenkungen anpassen beziehungsweise vergrössern und dadurch Spannungsspitzen abgebaut werden. Weil aber die Knoten an sich schon einen recht grossen Einfluss auf die Lebensdauer von Stützwerken aus Holz haben, ist das Problem der Druckspannungen sehr ernst zu nehmen. Bei hohen Holzkästen sind daher die unteren Lagen mit möglichst starken Rundholzdurchmessern auszuführen und die Kontaktflächen gross genug auszubilden.

Den Berechnungen, die zu den oben angeschriebenen Aussagen führten, liegen «mittlere» Verhältnisse in bezug auf das Verfüllungsmaterial des Holzkastens zugrunde. Mit einem kiesigen Material, dessen Scherwinkel $\phi' = 33°$ und das gesättigte Raumgewicht $\rho_{sat} \cdot g = 22$ kN/m^3 beträgt, wurde eine Verfüllung gewählt, wie sie in der Praxis recht häufig sein dürfte. Um auch die Verhältnisse für einen ausgesprochen günstigen Fall zu untersuchen, kann ein durchwegs mit Steinen verfüllter Holzkasten berechnet werden. Für den Scherwinkel setzt man $\phi' = 45°$ und für das Raumgewicht $\rho_{sat} \cdot g = 18$ kN/m^3. Erwartungsgemäss wird sowohl die Horizontalkraft $F_{h(z)}$ als auch die Vertikalkraft $F_{v(z)}$ am Knoten kleiner. Der Unterschied bei den Seitenlängen der für die Tragsicherheit erforderlichen Kontaktflächen beträgt aber lediglich 10%. Somit ändert sich an den oben gemachten Aussagen in bezug auf die rechnerischen Druckspannungen am Knoten nicht sehr viel. Die Vorteile der Steinfüllung liegen vor allem in der höheren Steifigkeit; d.h. die oben erwähnte Annahme des starren Systems trifft besser zu. Damit wird auch das zeitabhängige Verhalten, unter anderem der Nagelverbindung auf Schub, verbessert. Bei Holzkastensperren dürfen zudem Flügel aus Steinblöcken oder Drahtsteinkörben aufgesetzt werden. Meistens ergibt sich insgesamt auch ein wasserdurchlässigeres System. Falls der Kasten nicht gegen Ausschwemmen von feinem Geschiebe abgedichtet werden muss, resultiert somit eine verbesserte Gesamtstabilität.

4.4 Kostenschätzung

Die Kosten für Holzverbauungen in Wildbächen, Hängen und Runsen weisen eine grosse Spannweite auf. Massgebende Ursachen dafür sind einerseits die unterschiedlichen Konstruktionstypen, andererseits jedoch auch die speziellen Verhältnisse am Standort der Verbauung. Namentlich die Erschliessung bzw. die Verfügbarkeit von Baumaterial an Ort und Stelle sowie die Bedingungen auf der Baustelle (z.B. Wasserhaltung, Steilheit des Geländes mit Problemen der Hangstabilität beim Aushub, Steinschlag, etc.) spielen eine zentrale Rolle. Bei einer Kostenschätzung müssen die Aufwände für folgende Kategorien aufgrund der örtlichen Gegebenheiten und Preise abgeschätzt werden:

1. Material: Holz, Nägel, evtl. Drahtsteinkörbe, Verfüllmaterial, Geotextilien, Anker, etc.
2. Geräte: Zeitaufwand für Motorsäge, Bohraggregat, Seilkran, Kleinseilwinde, Grabenstampfer, etc.
3. Baumaschine (z.B. Schreitbagger): Zeitaufwand für Aushub, Kastenverfüllung, Terrainangleichungen, etc.
4. Arbeitskräfte (Löhne): Zeitaufwand für Installation, Aushub, Kastenbau, etc.
5. Installation: Seilkrananlage, Wasserhaltung, Baracke, etc.
6. Unvorhergesehenes

Obwohl grosse Unterschiede bestehen, werden im folgenden beispielhaft einige unverbindliche Angaben zu Aufwendungen und Kosten für Holzverbauungen gemacht. Der Holzbedarf für doppelwandige Holzkastenkonstruktionen liegt in einem Schwankungsbereich von ungefähr 0,15 bis 0,3 m^3 pro Kubikmeter Bauwerksvolumen. Dieser Wert ist insbesondere abhängig vom Durchmesser des verwendeten Rundholzes. Bei Sperren mit Holzausfachung parallel zur Fliessrichtung (Abb. 13) steigt der Holzbedarf auf etwa 0,5 m^3 Holz pro m^3 Bauwerksvolumen. Die Kosten pro Kubikmeter verbautes Holz für doppelwandige Holzkastenkonstruktionen schwanken in einem weiten Bereich von ca. Fr. 400.– bis 1000.–, in einzelnen Fällen bis gegen 2000.– pro m^3 Holz. Bezieht man diese Werte auf den Kubikmeter Bauwerksvolumen, so liegen die Kosten bei etwa 150 bis 400 Fr/m^3. Schwierige Bau- und Erschliessungsverhältnisse können den Bau zusätzlich verteuern. Einwandige Holzkasten verursachen Kosten von etwa 150 bis 250.– Fr/m^2 und einfache Hangroste etwa 50 bis 100 Fr/m^2. Die Kosten von einwandigen Holzsperren mit Absturzhöhen von 0,5–2,0 m betragen ungefähr Fr. 1500.– bis 3000.– Die Kostenaufteilung kann bei Holzkonstruktionen beispielsweise etwa wie folgt aussehen: die Lohnkosten betragen etwa 40–60% der Gesamtkosten, Maschinen- beziehungsweise Materialkosten je 20–30%.

5 Ausführung

Die saubere handwerkliche Ausführung ist von sehr grosser Bedeutung für die Funktionstüchtigkeit der Holzkonstruktionen. Viele zukünftige Schäden werden bei nachlässiger Ausführung gewissermassen miteingebaut. Es empfiehlt sich dringend, die Arbeiten gemäss dem entsprechenden Normpositionen-Katalog auszuschreiben und nur an ausgewiesene Fachleute zu vergeben. Nachfolgend werden einige Aspekte aufgezeigt, die es bei der Ausführung von Holzkonstruktionen zu beachten gilt. Sie basieren zur Hauptsache auf Erfahrungen mit älteren Verbauungen, auf Expertenwissen und Analogieschlüssen.

In Kapitel 4.3.2 wurde auf die Bedeutung der *Verbindungen* zwischen Längs- und Querhölzern hingewiesen. Dabei wurde gezeigt, dass die Knoten grossen Belastungen ausgesetzt sind. Betreffend der konstruktiven Ausbildung der Verbindungen existieren in der Verbaupraxis unterschiedliche Ansichten. Folgendes Verfahren hat sich jedoch als besonders geeignet herausgestellt: die Rundhölzer werden mit Armierungsstahl der Durchmesser 12–18 mm vernagelt. Der Durchmesser ist in Abhängigkeit des Rundholzdurchmessers zu wählen. Die Verbindungen werden mit 1–2 mm geringerem Durchmesser vorgebohrt und die Nägel werden zugespitzt. Der Effekt des Vorbohrens ist aus Abbildung 29 ersichtlich. Um exponierte Bauteile ersetzen zu können, sind dort die Verbindungen allenfalls mit Schrauben oder Bauklammern auszubilden. Eine Kerbung verleiht der Verbindung zusätzliche Stabilität und vergrössert die Auflagefläche, was eine Reduktion der Druckspannungen im Holz bewirkt (Abb. 28). Eine allfällige Kerbung erfolgt nur an den Querhölzern, und zwar auf der Unterseite. Dadurch wird vermieden, dass Wasser in den Kerbungen liegen bleibt, was sich insbesondere im Hangverbau auf die Lebensdauer auswirken dürfte. Stösse, d.h. beispielsweise die Verbindung zweier Längshölzer, sind allgemein auf das absolut notwendige Minimum zu reduzieren. Die Längshölzer werden mit Vorteil stumpf gestossen. Selbstverständlich muss jedes gestossene Längsholz auf mindestens zwei Querhölzern aufliegen bzw. auf beiden Seiten des Stosses ist ein Auflager vorzusehen. Zusätzlich kann die Verbindung allenfalls mittels durchgehend verschraubter Aufdoppelung verstärkt werden (Abb. 30 und 31).

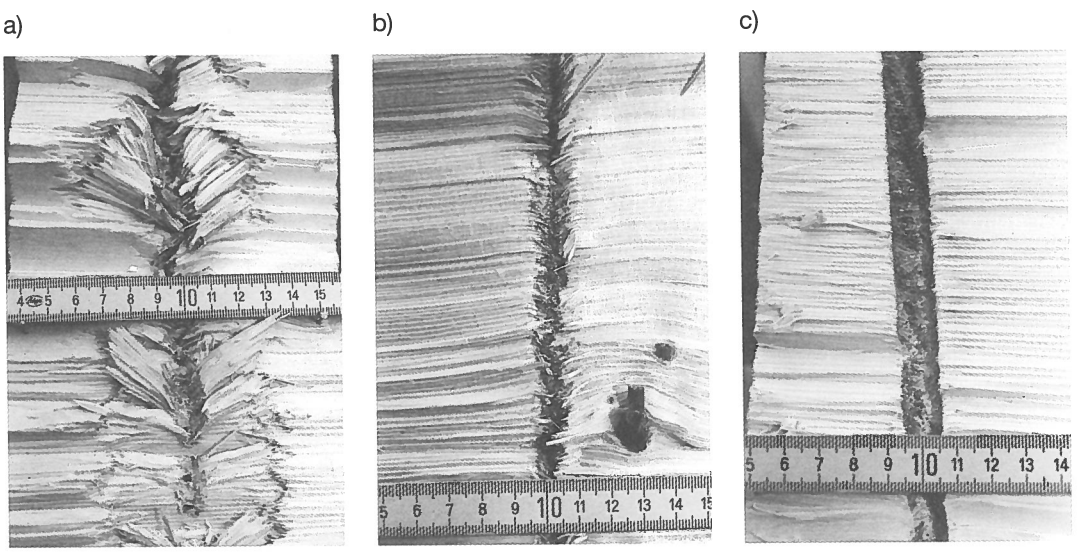


Abb. 29. Einfluss der Art der Vernagelung mit Armierungseisen ϕ12 mm auf Holzverletzungen:
a) nicht gespitzt und nicht vorgebohrt,
b) gespitzt und nicht vorgebohrt,
c) vorgebohrt
(Bilder: F. Ammann, Bollingen).

Insbesondere kurz nach dem Bau kommt es vielfach zu *Ausschwemmungserscheinungen*, welche im Verlaufe der Zeit gewöhnlich etwas abklingen. Damit es nicht zu Beeinträchtigungen der Stabilität und der Lebensdauer kommt, sind vorbeugende Massnahmen notwendig. Zum einen ist bei den Ausfachungen von Kastenkonstruktionen Sorgfalt angebracht, insbesondere auch bei der Verwendung von Füllhölzern. Diese können beispielsweise auch durch Auskehlung an die Querhölzer angepasst werden. Bei einwandigen Holzsperren kann ein Geotextil hinter der Sperre angebracht werden. Bei doppelwandigen Sperren wird empfohlen, auch den Bereich der Abflusssektion gegen unten mit Geotextil vor Auswaschung zu schützen. Ausschwemmungsprobleme können meistens aufgrund von Kontrollen kurz nach dem Bau rechtzeitig erkannt und mit einfachen Mitteln behoben werden.

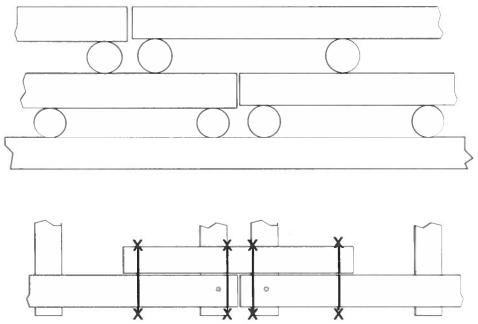


Abb. 30. Beispiel eines Stosses: Verbindung von Längshölzern.

Verschiedene Massnahmen können zu einer *Verlängerung der Lebensdauer* von Holzkonstruktionen beitragen. Im Falle von Holzverbauungen in geschiebeführenden oder sogar murgangfähigen Gerinnen muss die Abflusssektion mit einem Abriebschutz versehen werden. Im gefährdeten Bereich der Überfallkante und der Sperrenflügel werden zu diesem Zweck Rundhölzer oder Halbhölzer in Fliessrichtung angebracht. Diese sollen talseitig das oberste Längsholz des Holzkastens nur wenig überragen, damit eine gleichmässige Benetzung der Sperre dennoch gewährleistet ist. Bergseitig ragen sie deutlich in die Auflandung hinein. Die Abflusssektion kann auch mit einer – allerdings teuren – Steinpflästerung geschützt werden. Da das oberste durchgehende Längsholz an der Kastenfront besonders wichtig ist, wird oft hinter diesem noch ein zweites Längsholz verlegt. Beim Längsverbau in geschiebeführenden Bächen müssen die Querhölzer bündig abgesägt

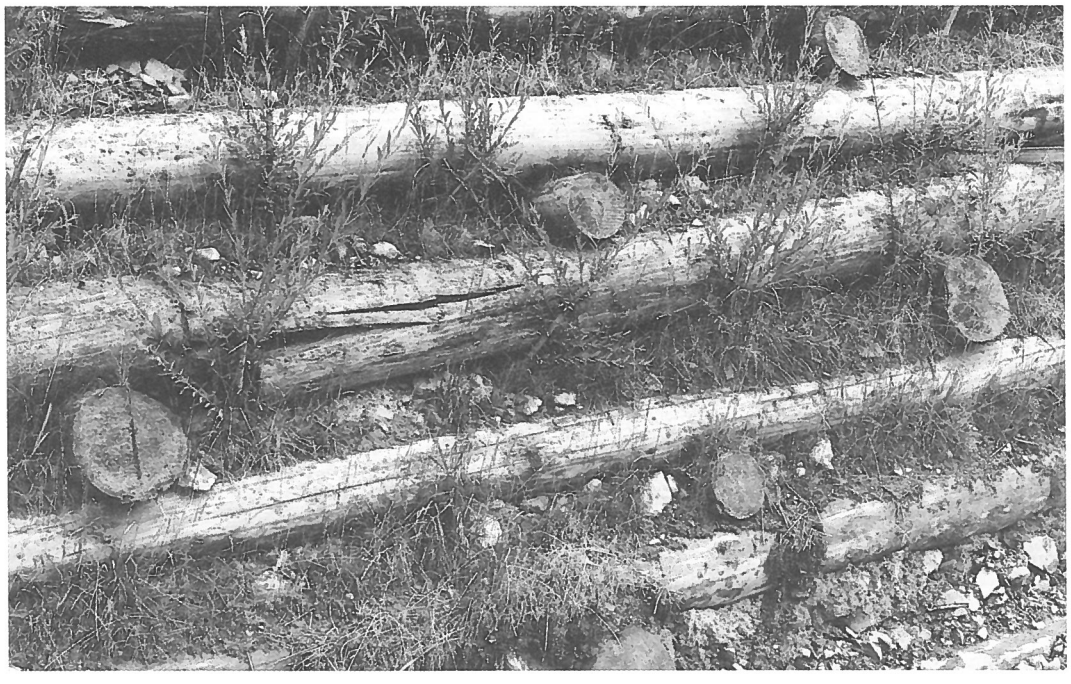


Abb. 31. Holzkasten mit gespaltenem Längsholz aufgrund nicht sachgemäss ausgebildetem Stoss, indem auf einer Seite des Stosses das Auflager fehlt.

werden. Um den direkten Kontakt von Holz mit Erdreich zu umgehen, kann im Bereich der Einbindung eine Kiespackung angebracht oder die Längshölzer mit Geotextil umwickelt werden. Bei Verbauungen im Hang dient insbesondere das Eindecken der Konstruktion mit Erdmaterial sowie die rasche Begrünung durch Saaten und Bepflanzung einer langen Lebensdauer. Bei den zum Teil in das oberste Längsholz eingesägten Niedrigwasserrinnen ist zu berücksichtigen, dass dadurch eine gleichmässige Benetzung des Sperrenkörpers erschwert wird. Bezüglich Fragen des Baustoffes Holz, der Auswahl der Holzart, des Zeitpunktes des Holzschlages, der Qualität des Holzes und der Entrindung sei auf Kap. 2.5.3 verwiesen.

Nachfolgend werden verschiedene *konstruktive Aspekte* beleuchtet. Der Anzug der Holzkastensperren im Gerinneverbau beträgt in der Regel 10 : 1 bis 5 : 1. Bei flacherem Anzug werden insbesondere die überstehenden Querhölzer durch herunterfallende Geschiebekomponenten verletzt. Im Hangverbau sollten die Werke nicht steiler als 5 : 1 gestellt werden. Für den Bau von Holzkasten sind die Querhölzer in der Länge nicht zu knapp auszuwählen, da ein grosszügiger Überhang einerseits eine Montagehilfe darstellt und andererseits die Spaltgefahr beim Vernageln reduziert. Nach Abschluss der Bauarbeiten werden die Querhölzer bei Holzsperren unterwasserseitig mit Vorteil auf ungefähr 10 bis höchstens 20 cm abgesägt. Der Überhang der Querhölzer in der Auflandung kann dagegen variabel gestaltet werden. Bei Holzsperren werden die Querhölzer übereinander angeordnet. Um die Ausbreitung des Wasserstrahls nicht zusätzlich zu vergrössern und damit die seitliche Einbindung der Sperre zu gefährden, wird darauf geachtet, dass die Querhölzer nicht unmittelbar unter die Ecken der Abflusssektion zu liegen kommen. Im Hangverbau sollte ein Überhang der Querhölzer belassen werden (siehe Kap. 4.3.2). Ferner ist dort auch die versetzte Anordnung von Querhölzern üblich und sinnvoll, insbesondere wenn Längshölzer gestossen werden müssen. Einschränkungen ergeben sich allenfalls aus arbeits-

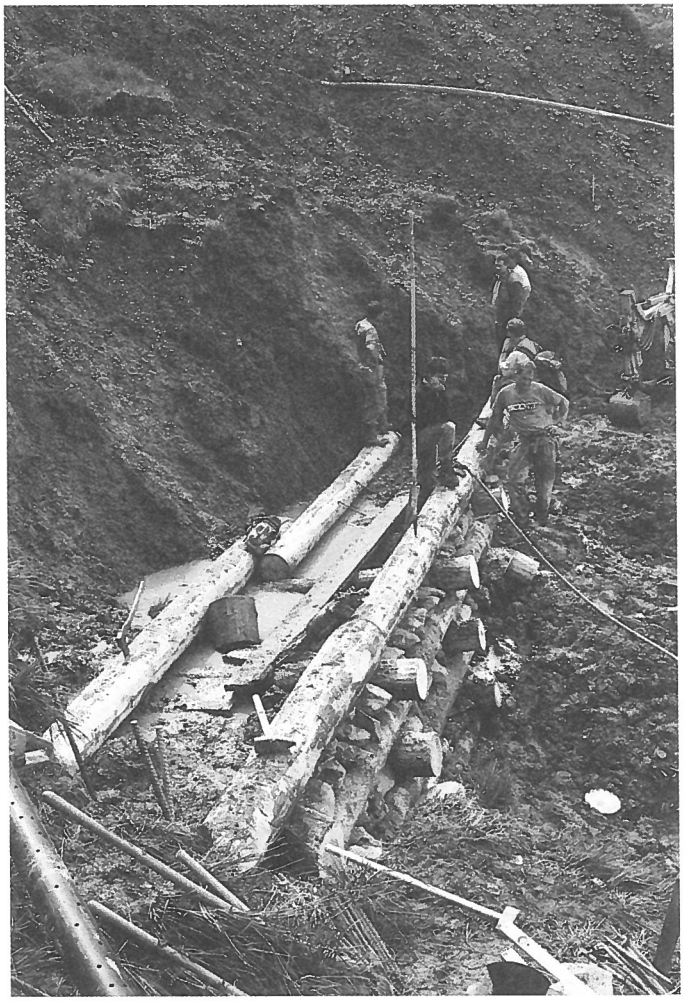


Abb. 32. Bau von Holzkastensperren in steiler Runse. Probleme mit der Wasserhaltung und nachrutschenden Böschungen.

technischen Gründen. Holzverbauungen werden mit Rundhölzern der Durchmesser 15–50 cm gebaut. Der ideale Bereich liegt jedoch etwa zwischen 20 und 30 cm. Bei grösseren Dimensionen wird die Manipulation aufwendig und bei kleineren Durchmessern steigt der Aufwand für die Verbindungen, da mit einer Lage weniger Bauwerkshöhe erreicht wird. Bei Holzkastenkonstruktionen werden die Durchmesser der Querhölzer meistens ungefähr 5 cm kleiner gewählt als jene der Längshölzer (Abb. 32).

Bei der *Ausführung* des Holzverbaus sollen Holzkörperverletzungen durch allgemeine Sorgfalt bei der Manipulation des Holzes vermieden werden. Verletzte Stellen sind bevorzugte Infektionsherde für Pilze. Die Kastenkonstruktionen werden möglichst lageweise gebaut, verfüllt und verdichtet. Dies macht eine konstante Präsenz der Baumaschine erforderlich. Zu den Aufgaben der Bauleitung kommen neben der Wahl von Standort und Ausrichtung des Bauwerks insbesondere auch die Kontrolle der Holzqualität, die Ausführung der Verbindungen und Ausfachungen sowie die fachgerechte Verfüllung und Verdichtung des Kastens. Bei anhaltendem Regenwetter muss der Bau unterbrochen werden, insbesondere wenn mit ungünstigem Material verfüllt werden muss.

6 Langzeitverhalten

6.1 Lebensdauer

Die Lebensdauer kann namentlich bei Holzbauwerken als eine Frage von Aufwand und Ertrag betrachtet werden. Wird von Anfang an viel investiert, kann die Funktionstauglichkeit wesentlich länger erhalten werden als bei schlecht geplanten und ausgeführten sowie nicht unterhaltenen Holzverbauungen. Das Langzeitverhalten wird insbesondere durch die nachfolgenden Einflussgrössen bestimmt:

- Natürliche Dauerhaftigkeit des Holzes sowie die örtlichen Standortsbedingungen: Die bei uns am häufigsten verwendeten Baumarten Fichte und Tanne sind nicht dauerhaft. Eine deutliche Verbesserung würde in entsprechenden Gebieten die Lärche bringen. Möglichst wassergesättigte Bedingungen sollen angestrebt werden. Bei Holzverbau in wechselfeuchtem Milieu und bei grossen Temperaturschwankungen ist mit massiven Einbussen bezüglich der Lebensdauer zu rechnen.
- Bauliche Konzeption, Gestaltung und Verarbeitungsqualität: Das Ziel muss darin bestehen, Unterkolkung, seitliches Umfliessen etc. mit den in der Regel verheerenden Schäden am Bauwerk zu verhindern. Kann dies nicht ausgeschlossen werden, sind vorbeugende Massnahmen zu treffen (z.B. Prügelboden am Fundament). Die Bauwerke sind gegen mechanischen Abrieb soweit als möglich zu schützen (z.B. Schutz der Abflusssektion) und so vorzubereiten, dass besonders exponierte Teile auswechselbar sind oder bereits bei der Ausführung verstärkt werden. Die Verarbeitungsqualität (z.B. Verbindungen, Vermeiden von Holzkörperverletzungen, Handentrindung) sowie die Holzqualität (gesundes Holz, kurze Lagerzeit) sind von grosser Bedeutung für die Lebensdauer.
- Mechanische Beanspruchung des Bauwerkes: Holz ist dem Abrieb durch Geschiebe ausgesetzt. In Bächen mit grossem Geschiebetrieb oder sogar Murgängen sind kürzere Lebensdauern zu erwarten. Bewegungen im Hang führen zu Stauchungsrissen in den Längshölzern und Deformationen der Kastenkonstruktionen, die den Verbund und damit auch die Lebensdauer beeinträchtigen. Auch Windwurf und Steinschlag können Schäden an Holzbauwerken bewirken.
- Überwachung und Unterhalt: Da die Lebensdauer von Holzbauwerken im Vergleich zu anderen Werkstypen geringer ist, kommt der Überwachung und dem Unterhalt eine besonders wichtige Funktion zu. Ohne Überwachung werden leichte, gut reparierbare Schäden nicht bemerkt, was zu einer schnellen Verschlechterung des Zustandes führt (Abb. 33).

Bisher wurde die Lebensdauer vor allem aus wirtschaftlicher Sicht betrachtet. Verglichen wird dabei insbesondere zwischen einer in der Erstellung teuren Variante mit hoher (technischer) Lebensdauer und einer kostengünstigen Variante von kürzerer Lebensdauer. Fragen des zeitlichen Zusammenfallens von periodisch auftretenden Extremereignissen in Gerinnen oder dem zeitlich bedingten Stabilitätsverhalten von Hängen, mit dem Ende der Lebensdauer, beziehungsweise der zeitlich abnehmenden Tragsicherheit von Schutzmassnahmen, werden in der Regel höchstens intuitiv und implizit behandelt. Im Zusammenhang mit der Lebensdauer von Holzkonstruktionen sind diese Fragen besonders

wichtig. Es sei jedoch ausdrücklich betont, dass es bei diesen Überlegungen nicht allein um die rein technische Lebensdauer von Massnahmen geht. Vielmehr handelt es sich auch um die richtige Beurteilung der natürlichen Prozesse und die Auswirkungen der Massnahmen auf diese (Böll 1997a). So ist beispielsweise die an sich hohe Lebensdauer einer Stahlbetonsperre belanglos, wenn die Sperrenflügel beim ersten Unwetter überflutet werden, dadurch die seitlichen Böschungen abrutschen und schliesslich die Sperre kippt. Andererseits ist nicht pauschal garantiert, dass nach dem Verfaulen einer Holzkonstruktion im Hangverbau die miteingebauten Pflanzen die Stützfunktion vollständig übernehmen können.



Abb. 33. Zerstörte Holzkastensperre.

Aufgrund der ungünstigen Holzfeuchtebedingungen ist die Lebensdauer von Holzkonstruktionen im Hang- und Runsenverbau meistens kürzer als in Wildbächen. Durch vollständiges Eindecken mit Lockermaterial und/oder Begrünen (Abb. 16) lassen sich die Verhältnisse verbessern. Hohe Stützwerke im steilen Gelände lassen sich aber häufig nicht eindecken, weil das Lockermaterial an der talseitigen Wand abrutscht. Zudem sind bei hohen Werken die Bedingungen für eingelegte Pflanzen und Steckstangen oft nicht einheitlich günstig, so dass die dauernde Beschattung ausbleibt. Stark nach hinten geneigte Werke mit einem Anzug von etwa 3 : 1 verhalten sich unter Umständen etwas besser. Besonders ungünstige Bedingungen herrschen an südexponierten Hängen. Falls bei widrigen Standortbedingungen auch noch mangelhaft projektiert und unsorgfältig gebaut wird, liegt die Lebensdauer meistens deutlich unter 30 Jahren.

Am Beispiel von Untersuchungen an Holzkastensperren werden nachfolgend Aspekte der Zustandsentwicklung und der Lebensdauer erläutert. Zeller und Röthlisberger (1987) untersuchten in den Gamser Wildbächen den Zustand von Holzsperren. Sie überprüften dabei in einem Abstand von 10 Jahren (1972 und 1982) ungefähr 200 Holzsperren aus den Jahren 1901–1905 (Abb. 34) und 1940–1958 nach einem einheitlichen Verfahren. Die Erhebungen umfassen neben Angaben zu den Ausmassen der Sperren eine detaillierte Aufnahme des Zustandes einzelner Bauteile: Sperrenflügel, Abflusssektion, Sperrenkörper, Sperrenfuss und Kolk. Im weiteren werden auch Angaben gemacht zu den auf die Sperre einwirkenden Prozessen sowie zum Gerinnezustand. Basierend auf diesen Beobachtungen im Gelände wurden die Sperren in die Kategorien «voll wirksam», «teilweise wirksam» und «nicht wirksam» eingeteilt. Dabei bedeutet «voll wirksam», dass die Funktionstauglichkeit – auch bei vorhandenen kleineren Zerfallserscheinungen – voll gewährleistet ist. «Teilweise wirksame» Sperren weisen bei einem 30jährlichen Hochwasser eine eingeschränkte Funk-

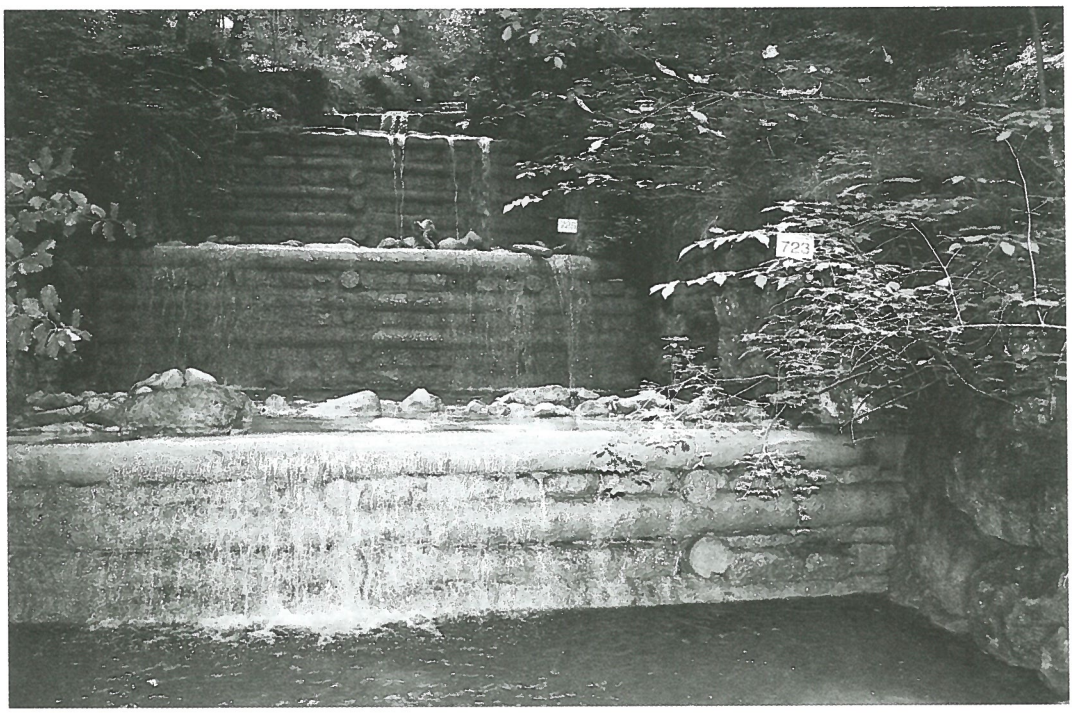


Abb. 34. Sperre aus der Zeit von 1901–1905 in gutem Zustand (Gams/SG).

tionstauglichkeit auf. Sie können jedoch durch Reparaturmassnahmen wieder voll instand gestellt werden. «Nicht wirksame» Sperren können nicht mehr repariert werden oder sind völlig zerstört beziehungsweise weggeschwemmt. 1996 wurde eine erneute Aufnahme des Sperrenzustandes in den Gamser Wildbächen durchgeführt. Weiter stehen Zustandsbeurteilungen nach dem gleichen Vorgehen aus dem Kanton Uri zur Verfügung (Baumann 1991).

Aufgrund von total 700 zur Verfügung stehenden Zustandserfassungen zu verschiedenen Zeitpunkten wurde ein mutmasslicher Zusammenhang zwischen Sperrenzustand und Sperrenalter abgeleitet (Abb. 35). Einzelne Reparaturarbeiten, die eine Verbesserung des Sperrenzustandes bewirken, sind dabei mit berücksichtigt und wirken sich auf den Zustandsverlauf aus. Totalerneuerungen werden hingegen bei Folgeaufnahmen nicht mehr beurteilt. Aus Abbildung 35 können für die untersuchten Holzsperren folgende Schlüsse abgeleitet werden:

- Während den ersten 15 bis 20 Jahren nach dem Bau treten kaum Schäden auf, welche die Funktionstauglichkeit einschränken. Der Anteil der voll wirksamen Sperren nimmt in der Folge rasch ab, so dass dieser Anteil 40 Jahre nach dem Bau nur noch ungefähr 35–40% beträgt. Bemerkenswert ist, dass einige Sperren auch bis ins hohe Alter voll wirksam bleiben.
- Die teilweise tauglichen Sperren nehmen in der Altersperiode von 20 bis 50 Jahren bis auf einen Anteil von 40 bis 50% zu. Anschliessend erfolgt eine stetige Abnahme dieser Kategorie auf Kosten der unwirksamen Sperren.
- Nach etwa 20 Jahren erfolgt eine stetige Zunahme der unwirksamen und zerstörten Sperren. Gemäss Abbildung 35 macht ihr Anteil 40 Jahre nach dem Bau ungefähr 20–25% aus.

Die Datenpunkte der 80- und 95jährigen Holzsperren in Abbildung 35 sind als unsicher zu bezeichnen, da eine grosse Anzahl der ursprünglichen Sperren durch neue Werke ersetzt wurden und deshalb nicht mehr beurteilt werden konnten. Dies hat zur Folge, dass der Zustandsverlauf dieser ersetzten Sperren extrapoliert werden muss. Weiter soll betont werden, dass die Ergebnisse ähnlicher Untersuchungen in anderen Einzugsgebieten von der in Abbildung 35 gezeigten Entwicklung abweichen können. Wie in Kapitel 6.1 dargelegt, wirken verschiedene, von Standort und Konstruktionsweise abhängige Einflussgrössen auf die Lebensdauer.

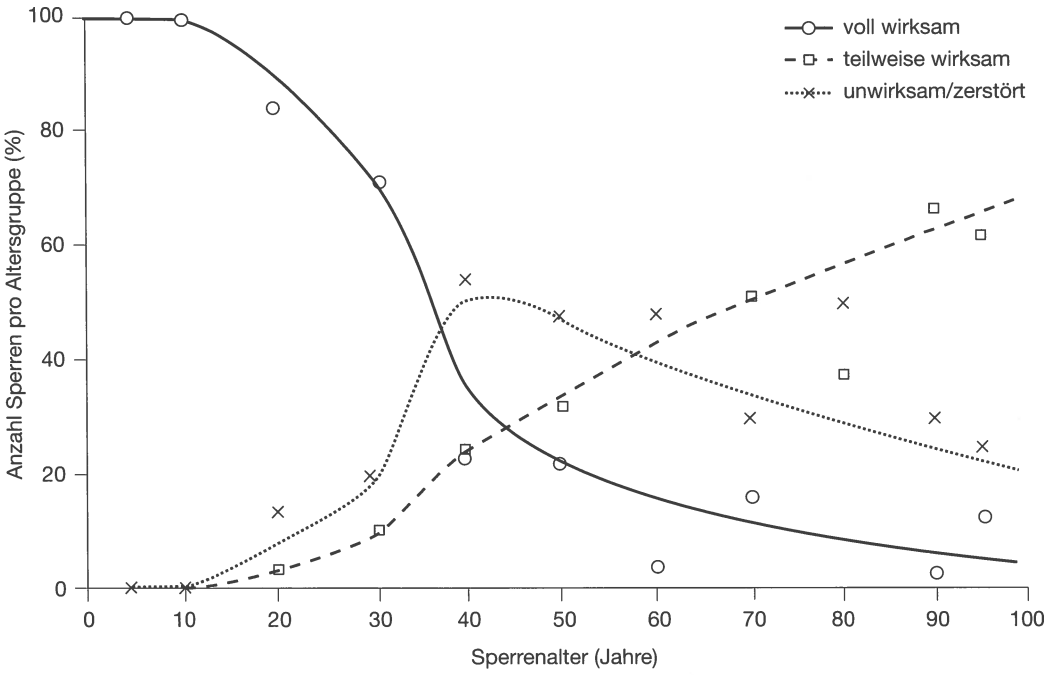


Abb. 35. Verlauf des Sperrenzustandes in Abhängigkeit von Alter und Anzahl: Datenpunkte der Untersuchungen und Trendlinien der Zustandskategorien.

Nach Zeller und Röthlisberger (1987) kann ein Grenzzustand einer Verbaustrecke formuliert werden: 50% der Sperren sind voll wirksam, 30% teilweise wirksam, 20% unwirksam. Wird dieser Zustand erreicht oder überschritten, kann die Funktionstauglichkeit der Sperrenstrecke nicht mehr mit laufendem Unterhalt und einzelnen punktuellen Erneuerungen erhalten werden. Die Sanierungen ganzer Abschnitte wird erforderlich. Aus Abbildung 35 ist ersichtlich, dass aufgrund dieser Regel spätestens nach 30 Jahren eine Wildbachverbauung aus Holz sehr genau überprüft werden muss. Leider bestehen zur Zustandsentwicklung von Holzbauwerken in Runsen oder Hängen keine entsprechenden Untersuchungen. Es ist jedoch davon auszugehen, dass bei Bauwerken, die der Wechselfeuchtigkeit ausgesetzt sind, wesentlich früher ein Zustand erreicht wird, der eine Erneuerung bzw. einen Ersatz der Werke notwendig macht.

6.2 Überwachung, Unterhalt und Erneuerung

Für die Überwachung des Zustandes und für die Unterhaltsarbeiten sind bereits im Projekt Lösungen zu beschreiben (Böll 1997b). Es empfiehlt sich, die einzelnen Bauwerke in der Bauphase mit einer Identifikation zu versehen und für jedes Werk in einer geeigneten Datei einen Datensatz anzulegen. Dieser umfasst Angaben zum Baujahr, zur Konstruktionsart, zu den verwendeten Baumaterialien, usw. Bei Zustandskontrollen in späteren Jahren wird dadurch ermöglicht, Schäden und deren Ursachen, wie auch notwendige Unterhalts- oder Erneuerungsarbeiten zu protokollieren.

Kurz nach Bauabschluss bzw. nach dem ersten grösseren Regen sollen die Bauwerke inspiziert werden. Dabei werden beispielsweise allfällige Auswaschungserscheinungen oder kleinere Setzungen usw. erkannt. Die Probleme können zu diesem Zeitpunkt meist mit einfachen Mitteln behoben werden. Danach erfolgen jährliche Kontrollen sowie Begehungen nach jedem grösseren Niederschlagsereignis. Bei begrünten Bauwerken wird nach einigen Jahren eine Pflege der Vegetation notwendig. Periodische Zustandserfassung und -dokumentation erlauben eine gute Beurteilung der Zustandsentwicklung sowie die Planung allfälliger Erneuerungsarbeiten.

Häufig kann festgestellt werden, dass bei erneuerungsbedürftigen Bauwerken gewisse Teile immer noch voll funktionstüchtig sind: beispielsweise bei Sperren der Sperrenkörper im Bereich der Abflussektion oder die untersten Lagen der Sperre. Oft lohnt es sich, vor die häufig stark zersetzten Einbindungen Steinblöcke oder Drahtsteinkörbe zu versetzen bzw.

sogar eine Stützmauer zu betonieren, um den noch gesunden Bereich der Abflusssektion zu erhalten. Weiter kann auch auf einem intakten Teil des Sperrenkörpers ein neuer Holzkasten aufgebaut werden und so der relativ grosse Aufwand für die Fundation und die ersten Lagen eingespart werden.

7 Literatur

Ammann, F., 1997: Ingenieurbiologische Verbaumethoden – Holzkastenverbau und Hangroste. Ingenieurbiologie 4/97: 4–7.

Arnold, M.; Sell, J., 1992: Qualitätserhaltung von Rundholz bei längerer Lagerung. Bericht EMPA 115/25.

ASF, Eidg. Amt für Stassen- und Flussbau (heute Bundesamt für Wasserwirtschaft) (Hrsg.), 1973: Dimensionierung von Wildbachsperren aus Beton und Stahlbeton. Richtlinie 1973. Bern, Eidg. Drucksachen- und Materialzentrale.

Baumann, P., 1991: Langzeitverhalten von Stützwerken aus Holz und Drahtsteinkörben im Wildbach- und Hangverbau. Diplomarbeit ETHZ, unveröffentlicht. 84 S.

Benko, R.; Highley, T.L., 1990: Selection of media for screening interaction of wood-attacking fungi and antagonistic bacteria. II. Interaction on wood. Material und Organismen 25: 174–180.

Blanchette, R.A.; Otjen, L.; Effland, M.J.; Eslyn, W.E., 1985: Changes in structural and chemical components of wood delignified by fungi. Wood Sci. Technol. 19: 35–46.

Böll, A., 1988: Holz im Wildbach- und Hangverbau. Wald Holz 6: 428–433.

Böll, A., 1997a: Wildbach- und Hangverbau. Ber. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 343: 123 S.

Böll, A., 1997b: Berücksichtigung von bestehenden oder geplanten Verbauungen. In: Kursunterlagen zum Ausbildungskurs Gefahrenkarten. Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW). 7 S.

Bosshard, H.H., 1984: Holzkunde. Band 3: Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. 2. Aufl. Basel, Birkhäuser. 312 S.

Briemle, G., 1997: Der richtige Zeitpunkt beim Holzeinschlag – ein Exkurs in die Esoterik. Wald Holz 1: 19–21.

Butin, H., 1983: Krankheiten der Wald- und Parkbäume. Leitfaden zum Bestimmen von Baumkrankheiten. New York, Georg Thieme Verlag. 172 S.

BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft), 1992: Holzkonstruktionen im Wanderwegbau. Handbuch zur Optimierung von Planung, Bau und Betrieb (erarbeitet durch U.A. Meyerhofer und M. Zumoberhaus, EMPA) Schr.reihe Umw. 153: 110 S.

BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft); WSL (Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft), 1990: Richtlinien für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet. Bern, BUWAL, Eidgenössische Forstdirektion; Birmensdorf/Davos, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung. 76 S.

BUWAL (Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft), BWW (Bundesamt für Wasserwirtschaft), BRP (Bundesamt für Raumplanung), 1997: Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bern, BUWAL, BWW, BRP. 42 S.

BWW, BUWAL, BRP, 1997: Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). Bern, BUWAL, BWW, BRP. 32 S.

Dumas, M.T., 1992: Inhibition of *Armillaria* by bacteria isolated from soils of the Boreal Mixedwood Forest of Ontario. Eur. J. For. Pathol. 22: 11–18.

Ehrbar, R., 1986: Sanierung von Strassenrutschungen mit verankerten Kleinbohrpfählen. Bündnerwald 39, 7: 60–65.

Eriksson, K.; Blanchette, R.A.; Ander, P., 1990: Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components. Berlin, Springer Verlag.

Erni, F.; Jecklin, R., 1998: Erfahrungen mit Erdankern: Bündnerwald 4/98: 59–61.

Findlay, W.P.K., 1962: The preservation of timber. London, Adam & Charles Black Verlag. 196 S.

Graf, E., 1997: Holz im Aussenbau. Wald Holz 10: 15–18.

Heinimann, H.R.; Hollenstein, K.; Kienholz, H.; Krummenacher, B.; Mani, P., 1998: Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien Nr. 85, Naturgefahren. Bern, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Hrsg). 248 S.

Highley, T.L.; Ricard, J., 1988: Antagonism of *Trichoderma* spp. and *Gliocladium virens* against wood decay fungi. Mat. Org. 23: 157–169.

Himes, W.E.; Skelly, J.M., 1972: An association of the black turpentine beetle, *Dendroctonus terebrans*, and *Fomes annosus* in loblolly pine. Phytopathology 62: 670.

Kienholz, H., 1993: Naturgefahren – Naturrisiken im Gebirge. Forum für Wissen. 7–21.

Kollmann, F., 1951: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Bd. 1, 2. Aufl. Berlin, Springer-Verlag. 1048 S.

Kuhn, C., 1992: Wertentwicklung bei der Waldlagerung von Fi/Ta-Rundholz. Schweiz. Z. Forstwes. 143, 9: 783–794.

Kuonen, V., 1983: Wald- und Güterstrassen. Pfaffhausen, Eigenverlag. 743 S.

Levy, J.F., 1975: Colonization of wood by fungi. In: Liese, W. (Hrsg.) Biological transformation of wood by microorganisms. Berlin, Springer. 16–23.

Liese, W., 1959: Die Moderfäule, eine neue Krankheit des Holzes. Nat.wiss. Rundsch. 11: 419–425.

Liese, W., 1970: The action of fungi and bacteria during wood deterioration. Rec. Brit. Wood Preserv. Assoc.: 281–294.

Morris, P.I., 1992: Available iron promotes brown-rot of treated wood. IRG/WP 5385, 9 pp.

Nilsson, T.; Obst, J.R.; Daniel, G., 1988: Ultrastructure of the attack of *Eusideroxylon zwageri* wood by tunnelling bacteria. Holzforschung 46: 361–367.

Neuschmid, K, 1997: Methoden der Böschungssicherung von Hangquerungen im steilen Gelände. Eigenverlag des Verfassers. 128 S.

Rickli, C.; Böll, A.; Gerber, W.; Graf, F., 1997: Forstlicher Bachverbau. Kursunterlagen des Weiterbildungskurses 1997 in Stalden OW. Forstliche Arbeitsgruppe Naturgefahren (FAN).

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA (Hrsg.), 1992: SIA Norm 164 Holzbau. 75 S.

Schmidt, O., 1994: Holz- und Baumpilze. Biologie, Schäden, Schutz, Nutzen. Berlin, Springer.

Thörnqvist, T.; Kärenlampi, P.; Lundström, H.; Milberg, P.; Tamminen, Z., 1987: Vedegenskaper och mikrobiella angrepp i och på byggnadsvirke. Swed. Univ. Agric. Scu. Uppsala 10: 1–138.

Trendlenburg, R.; Mayer-Wegelin, H., 1955: Das Holz als Rohstoff. 2. Aufl. München, Carl-Hanser-Verlag. 541 S.

Wälchli, O., 1973: Die Widerstandsfähigkeit verschiedener Holzarten gegen Angriffe durch den echten Hausschwamm (*Merulius lacrimans* [Wulf.] Fr.). Holz Roh- Werkst. 31: 96–102.

Wälchli, O., 1976: Die Widerstandsfähigkeit verschiedener Holzarten gegen Angriffe durch *Coniophora puteana* (Schum. ex. Fr.) Karst. (Kellerschwamm) und *Gloeophyllum trabeum* (Pers. ex. Fr.) Murrill (Blakenblättling). Holz Roh- Werkst. 34: 335–338.

Wälchli, O., 1977: Der Temperatureinfluss auf die Holzzerstörung durch Pilze. Holz Roh- Werkst. 35: 96–102.

Wälchli, O.; Graf, E.; in der Gand, H., 1986: Holzschutz im temporären Lawinenverbau. Mitt. Eidgenöss. Inst. Schnee- Lawinenforsch. 40: 76 S.

Wenzel, H., 1990: Bedeutung kombinierter technisch-biologischer Methoden in der Liechtensteiner Rüfenverbauung. Gesellschaft für Ingenieurbiologie, Jahrbuch 5: 139–154.

Wenzel, H., 1995: Schwemmirutsch, Alp Gafadura, Fürstentum Liechtenstein. Massnahmen zur Wiederbewaldung. Bündnerwald 1: 54–59.

Whitney, H.S.R.; Bandoni, R.J.; Oberwinkler, F., 1987: *Entomocorticium dendroctoni* gen. et sp. nov. (Basidiomycotina), a possible nutritional symbiote of the mountain pine beetle in lodgepole pine in British Columbia. Can. J. Bot. 65: 95–102.

Zeller, J.; Röthlisberger, G., 1987: Lebensdauer von Holzsperren am Beispiel der Gamser Wildbäche. Ber. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 291: 34 S.

ISBN 3-905620-76-6