Lignatec

Naturgefahren mit Holz begegnen

Erosion | Rutschung | Wildbach | Lawinen



BFH BOKU WSL Fobatec Lignum

Inhalt

Diese Publikation wurde von folgenden Partnern unterstützt:

Massgebliche finanzielle Unterstützung

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Aktionsplans Holz

Finanzielle Unterstützung

Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen PS-FP

Weitere Unterstützung

ecorisQ
Fachleute Naturgefahren FAN
Forstunternehmer Schweiz FUS
Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA, Fachverein Wald

Ideelle Trägerschaft

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein SIA

Projektpartner

Berner Fachhochschule BFH, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL
Fachstelle für forstliche Bautechnik Fobatec
Universität für Bodenkultur Wien BOKU
WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

Wirtschaftspartner

Caprez Ingenieure AG, Silvaplana
Castagnostyle GmbH, Taverne
fim – Kompetenz für Forst, Landwirtschaft und Garten, Uetendorf
Forst Aletsch, Fieschertal
Lindner Suisse GmbH, Wattwil

Seite 4		**Vorwort**
5	**1**	**Einleitung**
	1.1	Von der Gefahrenabwehr zum integralen Risikomanagement
	1.2	Massnahmen im Rahmen des IRM
	1.3	Von Querbäumen bis zur Ingenieurbiologie
9	**2**	**Dauerhaftigkeit des Baustoffs Holz**
	2.1	Allgemeines
	2.2	Biologischer Holzabbau
	2.3	Gebrauchsklassen (GK)
	2.4	Äussere und innere Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit von Holz
	2.5	Dauerhafte Holzarten und ihr Vorkommen im Schweizer Wald
	2.6	Kriterien für die Verwendung von Holz für Schutzbauwerke
	2.7	Fallbeispiel einer Sperrentreppe in einem Wildbach
14	**3**	**Normative Ansätze und Hinweise zur Bemessung von Schutzbauten aus Rundholz**
	3.1	Allgemeines
	3.2	Normative Grundlagen
	3.3	Normen zur Ermittlung von Einwirkungen
	3.4	Normen zum Nachweis der Grenzzustände Typ 1 und 3
	3.5	Normen zum Nachweis des Grenzzustandes Typ 2
17	**4**	**Holz zum Schutz vor Erosion**
	4.1	Prozess und Einwirkungen
	4.2	Übersicht und Funktionen von Bauwerken gegen Erosion
	4.3	Konstruktion und Anwendung von Erosionsschutzbauten aus Holz
22	**5**	**Holz zum Schutz vor Rutschungen**
	5.1	Prozesse und Einwirkungen
	5.2	Übersicht und Funktion von Bauwerken gegen Rutschungen
	5.3	Konstruktion und Anwendung von Stabilisierungsbauten aus Holz
	5.4	Grenzen des Einsatzes von Holzverbauungen
	5.5	Komplementäre Wirkung von ingenieurbiologischen Massnahmen
33	**6**	**Holz im Wildbachverbau**
	6.1	Prozesse und Einwirkungen
	6.2	Übersicht und Funktion von Sperrenbauwerken
	6.3	Konstruktion und Anwendung von Sperrenbauwerken aus Holz
	6.4	Konstruktion von Längsbauwerken aus Holz
	6.5	Grenzen des Einsatzes von Holzverbauungen im Wildbachverbau
43	**7**	**Holz zum Schutz vor Lawinen und Schneebewegungen**
	7.1	Prozesse und Einwirkungen
	7.2	Übersicht und Funktion von Lawinenverbauungen
	7.3	Konstruktion und Anwendung von Lawinenverbauungen aus Holz
	7.4	Triebschneezäune
	7.5	Grenzen des Einsatzes von Holzverbauungen

Autoren

Luuk Dorren, Prof. Dr., BFH-HAFL (Kap. 1)
Willy Eyer, Dipl.-Ing. ETH (Kap. 9)
Stefan Margreth, Dipl.-Ing. ETH, SLF (Kap. 3/7)
Gunther Ratsch, MSc Ing. BFH, Lignum (Kap. 3)
Christian Rickli, Dipl.-Ing. ETH, WSL (Kap. 2)
Massimiliano Schwarz, Dr., BFH-HAFL (Kap. 4/5)
Jürgen Suda, Dipl. Ing. Dr. rer. nat., BOKU (Kap. 3/6)
Magdalena Von Der Thannen, Dipl.-Ing. Dr. techn., BOKU (Kap. 8)

Fachlektoren

Willy Eyer, Dipl.-Ing. ETH
Franz Thalmann, Förster HF

Koordination

Gunther Ratsch, MSc Ing. BFH, Lignum, Zürich (verantwortlicher Redaktor)
Hervé Bader, Dipl.-Ing. ETH, Fobatec
Walter Krättli, Bsc Forstwirtschaft BFH, Fobatec

Titelbild

Holzschneerechen als temporäre Lawinenverbauung, Forst Aletsch (C. Pfammatter, Visp)

52 **8** **Schutzbauten und Nachhaltigkeit**
8.1 Einleitung
8.2 Normen und Datengrundlagen
8.3 Ökobilanz von Wildbachbauwerken – Fallbeispiel
8.4 Ergebnisse
8.5 Schlussfolgerungen

60 **9** **Resümee**
9.1 Vorteile des Holzeinsatzes für Schutzbauten
9.2 Nachteile des Holzeinsatzes für Schutzbauten
9.3 Allgemeine Abwägung zur Frage des Holzeinsatzes

64 **10** **Partner**

65 **11** **Literatur**

Vorwort

Naturgefahren stellen eine Bedrohung für Menschen, Sachwerte und Umwelt in der Schweiz dar. Im Kontext dieser Publikation bedeutsam sind insbesondere die gravitativen Gefahren (z. B. Hochwasser, Rutschungen, Lawinen) sowie indirekt auch meteorologische Ereignisse (z. B. Sturm und Hagel). Die direkte Gefährdung durch meteorologische und gravitative Naturgefahren wird infolge des Klimawandels, aber auch aufgrund des stetig wachsenden Siedlungsgebiets und seiner immer dichteren Bebauung zunehmen. Starkregenereignisse und intensivere Regenperioden, die zu lokalen Hochwassern bzw. zu Rutschungen und Erosionsphänomenen führen, aber auch Gleitschneelawinen aufgrund von Temperaturveränderungen sind vermehrt zu erwarten.

Die Schweiz verfügt über eine lange Tradition bei der Errichtung von Schutzbauten. So ist es auch nicht verwunderlich, dass der Schweizer Lawinenschutz und mithin das umfangreiche Wissen zum Einsatz von Holz zu diesem Zweck zum Weltkulturerbe der UNESCO gehört. Die Aufnahme in die Liste erfolgte 2018 und unterstreicht das Zusammenspiel von traditionellem Wissen, Technologie und Volkskultur.

Die Konstruktion von Schutzbauten aus Holz wurde über die Jahrhunderte perfektioniert und mit den örtlich vorkommenden Baumarten realisiert.

Im schweizerischen Wald gibt es neben den oft verwendeten Holzarten Fichte und Tanne zudem Arten wie die Lärche und Edelkastanie, die sich aufgrund der natürlichen Dauerhaftigkeit ihres Holzes besonders für Schutzbauten eignen. Schweizer Holz ist aber auch Bestandteil innovativer Produkte wie etwa Holzwollevliese, die für den Erosionsschutz zum Einsatz kommen können.

In den letzten Jahrzehnten wurden neben Holz vielfach auch Baustoffe wie Stahl, Beton oder Kunststoffe für Schutzbauten eingesetzt. Diese haben aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften bei Schutzbauten durchaus ihre Berechtigung. Es empfiehlt sich, je nach Anwendungsfall, zu erwartendem Ereignis und gewünschter Nutzungsdauer einen Baustoff zu wählen, der alle technischen Anforderungen optimal erfüllt. Schutzbauten aus Rundholz überzeugen indessen grundsätzlich immer hinsichtlich Nachhaltigkeit, dies vor allem bei der Verwendung von lokalen Ressourcen und im Zusammenspiel mit ingenieurbiologischen Massnahmen.

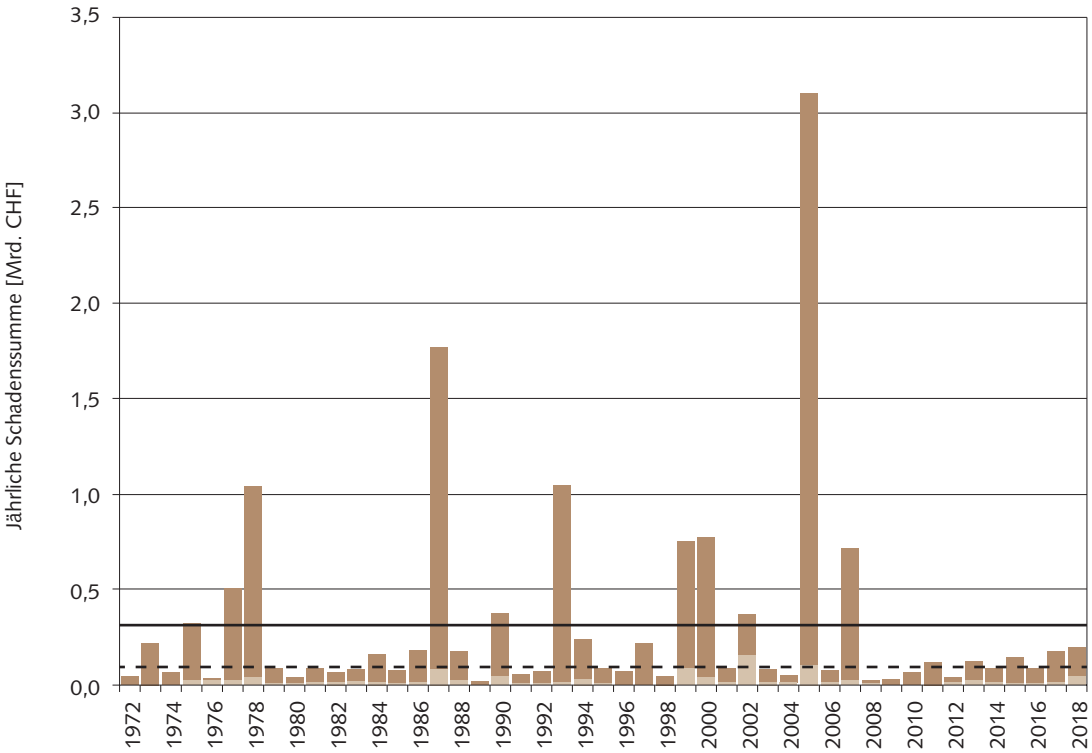
Das vorliegende Lignatec möchte den Einsatz von Holz bei Schutzbauten gegen Erosion, Rutschungen, im Wildbachverbau und im Lawinenschutz zusammenfassend beschreiben und erprobte Konstruktionen und deren Anwendung bekanntmachen. Daher richtet sich diese Publikation nicht nur an Fachleute der forstlichen Bautechnik, sondern auch an Planende in der Naturgefahrenprävention sowie Interessierte am Bauen mit Holz.

Bedanken möchte sich die Lignum bei allen Autoren und Partnern, die zum Gelingen dieser Lignatec-Ausgabe beigetragen haben.

Gunther Ratsch, Lignum Technik
Verantwortlicher Redaktor

1 Einleitung

Schweizweit führen gravitative Naturgefahren (z. B. Rutschungen, Murgänge, Hochwasser sowie Steinschlag und Lawinen) im Durchschnitt zu jährlichen Schäden in der Höhe von ca. 100 bis 300 Mio. CHF (vgl. Figur 1). [1] Dazu kommen noch die Schäden durch meteorologische/klimatologische (z. B. Hagel und Sturm) und tektonische Naturgefahren (z. B. Erdbeben). Da der Siedlungsraum immer intensiver genutzt wird und die Sachwerte gestiegen sind, haben die Schäden aufgrund von gravitativen Naturgefahren zwischen 1972 und 2007 erheblich zugenommen. Seit etwas mehr als 20 Jahren versucht man deshalb, den Auswirkungen von Naturgefahren mit Hilfe des integralen Risikomanagements zu begegnen. [2]

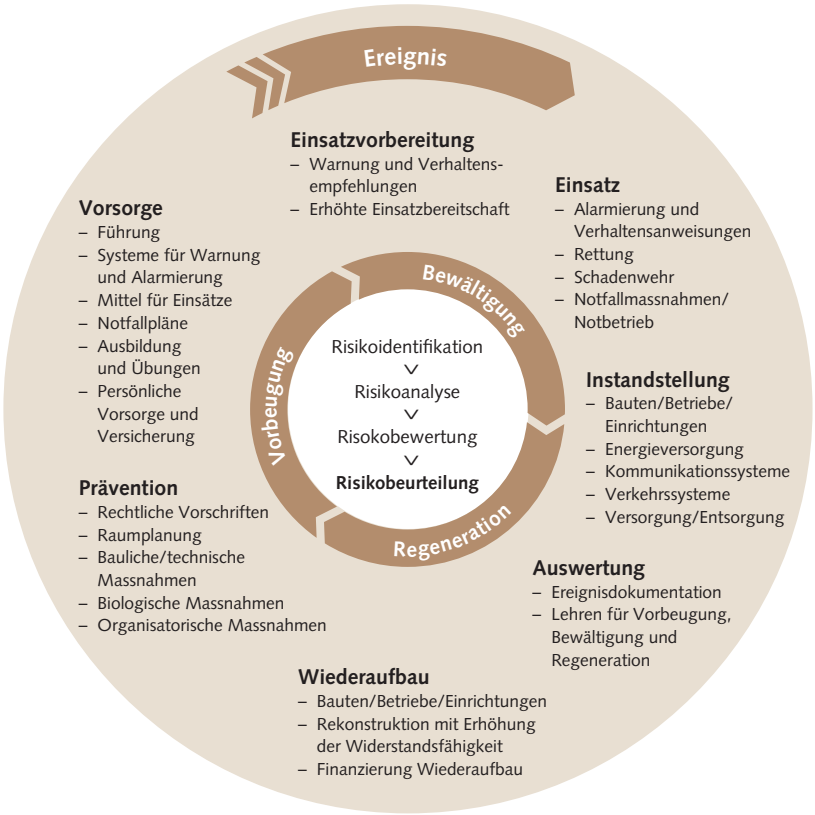


Figur 1
Entwicklung der jährlichen Schadenssummen durch Hochwasser, Murgänge, Rutschungs- und Sturzprozesse von 1972 bis 2018 (teuerungsbereinigt, Basis 2018). Arithmetisches Mittel (schwarze Linie, 306 Mio. CHF) und Median (gestrichelte Linie, 96 Mio. CHF), berechnet über den dargestellten Zeitraum, sind mit horizontalen Linien gekennzeichnet.

- Hochwasser/ Murgänge
- Rutschungs- und Sturzprozesse

1.1 Von der Gefahrenabwehr zum integralen Risikomanagement

Obwohl die Grundlagen für Naturgefahrenkataster und -kartierungen seit langer Zeit bestehen [3], gingen viele bis in die 1980er Jahre davon aus, dass man mit Verbauungen die gravitativen Naturgefahren in den Griff bekommen könne. Schutzbauten vermögen zwar in der Regel das Naturgefahrenrisiko zu reduzieren, doch es zeigte sich, dass sie meist keinen absoluten Schutz bieten und in Ausnahmefällen sogar negative Folgen haben können. Grund dafür ist meistens, dass Schutzbauten nicht für Extremereignisse oder für interagierende Naturgefahrenprozesse dimensioniert werden können. Dies kann zu Prozessverkettungen führen, etwa wenn Starkregen und flachgründige Rutschungen viel Geschiebe und Holz in die Gerinne eintragen, was zu Verklausungen und unerwarteten Überflutungen führen kann.
Während früher auf ein Ereignis die unmittelbare Schadenabwehr, die Instandstellung und allenfalls neue Verbauungen folgten, soll heute mit dem integralen Risikomanagement (IRM) eine ganzheitlichere Herangehensweise umgesetzt werden (vgl. Figur 2). Das IRM betrachtet alle Naturgefahrenprozesse, geht mit allen Risiken vergleichbar um und bezieht alle Arten von Massnahmen in die Massnahmenplanung ein. Im Zentrum des IRM steht der Risikokreislauf. Dieser beinhaltet die Vorbeugung, das eigentliche Ereignis, die Bewältigung sowie die Regeneration. Auf der Grundlage einer Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung sollen präventive Massnahmen Todesfälle und Sachschäden aufgrund von Naturereignissen verhindern. Zusätzlich stellt die Vorsorge sicher, wie im Krisenfall vorzugehen ist, wenn trotz präventiver Massnahmen keine genügend grosse Sicherheit erreicht werden kann.



Figur 2
Vereinfachtes Modell des integralen Risikomanagements.

1.2 Massnahmen im Rahmen des IRM

Die Massnahmen im Rahmen des IRM können den folgenden Bereichen zugeordnet werden:

- Raumplanung
- biologische Massnahmen
- baulich-technische Massnahmen
- organisatorische Massnahmen

Grundsätzlich wird als erstes mittels der Raumplanung versucht, die gefährdeten Räume in der Landschaft zu meiden oder das bestehende Risiko nicht zu erhöhen. In vielen Fällen ist dies in einem Land wie der Schweiz nicht möglich. Die Massnahmen, welche dann grossflächig zum Tragen kommen, sind die biologischen. Mehrheitlich betrifft dies den Schutzwald, aber auch ingenieurbiologische Massnahmen wie zum Beispiel Stützverbauungen aus Holz in Kombination mit Aufforstungen gehören hier dazu.

Laut dem Schweizerischen Landesforstinventar LFI [4] sind rund ein Drittel bzw. 1,32 Mio. ha der Schweizer Landesfläche mit Wald bedeckt, davon sind 49 % Schutzwald. Der Wald bildet somit eine grossflächige, grüne Infrastruktur mit einer wichtigen Schutzfunktion vor Naturgefahrenprozessen. [5] Wälder können Anrissen von Lawinen und flachgründigen Rutschungen vorbeugen, aber auch vor den Auswirkungen von Steinschlag schützen. Zudem reduziert der Wald die Ufer- und Oberflächenerosion in der Nähe von Wildbächen und vermindert damit auch Murganggefahren. Abhängig von der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Niederschlagsdauer und -intensität sowie der Grösse des Einzugsgebiets können Wälder sowohl die Eintrittswahrscheinlichkeit als auch die Intensität von Hochwasserereignissen verringern. Dadurch trägt der Wald vielerorts dazu bei, Naturgefahrenrisiken auf ein tragbares Mass zu senken. Dank der Kombination mit dem Schutzwald sind technische Massnahmen zur Abdeckung höherer Schutzansprüche oft kostengünstiger (tiefere Installations- oder Unterhaltskosten). An bestimmten Stellen machen technische Massnahmen überhaupt nur aufgrund des zusätzlichen Schutzes durch den Wald Sinn. [6]

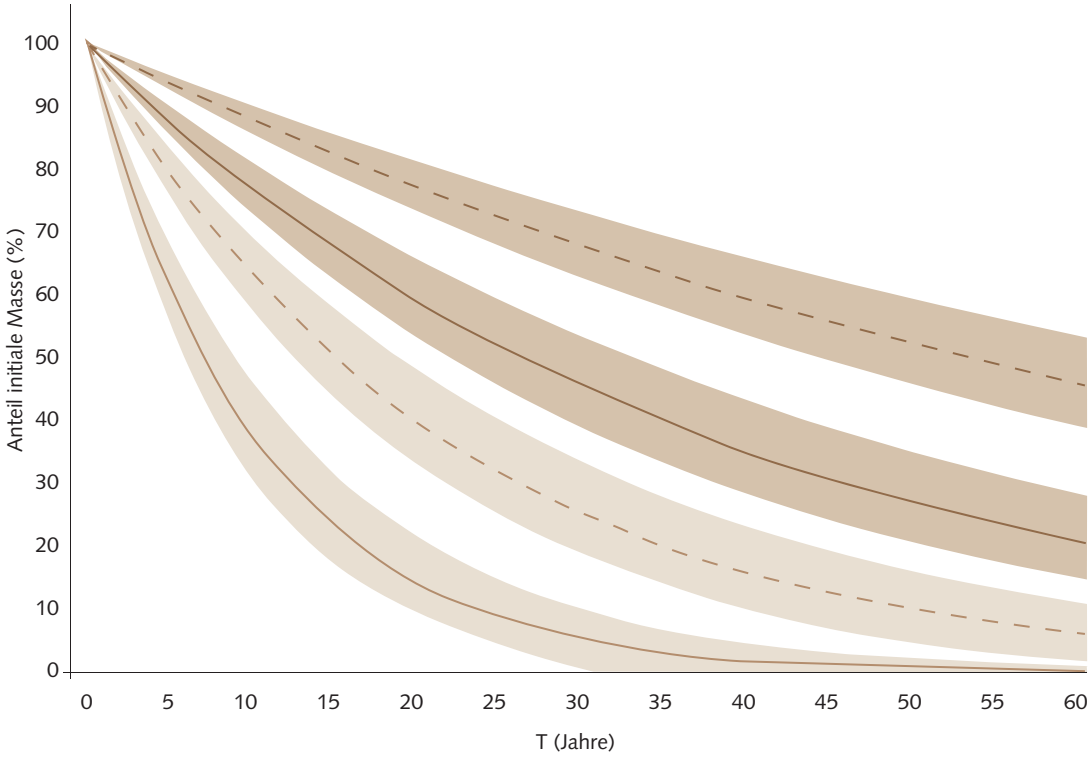


Figur 3
Querbäume und hohe Stöcke in einem Steinschlagschutzwald im Kanton Jura.

Im Rahmen des Schutzwaldmanagements wird oft mit quergefällten Stämmen (auch Querbäume genannt) und dem Belassen von hohen Stöcken gearbeitet (vgl. Figur 3). Das soll verhindern, dass sich die Schutzwirkung des Waldes aufgrund von waldbaulichen Eingriffen über mehrere Jahre reduziert. Bei solchen Eingriffen werden in der Regel Bäume wegen verschiedenster Gründe (z. B. Förderung der Verjüngung oder Verbesserung der Bestandesstruktur) gefällt; in der Folge nimmt die Stammzahl (Mass für die Dichte eines Waldbestandes) ab. Verschiedene wissenschaftliche Arbeiten haben gezeigt, dass die Querbäume eine mässige bis grosse Schutzwirkung haben (siehe dazu [7] und [8] betreffend Steinschlag oder [9] und Kapitel 7 betreffend Lawinen). Der effektive Wirkungsgrad des Schutzwaldes, unter Einschluss der Querbäume und hohen Stöcke, wird v. a. durch die bewaldete Hanglänge und die Menge an stehendem (Grundfläche oder Stammzahl und mittlerer Stammdurchmesser) oder liegendem Holz bestimmt (siehe z. B. [10]).

Eine Herausforderung bei der Schutzwaldbewirtschaftung ist die Nutzungsdauer der Querbäume, welche durch die Dauerhaftigkeit des Holzes bestimmt wird. Details dazu werden ausführlich im Kapitel 2 besprochen. Mehrere Forschungsarbeiten ([11] und [12]) weisen darauf hin, dass die natürliche Dekomposition des Holzes in Abhängigkeit von der Holzart, der mittleren Jahrestemperatur (MJT) sowie der Feuchtigkeit des Standorts zu einer exponentiellen Abnahme der Dichte und Festigkeit und dadurch zu einer Verringerung der Schutzwirkung führt. Wie Figur 4 zeigt, kann ein Buchenstamm bereits fünf Jahre nach dem Fällen schon fast 40 % seiner ursprünglichen Masse verloren haben. Bei einem Fichtenstamm wären es ca. 15 %.

Es ist evident, dass der Wald allein nicht überall in der Lage ist, das Naturgefahrenrisiko auf ein akzeptables Niveau zu reduzieren. Dies in erster Linie, weil der Gefahrenperimeter nicht ausreichend bestockt ist (z. B. in aktiven Lawinenschneisen und Murganggerinnen) oder weil er lokal zu wenig oder gar keine Wirkung hat (z. B. bei Überflutung von Gebieten entlang von grossen Flüssen). An solchen



Figur 4
Dekomposition von Buchen- und Fichtenstämmen im Laufe der Zeit für kalte und wärmere Standorte inkl. Streuungsbereich, MJT = mittlere Jahrestemperatur (Grafik auf Basis von Daten aus [11] und [12]).

Stellen kommt der dritte Massnahmentyp, die baulich-technischen Massnahmen, zum Tragen. Bekannte Beispiele sind Flussdämme, Geschiebesammler oder Steinschlagnetze. Obwohl oft mit Beton, Stahl, Blöcken und Erdmaterial gearbeitet wird, spielen Holzverbauungen hier auch eine wichtige Rolle. Bekannte Beispiele sind Lawinenverbauungen aus Holz und viele andere, welche in den folgenden Kapiteln erläutert werden, aber Holz wird z. B. auch in Palisaden gegen Steinschlag verwendet. Im heutigen risikobasierten Management von Naturgefahren muss die Kostenwirksamkeit einer Schutzmassnahme vor ihrer Realisierung geprüft sein. Diese wird ausgedrückt mit dem Verhältnis zwischen dem Nutzen einer Massnahme (der jährlichen Risikoreduktion) und den jährlichen Kosten der Massnahme (den gesamten Bau- und Unterhaltskosten geteilt durch die Nutzungsdauer der Massnahme). Bei klassischen baulich-technischen Massnahmen (Schutzbauten, welche mit Beton, Stahl, Blöcken und Erdmaterial gebaut sind) ist die Kostenwirksamkeit wegen der hohen Baukosten nicht immer gegeben. Mit Holz realisierte Massnahmen sind zwar meist mit tieferen Baukosten verbunden, aber auch mit einer kürzeren Nutzungsdauer. Die Frage der Kostenwirksamkeit muss somit von Fall zu Fall geprüft werden.
Wenn die Kostenwirksamkeit für baulich-technische Massnahmen ungenügend ist, können organisatorische Massnahmen die Risiken reduzieren. Das kann z. B. die Überwachung des Gefahrenprozesses in Kombination mit der Sperrung von Strassen und der Evakuation von Wohngebieten bedeuten. Andere Beispiele sind Objektschutzmassnahmen wie Dämmelemente aus wassergefüllten Schläuchen entlang von Flüssen, die künstliche Lawinenauslösung oder das Sprengen von Felspaketen, welche z. B. mit Radar überwacht wurden.

1.3 Von Querbäumen bis zur Ingenieurbiologie

Wenn man darüber spricht, Naturgefahren mit Holz zu begegnen, begibt man sich in verschiedene Fachbereiche, in denen unterschiedliche Definitionen und Begriffe verwendet werden. So fängt es schon an beim einfachen Querbaum und der Diskussion, ob ein solcher als Werk betrachtet werden kann. Aus einer Aktennotiz der Abteilung Recht des Bundesamts für Umwelt BAFU von 2021 bezüglich Haftungsfragen bei Querbäumen im Schutzwald folgt, dass Querbäume grundsätzliche keine Werke im Sinne von Art. 58 des Obligationenrechts bilden, sofern sie – wie in der Praxis häufig – nur an die Baumstrünke angelehnt werden. Nur wenn sie durch aktives Eingreifen des Menschen eine feste direkte oder indirekte Verbindung mit dem Boden aufweisen, können sie als Werk qualifiziert werden. Aus Gründen der Verhältnismässigkeit und der Zumutbarkeit scheinen bei Querbäumen im Vergleich zu den klassischen baulich-technischen Schutzbauten vereinfachte und abgeschwächte Kontrollintervalle zielführend und sachgerecht.
Mit Holz gebaute Werke wie Dreibeinböcke, Holzkästen oder Stützverbauungen können als temporäre Schutzmassnahmen definiert werden. Solche Holzkonstruktionen, wo Holz als inertes Material wirkt, werden auch oft mit ingenieurbiologischen Massnahmen kombiniert. Die Ingenieurbiologie berücksichtigt in Grunde genommen nur lebende Baustoffe, also Saatgut, Pflanzen, Pflanzenteile und Pflanzengesellschaften. [13] Ingenieurbiologie ist Teil des ‹ecological engineering› (international auch ‹Eco-engineering› genannt). Dieser Ansatz, folgt dem Gedanken, Ökosysteme für Anwendungen zu entwerfen, zu bauen und zu betreiben. Es findet also eine Steuerung von Ökosystemen mit ingenieurbasierten Methoden statt, wobei das Ökosystem aus einer Lebensgemeinschaft von Organismen und ihrer unbelebten Umwelt besteht. In diesem Sinne können Schutzwaldbewirtschaftung, aber auch Stützverbauungen aus Holz in Kombination mit Aufforstungen als ‹Eco-engineering› betrachtet werden. Solche Eco-engineering-Massnahmen werden heute im internationalen Kontext als Ökosystem- oder naturbasierte Lösungen für die Reduktion von Naturgefahrenrisiken definiert (siehe [14]). Zurzeit ist dieser Begriff weltweit in aller Munde.

2 Dauerhaftigkeit des Baustoffs Holz

2.1 Allgemeines

Verschiedene Umwelteinflüsse schränken die Verwendung von Holz im Aussenbau ein: mechanische Beanspruchungen, klimatische Einflüsse, aber auch Lebewesen wie Nager und Insekten, Bakterien und Pilze. Für den biologischen Holzabbau besonders bedeutsam sind die holzzersetzenden Pilze, welche natürlicherweise für die Abnahme der Holzsubstanz verantwortlich sind. Damit die Funktionalität von Schutzbauwerken aus Holz möglichst lange erhalten bleibt, ist es notwendig, den holzabbauenden Pilzen möglichst widrige Lebensbedingungen entgegenzusetzen. Wichtig ist zudem, Holzarten mit einer möglichst hohen natürlichen Dauerhaftigkeit zu verwenden. Die nachfolgenden Angaben sind mehrheitlich der Publikation ‹Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau› [15] entnommen.

2.2 Biologischer Holzabbau

Holz besteht zu 41–50 % aus Zellulose sowie je nach Holzart zu 25–40 % Hemizellulose und 18–32 % Lignin. Zu den Mikroorganismen, die diese Bausteine auftrennen und abbauen können, gehören einerseits Bakterien und andererseits verschiedene holzabbauende Pilze: Schimmel- und Bläuepilze sowie Moder-, Braun- und Weissfäulepilze. Wichtige Voraussetzungen für den Holzabbau sind Sauerstoff und Wasser. Eine Grundregel besagt, dass Holz entweder im wassergesättigten Zustand oder aber in getrocknetem Zustand mit einer Holzfeuchte <20 % (für trocken verbautes Holz) über längere Zeit konserviert werden kann. Zu den wichtigen Einflussgrössen auf die Pilzaktivität gehört neben der Wasserverfügbarkeit unter anderem auch die Temperatur: die Minimumtemperatur liegt beim Gefrierpunkt, das Optimum liegt je nach Pilzart zwischen 20 und 40 °C; darüber beginnt die Denaturierung. Das Ausmass ist ausserdem auch von der Expositionsdauer abhängig.

2.3 Gebrauchsklassen (GK)

Abhängig von der Exposition gegenüber einem Feuchteeintrag und der jeweiligen Nutzungssituation können Bauteile aus Holz gemäss SN EN 335 [16] in der Schweiz in vier, für Schutzbauten aus Rundholz in zwei relevante Gebrauchsklassen (GK3 und GK4) eingeteilt werden (vgl. Tabelle 1). Die Einteilung von Bauteilen aus Holz in Gebrauchsklassen dient der Wahl einer geeigneten Holzart. So werden im Aussenbereich verwendete Bauteile aus Holz (Holzfeuchte ständig über 20 %) in die Gebrauchsklasse 4 eingeteilt. Die in den Holzbautabellen 1 [17] gemachten Empfehlungen zur Verwendung bestimmter Holzarten in den jeweiligen Gebrauchsklassen sind für Schutzbauten aus Rundholz nur bedingt anwendbar.

2.4 Äussere und innere Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit von Holz

Die Dauerhaftigkeit kann als natürliche Widerstandsfähigkeit des Holzes gegenüber holzzerstörenden Organismen bezeichnet werden. [18] Neben Insekten sind dabei insbesondere die Pilze zu erwähnen. Die Dauerhaftigkeit ist in einem grossen Mass abhängig vom Vorhandensein oder Fehlen bestimmter Verkernungsstoffe. [19] Insbesondere das obligatorische Farbkernholz weist durch die in den Zellwänden inkrustierten Sekundärmetaboliten eine erhöhte Dauerhaftigkeit auf. Das Splintholz der verschiedenen Baumarten unterscheidet sich diesbezüglich nur unwesentlich und ist allgemein wenig resistent (vgl. Tabelle 2). Damit ergibt sich für die Reihenfolge mit abnehmender Pilzresistenz die folgende Faustregel:

1. Kernholz obligatorischer Farbkernholzarten Laubholz (es gibt Ausnahmen, z. B. Esche, Ulme)
2. Kernholz obligatorischer Farbkernholzarten Nadelholz
3. Holzarten ohne obligatorische Farbkernholzbildung

Für viele Schutzbauten – vor allem im Wasser- und Hangverbau – werden oftmals die leicht verfügbaren Holzarten Fichte und Tanne verwendet. Da diese Arten nicht zu den dauerhaftesten gehören, ist bei ihrer Verwendung der geforderten Nutzungsdauer der Bauwerke, dem konstruktiven Holzschutz (vgl. auch [20]) sowie der Zustandsbeurteilung und dem Unterhalt grosses Gewicht

Tabelle 1
Relevante Gebrauchsklassen bei verbautem Holz und Möglichkeiten des Auftretens von Schadorganismen nach SN EN 335 [16] und [17] für die Schweiz.

Gebrauchsklasse	Allgemeine Gebrauchssituation		Holzfeuchte [2]	Mögliches Auftreten von Schadorganismen [3]
1 [1]	Innenbereich, trocken		trocken, ständig unter 20 %	selten holzzerstörende Insekten
2 [1]	Innenbereich [4] oder unter Dach, nicht der Witterung ausgesetzt, Möglichkeit der Kondensation		gelegentlich über 20 %	wie Gebrauchsklasse 1 holzverfärbende Pilze
3.1	Aussenbereich, ohne Erdkontakt, der Witterung ausgesetzt	eingeschränkt feuchte Bedingungen [5]	gelegentlich bis häufig über 20 %	wie Gebrauchsklasse 2 holzzerstörende Pilze (Braun-/Weissfäule)
3.2		anhaltend feuchte Bedingungen [6]	häufig bis vorwiegend über 20 %	wie Gebrauchsklasse 2 holzzerstörende Pilze (Braun-/Weissfäule)
4	Aussenbereich, in Kontakt mit Erde oder Wasser		ständig über 20 %	wie Gebrauchsklasse 3 holzzerstörende Pilze (Moderfäule)/Bakterien

[1] Die Gebrauchsklassen 1 und 2 haben für die Anwendung von Schutzbauten keine Bedeutung.

[2] Die Begriffe ‹gelegentlich›, ‹häufig›, ‹vorwiegend› und ‹ständig› zeigen eine zunehmende Beanspruchung an, ohne dass hierfür wegen der sehr unterschiedlichen Einflussgrössen genaue Zahlenangaben möglich sind.

[3] Ein Schutz gegen alle aufgeführten Organismen ist nicht unbedingt erforderlich, da diese nicht unter allen Gebrauchsbedingungen an allen geografischen Standorten vorkommen, wirtschaftlich nicht von Bedeutung sind oder nicht in der Lage sind, bestimmte Holzprodukte aufgrund des spezifischen Zustands des Produkts zu befallen.

[4] Wenn bei Innenanwendungen Bedingungen mit regelmässiger starker Befeuchtung, z. B. in Nassbereichen und in nicht belüfteten Kellern (durch Spritzwasser oder starke Kondensation), zu erwarten sind, ist die Situation der entsprechenden Gebrauchsklasse 3.1 oder 3.2 zuzuordnen.

[5] Das Wasser kann sich nicht ansammeln. Das Holz oder das Holzprodukt bleibt nicht längere Zeit nass.

[6] Bauteile, bei denen über mehrere Monate Ablagerungen von Schmutz, Erde, Laub u. ä. zu erwarten sind, sowie Bauteile mit besonderer Beanspruchung sind in Gebrauchsklasse 4 einzustufen.

beizumessen. Verschiedene Autoren schätzen Nadelholz mit schmalen Jahrringen als dauerhafter ein ([21], [15]). Der Jahrringbau wird von den Wuchsbedingungen beeinflusst, denen ein Baum ausgesetzt ist. Dazu gehören der Standort, die soziologische Stellung im Bestand, das Alter des Baumes sowie die waldbaulichen Massnahmen.
Bezüglich Standort ist einerseits die Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit massgebend, andererseits spielen Klima, Höhenlage, Exposition und Länge der Vegetationsperiode eine wichtige Rolle. Vereinfacht gilt: Je härter die Lebensbedingungen für den Baum sind, desto langsamer entwickelt er sich und desto enger sind die Jahrringe. Engringiges Holz kann deshalb beispielsweise in höheren Lagen erwartet werden, aber auch von unterdrückten bis mitherrschenden Bäumen sowie auf mässig bis schlecht wüchsigen Standorten. Neben der Wahl einer geeigneten Holzart könnte theoretisch also auch durch die gezielte Auslese der Bäume beim Holzschlag ein möglichst optimaler Baustoff für Schutzbauwerke aus Holz bereitgestellt werden. Allerdings weist Nötzli [22] darauf hin, dass die Frage nach der Dauerhaftigkeit von verbautem Holz in Abhängigkeit vom Jahrringbau differenziert betrachtet werden muss und weitere Forschungsanstrengungen zu diesem Thema nötig sind.
Oft stellt sich die Frage, ob Holz für Schutzmassnahmen vor dem Verbau entrindet werden soll. Im Lawinen- und Gleitschneeschutz wird in der Regel entrindetes Holz eingesetzt. Bei der Verwendung im Hochwasserschutz kann sowohl Holz in Rinde als auch ohne Rinde verbaut werden. Entrindetes Holz erweist sich jedoch gemäss einer Langzeituntersuchung an Holzkastensperren aus Fichten- und Tannenholz in der Tendenz als vergleichsweise weniger dauerhaft. [27] Besonders eine maschinelle Entrindung mit daraus resultierenden Holzkörperverletzungen wird dabei als nachteilig vermutet.

Tabelle 2
Natürliche Dauerhaftigkeit von einheimischen Holzarten nach SN EN 350 [23] mit einer Einordnung der Nutzungsdauer nach [19].

Nutzungsdauer[1)]	Handelsname	Kurzzeichen nach EN 13556	Wissenschaftlicher Name	Pilze[2)]	Anobium[3)] (Nagekäfer)
15–25 Jahre	Robinie	ROPS	Robinia pseudoacacia	DC 1–2	DC D
	Edelkastanie	CTST	Castanea sativa	DC 2	DC D
	Eibe	TXBC	Taxus baccata	DC 2	DC D
	Eiche	QCXE	Quercus robur	DC 2–4	DC D
10–15 Jahre	Lärche	LADC	Larix decidua	DC 3–4	DC D
	Douglasie	PSMN	Pseudotsuga menziesii	DC 3–4	DC D
	Föhre	PNSY	Pinus sylvestris	DC 3–4	DC D
5–10 Jahre	Fichte	PCAB	Picea abies	DC 4	DC S
	Weisstanne	ABAL	Abies alba	DC 4	DC S
	Ulme	ULGL	Ulmus glabra	DC 4	DC S
	Esche	FXEX	Fraxinus excelsior	DC 5	DC S
	Pappel	PONG	Populus alba	DC 5	DC S
<5 Jahre	*Splintholz*			DC 5	DC S
	Erle	ALIN	Alnus incana	DC 5	DC D
	Buche	FASY	Fagus sylvatica	DC 5	DC S
	Hagebuche	CPBT	Carpinus betulus	DC 5	–
	Birke	BTXX	Betula pendula	DC 5	DC D
	Ahorn	ACPS	Acer pseudoplatanus	DC 5	DC D
	Weide	SAXX	Salix spp.	DC 5	–

1) Dauerhaftigkeit einiger einheimischer Holzarten, eingeteilt in Klassen mit ungefährer Nutzungsdauer von Holzstäben 5 × 5 cm in Bodenkontakt (nach Findlay 1962 [24], in Bosshard 1984 [19])
2) natürliche Dauerhaftigkeit gegen Pilze: DC 1 = sehr dauerhaft bis DC 5 = nicht dauerhaft nach SN EN 350
3) natürliche Dauerhaftigkeit gegen Insekten: DC D = dauerhaft, DC S = nicht dauerhaft nach SN EN 350



Figur 5 (links)
Bei Edelkastanienrundholz ist die Verfügbarkeit (Querschnitte, Längen) zu prüfen.



Figur 6 (rechts)
Lawinenverbauung aus Edelkastanie.

2.5 Dauerhafte Holzarten und ihr Vorkommen im Schweizer Wald

Wie in Tabelle 2 ersichtlich, gibt es vier einheimische Holzarten, die der Dauerhaftigkeitsklasse 2 (dauerhaft) zugeordnet werden: Robinie, Kastanie, Eibe und Eiche. Dabei ist zu erwähnen, dass der Anteil der Robinie im Schweizer Wald nur ca. 0,1 % beträgt (LFI [4]). Der Anteil der Eiche am gesamten Baumbestand in der Schweiz beträgt 2 %, der Anteil der Edelkastanie 1 %. Betrachtet man die regionale Verteilung, so beträgt der Anteil der Edelkastanie auf der Alpensüdseite 15 % und der Anteil der Eiche im Mitteland 5 %. [25] Hölzer wie die Lärche mit einem Anteil von 5,5 %, die Douglasie mit einem Anteil von 0,3 % und die Föhre mit einem Anteil von 2,7 % können ebenfalls zu den dauerhafteren Holzarten gezählt werden. [4] Im Sinne der Nachhaltigkeit (vgl. Kapitel 8) empfiehlt es sich, möglichst regionales Holz zu verwenden, damit Transportdistanzen minimiert werden können.

2.6 Kriterien für die Verwendung von Holz für Schutzbauwerke

Der Holzabbau beziehungsweise die Verminderung der Holzfestigkeit aufgrund von holzzersetzenden Pilzen kann entweder mittels Nasslagerung (Sauerstoffentzug) oder Trocknung (Wasserentzug) begrenzt werden. Auch durch Imprägnierung kann die Dauerhaftigkeit erhöht werden, wobei heutzutage aus ökologischen Gründen kaum mehr imprägniertes Holz für Schutzbauwerke eingesetzt wird. Besonders schnell schreitet der Holzabbau unter wechselfeuchten Bedingungen voran, beispielsweise im Übergangsbereich Luft/Boden.

Schutzbauwerke aus Holz kommen an verschiedenen Orten zum Einsatz:

- für Hangsicherungen und Rutschungssanierungen im Hangverbau (siehe Kapitel 4 und 5)
- für Entwässerungen und Hochwasserschutz in Wildbacheinzugsgebieten (siehe Kapitel 6)
- zum Schutz gegen Lawinen und Gleitschnee (siehe Kapitel 7)

Entsprechend ihrem Verwendungszweck sind die Umgebungsbedingungen am Werkstandort sehr unterschiedlich. Während bei Verbauungen im Lawinen- und Gleitschneeschutz für eine lange Lebensdauer aus obengenannten Gründen möglichst trockene Verhältnisse angestrebt werden, müssen die Bestrebungen im Wasserbau auf eine andauernd hohe Holzfeuchte ausgerichtet sein. Besonders gefährdet – und entsprechend zu schützen – sind Bauteile in wechselfeuchten Bedingungen. Bei Lawinen- und Gleitschneeschutzmassnahmen kommen diese vor allem in Übergangsbereichen z. B. von Stützen zum Boden vor. Bei Bachsperren sind es die Sperrenflügel und seitlichen Einbindungen, welche nicht ständig in Wasserkontakt sind. Analog kann bei verbautem Holz in dauernd wassergesättigten Gleyböden mit einer grösseren Nutzungsdauer gerechnet werden als in wechselfeuchten Böden wie beispielsweise den Pseudogleys. Bei Holzverbauungen in Wildbächen haben sich neben der Wassersättigung auch die Höhenlage und die Exposition als wichtige Faktoren herausgestellt: An Bauwerken in tieferen Lagen und in südexponierten Gebieten schritt der Festigkeitsverlust schneller voran ([15], [26]). Für die Regulierung des Klimas respektive zum Schutz vor zeitweiliger Austrocknung empfiehlt sich die Beschattung der Verbauung durch Anpflanzen von Ufervegetation. Im Hangverbau sollten die Bauwerke möglichst vollständig mit Erdmaterial eingedeckt und bepflanzt werden. Für Bauteile, bei denen eine Eindeckung nicht möglich ist, muss mit einer reduzierten Nutzungsdauer gerechnet werden.
Bei guten Voraussetzungen können Schutzmassnahmen aus Holz ihre Funktion sehr lange erfüllen. Zum Beispiel wurden in Plaffeien FR bis zu 75-jährige und in Gams SG bis zu 100-jährige Bachsperren mit befriedigendem Gesamtzustand vorgefunden. [15], [26] Entscheidend für eine lange Nutzungsdauer sind jedoch nicht nur möglichst dauerhaftes Holz, sondern auch eine geeignete bauliche Konzeption, Gestaltung und Verarbeitungsqualität, eine nicht zu extreme mechanische Beanspruchung sowie insbesondere auch dauernder Unterhalt und Überwachung der Bauwerke.

2.7 **Fallbeispiel einer Sperrentreppe in einem Wildbach**

Einige der oben erwähnten Zusammenhänge werden nachfolgend am Beispiel einer Untersuchung der Eidg. Forschungsanstalt WSL an Wildbachsperren aus Holz (Fichte, Tanne) verdeutlicht: In Hergiswil NW wurde 1996 eine Sperrentreppe aus 15 doppelwandigen Holzkastensperren erstellt. Der Zustand der Werke wird seither regelmässig dokumentiert. [27] Drei Jahre nach Fertigstellung wurden an den Sperren die ersten Fruchtkörper von Fäulepilzen beobachtet. In den nachfolgenden Jahren kamen insbesondere im Einbindungsbereich des obersten Längsholzes weitere Pilze dazu, und im Verlaufe der Zeit liessen sich insgesamt 18 verschiedene Pilzarten unterscheiden.



Figur 7
24 Jahre alte Wildbachsperre aus Holz (Hergiswil NW) mit beginnender Holzzersetzung im wechselfeuchten Bereich rechts unter der Verlandung und dem Sperrenflügel.

Die Festigkeit des Holzes wurde regelmässig mit einem qualitativen Verfahren beurteilt. Prüfgrösse war dabei die Eindringtiefe eines Schraubenziehers. Erste Stellen mit beginnender Holzzersetzung wurden fünf Jahre nach dem Bau entdeckt. Nach zehn Jahren wurden bei etwa der Hälfte der Sperren vermorschte Bereiche registriert, und bei der letzten Erhebung im November 2020, also 24 Jahre nach dem Bau, waren alle Sperren von einzelnen lokalen Faulstellen betroffen. In den wechselfeuchten Randbereichen der Bauwerke war die Holzfestigkeit weitaus häufiger reduziert als in den ständig benetzten Abflussbereichen. Generell traten die Faulstellen überwiegend im oberen Bereich auf (vgl. Figur 7). Die dauernd wassergesättigte Basis der Sperre hingegen blieb praktisch frei von Fäulnis. Bei allfälligen Instandstellungsmassnahmen könnten deshalb die unteren Lagen als Fundament belassen und die stärker abgebauten oberen Lagen ersetzt werden. Insgesamt ist festzuhalten, dass nach 24 Jahren trotz den festgestellten Anzeichen lokaler Holzzersetzung alle Werke immer noch voll funktionstauglich waren. Einzig bei einem Werk wurde eine leichte Absenkung der Sperrenflügel festgestellt.

3 Normative Ansätze und Hinweise zur Bemessung von Schutzbauten aus Rundholz

3.1 Allgemeines

In der Praxis werden die hier behandelten Holztragwerke in der Regel anhand von Bautypenzeichnungen mit konstruktiven Vorgaben zu den Abmessungen der Tragwerksteile errichtet (siehe dazu Kapitel 4, 5, 6 und 7).
Bei Bauwerken, die sich am Rande der Regelausführungen bewegen oder in geotechnisch sensiblen Bereichen errichtet werden, sollte die Tragfähigkeit gesondert nachgewiesen werden. Auch bei der Entwicklung von neuen oder der Optimierung bestehender Bautypenzeichnungen kann es erforderlich sein, die Bauteile des Tragwerks statisch zu bemessen. Schutzbauten aus Rundholz (Sperren, Stützwände, Hangverbauungen) zählen zu den Bauwerken mit Erdkontakt. Daher ist bei der Bemessung eine Überprüfung der Gesamtstabilität, des Baugrundes und der Tragwerksteile zu berücksichtigen. In der forstlichen Bautechnik haben sich dafür in Anlehnung an die Norm SIA 267 [28] auch die Begriffe der äusseren und inneren Tragsicherheit etabliert. Nach Norm SIA 260 ‹Grundlagen der Projektierung von Tragwerken› [29] sind für die Nachweise der Tragsicherheit vier Grenzzustände zu betrachten:

- Typ 1 betrifft die Gesamtstabilität (äussere Tragsicherheit). Bei der Gesamtstabilität bzw. äusseren Tragsicherheit werden Versagenszustände im umliegenden Baugrund betrachtet. Dazu zählen die Nachweise Kippen und Gleiten.
- Typ 2 betrifft den Tragwiderstand des Tragwerks oder eines seiner Teile (innere Tragsicherheit). Bei der inneren Tragsicherheit werden Versagenszustände im Holztragwerk betrachtet. Dazu zählen Versagen durch Bruch, übermässige Verformungen, Umwandlung des Tragwerks in einen Mechanismus oder Verlust der Stabilität (z. B. Nachweise infolge von Biege- und Schubbeanspruchung oder Stabilitätsnachweise von Druckstäben). Zusätzlich sind die Verbindungen und Verbindungsmittel zu bemessen.
- Typ 3 betrifft den Tragwiderstand des Baugrundes (Hangrutschung, Böschungsbruch, Geländebruch). Bei Bauwerken an Böschungen ist z. B. die Scherfestigkeit des Bodens infolge horizontaler und vertikaler Einwirkungen nachzuweisen.
- Typ 4 betrifft die Ermüdungsfestigkeit des Tragwerks oder eines seiner Teile und bezeichnet den Tragwiderstand bezüglich oft wiederholter Einwirkungen. Er hat für den Nachweis von Schutzbauten aus Rundholz keine Bedeutung.

3.2 Normative Grundlagen

Die Norm SIA 260 [29] legt die Aspekte der Ausführung, Nutzung und Erhaltung von Tragwerken fest. Da es sich bei Schutzbauten aus Rundholz um Tragwerke handelt, die wiederum einige Besonderheiten aufweisen, sind die Tragwerksnormen sinngemäss anzuwenden (vgl. Norm SIA 260 Ziffer 0.1.3 und 0.1.4). [29] Die Nutzungsdauer von Schutzbauten aus Rundholz ist projektspezifisch festzulegen. Angaben zu den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit werden nicht behandelt, da diese für Schutzbauten aus Rundholz nur von untergeordneter Bedeutung sind. Im folgenden werden die relevanten Normen für die Bestimmung der Einwirkungen und Bemessung für die Schweiz wiedergegeben. Bei fehlenden normativen Grundlagen wird auf ausländische Normen verwiesen.

3.3 Normen zur Ermittlung von Einwirkungen

Für die Bemessung von Schutzbauten aus Rundholz sind die ständigen und veränderlichen Einwirkungen unter Berücksichtigung der Grenzzustände mit den dazugehörigen Lastbeiwerten (vgl. Norm SIA 260 Tabelle 1 [29]) zu ermitteln. Auf eine Berücksichtigung der aussergewöhnlichen Einwirkung Erdbeben kann bei der Bemessung von Schutzbauten aus Rundholz der Bauwerksklassen I und II (z. B. Stützbauwerke oder Böschungen im Bereich von Verkehrswegen mit erheblicher Bedeutung) unter Berücksichtigung der Einschränkungen gemäss Norm SIA 267 Ziffer 7.2.3 [28] verzichtet werden.

3.3.1 Stützbauwerke und Hangverbauungen

Für Stützbauwerke und Hangverbauungen finden sich die Beanspruchungen aus Erddrücken und Oberflächenlasten in der Norm SIA 261 ‹Einwirkungen auf Tragwerke›. [30] Nach Norm SIA 261/1 ‹Einwirkungen auf Tragwerke – Ergänzende Festlegungen› [31] sind Einwirkungen infolge gravitativer Naturgefahren mit den geltenden Empfehlungen und Richtlinien des Bundes und mittels Gefahren- und Intensitätskarten zu bestimmen. Liegen keine Informationen vor, sind die Einwirkungen mit Hilfe einer Fachperson zu ermitteln (vgl. Norm SIA 261/1 Ziffer 2). Weitere Hinweise finden sich in [15] und [32].

3.3.2 Wildbachsperren

Für die Bemessung von Wildbachsperren sind keine detaillierten normativen Grundlagen in der Schweiz vorhanden. Der Nachweis der äusseren Tragsicherheit folgt dem üblichen Bemessungsvorgehen für Stützbauwerke nach Norm SIA 267. [28] Hinweise zur Bemessung und Ausführung geben die Dokumentationen ‹Holzkonstruktion im Wildbach – Hang- und Runsenverbau› [15] und ‹Wildbach- und Hangverbau›. [32]
In den österreichischen Normen finden sich Einwirkungsmodelle zu Beanspruchungen aus Wildbächen. So sind in der Technischen Regel ONR 24801 [33] Hinweise zu statischen und dynamischen Einwirkungen zu finden.

3.3.3 Lawinenverbauungen

Zur Bemessung von Lawinenverbauungen finden sich Einwirkungsmodelle zum statischen Schneedruck infolge der gleitenden und kriechenden Schneedecke in der Technischen Richtlinie ‹Lawinenverbau im Anbruchgebiet›. [34] Die Einwirkungsmodelle wurden primär für die Bemessung von Stützwerken entwickelt. Für die Bemessung von Gleitschneeschutzmassnahmen sind die Berechnungsformeln entsprechend anzupassen, wobei insbesondere der Einfluss von Randeffekten zu berücksichtigen ist. Die dort enthaltenen Modelle wurden in die ONR 24805 [35] entsprechend übernommen.

3.4 Normen zum Nachweis der Grenzzustände Typ 1 und 3

Die Grundlagen zur geotechnischen Bemessung von Stützbauwerken und Hangverbauungen (Tragwerks- und Bemessungsmodelle) sind in der Norm SIA 267 ‹Geotechnik› [28] abgebildet. Die Angaben zur Bemessung von Fundierungen der Lawinenverbauungen (Anker, Mikropfähle, Druckplatten) finden sich in der Technischen Richtlinie ‹Lawinenverbau im Anbruchgebiet› [34] und in der ONR 24806 ‹Permanenter technischer Lawinenschutz – Bemessung und konstruktive Ausgestaltung›. [36] Die Fundierung von Lawinenverbauungen aus Holz erfolgt in der Regel erfahrungsbasiert ohne statischen Nachweis gemäss der ‹Bauanleitung Gleitschneeschutz und temporärer Stützverbau›. [37]

3.5 **Normen zum Nachweis des Grenzzustandes Typ 2**

Mit der Norm SIA 265 ‹Holzbau› [38] und der Norm SIA 265/1 ‹Holzbau – Ergänzende Festlegungen› [39] können die Nachweise der inneren Sicherheit geführt werden.

Für die Bemessung von Schutzbauten aus Rundholz ist eine Einordnung des zur Verfügung stehenden Baustoffes in eine Festigkeitsklasse die Grundvoraussetzung für einen korrekten Nachweis der statischen Tragsicherheit der Bauteile. Kriterien zur visuellen Sortierung von Rundholz und der daraus folgenden Einordnung in eine der drei Festigkeitsklassen finden sich in der Norm SIA 265/1 Tabelle 5. [39] Dabei werden für Nadelholz zwei Festigkeitsklassen (C16 und C24) und für Laubholz eine Festigkeitsklasse (D30) abgebildet. Bei der Auswahl des Rundholzes ist besonders auf Reaktionsholz, Schrägfasrigkeit, Verformungen und Äste zu achten, welche die Tragsicherheit vermindern. Auch mechanische Schädigungen, die beim Fällen, beim Transport oder bei der Verarbeitung entstehen können, haben einen Einfluss auf die Festigkeit und sind zusätzlich bevorzugte lnfektionsherde für Pilze.

Kennzeichnende Eigenschaften und Bemessungswerte für visuell sortiertes Rundholz finden sich sinngemäss in der Norm SIA 265 Tabelle 8. [38] Die dort abgebildeten Eigenschaften und Bemessungswerte beziehen sich auf eine mittlere Holzfeuchte von 12 %. Da die Holzfeuchte einen grossen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften hat, sind die Bemessungswerte bei höheren Holzfeuchten durch Multiplikation eines Beiwertes abzumindern. Für aussergewöhnliche Bemessungssituationen dürfen die Bemessungswerte für Holzbauteile gemäss Norm SIA 265 Ziffer 2.2.6 [38] mit dem Beiwert zur Berücksichtigung der Zeitdauer der Einwirkung erhöht werden.

Durch den natürlichen Abbauprozess des Holzes verändert sich der statisch wirksame Querschnitt über die Zeit. Da diese Abbauprozesse stark von der Holzart, der Verwendung und dem umgebenden Makro- und Mikroklima abhängig sind, ist eine Abschätzung des rechnerisch anzusetzenden wirksamen Querschnitts schwierig. Eine stärkere Dimensionierung bis hin zu vermeintlicher Überdimensionierung kann Unsicherheiten auffangen, wobei zu grosse Querschnittsabmessungen aber auch zu einer verzögerten Austrocknung führen können. Hilfreich ist der Rückgriff auf Erfahrungen aus Verbauungsprojekten mit ähnlichen Umweltbedingungen. Je nach Anwendungsfall sind die Grundregeln des konstruktiven Holzschutzes zu berücksichtigen, wie z. B. der Schutz von Stirnholzflächen und das Vermeiden von stehendem Wasser auf den Bauteilen.

Hinweise zur Bestimmung von geometrischen Kenngrössen von Rundholz (Querschnittsflächen, Widerstandsmomente, Trägheitsmomente, Trägheitsradien) und Knickwiderstände für Nadelholz der Festigkeitsklasse C16/C24 finden sich in den Holzbautabellen 1. [17]

Hinweise zur Projektierung und Bemessung von Lawinenverbauungen aus Holz gibt die Technische Richtlinie ‹Lawinenverbau im Anbruchgebiet›. [34]

Für die Projektierung, Bemessung und konstruktive Durchbildung von Wildbachverbauungen kann die österreichische Technische Regel ONR 24802 [40] von Nutzen sein. In dieser Technischen Regel gibt es generelle Vorgaben zur Konstruktion von Sperren, jedoch keine spezifischen Ausführungen zu Holzbauwerken. Hinweise zur Bemessung von Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau finden sich auch in ‹Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau›. [15]

3.5.1 **Bemessung von Verbindungsmitteln**

Für die Bemessung von stiftförmigen Verbindungsmitteln (Nägeln, Schrauben, Bolzen) sind die Angaben der Norm SIA 265 [38] anzuwenden. Der Nachweis von Stahlteilen ist nach Norm SIA 263 [41] zu führen.

4 Holz zum Schutz vor Erosion

4.1 Prozess und Einwirkungen

Erosion ist ein Prozess, bei welchem eine Abtragung von Lockermaterial oder verwittertem Material durch externe Kräfte stattfindet. Als solche gelten die Effekte der Bewegung von Wasser, Feststoffen, Luft oder eine Kombination von diesen an der Kontaktfläche. In diesem Kapitel wird spezifisch die Erosion von Boden durch fallendes oder fliessendes Wasser behandelt. Diesbezüglich können fünf unterschiedliche Formen der Bodenerosion definiert werden.

Splash Erosion (Regentropfen-Erosion)
Dies ist das Anfangsstadium der Bodenerosion, welches durch die Kraft beim Aufprall der Regentropfen auf die Bodenaggregate entsteht (Splash effect). [42] Die Energie der Regentropfen kann punktuell viel höher sein als bei fliessendem Wasser und dadurch Bodenpartikel (mineralisches oder organisches Material) aus dem Verbund lösen, welche sonst nicht durch Wasserabfluss erodiert werden könnten. [43]

Interrill-Erosion
Dieser Begriff beschreibt die Mobilisierung und den Transport von Bodenpartikeln durch Oberflächenabfluss von Wasser auf kleiner räumlicher Skala. Weil die Abflussenergie limitiert ist, wird durch diesen Prozess vor allem Material transportiert, welches bereits durch Splash-Erosion mobilisiert wurde und im Wasser als Suspension verbleibt (feine organische Substanz, Ton- und Schlufffraktionen). Die Sand- und Kiesfraktionen können nach Akkumulation je nach Hangneigung auch in Form von murgangartigen Prozessen verlagert werden (engl. ‹soil slumps›).

Rillen-Erosion
Dieser Prozess ist durch eine kontinuierliche Wirkung von konzentriert fliessendem Wasser über längere Zeit (zum Beispiel während eines Niederschlagsereignisses) charakterisiert. Dieser Prozess kann eine Kombination von kontinuierlichem Sedimenttransport und unregelmässigen, murgangartigen Prozessen sein.

Graben-Erosion (gully)
Wenn die Erosionstiefe mehr als 0,3 m beträgt, entsteht ein Graben (engl. ‹gully›), in dem die erosiven Einwirkungen aufgrund des höheren spezifischen Abflusses stärker sind als in Rillen, aber durch die gleichen Prozesse verursacht werden.

Unterirdische Erosion (pipe erosion)
Bei vorwiegend unterirdischem Abfluss kann die hydraulische Erosion zur Bildung von grösseren, sogenannten Stromröhren führen. Diese können einstürzen und die Oberfläche aufreissen. [44]

Die Wirkung von Massnahmen auf einen bestimmten Prozess kann in Funktion der räumlichen Einwirkung differenziert werden. [45] So unterscheidet man zwischen einer Wirkung in der ‹Beitragszone› (zum Beispiel die Reduktion des Wasserabflusses aus der beitragenden Fläche des Einzugsgebietes), in der ‹Prozesszone› (zum Beispiel die Reduktion der Schleppspannung von Wasser durch Geländeabflachung im Bereich, wo die Erosion stattfindet) und in der ‹Auslaufzone› (zum Beispiel die Errichtung eines Geschiebesammlers im unteren Transit- oder Ablagerungsgebiet).

4.2 Übersicht und Funktionen von Bauwerken gegen Erosion

Die Anwendung von Bauwerken zum Schutz gegen oberflächliche Erosionsprozesse kann in der sogenannten ‹Prozesszone› (Prozessquelle) [45] in vier Typen unterteilt werden:

- Abschirmung der Bodenpartikel: Durch die Abdeckung des Bodens mit widerstandsfähigem Material und/oder einer dichten Pflanzendecke kann die kinetische Energie der Regentropfen verringert und damit die Wirkung von Splash-Erosion beseitigt werden.
- Erhöhung der Rauhigkeit: Dadurch wird die Abflussgeschwindigkeit reduziert und die Infiltration erhöht.
- Abflachung des Geländes: Durch den Bau von Holzschwellen oder Terrassen (Bermen) kann die Hangneigung lokal verkleinert werden, wodurch die Schleppspannung von fliessendem Wasser und die treibende Komponente der Gewichtskraft der Bodenpartikel reduziert werden. Die Funktion dieser Massnahmen entspricht zum Teil der Funktion von Bachsperren (siehe Kapitel 6).
- Abführung von Oberflächenwasser: Die gezielte Ansammlung und Abführung des Wassers reduziert die Infiltration in tiefere Schichten oder den natürlichen Abfluss in kritische Bereiche. Weil solche Massnahmen die Bildung von konzentriertem Abfluss und dadurch die Entstehung von Rillen- und Grabenerosion fördern können, sind je nach Situation entsprechende Sohlensicherungen notwendig.

4.3 Konstruktion und Anwendung von Erosionsschutzbauten aus Holz

4.3.1 Hang- und Böschungsschutzvliese aus Holzwolle

Hang- und Böschungsschutzvliese reduzieren die Erosion durch Regentropfen, die Oberflächenerosion und die Bildung von Rillenerosion. Gemäss Schweizer Holzwolle-Standard werden unter Holzwolle Fasern aus Holz mit Dicken von 0,1–0,25 mm sowie einer Breite von 1,3–8 mm verstanden. Die Holzwollefäden sind bis zu 500 mm lang und werden zusammen mit einem abbaubaren Netz aus Naturfasern versteppt. Eine Schweizer Produktion von Netzen aus heimischen Naturfasern (Zellulose) befindet sich in der Testphase. Es gibt verschiedene Holzwollevliese dieser Art, wobei für die Dauerhaftigkeit, Festigkeit und Stabilität der Holzwolle die individuelle Rezeptur der Holzartenmischung eine wichtige Rolle spielt (so ist Esche z. B. weniger dauerhaft als Tanne und Fichte). Holzarten wie Robinie, Kastanie und Lärche wurden ebenfalls bereits getestet und eingesetzt. Es gibt keine Bemessungskriterien für den Einbau von Erosionsschutzvliesen; dieser erfolgt nach Verlegeanleitung des Herstellers. Wichtig ist dabei, dass die Vliese überlappend und spannungsfrei verlegt werden. Die Spannung aus dem eigenen Gewicht zwischen den Fixierungspunkten darf nicht höher sein als der Zugwiderstand des Vlieses. [46] Während des Einbaus ist es wichtig, dass keine Hohlräume zwischen Vlies und Boden entstehen (vgl. Figur 8). Dafür können die Vliese mit Steckhölzern (am besten eignen sich Weidenarten) mit einem Durchmesser von 3–5 cm und einer Länge von 30–50 cm am Hang fixiert werden (oder Schweizer Buchenholzhaften resp. Stahlhaften bei geröllhaltigen Unterlagen). Je nach Situation wird das geeignete Saatgut für die Begrünung vor oder nach der Installation verwendet. Die Bestimmung der Vliese ist es, die Funktion der Vegetation während der Anwuchsphase zu übernehmen und Schutz zu gewährleisten (je nach Standort 2–3 Vegetationsperioden). Durch das hervorragende Wasserspeichervermögen, den guten Oberflächenabfluss und die Nischen zwischen den Fasern fördern die Holzwollevliese das Mikroklima (Feuchte, Temperatur) für eine schnelle Etablierung der Vegetation und mindern die Gefahr einer Unterspülung.





Figur 8
Erosionsschutz mit Böschungsmatten aus Holzwolle.

Die allgemeinen Vorteile der Holzwollevliese sind der sofort wirksame Schutz der Bodenoberfläche, die leichte Handhabung und der vollständige biologische Abbau der Vliese. Weiterhin werden die Holzwollevliese aus lokalen Hölzern – zertifiziert mit dem Label Schweizer Holz – hergestellt. Sie sind eine nachhaltige Alternative zu importierten Naturfaservarianten (Kokos, Jute), und es werden keine unerwünschten exotischen Organismen eingeschleppt. Das Resultat ist eine überzeugende Ökobilanz.

4.3.2 **Terrassen (Bermen)**

Terrassen werden gebaut, um die Neigung eines Hanges über grosse Bereiche zu reduzieren und die Steilpartien auf kleine Bereiche zu konzentrieren. Durch die Abflachung wird die Schleppspannung von fliessendem Wasser reduziert und damit die Oberflächenerosion vermindert. Für die Dimensionierung gilt das gleiche Prinzip wie für Bachsperren, wobei das Grenzgefälle als Kriterium für die Reduktion der Erosionsrate gilt. Diese Massnahmen sind nicht gedacht, um flachgründige Rutschungen zu stabilisieren, hingegen haben sie den Vorteil, die Bodenfeuchtigkeit zu erhöhen und damit die Etablierung der Vegetation auf trockenen Standorten zu fördern.

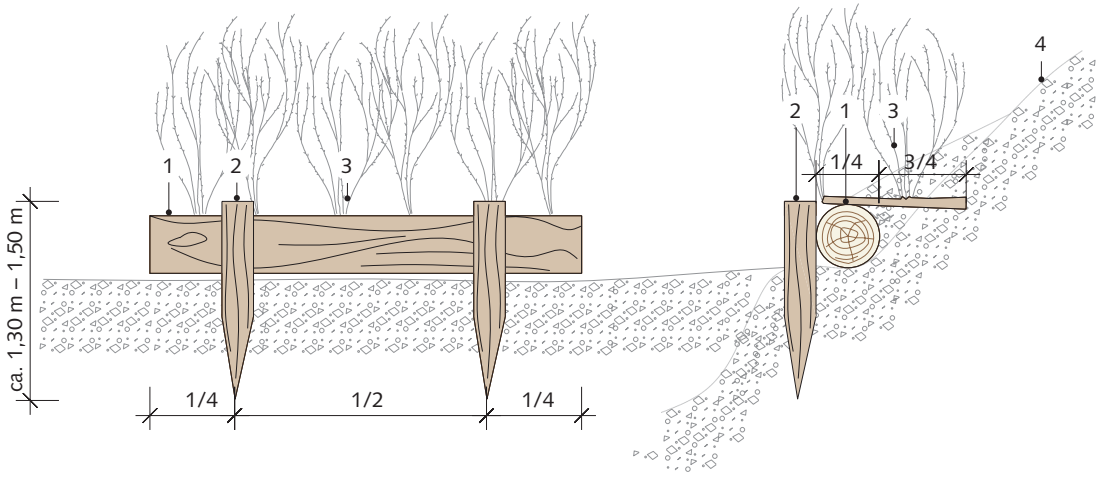
Die Terrassen können mit unterschiedlichen Holzkonstruktionen (vgl. Figur 9 und Figur 10) gebaut werden, meistens mit befestigten und verankerten Holzschwellen (ungefähr 30 cm Durchmesser; Pilotenwände), Brettern (ungefähr 30 cm Breite und 2,5 cm Dicke) oder einwandigen Holzkästen (siehe Kapitel 5.3.3). Die Terrassen mit Holzkästen werden über mehrere Meter in der Länge gebaut, mit Höhen bis zu 2 m. Höhere einwandige Holzkästen werden mit der Zeit instabil und können durch die Vegetation nicht gehalten werden. Die Holzschwellen sind bis maximal 50 cm hoch, 2–3 m lang und werden versetzt im Hang angeordnet. Wenn möglich sollten diese Strukturen mit Begrünung und längerlebigen Gehölzen kombiniert werden, deren Wurzeln nach dem Zerfall der Bauten idealerweise die Schutzfunktion übernehmen. Die Pfosten (vgl. Figur 11) können aus ungefähr 1,3 m langem Rundholz, alternativ auch aus Weidenstecklingen erstellt werden. Sie sollten beim äusseren Viertel der Länge der Schwelle oder der Bretter gesetzt werden, um Verformungen bzw. Materialversagen (Biegebeanspruchung) zu reduzieren. Die Anzahl der benötigen Terrassen hängt vom Bodenmaterial und der ursprünglichen Hangneigung ab. Am effektivsten sind diese Massnahmen bei Neigungen zwischen 30° und 40°. Der Arbeitsfortschritt erfolgt analog dem Bachverbau von unten nach oben.





Figur 9 (links)
Terrasse aus einwandigen, zersetzten Holzkästen kombiniert mit Wasserableitungsrinne in Arieschbach GR.

Figur 10 (rechts)
Begrünte Terrassen aus Holzschwellen.



Figur 11
Empfehlungen zum Bau von Holzschwellen.

1 Holzschwelle (d = 300 mm, Länge 2–3 m)
2 Pfosten, d = 200 mm
3 Weidenstecklinge
4 Hangneigung 30° bis 40°

4.3.3 **Offene Rinne (Wasserableitungsrinne)**

Wasserableitungsmassnahmen sichern den gezielten und raschen Abfluss von Regenwasser, Schmelzwasser sowie auch von gefasstem Quellen- oder Grundwasser und schützen vor Sohlen- und Seitenerosion (Grabenerosion). Zudem wird durch die Wasserableitung die Festigkeit des Bodens erhöht (höhere scheinbare Kohäsion und niedrigerer Porenwasserdruck).

Die Ausbildung der offenen Rinne kann unterschiedlich sein (siehe [47]) und sollte im Hinblick auf die hydraulische Effizienz eine geringe Rauhigkeit sowie ein kleines Verhältnis von Umfang zu Querschnitt haben. Am meisten werden V-förmige (vgl. Figur 12) und rechteckige Rinnen (vgl. Figur 13) gebaut.

Die Bemessung des Abflussquerschnittes erfolgt gemäss dem Ansatz von Strickler für ein alle 100 Jahre zu erwartendes Niederschlagsereignis. [47] Dabei ist zu berücksichtigen, dass oft turbulente Zustände vorkommen und damit für die Bemessung ein zusätzlicher Sicherheitszuschlag nötig ist. Dazu kommt auch die Wirkung der Luftaufnahme des Wassers, welche das Abflussvolumen erhöht. Bei kleineren Abflusstiefen (kleiner als 1 m) kann ein Sicherheitszuschlag von 1,5 eingesetzt werden, um diese Effekte zu berücksichtigen. Zusätzlich sollte für die Abflusskapazität noch ein Sicherheitszuschlag von 2 eingesetzt werden, damit die Auswirkungen von Verklausungen oder Sedimenten die Funktion der Wasserableitung nicht zu stark beschränken.

Bei der Dimensionierung ist auch die Kurvatur der Abflussrichtung zu berücksichtigen, damit seitliche Austritte vermieden werden können. Bei problematischen Stellen, wo das Wasser austreten kann, sollten Prallbretter eingebaut werden. Bei konvexen Gefälleknicken sollten Gefälleunterschiede von mehr als 5 % vermeiden werden, damit keine zu starken Wellen entstehen. Die Überlappung an den einzelnen Rinnensegmenten (Stossfuge) sollte frei verschiebbar und ausreichend lang sein (ungefähr 25 cm), damit der Rückfluss (Durchsickerung) von Wasser verhindert wird. [47]

Die Anpassung an Hangverformungen und die Verwendung von lokalem Material sind der grosse Vorteil solcher Holzkonstruktionen. Diese sind aber auch anfällig gegenüber Schäden durch Schneedruck oder Steinschlag. Deshalb brauchen sie regelmässige Kontrollen und Unterhaltsarbeiten. Ohne Unterhalt können die offenen Rinnen sogar kontraproduktiv sein, da sie den Abfluss konzentrieren. Eine defekte Rinne begünstigt das Einsickern von Wasser in den Rutschkörper und die Runsenerosion.







Figur 12 (links und Mitte) Beispiele für die Konstruktion eines V-Kanals.

Figur 13 (rechts) Rechteckkanal aus Holzbalken.

4.3.4 **Totholzfaschine**

Totholzfaschinen (aus Stämmen und Ästen, und Sägeresten und Schwarten) dienen der Drainierung und unterirdischen Ableitung von Hangwasser aus tonigen und schluffigen Böden (vgl. Figur 14 und Figur 15). Durch die präferenziellen Fliesswege entlang der Äste und Stämme wird die durchschnittliche hangparallele Durchlässigkeit des Bodens stark erhöht und damit die Versickerung des Wassers reduziert. Gleichzeitig verhindert das eingebettete Holz die Entstehung von unterirdischer Erosion, welche bei offenen Gräben sonst auftreten könnte.

Die Absteckung der Wasserableitung erfolgt angepasst an das Gelände. Die Dimensionen der Gräben hängen vom Abfluss ab; sie sind meistens 0,5–2 m tief. Nach dem Aushub der Gräben werden die Faschinen eingelegt. Es ist wichtig, dass die Faschinen eine grosse Kontaktfläche zur Grabensohle haben, damit sie ihre Funktion erfüllen können und keine Sohlenerosion entsteht. Dafür sollte die Faschine gut verdichtet werden und eventuell mit einer Schicht Aushubmaterial eingedeckt werden. Der unterste Teil der Faschine am Hangfuss sollte möglichst frei von Widerständen gelassen werden (keine Filterwirkung), damit keine Verstopfung entstehen kann. Das Wasser kann am Hangfuss in kontrollierten Sammelschächten oder offenen Gräben gefasst werden. Es ist nötig, Absetzstellen für die Sedimente zu bauen (Schlammsammler), bevor das Wasser weitergeleitet wird.

Es können lokale und biologisch abbaubare Materialien verwendet werden, wodurch eine nachhaltige Konstruktion entsteht. Der Nachteil liegt vor allem in der schwierigen Kontrolle der Funktionalität (z. B. ob unterirdische Erosion entsteht). In Hängen, wo starke Verformungen auftreten, kann die Wirkung dieser Massnahmen rasch abnehmen. In Kombination mit ingenieurbiologischen Massnahmen (Stecklingen oder lebenden Faschinen) kann diese Massnahme effektiv und logistisch einfach sein.



Figur 14 (links)
Bau einer Drainierung mit Totholzfaschinen.

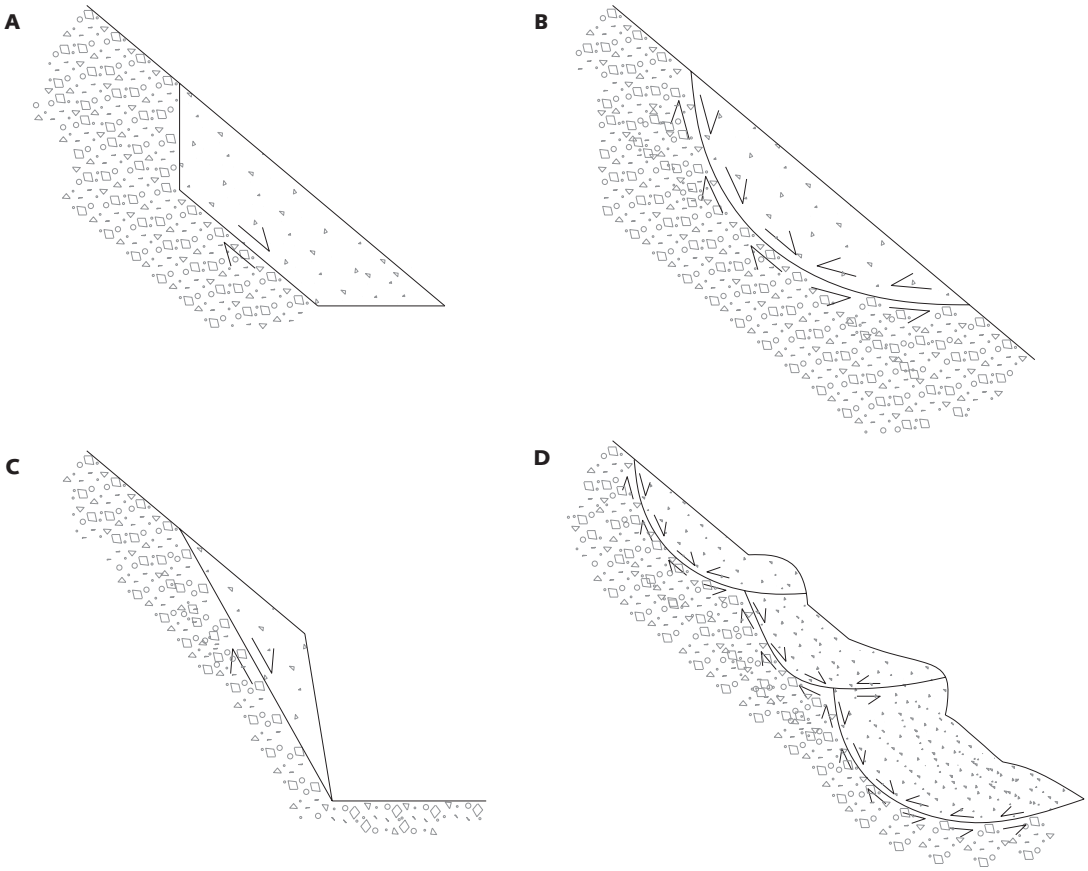


Figur 15 (rechts)
Fertiggestellte Drainierung mit Totholzfaschinen.

5 Holz zum Schutz vor Rutschungen

5.1 Prozesse und Einwirkungen

Rutschungen sind gravitative Prozesse, durch die ganze Pakete von Lockermaterial mobilisiert werden. Für eine einfachere Klassifikation kann man zwischen flachgründigen Rutschungen (mit Anrissmächigkeiten < 2 m), mittelgründigen (mit Anrissmächtigkeiten > 2 m und < 10 m) und tiefgründigen Rutschungen (mit Anrissmächigkeiten > 10 m) unterscheiden. Flachgründige Rutschungen treten normalerweise als spontane Translationsbewegungen (Scherfläche parallel zum Hang) auf und können bei starker Verflüssigung als Hangmuren (nicht kanalisiert) oder Murgänge (kanalisiert) auslaufen (vgl. Figur 16 A). Böschungsinstabilitäten, welche durch eine Änderung der Geländegeometrie und der Lastverhältnisse entstehen (zum Beispiel beim Bau einer Strasse) (vgl. Figur 16 C), können abhängig vom Bodenmaterial als Translations- oder Rotationsbewegungen auftreten. Tiefgründige Rutschungen treten meistens als Rotationsbewegungen (vgl. Figur 16 B) oder komplexe Rutschkörper mit differentialen Bewegungen auf (vgl. Figur 16 D).

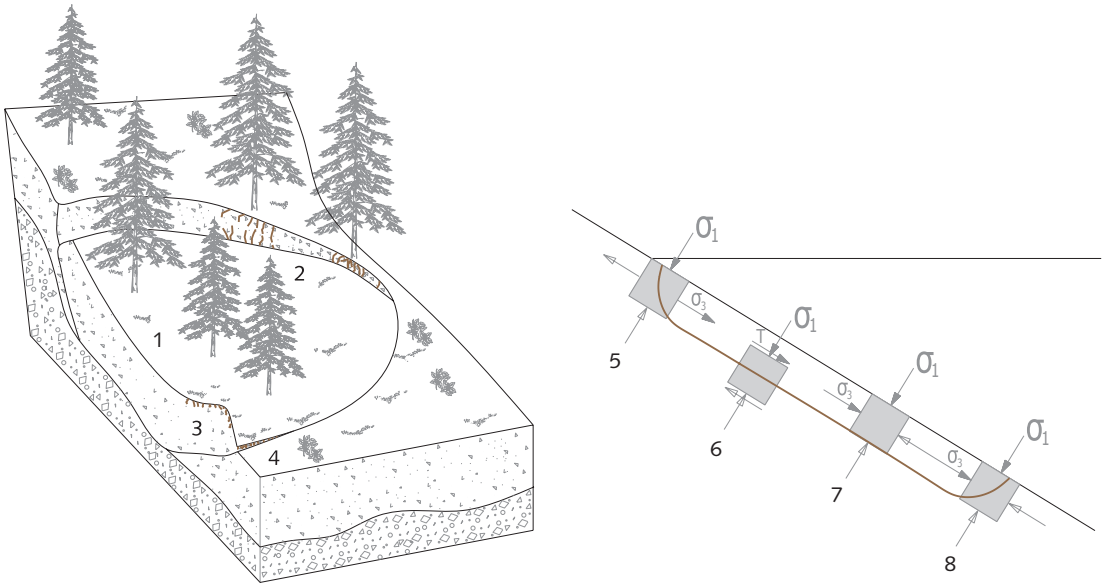


Figur 16
Konzeptuelle Darstellung möglicher Rutschmechanismen.

- **A** Translationsrutschung mit linearer Gleitfläche
- **B** Rotationsrutschung mit kreisförmiger Gleitfläche
- **C** Translationsrutschung nach Geländeänderung (aktiver Erddruckkeil)
- **D** komplexe Rutschung mit differentialen Bewegungen

Die Analyse der Faktoren, welche zu Rutschprozessen führen, ist wichtig für die Definition der richtigen Massnahmen. Es wird zwischen Grunddisposition, variabler Disposition und auslösenden Faktoren unterschieden. Die Grunddisposition umfasst Aspekte wie z. B. die Neigung, die Geologie und die Exposition, welche sich langfristig nicht stark ändern. Die variable Disposition umfasst etwa den Zustand der Vegetation (beziehungsweise die Wurzelverstärkung) und die Eigenschaften des Bodens (z. B. Feuchte, Verteilung der Schluff-/Tonfraktion, Bodenmächtigkeit), welche mittelfristig ändern können. Die auslösenden Faktoren sind kurzfristige Ereignisse; in den meisten Fällen ist es die Zunahme des Porenwasserdrucks aufgrund von starken Niederschlägen oder von konzentriertem Wasserabfluss (z. B. aus der Drainierung von Strassen oder Defekten in Wasserleitungen).

Um die Wirkung von Massnahmen besser einzuordnen, ist es wichtig, die Phasen der Aktivierung der Widerstandskräfte in den Bauwerken während der Entstehung einer Rutschung zu analysieren (vgl. Figur 17). In einer ersten Phase wird hauptsächlich der Scherwiderstand des Bodens entlang der lokalen Scherfläche aktiviert (Punkt 1 in Figur 17). In der zweiten Phase werden im oberen Anrissbereich der Rutschung zusätzlich laterale Zugwiderstände mobilisiert (Punkt 2 in Figur 17). In der dritten Phase, sobald der Grossteil des lateralen Zugwiderstands verloren gegangen ist, wirken hauptsächlich Druckkräfte im unteren Anrissbereich (Punkt 4 in Figur 17). Während dieser Phase kann die Versteifung des Rutschkörpers, z. B. durch einen Hangrost, eine wichtige Rolle spielen (Punkt 3 in Figur 17). Zudem reagieren andere Bauelemente wie Holzkästen oder Holzschwellen mit Druckwiderstand (passive Erddruckkraft) auf diese Belastung.



Figur 17
Schematische Darstellung der mobilisierten Widerstandsspannungen während der Entstehung einer flachgründigen Rutschung.

1 Scherspannung
2 Zugspannung am oberen Teil der Anrisskante
3 hangparallele Druckspannung
4 Druckspannung am unteren Teil der Anrisskante
5 laterale Wurzelverstärkung auf Zug
6 basale Wurzelverstärkung
7 Versteifung des Rutschkörpers
8 laterale Wurzelverstärkung auf Druck

5.2 Übersicht und Funktion von Bauwerken gegen Rutschungen

Für die Stabilisierung von rutschungsgefährdeten Hängen sind prinzipiell drei Bauwerkstypen zu unterscheiden:

Stützwerke
Darunter versteht man Strukturen, welche potentielle rutschende Massen stützen und teilweise versteifen. Rutschende Hänge werden durch die Übertragung von Kräften (Druck oder Scherung oder eine Kombination aus diesen Mechanismen) stabilisiert. Dabei ist es wichtig, die Mechanismen der Rutschprozesse so gut wie möglich zu charakterisieren, um das richtige Bauwerk und dessen Funktion zu definieren. Zum Beispiel wirken Hangroste bei flachgründigen Translationsrutschungen mit Längen <20 m und einem stabilen Hangfuss als Versteifung der Rutschmasse, und der grosse Teil der destabilisierenden Kräfte wird unter Druck am Hangfuss verteilt. Wenn die Länge der flachgründigen Translationsrutschung zu gross ist und es die Möglichkeit gibt, in stabilen Untergrund zu bauen (im Rutschkörper oder an der Seite des Rutschkörpers), dann können Holzkästen verwendet werden, um die Druckkräfte in die stabilen Bereiche abzuleiten.

Rückhaltende Werke
Solche Werke brauchen Verankerungen, um die stabilisierenden Widerstandskräfte aus tieferen und stabilen Bereichen in den zu stabilisierenden Rutschkörper zu leiten.

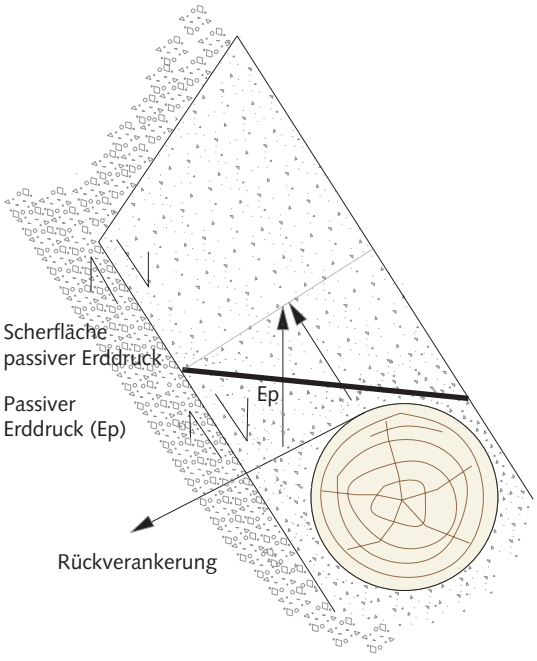
Wasserableitungsmassnahmen
Sie wirken stabilisierend durch die Verminderung des Porenwasserdruckes im Rutschkörper und eventuell durch die Erhaltung der scheinbaren Kohäsion (im ungesättigten Zustand).

Alle genannten Bauwerkstypen sind als temporäre Bauten mit einer stark eingeschränkten Dauerhaftigkeit zu verstehen, die stets in Kombination mit Lebendverbaumassnahmen zu realisieren sind. Es ist immer davon auszugehen, dass das Werk in einem solchen Kontext kurz- oder mittelfristig zerstört wird. Wenn möglich wird auf die Verwendung von künstlichen Baumaterialien (PVC, Blechen, Beton, Eisen etc.) verzichtet.

5.3 Konstruktion und Anwendung von Stabilisierungsbauten aus Holz

5.3.1 Verankerte Schwellen

Verankerte Holzschwellen können verwendet werden, um flachgründige Rutschungen punktuell zu stützen. Auf die Schwellen wirken die Druckkräfte des potentiellen Rutschkörpers (treibende Kräfte minus Scherwiderstand der Rutschfläche und des Erdkeils zwischen Schwelle und Front der Rutschmasse), welche durch die Verankerung in den Untergrund geleitet werden. Der maximale Widerstand, welcher parallel zum Hang stabilisierend wirkt, entspricht der passiven Erddruckkraft. [48] Die Fundationen (Anker oder Dübel) leiten Teile der Widerstandskräfte unter Zug oder Scherung/Biegung in den stabilen Untergrund. Die maximale passive Erddruckkraft kann als Kriterium dienen für die Bemessung der Abstände zwischen den Schwellen. Die lateralen Druckkräfte der unstabilen Bodenschichten (welche proportional zum Abstand zwischen den Schwellen sind) sollen nicht grösser als die hangparallele Komponente der passiven Erddruckkraft sein (vgl. Figur 18).



Figur 18
Skizze der Wirkung der Holzschwellen gegen flachgründige Rutschungen (gestrichene Fläche), welche bei der Schwelle den passiven Erddruck aktiviert.

Wenn das Erdmaterial zwischen den Schwellen nicht durch den Einsatz von Grünverbauungen versteift wird, ist mit Rissen infolge von Setzungen des Erdmaterials zu rechnen. Das wiederum könnte die Infiltration von Oberflächenabfluss fördern und eine Erhöhung des Porenwasserdrucks (beziehungsweise eine Abnahme der scheinbaren Kohäsion) im Rutschkörper verursachen und damit die Wirkung der Massnahmen reduzieren.
Bei der Errichtung von verankerten Schwellen werden einfache Rundhölzer mit einer Länge von 3–5 m und einem Durchmesser von mindestens 20 cm verwendet (vgl. Figur 19). Die Stämme sind mit Dübeln oder Stahlseilen (zum Beispiel Totmannanker oder Lockermaterialanker) im stabilen Untergrund verankert und sollen im potentiellen Rutschkörper eingedeckt werden. Die Anzahl der Verankerungen hängt von der Dimension der Stämme und der Tragfähigkeit der einzelnen Fundation ab. Bei der Ausführung erfolgen die Arbeiten grundsätzlich von unten nach oben. Das erlaubt zudem, dass Aushubmaterial der oberen Schwelle für die Eindeckung der unteren Schwelle verwendet werden kann. Diese Massnahme ist besonders vorteilhaft in steilem und schlecht zugänglichem Gelände.

5.3.2 Hangroste

Hangroste sind Gitterkonstruktionen, welche die Steifigkeit einer potentiellen Rutschmasse erhöhen und vor allem durch die Verteilung der Druckkräfte am Hangfuss den Hang stabilisieren. Für die Erfüllung dieser Funktion müssen die Hangroste in die potentielle Rutschmasse eingebaut werden und dürfen nicht nur an der Oberfläche liegen. Diese Art von Massnahme eignet sich nicht für die Stabilisierung von Rotationsrutschungen oder tiefgründigen Bewegungen. Hangroste werden oft komplementär zu Holzkästen gebaut, um die Druckkräfte über die Fläche abzuleiten und punktuell auf den Hangfuss oder in stabilen Untergrund zu übertragen.

Figur 19 (links)
Bau von rückverankerten Holzschwellen zur Stabilisierung einer Böschung.



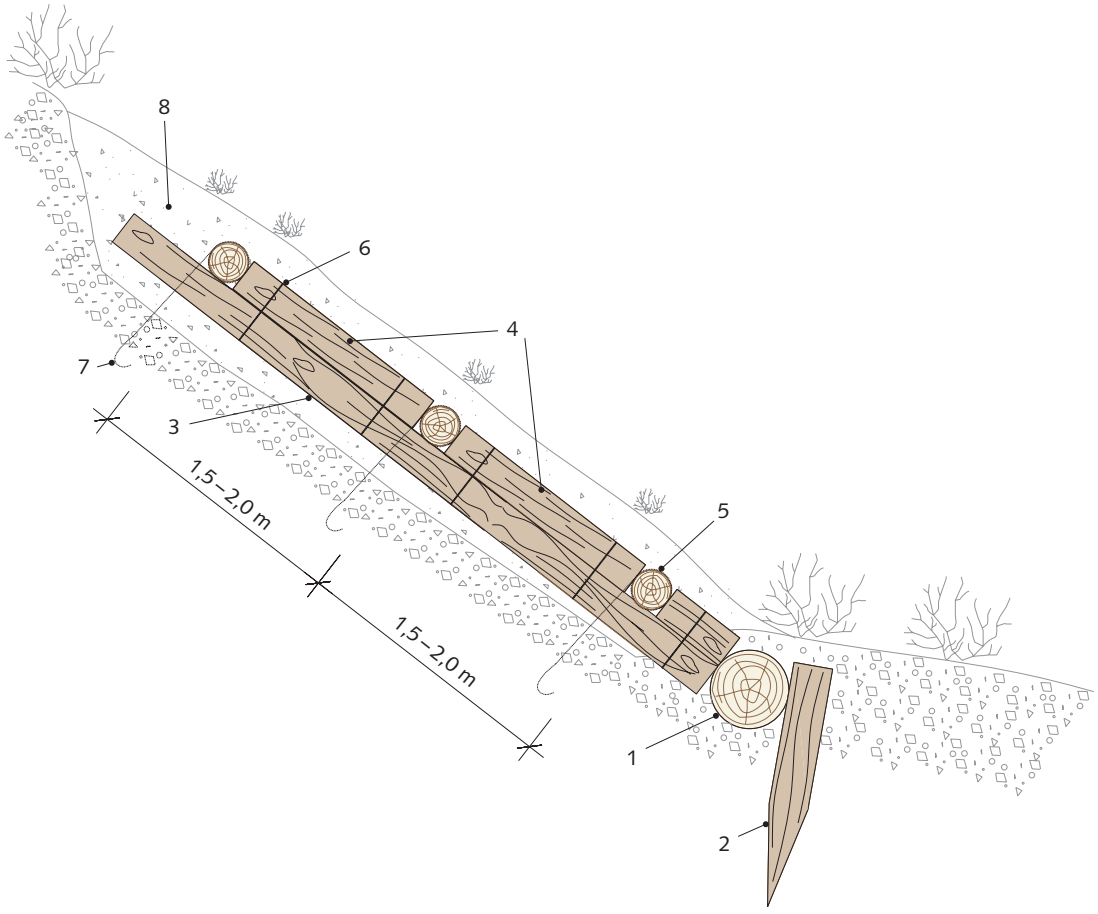
Figur 20 (rechts)
Bau eines Hangrostes zur Stabilisierung einer Böschung.



Die Konstruktion wird aus lebendigem (für kleinere Dimensionen [49]) oder totem Rundholz gebaut, mit Durchmessern von ungefähr 10–30 cm (vgl. Figur 20). Es können auch konische Stämme in der Falllinie eingelegt werden (Längshölzer), mit dem grösseren Durchmesser am Hangfuss. Der Abstand der Längshölzer und Querhölzer sollte 1,5 bis 2 m (maximal 3 m) betragen. Die Querhölzer werden

Figur 21
Prinzipskizze einfacher Hangrost.

1 Fundationsschwelle
d = ca. 400 mm
2 Pfosten,
d = ca. 200 mm,
Länge ca. 1,0–1,5 m
3 unteres Längsholz,
durchgehend, Abstand
a = 1,5–2,0 m,
d = ca. 200–300 mm
4 obere Längshölzer,
unterbrochen,
d = ca. 200 mm
5 Querhölzer,
durchgehend,
d = ca. 200 mm
6 Armierungseisen,
d = 12–18 mm
7 Rückverankerung
L = 1,5–3,0 m
8 vollständige
Eindeckung



durch kurze Stämme in der Falllinie gestützt (obere Längshölzer). Es können mehrere Lagen von Längs- und Querhölzern gelegt werden, je nach Mächtigkeit der potentiellen Rutschmasse, in der Regel jedoch zwei (vgl. Figur 21). Während des Bauens können Buschlage oder Heckenlage bei der Füllung mit Erdmaterial eingebaut oder nachträglich Stecklinge und/oder Saatgut eingesetzt werden. Bei der Anwendung von lebendem Material sollten die Arbeiten während der Vegetationsruhezeit durchgeführt werden (November bis März). Die Anwendung von lebendigem Material sichert gleichzeitig die langfristige Übernahme der stabilisierenden Funktion durch die Wurzeln und schützt nach kurzer Zeit gegen Oberflächenerosion (siehe auch [50] und [51]).
Hangroste bis ungefähr 15 m Kantenlänge und mit guter Verankerung des Fusses können ohne Rückverankerung gebaut werden. Bei längeren Böschungen oder steilen Hangneigungen (> Reibungswinkel des Erdmaterials, ab welchem aktiver Erddruck entsteht) muss der Hangrost mit Dübeln, Armierungseisen oder Ankern (z. B. Erdspreiz- oder -kippankern an Stabstahl oder Stahlseilen) im stabilen Untergrund fixiert werden. Hangroste sollten nicht steiler als maximal 60° gebaut werden. Vor allem bei steilen Böschungen muss das Füllmaterial gut stabilisiert werden, am ehesten mit lebendigem Material (Stecklingen oder Nacktwurzeln) oder ausnahmsweise mit Geotextilien. Mangelnde Rückverankerung, schlechte Überlappung der Querhölzer und nicht ausreichende Fusssicherung sind die wesentlichen Ursachen von Schäden an dieser Art von Holzkonstruktionen.

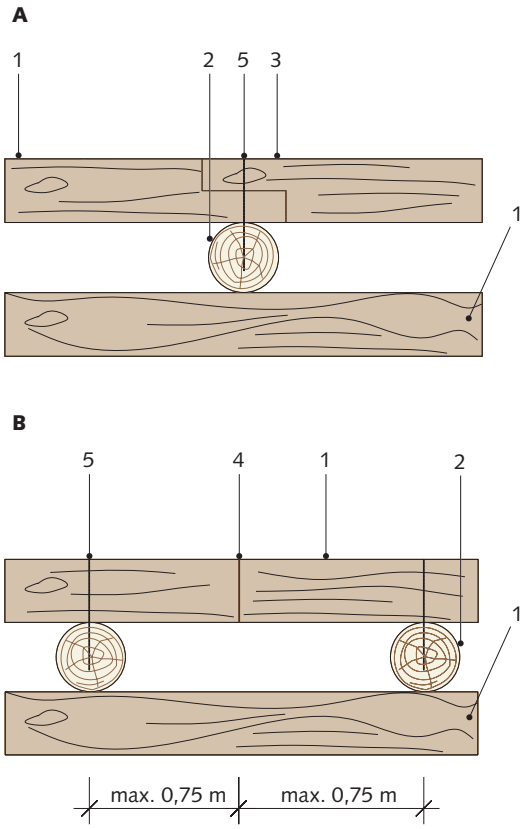
5.3.3 **Holzkästen (Krainerwände)**

Holzkästen eignen sich für die punktuelle Sicherung von Hängen und Böschungen sowie zur Beseitigung kleinerer Schadstellen. Das Grundprinzip der Holzkastenkonstruktion im Hangverbau entspricht jenem im Gerinneverbau, und auch in diesem Fall unterscheidet man zwischen ein- und doppelwandigen Konstruktionen (siehe Figur 35). Einwandige Holzkästen sind anfällig gegenüber Kippen und werden deshalb nur für Konstruktionen bis ungefähr 1–2 m Höhe verwendet. Dabei ist es wichtig, eine gute Verankerung der Querhölzer im Untergrund sicherzustellen. Doppelwandige Holzkästen sollten eine maximale Höhe von 5 m haben. [52]
Diese Konstruktionen wirken entweder gegen aktiven Erddruck (steile Böschungen) oder als punktuelle Stabilisierung von flachgründigen Bewegungen (Kriechdruck), meistens in Kombination mit Hangrosten. Die Funktion der Holzkästen ist die Ableitung der bergseitig wirkenden Kräfte über dem Fundament in den stabilen Untergrund oder in stabile Seitenbereiche. Dabei bildet das Holzgerüst gemeinsam mit dem Füllmaterial eine Verbundkonstruktion und statisch betrachtet einen relativ stabilen Schwergewichtskörper. Entsprechend werden die Nachweise der äusseren Tragsicherheit geführt. Der Nachweis der inneren Tragsicherheit ist hingegen komplex und wird rechnerisch nicht durchgeführt. Stattdessen werden auf Erfahrung basierende konstruktive Grundregeln angewendet. Die Einwirkung von Porenwasserdruck sollte durch Drainage komplett beseitigt werden. Diese Konstruktionen wirken durch das eigene Gewicht (Gewichtsmauer) oder in Kombination mit Verankerungen. Es ist wichtig zu berücksichtigen, dass durch das zusätzliche Gewicht des Werkes kein Grundbruch oder tiefgründige Instabilitäten entstehen. Womöglich sollten diese Konstruktionen auch seitlich in stabiles Terrain eingebunden werden.
Die Konstruktion besteht aus Längshölzern (andere Bezeichnungen: Läufer, Schwelle, Blockhölzer, Reihe), die parallel zum Hang bzw. der Höhenlinie gelegt sind, sowie Querhölzern (Zangen) senkrecht zu den Längshölzer. Die Querhölzer können übereinander oder alternierend mit Abständen von 1–3 m angeordnet werden. Die alternierende Einordung der Querhölzer garantiert eine bessere Steifigkeit der Konstruktion. Je nach Nutzung sollte der Durchmesser der Bauelemente so gewählt werden, dass die Durchbiegung der einzelnen Elemente die Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion (falls gefordert) nicht beeinträchtigt und dass die Kriterien der inneren Tragsicherheit erfüllt sind (Zug-, Druck- und Querdruckspannungen, siehe Norm SIA 265 [38]). Wenn möglich sollten Durchmesser > 25 cm verwendet werden, damit die Dauerhaftigkeit der Konstruktion erhöht werden kann. [22] Die Länge der Längshölzer sollte so gross wie möglich sein, um Schwachstellen in der Konstruktion zu reduzieren. Der Abstand zwischen den Längshölzern sollte nicht grösser sein als 3 m. Um die Verformung der Konstruktion infolge der Zersetzung der Holzsubstanz zu reduzieren, kann das Splintholz je nach Holzart bei der Kontaktstelle der Hölzer entfernt werden, so dass Kernholz auf Kernholz liegt. Die Stossverbindung zwischen den Längshölzern (auf Stoss verlegt) ist vorzuziehen (vgl. Figur 22), weil diese Variante dauerhafter und einfacher zu bauen ist. Die Auflagerung auf Querhölzern in einem Abstand von max. je 0,75 m beidseitig des Stosses ist wichtig. Diese kann auch mit Bauklammern (Durchmesser 10–20 mm) oder mittels durchgehend verschraubter Aufdoppelung zusätzlich befestigt werden. [15] Die Verbindung mit einer Überblattung hingegen ist aufwendiger und anfällig gegenüber Holzzersetzung.

Figur 22
Illustration der Verbindung von Längshölzern.

A Verbindung mit einer Überblattung (nicht empfohlen)
B Stumpfer Stoss

1 Längshölzer
2 Querhölzer
3 Überblattung
4 stumpfer Stoss
5 Nägel (Armierungseisen)

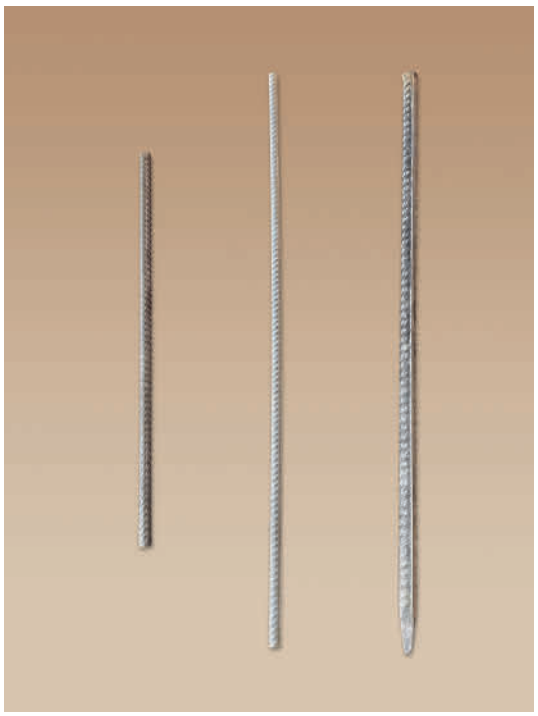


Die Verbindungen zwischen Längs- und Querhölzern erfolgt meistens mit Armierungseisen (Bewehrungsstahl B500B, vgl. Figur 23), welche einen Durchmesser von 12–18 mm und eine Länge grösser als der doppelte Durchmesser des Holzes haben. Diese Verbindungsstellen sind besonders anfällig gegenüber holzzerstörenden Prozessen. Die Freisetzung von Eisen aus den Nägeln fördert das Wachstum der Pilze [22], deshalb wird die Anwendung von verzinkten Nägeln empfohlen (vgl. Figur 24). [20] Um die Schäden im Holz zu reduzieren, wird auch empfohlen, die Nagellöcher vorzubohren. Allerdings sollte der Bohrdurchmesser kleiner sein als der Durchmesser des Nagels, damit genug Mantelreibung vorhanden bleibt. Um die Reibung zwischen Holz und Nagel beim Eintreiben zu verringern, können die Nägel in biologisch abbaubares Öl eingetaucht werden. Ohne Vorbohrung verlaufen die zugespitzten Nägel oft den Jahrringen entlang nach aussen; vor allem beim unteren Holz. Zudem spaltet das Holz leicht auf.
Die Bemessung der Konstruktion muss die äussere Sicherheit gegen Kriechdruck oder aktiven Erddruck erfüllen (Sicherheit gegen Kippen, Gleiten und Grundbruch gemäss Norm SIA 260, 261, 267), ebenso die Kriterien der inneren Tragsicherheit (Norm SIA 265). Die Gebrauchstauglichkeit ist durch die Anwendung von ausreichend grossen Durchmessern der Hölzer gewährleistet und wird bei den beschriebenen Konstruktionen in der Praxis erfüllt.

Figur 23 (links)
Verbindung der Quer- und Längshölzer mit Armierungseisen.



Figur 24 (rechts)
Rohe und verzinkte Nägel. Auch bei angespitzten Nägeln sollte vorgebohrt werden.



Bei der Ausführung wird das Fundament bis in den stabilen Untergrund gegraben, meistens mit einem Schreitbagger mit Seilwinde. Nach dem Aushub und während des Baus muss bei tiefen Grabungen die Böschung temporär gesichert werden (z. B. mit Stütze oder mit Baggerschaufel und Metallgitter). Als erstes wird die unterste Reihe der Längsholzer gelegt. Je nach Anwendung kann die Fundationsebene ungefähr 5–15° rückwärtig geneigt sein, um die Sicherheit gegen Gleiten der Konstruktion zu erhöhen.
Wenn der Untergrund beim Fundament nicht ausreichend stabil gegen Gleiten ist, so kann die unterste Reihe verankert (zum Beispiel mit Erdspreiz-, Erdkipp- oder Totmannanker) oder mit gerammten Eisenbahnschienen stabilisiert werden. [20]
Es ist wichtig, darauf zu achten, dass die Konstruktion gut drainiert ist. Dies kann durch die Anwendung von durchlässigem Füllmaterial gesichert oder durch die Installation einer Sickerleitung hinter der ersten, bergseitigen Längsholzreihe gefördert werden. Nach der Montage einer Längs- und Querholzlage wird das Füllmaterial verdichtet oder beim Einsatz von Stecklingen oder Nacktwurzler lediglich angedrückt (Förderung der Durchwurzelung).
Wenn das Füllmaterial zu Erosion neigt, so muss die Öffnung zwischen den Längshölzern mit Steinen (vgl. Figur 25 und Figur 27) oder Füllhölzern (vgl. Figur 26) von der inneren Seite her geschlossen werden (eventuell können zusätzlich Geotextilien oder Schafwollstränge, ein Isolationsprodukt, verwendet werden). Die äusseren Köpfe der Querhölzer können am Schluss abgesägt werden, mindestens 20 cm vor den Längshölzern, um das Aufspalten zu verhindern.



Figur 25 (links)
Ausfachung mit Steinen als Füllmaterial.



Figur 26 (rechts)
Ausfachung mit Füllhölzern.

Rundhölzer sollten im möglichst frischen Zustand eingelegt und feucht gehalten werden. Die Beschattung durch Pflanzen oder eine Abdeckung kann für die Dauerhaftigkeit vorteilhaft sein. Die Wirkung der Abdeckung hängt stark von der Art und der Durchlässigkeit des Bodens ab. In tonhaltigen Böden, in denen die Holzkästen in permanent reduzierenden Bedingungen eingebaut sind, kann das Holz ausserordentlich lange halten (mehr als 100 Jahre). Unter diesen Bedingungen ist aber keine komplementäre Wirkung der Wurzeln in den tieferen Bodenhorizonten zu erwarten. Hingegen fördert der Einbau von Holzkästen in durchlässigen und biologisch aktiven Bodenhorizonten den raschen Abbau von Holz; dafür kann dann die Wirkung der Vegetation die stabilisierende Funktion effektiver übernehmen. Bei nicht eingedeckten Holzkästen muss damit gerechnet werden, dass diese Konstruktionen nach wenigen Jahren Zerfallserscheinungen aufweisen.



Figur 27
Beispiel eines ungefähr 30-jährigen Holzkastens mit Füllung aus Steinen, verwendet zur Stabilisierung einer Strassenböschung.

Vorteil der Holzkästen ist der elastische Baukörper, der sich bei Hangverformungen und Setzungsprozessen gut anpassen kann. Das geringere Gewicht im Vergleich zu Beton- oder Steinkonstruktionen vermindert die Möglichkeit eines Grundbruchs. Zusätzlich sind Holzkästen günstiger als andere Konstruktionen (z. B. aus Beton), vor allem durch die Verwendung von lokalem Material (vgl. Kapitel 8). Die Logistik für die Baustelle ist oft auch einfacher als für andere Bauweisen, wobei die Erfahrung der lokalen Bauequipe ein entscheidender Faktor ist. Ein weiterer Vorteil solcher Konstruktionen besteht darin, dass kein Rückbau nötig ist.

5.4 Grenzen des Einsatzes von Holzverbauungen

Die Einschränkungen bei der Verwendung von Holz im Hangverbau sind hauptsächlich auf Aspekte der Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit zurückzuführen.

Was die Tragsicherheit von Holzbauten betrifft, sind die Konstruktionsgrenzen durch die innere und äussere Tragsicherheit gegeben. Für die innere Tragsicherheit von Holzkästen ist besonders auf die Querdruckspannung im Bereich der Verbindungen zwischen Längshölzern und Querhölzern (Zangen) zu achten. Die zulässige Druckfestigkeit senkrecht zur Richtung der Holzfasern kann in diesem Fall ein begrenzender Faktor sein und limitiert die Höhe der Holzkästen. Ein weiterer limitierender Aspekt der inneren Tragsicherheit von Holzbauten (z. B. Holzkästen) ist die Belastung durch die Linienlast bzw. den Druck des Füllmaterials (z. B. Erdruhedruck mit Füllung aus Boden). Diese beansprucht die Tragsicherheit sowohl innerhalb der Holzbauteile als auch der Verbindungen zwischen den Bauteilen. Bei der äusseren Tragsicherheit ist zu beachten, dass Holzkonstruktionen ein niedrigeres Eigengewicht als Werke etwa aus Beton aufweisen. Dieser Aspekt kann limitierend sein, vor allem für Verbauungen, welche ausschliesslich durch das eigene Gewicht stabilisierend wirken müssen (z. B. Stützmauern). Ein weiterer einschränkender Faktor ist die Steilheit des Geländes, so dass Stützbauwerke vor allem wegen des grossen Aushubvolumens, das für die Fundamente der Bauwerke erforderlich ist, nur schwer oder mit grossem Aufwand errichtet werden können. In diesem Fall bieten sich Lösungen wie rückverankerte Werke (z. B. Palisadenwände) an.



Figur 28
Böschungsstabilisierung eines Waldweges.

Die Gebrauchstauglichkeit von einigen Bauwerken wird durch die Verformungen definiert, die sie durch äussere Beanspruchungen oder ihr Eigengewicht erfahren können. Bei Holzkonstruktionen zur Hangsicherung sind die Verformungen meistens nicht problematisch. Bei Konstruktionen, die für die Böschungsstabilisierung von Waldwegen/Forststrassen verwendet werden (vgl. Figur 28), können diese Verformungen jedoch für die Funktionsfähigkeit limitierend werden (insbesondere bei talseitigen Werken, die hohen Belastungen durch eine Verkehrslast ausgesetzt sind).

Wie schon im Kapitel 2 erwähnt, hängt die Dauerhaftigkeit von Holz von vielen Faktoren ab und muss von Fall zu Fall beurteilt werden. In Anbetracht der grossen Unsicherheiten bei der Vorhersage der Dauerhaftigkeit ist es wichtig, eine Kontrolle und Instandhaltung der Holzbauten zu planen und ihre Errichtung komplementär mit ingenieurbiologischen Massnahmen zu kombinieren. Im allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass Holzkonstruktionen für Hangsanierungen eine Nutzungsdauer von 10–30 Jahren haben. Figur 29 und Figur 30 zeigen einen ca. 30-jährigen Holzkasten, welcher an die Grenze der Anwendung dieses Werktyps stösst: Das Holz ist zum Teil komplett verrottet und zum Teil durch das Eigengewicht zusammengedrückt. Es ist keine ausreichende Vegetation vorhanden, welche die mechanische Funktion übernehmen kann.

Es gibt auch Grenzen, die mit dem erforderlichen Unterhalt zusammenhängen. Je schwieriger die Bedingungen sind, desto aufwendiger werden die Unterhaltsarbeiten, die über mehrere Jahre mit zunehmender Intensität durchgeführt werden müssen.





Figur 29 (links)
Doppelwandige Holzkästen mit Anzeichen von Mängeln bezüglich Tragsicherheit nach ca. 30 Jahren. Vermutlich wären eine flachere Ausbildung und Bepflanzung erfolgreicher.

Figur 30 (rechts)
Verrottete und zusammengedrückte Rundholzquerschnitte der Querhölzer des Holzkastens.

5.5 Komplementäre Wirkung von ingenieurbiologischen Massnahmen

Holzkonstruktionen sind aufgrund ihrer limitierten Dauerhaftigkeit auch im Hangverbau meist als temporäre Massnahmen zu verstehen. Dafür können die Funktionen dieser Konstruktionen in den meisten Fällen gut durch die Ergänzung von Vegetation und deren Wirkungen kompensiert werden.
Durch die Überschirmung der Vegetation kann wenige Wochen bis Monate (bei Gräsern) nach den Arbeiten die erosive Wirkung von Regentropfen (Splash-Erosion) stark reduziert werden. Zusätzlich sorgt die Bildung eines oberflächennahen Wurzelnetzes (wenige Zentimeter tief) für eine erhöhte Stabilität der Bodenpartikel (Schutz gegen Interrill- und Rill-Erosion). Die Erhöhung der Rauhigkeit durch die Vegetation reduziert die Abflussgeschwindigkeit und fördert die Infiltration des Wassers, welche wiederum die Etablierung der Vegetation fördert. Alle diese Effekte reduzieren die Oberflächen- und die Runsenerosion (siehe Kapitel 4). Figur 31 zeigt die zeitliche Entwicklung der Vegetation in einem Hang mit Holzkonstruktionen für den Schutz vor Oberflächen- und Runsenerosion (Terrassen, Wasserableitungsrille, Holzsperren).



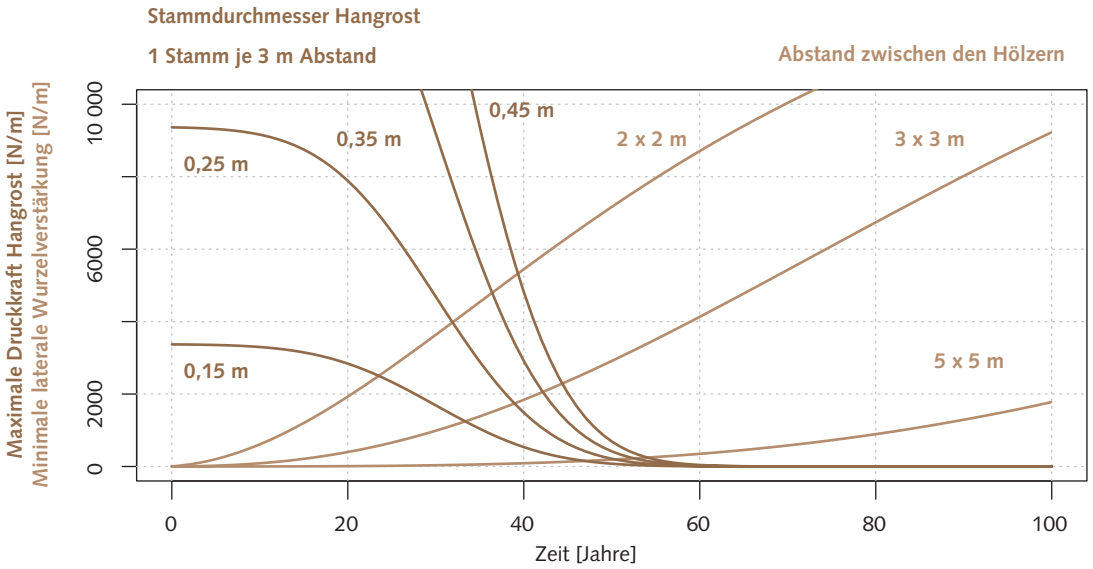




Figur 31
Zeitliche Entwicklung der Vegetation in einem mit Holz verbauten Hang in Arieschbach GR. Links: 1998, Mitte: 2005, rechts: 2017.

Durch das Wachstum von Sträuchern und Bäumen erweitern sich die mechanischen Wirkungen der Vegetation mit der Zeit, wobei die Dynamik der Wurzelverstärkung von besonderer Bedeutung zur Stabilisierung von flachgründigen Rutschungen ist. Die Dynamik der Wurzelverstärkung ist je nach Standort und Baumarten unterschiedlich, kann aber auf günstigen Standorten innerhalb von 20–30 Jahren die stabilisierenden Wirkungen von Hangrosten oder Holzkästen übernehmen. [53] Die Wechselwirkung zwischen der abnehmenden Funktion von Holzverbauungen und der zunehmenden Wirkung der Wurzeln ist konzeptuell in der Figur 32 dargestellt. Diese zeigt, wie die Dauer der Funktion je nach Dimensionierung der Holzkonstruktionen (Durchmesser und Abstand von Längshölzern, Holzart) beeinflusst werden kann und wie gleichzeitig das Wachstum und die Struktur der Vegetation die Zunahme der Wurzelverstärkung bestimmt. Die Quantifizierung der zeitlichen Entwicklung der Wurzelverstärkung ist bei ingenieurbiologischen Massnahmen ein wichtiger Parameter für die Beurteilung der langfristigen Funktionalität von Hangverbauungen und eine quantitative Nutzen-Kosten-Analyse. [54]

Die Wirkung auf den Wasserhaushalt der Vegetation wirkt zusätzlich stabilisierend auf viele Hangprozesse, so etwa die Evapotranspiration (Erhöhung der scheinbaren Kohäsion während Trockenperioden) oder die Bildung von drainierenden präferentiellen Fliesswegen parallel zum Hang (analog zur Faschine). Durch die Wahl der Baumarten kann auch der chemische Zustand des Bodens beeinflusst werden. Insbesondere die Zusammensetzung des Streumaterials kann die biologische Aktivität im Boden beeinflussen und dadurch bodenbildende Prozesse steuern, welche sich am Ende positiv auf die Hangstabilität auswirken können.



Figur 32
Konzeptuelle Darstellung der zeitlichen Wechselwirkung von Holzverbauungen (abnehmend) und der Wurzelverstärkung (zunehmend).





Aufnahme 2011 (links) Konstruktion des Hangrostes mit einem Stammdurchmesser von 15 cm und eine Abstand zwischen den Hölzern von 2 × 2 m.

Aufnahme 2015 (rechts) Entwicklung der Vegetation nach 4 Jahren.

Die Schätzung der möglichen Durchwurzelungstiefe ist oft ein entscheidender Aspekt für den erfolgreichen und langfristigen Einsatz von ingenieurbiologischen Massnahmen. Diese ist generell abhängig von den Baumarten, dem Bodentyp und dem Klima. Vor allem die zeitliche Veränderung des Wassergehalts im Boden ist ein wichtiger Faktor für die Wurzelverteilung. [55] In durchlässigen Böden können die Wurzeln einige Meter Tiefe erreichen, wenn die oberen Horizonte trocken bleiben. Hingegen bilden sich bei feuchten oberflächennahen Horizonten tendenziell flachgründige Wurzelsysteme aus. Permanent gesättigte und tonhaltige Bodenhorizonte sind limitierend für das Wurzelwachstum (Pseudogley- und Gleyböden). Eingedeckte Holzkästen können in diesen Böden lange halten (bis zu 100 Jahre, siehe auch Kapitel 2), aber es ist nicht zu erwarten, dass Wurzeln deren Funktion übernehmen können. Bei Konstruktionen, welche die ersten 1–2 m Tiefe in einem durchlässigen Boden stabilisieren, ist die Dauerhaftigkeit von Holz stark reduziert, aber dafür kann die Wirkung der Vegetation unter passenden Bedingungen die stabilisierende Funktion gut übernehmen. Bodenchemische Eigenschaften (z. B. pH-Wert), Lichtverhältnisse und Schnee sind weitere wichtige Faktoren, welche für die Etablierung der Vegetation entscheidend sein können. Der Einfluss von Wildverbiss muss auch berücksichtigt und eventuell mit zusätzlichen Massnahmen limitiert werden (z. B. mit Zäunen). Weiterhin sollte auch der Einfluss von invasiven Neophyten mit Massnahmen in der Ausführung und im Unterhalt der Konstruktionen (z. B. Aufforstung mit kompetitiven Baumarten oder Entfernung von ungünstigen Baumarten) berücksichtigt werden.

6 Holz im Wildbachverbau

Holz wird im Wildbachverbau vorwiegend als Rundholz zur Sohlensicherung (Querbauwerke) für Uferschutzbauten (Längsbauwerken) eingesetzt.

6.1 Prozesse und Einwirkungen

Die obengenannten Bauwerke wirken gegen die erosiven Eigenschaften der Fliessprozesse in Bächen und Flüssen (siehe Kapitel 6.2). Sie werden durch Erd- und Wasserdrücke beansprucht. Bei Sperrenbauwerken werden die Wasserdrücke von der Bauwerksunterkante bis zur Oberfläche des massgebenden Wasserspiegels angesetzt. Da Holzsperren einen durchlässigen Bauwerkskörper besitzen, können die statischen Wasserdrücke abgemindert werden. An Flügeln, welche neben der Abflusssektion aus der Bachsohle herausragen, treten zusätzlich an allen angeströmten Teilen dynamische Wasserdrücke auf. Die Höhe der Wasserdrücke oberhalb der Bachsohle hängt neben der Fliesshöhe von der Dichte des Fliessprozesses und der Geschwindigkeit ab.

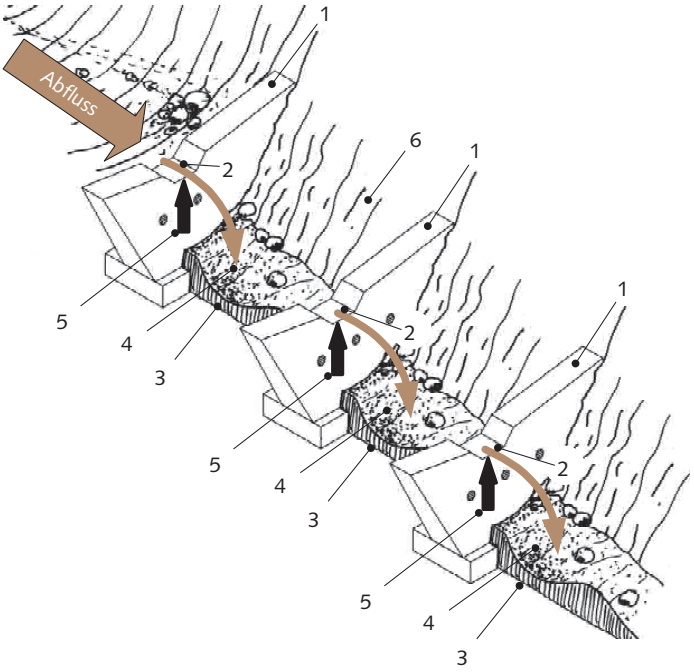
Zur standardisierten Festlegung der Eigenschaften des Abflusses (Fliessprozess) werden in [56] drei Gruppen von Fliessprozessen (Hochwasser, Feststofftransport und Murgang) laut Tabelle 3 unterschieden. Bei den dort angegebenen Parametern handelt es sich um Richtwerte. Hochwasserabflüsse können bei allen Sohlneigungen auftreten, besonders häufig sind sie jedoch in flachen Bachstrecken (unter 2 % Sohlneigung). In steileren Bachstrecken (meist Wildbächen) treten hauptsächlich Fliessprozesse mit höherem Feststoffanteil auf, wobei hier nicht nur die vorhandene Wassermenge, sondern auch die mobilisierbaren Feststoffherde (Bachsohle, seitliche Anbrüche, Rutschmassen etc.) den Bemessungsprozess bestimmen. Dieser kann somit nur durch eine eingehende Analyse des Einzugsgebietes des Baches festgelegt werden. Fliessgeschwindigkeiten zur Berechnung der dynamischen Wasserdrücke werden aus Abflusssimulationen entnommen. Als Richtwerte treten bei Hochwasserabflüssen und flachen Bachstrecken (unter 2 % Sohlneigung) Geschwindigkeiten bis 2 m/s auf; in steilen Fliessstrecken (bis 10 %) sind mittlere Fliessgeschwindigkeiten bis 5 m/s möglich. Weitere Details zu den Einwirkungen und die Vorgehensweise bei einer allfälligen Bemessung einer Sperre finden sich in [57], [58], [32] und [40].

Tabelle 3
Standardisierte Gruppen der Fliessprozesse und wichtige Parameter laut [56] und [33].

Prozessparameter	**Fliessprozess**				
	Hochwasser	**Feststofftransport**		**Murgang**	
		fluviatil	**murartig**	**steinig**	**schlammig**
Dichte ρ, in kg/m³	1000	1000–1300	1300–1700	1700–2000	2000–2300
Prozessabhängige mittlere Geschwindigkeit v, in m/s	Festlegung gemäss hydraulischem Modell häufig 0 bis 5		3–5	3–6	5–10

6.2 Übersicht und Funktion von Sperrenbauwerken

Sperrenbauwerke (Querbauwerke) erfüllen die Funktion der Stabilisierung/Konsolidierung (laut [56]). Die Stabilisierung umfasst alle Massnahmen, die dazu dienen, die Sohle und die Ufer inklusive der seitlichen Hänge in der bestehenden Lage zu sichern und gegen Seiten- und Tiefenerosion zu schützen (Figur 33 und Figur 43). Durch die Abtreppung der Bachsohle mit Sperren reduziert sich das Sohlgefälle, und es bilden sich freie Überfälle (Abstürze) aus. Dies führt zu einer Verringerung der Fliessgeschwindigkeit und einer Reduktion der Energie des Fliessprozesses. Damit verbunden ist eine Reduktion der Geschiebetransportkapazität, die entweder zu einer Verringerung der Erosionsleistung oder zur temporären Ablagerung (Sedimentation) transportierter Feststoffe führt. Diese Gesetzmässigkeiten beeinflussen den Verlandungswinkel (vgl. Figur 34). Erfolgt gleichzeitig durch die Hebung der Gerinnesohle mittels Sperren eine Verbesserung der Standsicherheit der seitlichen Hänge, spricht man von Konsolidierung. Konsolidierungssperren aus Holz sind für Hochwasserabfluss und bei entsprechender Konstruktion für fluviatilen Feststofftransport einsetzbar.



Figur 33
Prinzipdarstellung der Funktion Stabilisierung mittels Sperrentreppe.

1 Querbauwerk (Sperre)
2 Überfall
3 Kolk
4 Energieumwandlung
5 Höhenfixpunkt in der Sohle
6 Stabilisierung der Hänge

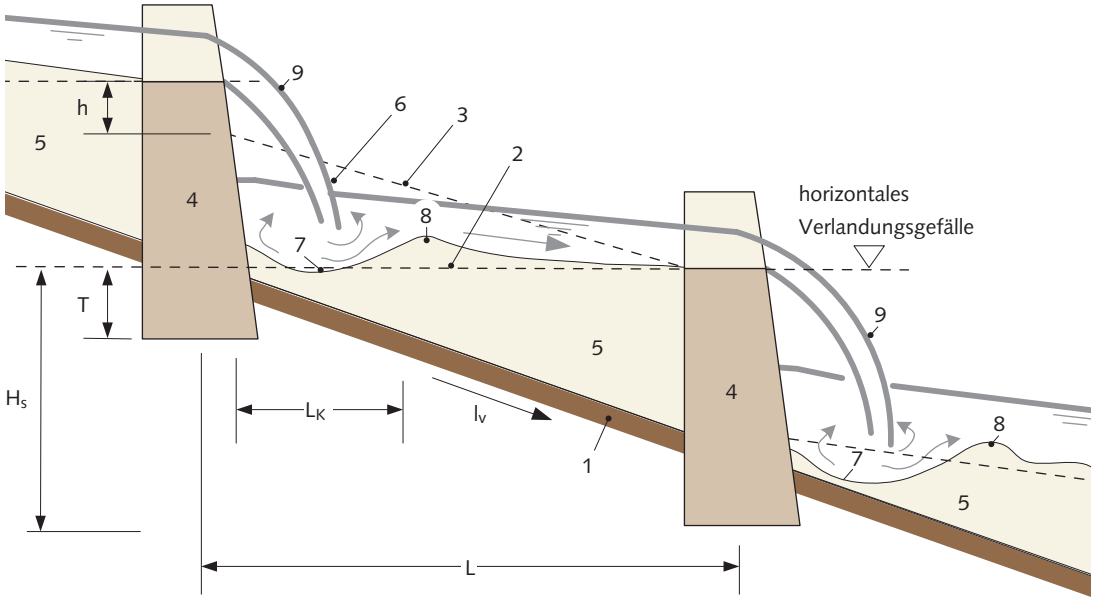
6.3 Konstruktion und Anwendung von Sperrenbauwerken aus Holz

6.3.1 Allgemeine Konstruktionsregeln für Holzsperren

Sperren (Querbauwerke) sind möglichst im rechten Winkel zur Fliessrichtung anzuordnen. Die Abflusssektionen sind hydraulisch auf den Bemessungsabfluss auszulegen. Aus Gründen der Standsicherheit dürfen die Sperrenflügel vom Bemessungsabfluss nicht überströmt werden. Um dies zusätzlich zu unterstützen, wird in [56] empfohlen, die Krone der Flügel bei Hochwasser oder fluviatilem Feststofftransport mit einem Flügelanzug von mindestens 10 % und bei murartigem Feststofftransport von mindestens 15 % auszustatten, aber nicht geringer als das maximale Verlandungsgefälle im betrachteten Bachabschnitt.

In den meisten Fällen werden Holzsperren als Sperrentreppe (Serie von regelmässig angeordneten Querwerken) eingesetzt (vgl. Figur 33 und Figur 43). Im Vergleich zum Gefälle des unverbauten Wildbaches stellt sich zwischen den Sperren einer Treppe ein geringeres Gefälle ein. Dieses Verlandungsgefälle hängt von der Kornzusammensetzung der Bachsohle und der Art des Fliessprozesses ab. Das Verlandungsgefälle kann gemäss [32], S. 32 ff. berechnet werden.

Bei der Konzeption der Treppe (vgl. Figur 34) muss ein Optimum zwischen Sperrenhöhe H_s und Sperrenabstand L gefunden werden. Der Abstand L der Sperren innerhalb einer Treppe muss mindestens der Länge des Kolkes L_k (Überfallsstrahl) entspre-



Figur 34
Längsschnitt durch eine Sperrentreppe.

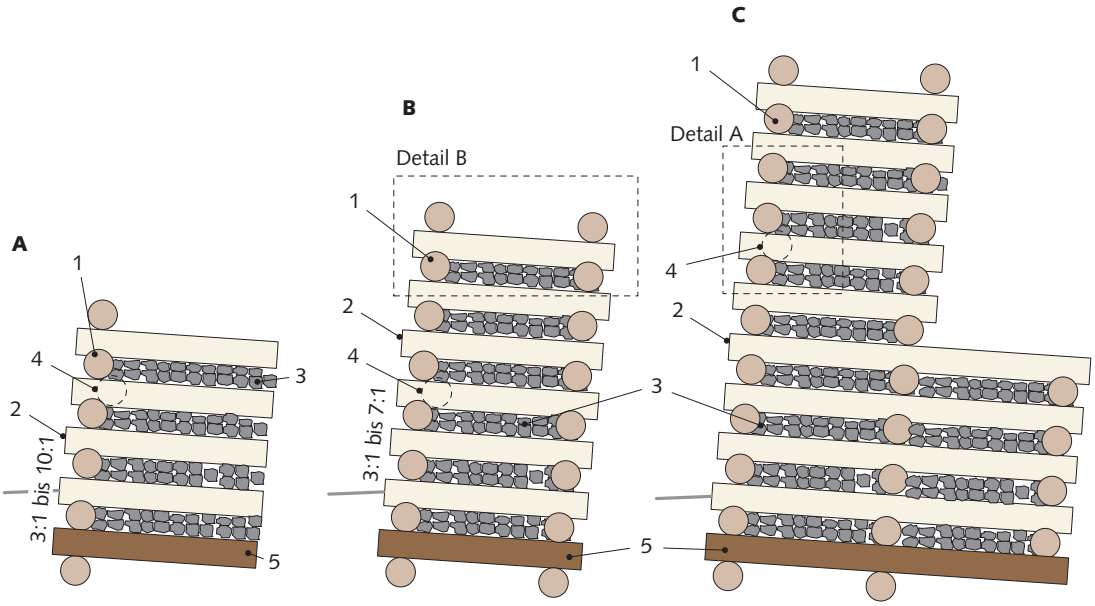
1 ursprüngliches Sohlgefälle
2 minimales Verlandungsgefälle
3 maximales Verlandungsgefälle
4 Holzsperre (schematisch)
5 Verlandungsraum
6 Energieumwandlung
7 Kolk
8 Wall
9 Überfall

chen. Kolklängen können nach hydraulischen Gesetzmässigkeiten (z. B. Wurfparabel) berechnet werden. Angaben zur Berechnung finden sich in [32] und [59]. Die erforderliche Sperrenhöhe ergibt sich aus dem Schnittpunkt zwischen der ursprünglichen Sohle und dem angenommenen minimalen Verlandungsgefälle zwischen den Sperren. Ab diesem Schnittpunkt muss die Sperre 1–1,5 m (T) tief gegründet werden. Eine sehr auf der sicheren Seite liegende Annahme ist ein horizontales Verlandungsgefälle. Im weiteren muss das maximal mögliche Verlandungsgefälle abgeschätzt werden. Die Abflusssektion der oben liegenden Sperre muss mindestens 50 cm (h) aus der Bachsohle ragen, da sonst eine Konzentration des Abflusses nicht mehr gewährleistet werden kann.

6.3.2 **Konstruktion der Holzkästen**

Ein Holzkasten besteht aus miteinander verbundenen Längs- und Querhölzern (Zangen; vgl. Figur 35 und Figur 38). In den durch diesen Kasten gebildeten Hohlraum wird Material eingefüllt. Dieses Füllmaterial erhöht das Eigengewicht der Holzkastenkonstruktion und erzeugt so ein entgegen den Einwirkungen aus Erd- und Wasserdrücken drehendes Moment. Somit wirken diese Konstruktionen als Gewichtsmauer bzw. -sperre. Bei zweiwandigen Sperrentragwerken, wenn unausweichliche Stösse der Längshölzer versetzt werden und die Einbindung der Sperre in den seitlichen Flanken ausreichend tragfähig ist, kann der Holzkasten auch eine horizontale Tragwirkung ausüben.

Üblicherweise werden Längshölzer mit Durchmessern von 20–50 cm verwendet, hauptsächlich Nadelholz aus unmittelbarer Nähe des Bauortes. In Ausnahmefällen wird aus Dauerhaftigkeitsgründen auf weiter entfernt gewachsene Hölzer wie Lärche oder Douglasie gesetzt. Die Längs- und Querhölzer müssen an den Knotenpunkten tragfähig miteinander verbunden werden. Dies kann nach [32] mittels durchgehender Schrauben bzw. Gewindestangen mit Muttern an beiden Seiten oder einfacher durch Nägel aus Bewehrungsstahl B500B erreicht werden. Die Nägel sind 0,6–1 m lang. Hier wird teilweise vorgebohrt und dann der Nagel hydraulisch eingerammt. Durch das Vorbohren wird ein Aufreissen des Holzes durch die Vernagelung vermieden, denn die Nutzungsdauer einer Holzkonstruktion hängt im wesentlichen von der Qualität der einzelnen Verbindungen und Anschlüsse ab.
Da ein Teil der Schubbeanspruchung durch Reibung infolge des vertikalen Druckes aufgenommen wird, muss jedes aufgesetzte Holz wippfrei aufliegen und wird an jedem Kreuzungspunkt mit den darunterliegenden Hölzern mit einem Nagel verbunden. Eine Empfehlung aus der Praxis ist, nur die Unterseite der Zangen auszufräsen, und dies auch nur in Ausnahmefällen. Die maximale Frästiefe soll ¼ des Zangendurchmessers nicht überschreiten. Denn jede Verletzung der Holzfasern bildet eine mechanische Schwächung und eine weitere Eintrittspforte für holzabbauende Organismen. Wichtig ist generell eine saubere, ‹fachwerksmässige› Verbindung aller Holzteile.



Figur 35
Gängige Bautypen von Holzkästen.

A einwandig
B zweiwandig
C dreiwandig

Detail A siehe Figur 36, Detail B siehe Figur 41

1 Längsholz
2 Querholz (Zange)
3 Verfüllung
4 Ausfachung
5 Prügelboden

Stösse von Längshölzern sind möglichst einfach auszuführen (siehe dazu Figur 22). Bei Stössen ist besser links und rechts des Stosses ein Querholz anzuordnen. Bei Sperren sollten laut [32] die Querhölzer zumindest im Bereich der Abflusssektion übereinander angeordnet werden, um die Angriffsfläche für herabfallende Steine zu minimieren (vgl. Figur 37).

Je nach der Anzahl der Ebenen von Längshölzern werden ein-, doppel- und mehrwandige Holzkästen unterschieden (vgl. Figur 35). In der Praxis übliche Bauhöhen sind in Kapitel 6.5 zusammengestellt.

Einwandige Konstruktionen bestehen aus Längshölzern, die mit Zangen im Erdreich verankert werden (vgl. Figur 35 A). Mittels gerammter Piloten (vertikaler Pfähle) gesicherte Querhölzer haben sich in der Praxis als nicht besonders dauerhaft herausgestellt. Luftseitig werden die Sperren mit einem Anzug bis 10:1 ausgeführt.

Der doppelwandige Holzkasten besteht aus zwei Ebenen parallel angeordneter Längshölzer, welche durch Querhölzer (Zangen) verbunden sind (vgl. Figur 35 B). Statisch sinnvoll sind nach [32] luftseitige Neigungen bis 7:1. Ein- und zweiwandige Konstruktionen weisen häufig eine Basisbreite von 2 m bei einer Höhe bis Unterkante Abflusssektion von 2–3 m auf. Die grössten Bauwerkhöhen erreicht man mit dreiwandigen Holzkästen (vgl. Figur 35 C). Werden die luftseitigen Sperrenanzüge zwischen 3:1 und 5:1 gewählt, ergibt sich eine optimale Befeuchtung der Luftseite durch Wasserabflüsse, was tendenziell die Nutzungsdauer erhöht.

Die Ansichten der Sperren sind je nach Art der Flügel in Figur 37 dargestellt. Diese gelten für alle oben dargestellten Arten von Holzkästen.

In der Praxis werden Holzsperren eher in schwer zugänglichen Gräben eingesetzt, da sich die Rundhölzer leicht transportieren lassen. Die Linienform von Gerinnen erleichtert den Einsatz von Mobilseilkränen, indem die Einrichtung einer Seillinie meist mehrere Sperren bedienen kann. Der Bau erfolgt heute meist mittels Unterstützung durch Schreitbagger mit Seilwinde. Aufgrund der kurzen Bauzeit werden Holzsperren auch als Sofortmassnahme nach Ereignissen eingesetzt.

6.3.3 **Fundierung**

Holzkästen müssen nach [15] auf einer sauber ausgeglichenen und tragfähigen Aufstandsfläche fundiert werden, die im rechten Winkel zum Kasten geneigt ist. Darauf wird eine unterste Längsholzlage verlegt. Zur Erhöhung der Robustheit kann darauf ein Prügelboden eingebaut werden. Dieser besteht aus dicht an dicht verlegten Rundhölzern und lagert luftseitig auf einem Längsholz. Ein Prügelboden verhindert ein Ausspülen der Verfüllung des Holzkastens und reduziert die Gefahr der inneren Erosion erheblich. Bei eher bindigem Untergrund und ton-/schluffhaltigem Füllmaterial in Verbindung mit geeigneten Blöcken kann auf die Prügellage auch verzichtet werden.

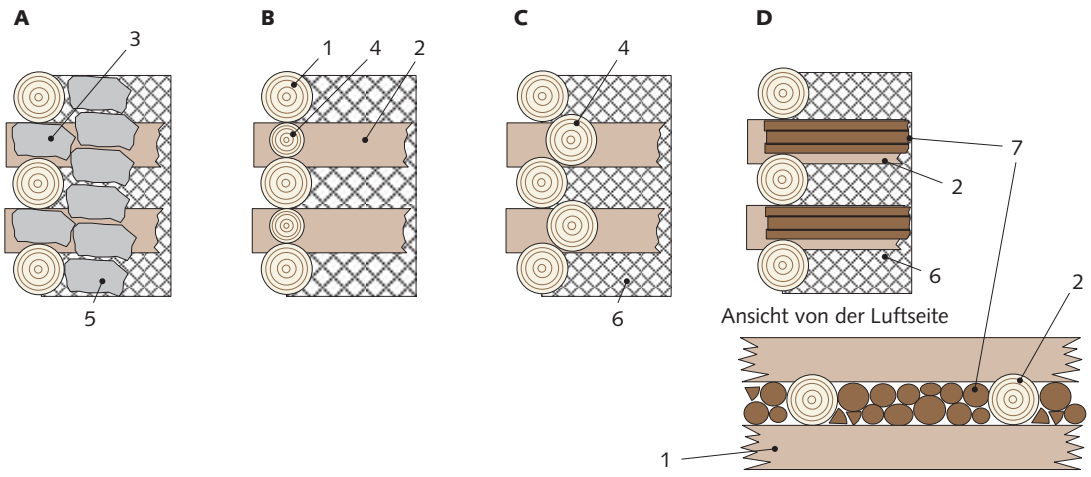
6.3.4 **Sicherung des Sperrenvorfeldes**

Wegen des häufig steilen Geländes, welches zu wenig Platz für die Ausbildung einer Kolkwanne zulässt, muss das Sperrenvorfeld in vielen Fällen gesichert werden. Bei Holzsperren sind Sohlsicherungen durch Wasserbausteine (vgl. Figur 38), mit Vorsperre, luftseitig verlängertem Prügelboden (vgl. Figur 43) oder liegendem Holzrost mit Steinausfachung üblich. Seitlich können die Kolke mit Leitwerken aus Holzkästen (vgl. Figur 43) oder Grobsteinschlichtungen begrenzt werden.

6.3.5 **Verfüllung und Ausfachungen**

Ein leerer Holzkasten hat eine sehr geringe Steifigkeit, da die Knoten statisch gesehen Gelenke darstellen. Die erforderliche Steifigkeit erlangt das System erst durch die Verfüllung der Hohlräume mit groben Steinen oder/und dem Aushubmaterial (sofern geeignet). Idealerweise werden mögliche Fliesswege durch die Sperre mit tonigem Erdmaterial blockiert. Wenn die Gefahr besteht, dass das Bauwerk ausgespült wird, können die Ritze durch das Einbringen von Schafwollzöpfen geschlossen werden. Die Ausfachungen eines Holzkastens können aus Holz- oder Steineinlagen hergestellt werden (vgl. Figur 36 und Figur 38). Der Vorteil einer Steinausfachung liegt in der höheren Steifigkeit und in der längeren Nutzungsdauer. Die Steine werden so in die Ausfachung eingebaut, dass sie nicht herausfallen können (vgl. Figur 36 A). Nach [15] soll die erste Lage aus Steinen bestehen, die sich in der Öffnung verkeilen können. Nach den Ausfachungssteinen sollte nach [15] idealerweise eine durchgehende Wand aus Steinen trocken aufgemauert werden. Da Steinausfachung Handarbeit bedeutet, wird diese Methode aus Kostengründen kaum noch angewendet.

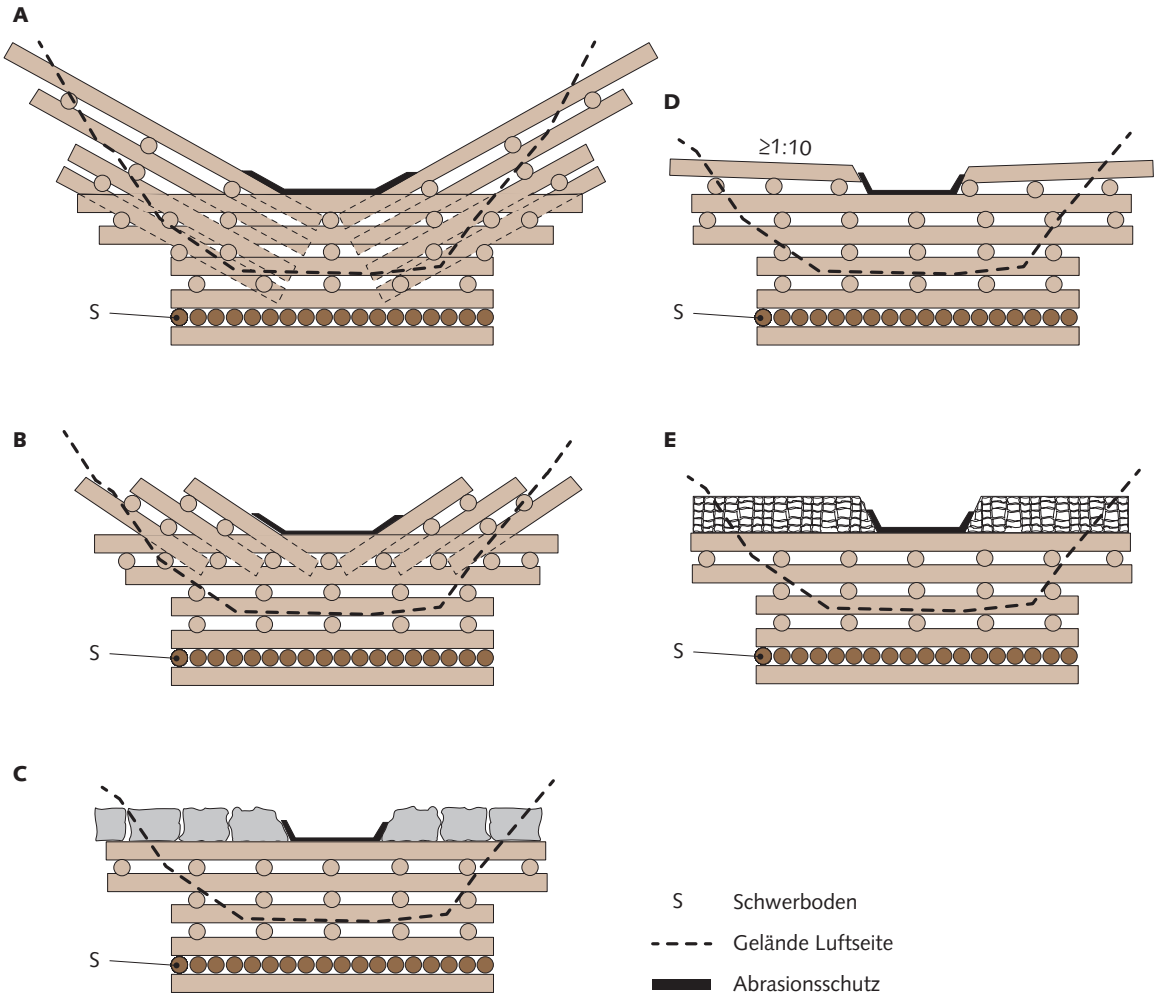
Die Ausfachung mit Holz parallel zum Längsholz kann auf zwei Arten erfolgen (vgl. Figur 36 B, C und Figur 38). Bei der ersten Variante werden die Hölzer mit demselben Durchmesser wie die zu verfüllenden Öffnungen verwendet (vgl. Figur 36 B). Diese Rundhölzer werden an die Längshölzer genagelt. Bei der zweiten Variante verwendet man Hölzer mit einem grösseren Durchmesser als die zu schliessenden Ausfachungen und verfüllt damit die Öffnung von hinten (vgl. Figur 36 C). Dabei ist der Nagelaufwand deutlich geringer, allerdings können sich die eingelegten Hölzer durch nachträgliche Setzungen verschieben. Das Abdichten der Ritzen von holzausgefachten Holzkästen bei feinanteilreichen Böden mit Schafwollezöpfen ist einfacher als das Einpassen eines Geotextils. Eine weitere Variante ist die Ausfachung mit Holz parallel zu den Querhölzern (siehe Figur 36 D, ‹Greyerzer System›).



Figur 36
Ausfachung von Holzkästen. Detail A aus Figur 35.

A Ausfachung mit Steinen
B und **C** Varianten zur Ausfüllung mit Holzlagen parallel zu den Längshölzern
D Ausfachung mit Rund-Spaltholz ‹Greyerzer System›

1 Längsholz
2 Querholz (Zange)
3 Steine (Blöcke)
4 Rundholz
5 Trockenmauerwerk
6 Verfüllung
7 Rund- oder Spaltholz



Figur 37
Ausbildung der Sperrenflügel. Dargestellt sind die luftseitigen Ansichten von Holzsperren.

A und **B** Einsteckflügel
C Blocksteinflügel
D geneigte und horizontale Holzflügel
E Flügel aus Drahtsteinkörben

6.3.6 **Sperrenflügel**

Um den Abfluss in Bachmitte zu zentrieren, muss mit Sperrenflügeln eine Abflusssektion ausgebildet werden (vgl. Figur 37). Die Sperrenflügel können unterschiedlich ausgeführt sein.

In der derzeitigen Praxis werden vorwiegend Holzflügel errichtet. Diese werden häufig als Holzkästen errichtet (vgl. Figur 37 A, B, D und Figur 39 A). Um den Widerstand zu erhöhen, können die Flügel auch ein Stück bachaufwärts verlängert werden. Eine Verbindung mit der darüberliegenden Sperre ist ebenfalls möglich. Einen höheren Widerstand gegen Abscheren bieten die in Österreich praktizierten Einsteckflügel (empfohlene Ausführung bei murfähigen Bächen). Hier werden, wie in Figur 37 B und Figur 39 B, D dargestellt, die Rundhölzer der Flügel zwischen die Längs- und Querhölzer gesteckt. Bei schmaleren Bächen können die Flügel auch wie in Figur 37 D dargestellt ausgeführt werden.

Um der Problematik der verkürzten Nutzungsdauer der Holzkonstruktionen im Einbindebereich zu begegnen, können die Flügel mit Drahtsteinkörben (vgl. Figur 37 E) oder Wasserbausteinen (vgl. Figur 37 C und Figur 38) ausgeführt werden. Hier gilt es zu beachten, dass sie durch die weniger gute Verbindung mit dem Sperrenkörper durch den Abfluss leichter von der Sperre heruntergeschoben werden können.

Die Sperrenflügel bzw. Längshölzer sollten seitlich 1,2–1,5 m (bei fluviatilem Feststofftransport mindestens 2 m) in die Flanken eingebunden sein.





Figur 38
Links: Holzkastensperre mit Flügeln aus Wasserbausteinen und Ausfachungen mit Rundhölzern. Rechts: Vorfeldsicherung mit Wasserbausteinen.









Figur 39
Beispiele aus Österreich.

A Holzkastensperren mit schrägen Flügeln
B mit Einsteckflügeln
C dicht an dicht gelegte Rundhölzer in der Abflusssektion
D dreiwandige Holzkastensperre

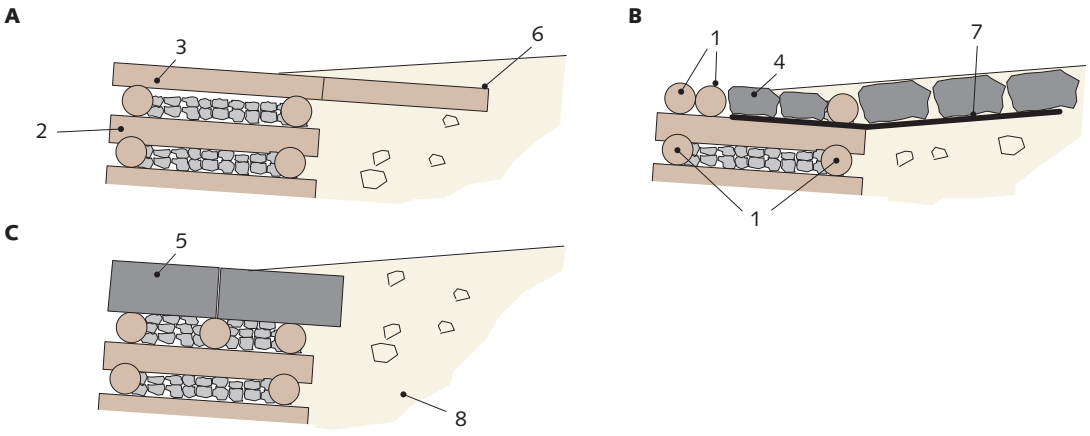
Dreiwandige Holzkastensperren, wie in Figur 39 D dargestellt, sind Extrembauwerke für Sonderanwendungsfälle. In diesem Fall wurde für eine Holzkonstruktion entschieden, da im Bereich des Bauwerkes die Hänge noch nachrutschen. Erst nach der Beruhigung der Hänge in einem Zeitraum von etwa 20–30 Jahren (das entspricht ungefähr der Nutzungsdauer der Holzverbauung) wird eine Sperre in Betonbauweise davor errichtet. Die Verwendung von kalibrierten Hölzern, wie in Figur 39 abgebildet, ist für die Schweiz unüblich. Vorteile der Verwendung von kalibrierten Hölzern sind eine einfachere Montage und Passgenauigkeit bzw. Gleichmässigkeit des Bauwerks. Die zusätzlichen Bearbeitungs- und Transportaufwendungen sprechen indessen dagegen.

6.3.7 **Abflusssektion**

Die Unterkante der Abflusssektion sollte für eine gleichmässige Benetzung der Luftseite der Sperre horizontal ausgeführt werden. Die Abflusssektionen der Holzsperren unterliegen schon bei gelegentlichem Geschiebetrieb einer Beanspruchung durch Abrasion (vgl. Figur 40). Zur Erhöhung der Nutzungsdauer können Abflusssektionen mit einem durchgehenden Abrasionsschutz ausgestattet werden. Der am häufigsten ausgeführte Abrasionsschutz ist jener mit Rundhölzern (vgl. Figur 41 A, Figur 39 A–D und Figur 42). Im weiteren kann die Oberseite des obersten Kastens mit platten Steinen abgepflastert werden (vgl. Figur 41 B und Figur 40). Darunter kann auch ein noch bachaufwärts gezogener Teppich aus Geotextil eingebaut werden. Da die Längshölzer hier ungeschützt sind, sollte an der Vorderkante ein zweites Längsholz angeordnet werden (vgl. Figur 41 B). Die Krone im Bereich der Abflusssektion kann auch mit behauenen Steinen (oder Betonelementen, Figur 41 C) abgedeckt werden. Bei allen Abdeckungen ist wichtig, dass sie luftseitig nicht über die Längshölzer hinausragen, da sie sonst das dauerhafte Benetzen der Sperrenvorderseite durch die Abflüsse verhindern.



Figur 40
Ausfachung mittels Steinen: Holzsperre nach Beanspruchung durch Murgang.



Figur 41
Ausführung der Abflusssektionen. Detail B aus Figur 35.

A Abdeckung mit Rundhölzern
B Auspflasterung
C behauene Kronsteine

1 Längsholz
2 Querholz (Zange)
3 Rundholzabdeckung
4 plattige Steine
5 Kronsteine
6 verlängerte Rundhölzer
7 Geotextil
8 Füllmaterial



Figur 42
Ausführung der Abflusssektion mit einer Abdeckung aus Rundhölzern. Die weit überstehende Abdeckung (Rundhölzer) schützen die darunterliegenden Längshölzer gut vor Abrasion, dies führt aber zu einer weniger guten Befeuchtung, infolgedessen es zu ungünstigen Holzfeuchte hinsichtlich biologischen Abbau kommen kann.

6.3.8 **Ausführungen bei höherer Beanspruchung**

Holzsperren sind bei Beanspruchungen durch Murgänge in der Regel nicht standsicher. Häufig werden daher Sperren aus anderen Baustoffen eingesetzt. Durch eine geschickte Konstruktion lässt sich der Widerstand für murartigen Feststofftransport bei Holzkonstruktionen jedoch deutlich erhöhen. Generell sind hier vorstehende Teile im Abflussbereich zu vermeiden (vgl. Figur 40). Zudem ist bei Fliessprozessen mit höherem Feststoffanteil unbedingt das Sperrenvorfeld zu sichern (siehe Kapitel 6.3.4). Als besonders widerstandsfähig haben sich Sperren erwiesen, die luft- und wasserseitig kraftschlüssig seitlich über die Flügel und an der Sohle mit dem Prügelboden verbunden sind (verbundene Sperrentreppe, vgl. Figur 43). Es sollten Einsteckflügel verwendet werden (vgl. Kapitel 6.3.6). Wichtig ist dabei, dass die Flügel nahtlos in die Leitwerke übergehen und nicht vorstehen. Mit Rundhölzern abgedeckte Abflusssektionen haben sich als sehr widerstandsfähig erwiesen, besonders dann, wenn man sie oberwasserseitig verlängert und mit der oberen Sperre verbindet. Dadurch kann man laut [32] eine zusätzliche Rückverankerung erreichen. Eine solche Lösung kommt nicht in Frage, wenn im Verlandungsbereich grössere Bodensetzungen zu erwarten sind. Bei dieser Konstruktion muss man sich jedoch bewusst sein, dass spätere Wartungen höheren Aufwand erfordern, da in sich verbundene Holzteile schwer auszuwechseln sind.





Figur 43
Verbundene Sperrentreppe.

6.4 **Konstruktion von Längsbauwerken aus Holz**

Die Konstruktion von Längsbauwerken (Uferschutzbauwerken) folgt den gleichen Anforderungen wie in Kapitel 5.3.3 zusammengestellt. Abweichend davon sind zwischen den Längshölzern immer Ausfachungen (vgl. Kapitel 6.3.5) anzuordnen, oder es ist in Verbindung mit einer Bepflanzung ein weitgehend erosionsstabiles Material als Füllmaterial zu verwenden. An der Sohlfläche ist empfohlen analog den Sperren einen Prügelboden laut Kapitel 6.3.3 auszuführen. Uferschutzbauwerke sollten 1 m tief unterhalb der mittleren Bachsohle eingebunden sein. Es werden ein- und zweiwandige Holzkästen eingesetzt (vgl. Kapitel 6.3.2).

6.5 Grenzen des Einsatzes von Holzverbauungen im Wildbachverbau

Die Geometrie definiert sich über die Sperrenlänge (Bachbreite) und die Sperrenhöhe. Die maximal möglichen Bauhöhen von Quer- und Längsbauwerken orientieren sich nach der Bauart der Holzkästen. Einwandige Holzkästen sind bis zu einer Bauhöhe von 1,5 m, unter optimalen Bedingungen bis 2 m Höhe möglich. Doppelwandige Holzkästen können bei sorgfältiger Bauweise eine Höhe bis zu 4 m, bei besonders guten Bedingungen 5 m erreichen. Um die Auswirkungen eines Sperrenversagens zu minimieren, sollten die Werkhöhen so gering als möglich gehalten werden.

Maximal baubare Breiten ergeben sich aus den verfügbaren Stammlängen. Einwandige Holzkästen sind durch diese Längen begrenzt. Bei zwei- und dreiwandigen Systemen können die Stösse bach- und luftseitig versetzt werden.

Günstige Umgebungsbedingungen für Holzsperren sind schattige, dauerfeuchte/nasse Standorte. An häufig sonnigen und regelmässig austrocknenden Runsen haben Holzbauwerke eine recht kurze Nutzungsdauer (oft nur wenige Jahre). Abgesehen davon ist der Bereich der seitlichen Einbindungen (wechselfeuchte Zone) immer limitierend für die Nutzungsdauer, da dort meist Umgebungsbedingungen herrschen, die sich optimal auf das Pilzwachstum auswirken (vgl. dazu auch Kapitel 2). Aus Erfahrung ist überdies bekannt, dass Holzsperren bei sandigen, erosionsanfälligen Böden grundsätzlich ungeeignet sind.

7 Holz zum Schutz vor Lawinen und Schneebewegungen

Im Lawinenschutz wird Holz insbesondere beim temporären Stützverbau sowie bei Gleitschneeschutzmassnahmen (Verpfählungen, Dreibeinböcken und Holzschwellen) eingesetzt. Überdies wird Holz im Verwehungsverbau und vereinzelt bei Ablenkbauwerken verwendet.

7.1 Prozesse und Einwirkungen

Lawinen sind schnelle Massenbewegungen, die in allen Gebirgen der Welt mit einer saisonalen Schneedecke auftreten. Im Laufe der Geschichte haben Lawinenkatastrophen immer wieder Todesopfer gefordert. Die Besiedlung der Gebirgsräume wurde dadurch geprägt, indem Gefahrengebiete verlassen oder Lawinenverbauungen erstellt wurden (vgl. Figur 44). Lawinen entstehen, wenn eine ganze Schneetafel grossflächig abbricht und in einzelne mehr oder weniger grosse Schollen zerfällt, die während der Bewegung mit dem Boden in Kontakt bleiben. Je nach Beschaffenheit des Schnees und der Topografie dominiert der Fliess- oder Staubanteil einer Lawine. Typischerweise sind Lawinenanrissgebiete 30–50° geneigt. Die Grösse einer Lawine kann sehr unterschiedlich sein: Sie kann einen Rutsch mit einem Volumen von 100 m^3 bis zur extrem grossen Lawine mit einem Volumen von mehreren 100 000 m^3 sowie Fliessstrecken von mehreren Kilometern umfassen. Die angebrochenen Schneemassen erreichen schon nach kurzer Zeit Geschwindigkeiten von 10–40 m/s. Die Dichte einer Fliesslawine ist jener der natürlichen Schneedecke ähnlich und beträgt etwa 300 kg/m^3. Auslöser für Lawinen sind meist starker Schneefall bei stürmischem Wetter bzw. Wärmeperioden. Der Druck einer Lawine hängt von der Schneeart, dem Volumen und der Geschwindigkeit ab. Grosse Lawinen können dynamische Drücke von mehr als 100 kN/m^2 ausüben und grosse Zerstörungen verursachen. [60]

Beim Schneegleiten handelt es sich dagegen um anhaltende langsame Bewegungen der gesamten Schneedecke an glatten, stark besonnten Hängen mit einer Neigung von mindestens 15°. Oft bilden sich typische Abrisskanten, sogenannte Fischmäuler (vgl. Figur 45). Eine glatte Bodenoberfläche und ein nicht gefrorener Boden fördern Schneegleiten. Meist besteht eine nasse Schmierschicht zwischen Boden und Schneedecke. Werden landwirtschaftliche Flächen in Hanglagen ungenügend gepflegt, können langhalmige Grasbestände das Schneegleiten begünstigen. Befindet sich ein Objekt wie zum Beispiel ein Gebäude in der gleitenden Schneedecke, werden dort die Bewegungen der Schneedecke lokal gebremst, und in der Folge treten statische Schneedruckkräfte auf, die meist kleiner als 20 kN/m^2 sind. Schneegleiten kann zu Gleitschneelawinen führen, einem schnellen Abrutschen der gesamten Schneedecke. Gleitschneelawinen stellen z. B. für Verkehrswege eine schwer vorhersehbare Gefährdung dar. Infolge des Klimawandels werden Schneegleiten und Gleitschneelawinen zukünftig häufiger auftreten.



Figur 44 (links) Ablagerungen einer Nassschneelawine im Januar 2018.



Figur 45 (rechts) Durch die langsame, hangparallele Bewegung der Schneedecke haben sich Gleitschneerisse (Fischmäuler) gebildet.

7.2 Übersicht und Funktion von Lawinenverbauungen

Lawinenverbauungen aus Holz werden insbesondere als temporäre Stützwerke und als Gleitschneeschutzmassnahmen eingesetzt. Holz wird weiter für Verwehungsverbauungen und eher selten für Spaltkeile verwendet. Holzverbauungen in der Form von Schneehägen oder Verpfählungen wurden bereits vor 150 Jahren gebaut und gehören zu den ersten technischen Schutzmassnahmen im Anrissgebiet von Lawinen. Heute bestehen in der Schweiz mehr als 200 km temporäre Stützwerke aus Holz. Ein Stützwerk soll die Schneedecke so stabilisieren, dass das Anbrechen von Lawinen möglichst verhindert wird und dass kleine Lawinen, die nie vollständig verhindert werden können, abgebremst und gestoppt werden (vgl. Figur 46). Zu Beginn des Lawinenverbaus wurde die Tragkonstruktion oft aus Stahl gefertigt, und die Rostbalken waren aus Rundholz. Temporäre Stützwerke werden wenn möglich mit Aufforstungen kombiniert, dies mit dem Ziel, dass innerhalb der erwarteten Nutzungsdauer von 30–50 Jahren der Wald die Schutzfunktion übernehmen kann. Gegenüber permanenten Stützwerken aus Stahl haben Lawinenverbauungen aus Holz den Vorteil, dass die spätere Waldpflege einfacher möglich ist und der Rückbau meist entfällt. Infolge der beschränkten Nutzungsdauer und limitierten Werkhöhe liegt der primäre Einsatzort von temporären Stützwerken in Anrissgebieten unterhalb der Waldgrenze. Weitere typische Einsatzorte sind kleinere Anrissgebiete im Siedlungsgebiet oder oberhalb von Verkehrsachsen, Sturmflächen sowie grössere Verjüngungsflächen in bewaldeten Anrissgebieten. Sind die statischen Anforderungen höher oder das Aufkommen einer Aufforstung weniger wahrscheinlich, werden auch kombinierte Holz-Stahl-Werke verwendet.





Figur 46 (links)
Holzschneerechen in einem Aufforstungsgebiet.

Figur 47 (rechts)
Dreibeinböcke in einem Gleitschneehang im Siedlungsgebiet.

Holz hat sich als Baumaterial für Gleitschneeschutzmassnahmen durchgesetzt (vgl. Figur 47). Stahl oder Aluminium kommen nur ausnahmsweise zum Einsatz. Gleitschneeschutzmassnahmen erhöhen die Bodenrauhigkeit, damit sich die Schneedecke besser mit dem Boden verzahnt und nicht mehr abgleitet. Als Massnahmen werden Verpfählungen, Holzschwellen sowie Dreibeinböcke verwendet. Diese aufgelösten Massnahmen erzeugen wegen der im Vergleich zu Stützwerken kleineren Abmessungen nur einen lokalen Stützeffekt. Für einen erfolgreichen Einsatz ist deshalb ein Einbau in der Fläche erforderlich. Sonst können die Massnahmen überbeansprucht und zerstört werden. Gleitschneeschutzmassnahmen werden insbesondere an Standorten, an denen die Jungpflanzen einen zusätzlichen Schutz brauchen, auch mit temporären Stützwerken kombiniert. Häufige Einsatzorte sind neben Aufforstungsprojekten auch gefährliche Gleitschneehänge oberhalb von Verkehrswegen, Skipisten oder Siedlungen.

Verwehungsverbauungen beeinflussen den Ablagerungsort und die Verteilung der durch den Wind verfrachteten Schneemassen (vgl. Figur 48). Triebschneezäune, die oft als reine Holzkonstruktionen gebaut werden, kommen zum Schutz von Verkehrsachsen vor Schneeeinwehungen oder zur Verminderung von zu grossen Schneehöhen in Lawinenanrissgebieten zum Einsatz. Aus Landschaftsschutzgründen oder wenn die Lawineneinwirkungen klein sind, kann ein Spaltkeil aus Holz (vgl. Figur 49) oder als kombinierte Holz-Stahl-Konstruktion gefertigt werden. Ein Spaltkeil lenkt die anströmende Lawine links und rechts am zu schützenden Objekt vorbei.



Figur 48 (links)
Triebschneezaun aus 5 m langen Holzelementen.



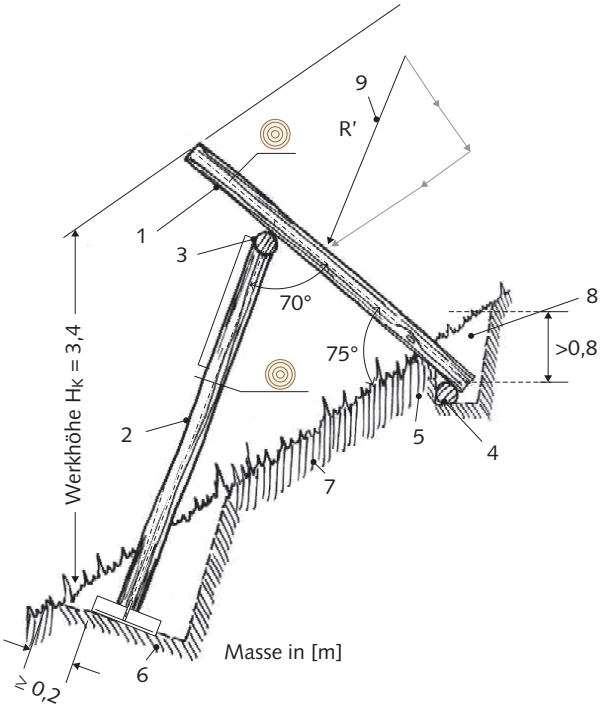
Figur 49 (rechts)
Ein Spaltkeil, der aus Holz gebaut wurde, schützt ein Wohngebäude.

7.3 Konstruktion und Anwendung von Lawinenverbauungen aus Holz

Für die optimale Planung von Lawinenverbauungen aus Holz werden in einem ersten Schritt das Lawinen- oder Schneegleitproblem, mögliche Ursachen und die Konsequenzen für Menschen und Sachwerte aufgezeigt. Darauf basierend werden der Handlungsbedarf und das Schutzziel der Massnahme abgeleitet. Wichtige Punkte für die Wahl möglicher Massnahmen und die Beurteilung ihrer Machbarkeit sind die Schneehöhe, die Topografie, die Vegetation, die Hangneigung, die Bodenrauhigkeit, die Wuchsbedingungen und der Baugrund. Bedeutend ist auch die Beurteilung der Kostenwirksamkeit. Auf der Grundlage dieser Informationen wird eine Vorstudie oder ein Bauprojekt ausgearbeitet. Unimprägnierte Verbauungen werden mit kernholzbildenden Baumarten wie Edelkastanie, Robinie oder Eiche erstellt. An gutwüchsigen Standorten kann auch Lärchenholz eingesetzt werden. Fichten- und Tannenholz muss imprägniert werden, was aus Umweltschutzgründen nicht mehr praktiziert wird.

7.3.1 Temporäre Stützwerke

In der Schweiz wird der Holzschneerechen mit senkrecht zur Niveaulinie angeordneten Rosthölzern am häufigsten eingesetzt. Der Rost überträgt den hangparallel wirkenden Schneedruck bergseits auf die Schwelle und talseits auf Pfette und Stützen (vgl. Figur 50 und Figur 51). Um die seitliche Stabilität der Werke zu erhöhen, wird zwischen Pfette und Stütze zusätzlich ein Querholz eingebaut, der sogenannte Bug. Die einzelnen Elemente aus Rundholz werden vernagelt. Schneerechen werden in der Regel als Einzelwerke mit einer Breite von 4 m gebaut. Schneerechen werden gegenüber Schneebrücken bevorzugt, weil die bergseitige Verankerung der Schwelle auf der ganzen Werkbreite einfacher möglich ist, die schief stehenden Rosthölzer weniger fäulnisgefährdet sind und das Jungholz beim Durchwachsen von Schneerechen weniger Bruchschäden durch Abbiegen der Stämme erleidet. Die optimale Neigung des Rostes beträgt gegenüber der Hangsenkrechten 15° und der Winkel zwischen Stütze und Rost 70°. Wird der Rost steiler ausgebildet, werden die bergseitigen Verankerungskräfte grösser. Holzschneerechen können eine Schneedecke mit einer maximalen Höhe von 3,4 m abstützen. Für den Bau von Holzschneerechen sind Bauanleitungen und Werkpläne verfügbar [37], welche die gemäss der Technischen Richtlinie [34] erforderlichen Abmessungen der Bauteile in Abhängigkeit von der Schneehöhe und Hangneigung vorgeben. Ein projektspezifischer Nachweis der inneren und äusseren Tragsicherheit wird in der Regel nicht durchgeführt. Die Tragfähigkeit der Standard-Holzschneerechen basiert auf einem Gleitfaktor von 1,8. Der Gleitfaktor beschreibt die Bodenrauhigkeit und beeinflusst die Grösse des Schneedrucks stark. [34] Bei kleinen Bodenrauhigkeiten und höheren Gleitfaktoren wird der Bau von zusätzlichen Gleitschneeschutzmassnahmen wie Dreibeinböcken zwischen den Werkreihen empfohlen. Für eine Schneehöhe von 3,4 m und eine Hangneigung von 45° beträgt am Werkrand der Durchmesser der 3,30 m langen Rostbalken 20 cm, der Durchmesser der Pfette ist 27 cm und jener der Schwelle 20 cm (vgl. Figur 50). Die 5 m langen Stützen benötigen einen Durchmesser von 24 cm, um nicht auszuknicken. Zu beachten ist, dass unnötig grosse Abmessungen der Bauteile hinsichtlich Holzfeuchtigkeit für die Nutzungsdauer von Nachteil sind. Die Ausführung der Fundation von Holzschneerechen ist für eine lange Nutzungsdauer sehr wichtig. Je nach Untergrund bestehen verschiedene Varianten. In flachgründigen Böden wird die Schwelle mit Seilankern im Fels verankert. In dicht gelagertem



Figur 50
Prinzipskizze Holzschneerechen Typ SLF mit Grabenschwellenverankerung.

1 Rost: Rundholz (d = 20 cm, L = 330 cm)
2 Stütze: Rundholz (d = 24 cm, L = 500 cm)
3 Pfette: Rundholz (d = 27 cm, L = 400 cm)
4 Schwelle: Rundholz (d = 20 cm, L = 400 cm)
5 bergseitiges Auflager
6 talseitiges Auflager
7 Lockergestein
8 Erdüberdeckung
9 Resultierende des Schneedrucks

Lockergestein kommt die Grabenschwelle zum Einsatz (vgl. Figur 50), bei der die Schwelle rund 80 cm tief als ‹Toter Mann› eingegraben wird. In nicht erosionsgefährdeten Böden kann die Schwelle auch offen mit Pfählen gesichert eingebaut werden. Die Stütze wird mit einem Stahldorn auf einer Stahl- oder Betonplatte versetzt, die mindestens 20 cm im gewachsenen Boden eingegraben wird. Holzschneerechen werden gleich wie permanente Stützwerke geplant und im Gelände angeordnet. [34]



Figur 51
Holzschneerechen Typ SLF in Kombination mit Aufforstungen zum Schutz einer Verkehrsachse.

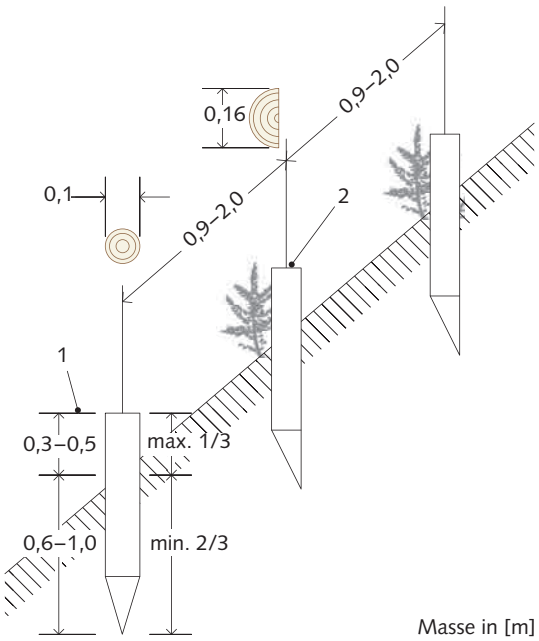
Die Werkabstände in der Falllinie hängen insbesondere von der Werkhöhe und der Hangneigung ab. Bei einer Hangneigung von 35° und einer Werkhöhe H_k von 3,4 m beträgt der hangparallele Werkabstand rund 24 m. Sind die Werkabstände zu gross, können Schäden infolge Schneedrucks auftreten. Wichtig ist, dass die obersten Werke kurz unter den höchstliegenden Anrisslinien von Lawinen gebaut werden. Im offenen, flächigen Gelände bewährt sich die durchgehende Anordnung der Werke (vgl. Figur 51). In Kombination mit Aufforstungen und waldbaulichen Massnahmen kann von Holzschneerechen eine ähnliche Wirkung wie von permanenten Stützwerken aus Stahl erwartet werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Holzqualitäten den Ansprüchen der lokal erforderlichen Nutzungsdauer genügen und der Jungwald die Schutzfunktionen nach dieser Zeitspanne übernehmen kann. Dann sind Holzschneerechen eine bautechnisch einfache und kostengünstige Verbaumassnahme.

7.3.2 **Gleitschneeschutzmassnahmen**

Gleitschneeschutzmassnahmen werden in der Regel aufgrund von Erfahrungswerten ohne statische Nachweise projektiert. Für die Projektierung sind Bauanleitungen verfügbar. [37] Imfolgenden werden die wichtigsten Massnahmen vorgestellt.

7.3.2.1 Verpfählung

Einzelne Holzpfähle werden im Dreiecksverband manuell oder maschinell in den Boden gerammt (vgl. Figur 52 und Figur 53). Die Abstände in der Falllinie variieren zwischen 90 cm (Hangneigung 45°) und maximal 2 m (Hangneigung 30°). Als notwendiger Pfahldurchmesser wird für Rundhölzer 10 cm und für Halbrundhölzer 16 cm verwendet. Die Pfahlhöhe über dem Boden beträgt 30–50 cm. Das ideale Verhältnis der Rammtiefe zur Pfahllänge über dem Boden beträgt 2:1. In dichten Böden beträgt die minimale Rammtiefe 60 cm und in lockeren Böden 80–100 cm. Wird die Rammtiefe zu klein gewählt, können die Pfähle durch die Schneedruckwirkung umgedrückt und ausgerissen werden. Verpfählungen haben sich nicht nur für den Schutz von Jungpflanzen, sondern auch zur Verhinderung von Gleitschneerutschen an kurzen, steilen Strassenböschungen bewährt.



Figur 52
Prinzipskizze Verpfählung. Je nach Hangneigung variiert der Abstand zwischen 90 cm (45°) und 200 cm (30°).

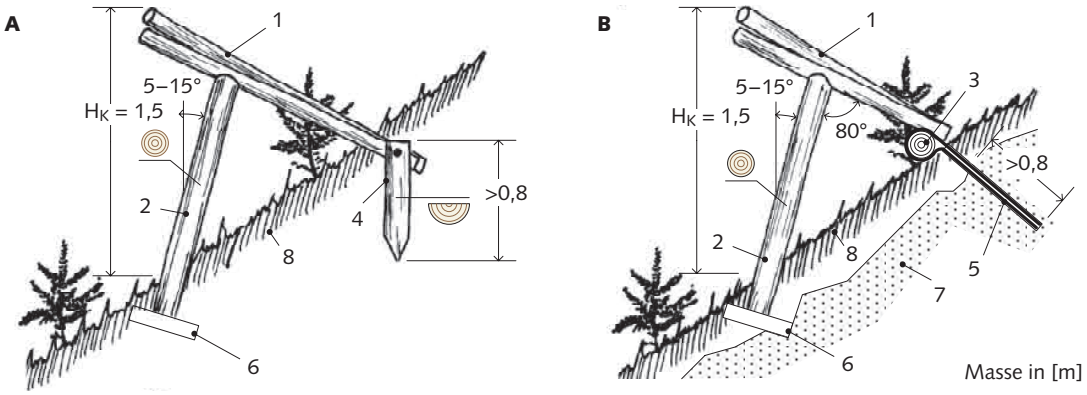
1 Rundholz (d = 10–15 cm, L = 90–150 cm)
2 Halbholz (d = mind. 16 cm, L = 90–150 cm)



Figur 53
Verpfählung zum Schutz einer Erschliessungsstrasse vor Schneegleiten; wichtig ist das Einrammverhältnis der Pfähle von 2:1 im/über dem Boden.

7.3.2.2 Dreibeinböcke

Der Dreibeinbock, auch unter dem Namen ‹Ogi-Bock› bekannt, ist die in der Schweiz am häufigsten eingesetzte Gleitschneeschutzmassnahme. Es gibt mehrere 10 000 Dreibeinböcke. Im Zusammenhang mit Aufforstungen schützt der Dreibeinbock die Jungpflanzen nicht nur vor Schneegleiten, sondern im Dickungs- und Stangenholzalter auch wirkungsvoll vor Schneekriechen. Er bewirkt zusätzlich ein früheres Ausapern um die Holzpfosten herum. Dadurch wird die Vegetationszeit für die Jungpflanzen verlängert. Die Böcke bestehen aus zwei V-förmig angeordneten, gekreuzten, rund 2 m langen Rundhölzern mit einem Durchmesser von 10–14 cm, die bergseitig mit einem Querholz versehen sind, das je nach Bodenverhältnissen mit Bewehrungsstäben, Pfählen oder Seilen verankert ist. Talseitig stehen die Rundhölzer auf einer Stütze mit Durchmesser von 12–15 cm, die auf einer kleinen Fundamentplatte aus Beton oder Stahl fundiert ist (vgl. Figur 54 und Figur 55). Dreibeinböcke werden in einem Raster mit Abständen von Stütze zu Stütze von 1,5–2,0 m angeordnet. Bei flächigen Verbauungen werden pro Hektare je nach Hangneigung rund 500–750 Dreibeinböcke eingebaut. Dreibeinböcke sind rund 1,5 m hoch. Werden Dreibeinböcke überschneit, kann die Stütze in den Boden gedrückt werden, oder die Auskragung der Rundhölzer kann brechen. Idealer Einsatzort sind Gleitschneehänge unterhalb der Waldgrenze. Bei Hängen, die flacher als etwa 35° sind, können Dreibeinböcke zusammen mit Aufforstung auch in Rotten angeordnet werden. Wichtig ist, dass in den Randbereichen die Dreibeinböcke sorgfältig positioniert werden, um Schneedruckschäden infolge von Randeffekten zu verhindern.



Figur 54
Prinzipskizze Dreibeinböcke mit Schwellen- und Pfahlverankerung.

A Dreibeinbock mit Pfahlverankerung
B Dreibeinbock mit Schwellenverankerung

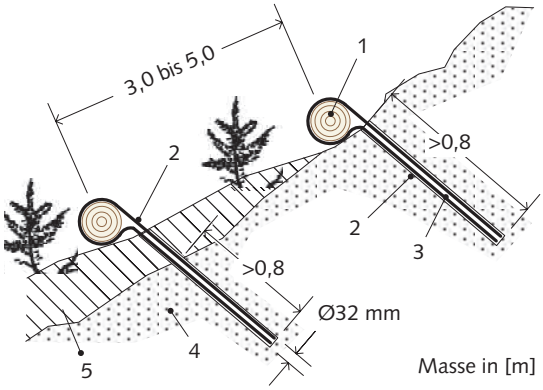
1 Trägerelement: Rundholz (d =10–14 cm, L = 200 cm)
2 Stütze: Rundholz (d = 12–15 cm, L = 220 cm)
3 Schwelle: Rundholz (d = 16–20 cm, L = 200 cm)
4 Pfahlanker: Halbholz (d = 16 cm, L = 80 cm)
5 Seilanker (Spiralseil d = 7,5 mm, verzinkt)
6 Fundamentplatte aus Metall, Stein oder Stahlbeton (25/25/10)
7 Felsen
8 Lockergestein (Boden)



Figur 55
Dreibeinböcke mit bergseitigem Querholz schützen Jungpflanzen vor Schneegleiten und -kriechen.

7.3.2.3 Holzschwellen

Eine Holzschwelle besteht aus einem 4 m langen Rundholz mit einem Durchmesser von 30 cm, das mit Seilschlaufen an zwei Seilankern befestigt ist (vgl. Figur 56 und Figur 57). Im Fels soll die Verankerungslänge mindestens 0,8 m betragen und im Lockergestein je nach Lagerungsdichte rund 3 m. Im Lockergestein werden anstelle von Seilankern vereinzelt auch Erdkippanker eingesetzt, die in den Boden gerammt und aufgespreizt werden, oder mit Stabankern fundierte Stahlschuhe, an denen die Schwellen befestigt werden. Der Schwellenabstand in der Falllinie variiert je nach Hangneigung zwischen 3 m und 5 m. Die Schwellen werden aufgelöst im Dreiecksverband eingebaut. Ideale Einbauorte sind anstehender Fels oder flachgründige Böden. In wenig tragfähigen, leicht erodierbaren Böden können die hohen Verankerungskosten den Einbau von Schwellen unwirtschaftlich machen. Im Vergleich zu Dreibeinböcken und Verpfählungen sind Holzschwellen viel robuster und können deshalb auch in hochgelegenen Gebieten mit grossen Schneehöhen eingebaut werden. Im Laufe der Zeit können Holzschwellen in den Boden gepresst werden und dadurch an Wirkungshöhe verlieren. Dies kann verhindert werden, indem die Holzschwellen auf zwei runde, 1,5 m lange Querhölzer gestellt werden oder indem die Holzschwellen periodisch freigelegt werden. In den letzten Jahren wurden Holzschwellen vermehrt zum Schutz von Skipisten vor Gleitschneelawinen eingesetzt.



Figur 56
Prinzipskizze Holzschwelle. Die Schwellen sind mit zwei Spiralseilen direkt im Fels verankert.

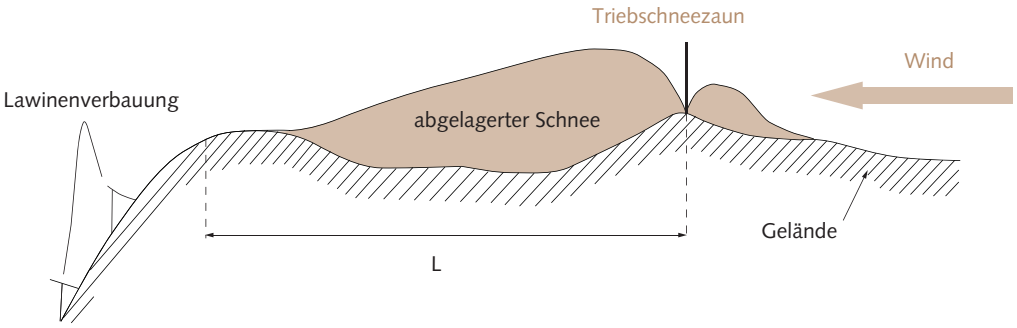
1 Querholz (d = 30 cm, L = 400 cm)
2 Seilanker (Spiralseil d = 11 mm, verzinkt)
3 Ankermörtel
4 Felsen
5 Lockergestein (Boden)



Figur 57
Holzschwellen mit zwei Seilankern fundiert. Der Vorteil des Seilankers ist, dass die Schwellen, falls erforderlich, einfacher ausgewechselt werden können.

7.4 **Triebschneezäune**

In den letzten 20 Jahren wurden im Kanton Graubünden verschiedene Triebschneezäune aus selbsttragenden, 5 m langen Holzelementen erfolgreich eingesetzt (vgl. Figur 59). Diese Konstruktion wurde in den USA vor mehr als 50 Jahren entwickelt [61] und dort häufig zum Schutz von Verkehrsachsen eingesetzt. Die Holzkonstruktion besteht aus drei 4 m hohen und 15° geneigten Trägern, die je zweifach abgestützt und mit zwei Bodenbrettern verschraubt sind. An die geneigten Träger werden 5 m lange und 15 cm hohe Bretter in Abständen von 15 cm verschraubt, damit der Füllungsgrad des Zaunes 50 % beträgt. Wichtig ist, dass zwischen dem untersten Brett und dem Boden ein Spalt besteht, dessen Höhe mindestens 10 % der Zaunhöhe beträgt. Dieser Bodenspalt erzeugt einen lokalen Düseneffekt und verhindert ein frühzeitiges Einschneien des Zaunes. Damit die seitliche Stabilität gewährleistet ist, werden zusätzlich drei Bretter diagonal als Windverbände eingebaut. Die einzelnen Elemente werden mit sechs Erdankern fundiert. Der Vorteil dieser Holzkonstruktion ist, dass sie von einer Forstgruppe gebaut werden kann und dass sie, falls erforderlich, im Gelände relativ einfach versetzt werden kann. Der Abstand vom Zaun zum Lawinenanrissgebiet oder zur zu schützenden Verkehrsachse sollte 15- bis 20-mal die Zaunhöhe betragen (vgl. Figur 58). Vor dem Bau braucht es eine umfassende Untersuchung der Wind- und Schneeverhältnisse im Projektgebiet. Optimal ist, wenn der Standort flach ist.



Figur 58
Prinzipskizze eines Triebschneezauns, der eine Lawinenverbauung vor grossen Triebschneeansammlungen schützt. Der Triebschneezaun bewirkt, dass die Schneemassen oberhalb der Verbauung abgelagert werden. Der Abstand L vom Triebschneezaun zum zu schützenden Gebiet sollte mehr als die 15- bis 20-fache Zaunhöhe betragen.



Figur 59
Triebschneezaun aus Holzelementen. Im Lee des Zaunes (links im Bild) hat sich eine grosse Schneeablagerung gebildet.

7.5 Grenzen des Einsatzes von Holzverbauungen

Die grössten Nachteile von Holz gegenüber von Stahl sind die geringere Dauerhaftigkeit (vgl. Figur 60) und die geringere Festigkeit. Insbesondere im Übergangsbereich Boden/Luft kann Fäulnis zum vorzeitigen Versagen von Holzelementen führen. Die Holzfestigkeit erlaubt ein wirtschaftliches Bauen von temporären Stützwerken bis zu einer Werkhöhe von rund 3,4 m. Grössere Werkhöhen würden zu schwere Bauteile und zu massive Querschnittsabmessungen bedingen. Temporäre Stützwerke wie Holzschneerechen sind auf waldfähigen Standorten sinnvoll, wo das Heranwachsen des Waldes möglich ist. Ist dies innerhalb der Nutzungsdauer der Holzverbauungen nicht möglich, kann je nach Schutzziel der Einsatz von Stahlverbauungen wirtschaftlicher sein. An schneereichen Standorten, an Lagen mit schlechten Wuchsbedingungen und insbesondere oberhalb der Waldgrenze soll deshalb auf den Einsatz von Holzschneerechen verzichtet werden. Holzverbauungen werden in der Regel nicht mit gebohrten Mikropfählen und Ankern fundiert. Ihr Einsatz ist deshalb auf Böden mit mittleren bis guten Fundationsverhältnissen beschränkt. Gleitschneeschutzmassnahmen wie Dreibeinböcke oder Verpfählungen sollen nur unterhalb der Waldgrenze eingebaut werden, da sie bei grossen Schneehöhen schadenanfälliger sind als Holzschwellen. In landwirtschaftlich genutzten Gleitschneehängen sind Gleitschneeschutzmassnahmen oft nicht erwünscht, da die Bewirtschaftung erschwert wird. Alle Gleitschneeschutzmassnahmen funktionieren nur, wenn sie in der Fläche eingebaut werden.



Figur 60
Gebrochener morscher Rostbalken einer kombinierten Holz-Stahl-Schneebrücke.

8 Schutzbauten und Nachhaltigkeit

In diesem Kapitel werden Schutzbauwerke in den Kontext der Nachhaltigkeit gestellt. Anhand eines konkreten Fallbeispiels aus Österreich wird eine Ökobilanz gerechnet. Wichtig ist, dass dieses Beispiel nicht repräsentativ für andere Bauwerke oder Baustellen ist. Jedes Bauwerk ist mit seinen spezifischen Ausgangsbedingungen sowie den Details zur Errichtung, Nutzung und Lebensendphase individuell zu beurteilen bzw. zu kalkulieren.

8.1 Einleitung

Der Begriff Nachhaltigkeit wurde durch den Forstwirt Hans Carl von Carlowitz im Jahr 1713 geprägt, als er das Dreieck von ökologischem Gleichgewicht, ökonomischer Sicherheit und sozialer Gerechtigkeit beschrieb. [62] Sein Werk ‹Sylvicultura Oeconomica›, mit dem er die nachhaltige Verwendung von Holz forderte, wurde in ganz Europa angenommen. Das Prinzip der Nachhaltigkeit bzw. der nachhaltigen Entwicklung wurde somit aus dem forstlichen Bereich heraus auf viele globale Umweltprobleme bezogen und ist so zu einer grundlegenden Handlungsmaxime in allen Wirtschafts- und Gesellschaftsbereichen geworden. Das zeigt auch die klassische Definition der Brundtland-Kommission aus dem Jahr 1987: ‹Nachhaltige Entwicklung ist eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen.› [63]

Heute wird die ‹nachhaltige Entwicklung› wohl klassischerweise mit dem ‹Dreikreisemodell› beschrieben, das im Nachgang zur Konferenz von Rio (Weltkonferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung in Rio de Janeiro 1992) entwickelt wurde. Eine nachhaltige Entwicklung zielt demnach auf einen haushälterischen Umgang mit Ressourcen (Umwelt, Ökologie), eine solidarische Gesellschaft (Soziales) und wirtschaftliches Wohlergehen (Ökonomie) ab. Alle drei Kreise – Ökologie, Soziales und Ökonomie – müssen berücksichtigt werden; sie nehmen aufeinander Bezug und überschneiden sich in wesentlichen Teilen.

Nach diesem Konzept haben sich diverse Methoden entwickelt, welche die Nachhaltigkeit von Produkten und Dienstleistungen bewerten sollen und damit ein Werkzeug zur Unterstützung in Nachhaltigkeitsentscheidungen sind. Eine dieser Methoden ist die Ökobilanzierung (engl. ‹Life Cycle Assessment›, LCA). Eine Ökobilanz kann auf unterschiedliche Systeme angewandt werden, von spezialisierten Produkten bis zu globalen, multinationalen Firmen und ganzen Industrien (SN EN ISO 14040 [64]). Dabei werden in erster Linie ökologische Wirkungen bewertet. Soziale und wirtschaftliche Aspekte von Nachhaltigkeit sind aktuell noch durch getrennte, aber verwandte Methoden abgedeckt – Social LCA (sLCA) und Life-Cycle Costing (LCC).

Die schweizerische Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren KBOB stellt der Baubranche über die Fachgruppe Nachhaltiges Bauen Ökobilanzzahlen von Baustoffen zur Verfügung. Die Werte basieren auf branchenbezogenen Stoff- und Energieflüssen, wobei vereinfachend drei Umweltindikatoren ausgewiesen werden. Dies sind die Primärenergie (unterteilt in erneuerbar, nichterneuerbar), die Treibhausgasemissionen (THG-E) und die Umweltbelastungspunkte (UBP). In dieser Berechnungsmethode werden die Herstellung des Produktes, Transportwege und der Rückbau bzw. die Entsorgung berücksichtigt. Die Nutzungsphase der Baustoffe, also der Zeitraum ab Einbau bis zum Austausch bzw. Rückbau, wird nicht mit einberechnet. Die zur Verfügung gestellten Werte für Baustoffe aus Holz können nur bedingt für die Verwendung einer LCA-Analyse von Schutzbauten verwendet werden, da es sich bei diesen Werten für Holz z. B. um gesägtes und getrocknetes Bauholz handelt. Somit sind Prozesse bereits erfasst, welche bei der Erstellung von Schutzbauten aus Rundholz nicht anfallen.

In diesem Kapitel wird ein Fallbeispiel aus Österreich präsentiert. Es vergleicht die Umweltauswirkungen anhand der beiden Wirkungskategorien Treibhausgasemissionen (THG-E) [t CO_2-eq.] und Primärenergie (PE) [GJ], welche bei der Errichtung von Holzsperren bzw. Betonsperren in einem Wildbacheinzugsgebiet entstehen. Der Fokus liegt auf den ökologischen Umweltwirkungen; die ökonomischen und sozialen Wirkungen werden in dieser Studie nicht berücksichtigt. [65]

8.2 Normen und Datengrundlagen

Als Anleitung für die Erstellung und Durchführung von Ökobilanzen stehen die Normen SN EN ISO 14040 [64] und SN EN ISO 14044 [66] zur Verfügung. In diesen Normen sind die Grundsätze, die Rahmenbedingungen sowie die Anforderungen an eine Ökobilanz festgelegt. Eine Ökobilanz bezieht sich auf die Umweltaspekte und potentiellen Umweltwirkungen im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung. [64]

Für die Durchführung einer Ökobilanz stehen unterschiedliche Softwarelösungen und Datenbanken zur Verfügung. Im vorliegenden Fallbeispiel wurden die Software OpenLCA (Version 1.4.2) und die Schweizer Datenbank Ecoinvent (Version 2.2, herausgegeben 2007, Schweiz) [67] verwendet. Die aus der Schweiz stammenden Datensätze wurden speziell für die in Österreich produzierten Materialien angepasst. Treibstoffverbrauch sowie Emissionen von Baumaschinen wurden mangels österreichischer Daten anhand der Schweizer Non-Road-Database [68] für das Jahr 2015 ermittelt.

8.3 Ökobilanz von Wildbachbauwerken – Fallbeispiel

Bei dem ausgewählten Fallbeispiel handelt es sich um eine Wildbachregulierung im Mauerbodenbach, einem Teileinzugsgebiet des Oselitzenbaches im Bezirk Hermagor, Kärnten, Österreich.
Das Beispiel untersucht vier Sperrenbauwerke in Ortbetonbauweise (siehe Figur 61), welche der Stabilisierung der Grabeneinhänge und einer Hangrutschung dienen. Die betrachteten Querbauwerke weisen eine Absturzhöhe von 2,5–4,5 m auf. Die Vorfelder bestehen aus Grobsteinschlichtungen, für deren Herstellung Findlingssteine in Ortbeton verlegt wurden. Dieses Beispiel wird in fünf Varianten berechnet. Die Variante B1 rechnet die tatsächliche Ausführung in Beton nach. Die Variante B2 legt zum Vergleich grössere als die tatsächlichen Transportdistanzen der Berechnung zugrunde. Grundlage für die Berechnung der Betonvarianten ist der Baubericht 2006/07 Mauerbodenbach der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) in Österreich.

Die Variante H1 berechnet die in Beton ausgeführten Bauwerke so, also wären sie in Holz ausgeführt worden, wobei die Abmessungen der Ansichtsfläche der Bauwerke unverändert bleiben. Die Variante H2 legt dafür grössere Transportdistanzen zugrunde, und die Variante H3 geht von Transportdistanzen aus, wie sie bei der Verwendung von regionalem Holz realistisch erscheinen. Grundlagen für die Berechnung der Holzvarianten liefert der Ausführungsnachweis aus dem Jahr 2003 der WLV für eine Regulierung des Jagdhüttengrabens, der ebenfalls im Einzugsgebiet des Oselitzenbaches liegt (vgl. Figur 62). Zur Errichtung dieser Regulierung wurde Robinienholz aus Rumänien verwendet. Die Sperrenvorfelder sind als Grobsteinschlichtungen ausgeführt, wofür Findlinge in Transportbeton verlegt wurden.



Figur 61 (links) Betonquerbauwerke am Mauerbodenbach aus den Jahren 2006/2007 [65].



Figur 62 (rechts) Holzquerbauwerke im Jagdhüttengraben aus dem Jahr 2003 [65].

Die folgende Tabelle 4 zeigt einen Ausschnitt der Hauptbaustoffe und Geräte für das Fallbeispiel. Eine solche Zusammenstellung wird in der SN EN ISO 14040 [64] als Sachbilanz bezeichnet.

Tabelle 4
Ausschnitt der Sachbilanz [65].

Baumaterial/Maschine	Einheit	Varianten Beton (B1, B2)	Varianten Holz (H1, H2, H3)
Hartbeton (schwer)	t	1,38	–
Zement CEM II/32,5 N lose (PZ)	t	262,38	–
Betonschotter 0/22	t	1.512.62	–
Grobschlag	t	–	1.254,60
Wegschotter	t	62,40	62,40
Bewehrungsstahl	t	8,64	–
Rundholz MDM >24 cm	m^3	5,87	178,87
Bewehrungsstahlnägel	kg	24,80	1.114,8
LKW + Hiab	h	100,50	155,50
Kettenbagger	h	312,50	293,00
Schreitbagger	h	4,50	441, 50
Raupendumper	h	216,00	–
VW Golf	h	26,00	26,00

In Tabelle 5 ist ein Ausschnitt der Transporte sämtlicher Materialien mit den Entfernungen für die zwei Varianten in Betonbauweise mit einer Herstellung des Betons vor Ort (B1, B2) und die drei Varianten in Holzbauweise (H1, H2, H3) dargestellt. Für die Betonbauweise beträgt die durchschnittliche LKW-Transportdistanz 66 km (Variante B1) und 135 km (Variante B2). Bei der Holzbauweise beträgt die durchschnittliche LKW-Transportdistanz 54 km (Variante H1), 114 km (Variante H2) und 45 km (Variante H3).

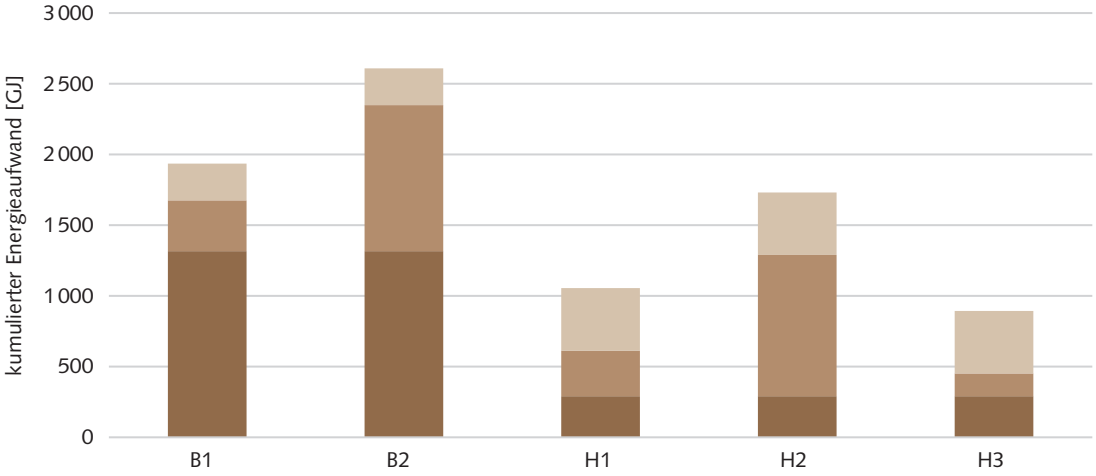
Tabelle 5 Variation des Fallbeispiels durch Transportdistanzen – Ausschnitt [65].

Transportgut	**Trans-port-mittel**	**Varianten Betonquerwerke**		**Varianten Holzquerwerke**		
		B1 tatsächliche Transport-distanzen [km]	**B2** erweiterte Transport-distanzen [km]	**H1** tatsächliche Transport-distanzen [km]	**H2** erweiterte Transport-distanzen [km]	**H3** Transport-distanz bei Verwendung von regionalem Holz [km]
Zement	LKW	138	200	–	–	–
Schotter	LKW	32	100	32	100	32
Grobschlag	LKW	–	–	18	100	18
Bewehrungsstahl	LKW	130	300	130	300	130
Rundholz Lärche	LKW	28	100	–	–	28
Rundholz Robinie	LKW	–	–	69	100	–
Rundholz Robinie	Zug	–	–	500	1500	–
Sonstiges Kleinmaterial	Pritsche	69	100	69	100	69
Schreitbagger	LKW	38	100	38	100	38
Dumper	LKW	69	100	–	–	–
Mischer IMPE 500lt	LKW	69	100	–	–	–
Zementförderschnecken	LKW	69	100	–	–	–
Zementwaagen	LKW	69	100	–	–	–
Container	LKW	69	100	69	100	69

Des weiteren wurden die zu erwartende Nutzungsdauer und die anzunehmenden Erhaltungs- bzw. Instandhaltungsmassnahmen aus der Richtlinie ‹Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und Priorisierung von Massnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung› [69] entnommen. Die Richtlinie unterstellt für Stahlbetonbauwerke eine Nutzungsdauer von 80 Jahren und einen jährlichen Instandhaltungssatz von 0,2 % der Herstellungskosten. Der Instandhaltungssatz wurde für die Ökobilanz als jährlicher Prozentsatz der bauwerksbezogenen Herstellungsenergie bzw. ausgestossenen Emissionen verwendet. Holzbauwerken wird laut dieser Richtlinie eine Nutzungsdauer von 40 Jahren und ein Instandhaltungssatz von 0,5 % unterstellt. Grobsteinschlichtungen, welche zur Vorfeldsicherung der Querbauwerke erforderlich sind, sind mit einer Nutzungsdauer von 40 Jahren und mit einem jährlichen Instandhaltungssatz von 1 % der Herstellungskosten angegeben. Ist der Schutz durch die Bauwerke auch nach dem Ablauf der Nutzungsdauer immer noch notwendig, werden sie neu errichtet (meist einfach vorgebaut, um die Kosten für den Rückbau zu sparen). Wenn die Schutzfunktion der Bauwerke nicht mehr notwendig ist, werden die Bauwerke in Österreich meist einfach als sogenannte ‹Deponie› in der Landschaft belassen.

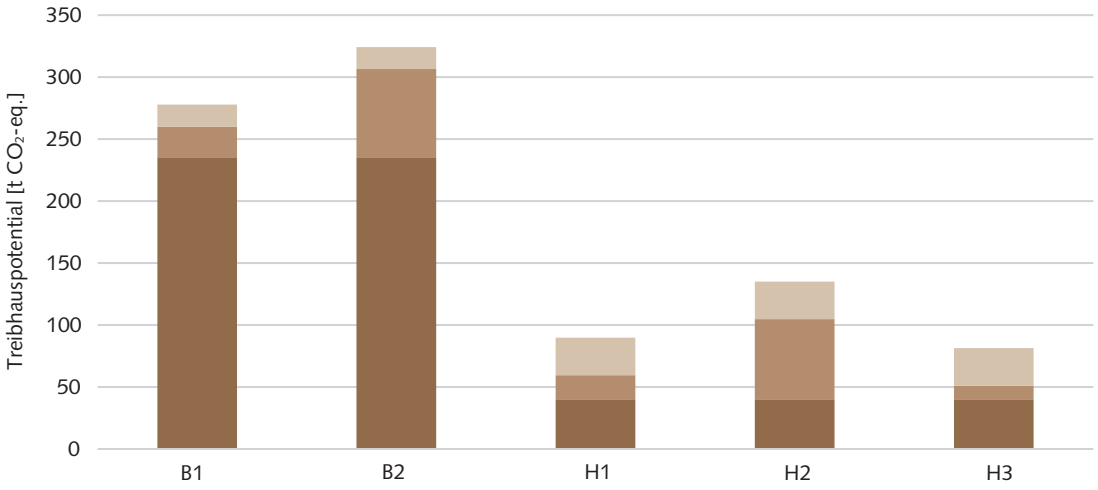
8.4 **Ergebnisse**

Die Ergebnisse der Errichtungsphase für die realen Varianten B1 und H1 zeigen in Bezug auf den Energieaufwand, dass bei der Betonvariante v. a. die Herstellung des Ortbetons relevant ist (vgl. Figur 63), während bei der Holzvariante die Transporte und der Maschineneinsatz auf der Baustelle eine grosse Rolle spielen. Die gesamte Primärenergie des Betonquerbauwerks beträgt 1935 GJ und jener der Holzquerbauwerke 990 GJ. Somit ist der gesamte Energieaufwand für die Errichtung der Betonbauwerke etwa doppelt so hoch wie jener der Holzbauwerke. Bei der Verwendung von regionalem Holz (H3) ist eine Verbesserung des Energiebedarfs von 11 % gegenüber der ursprünglichen Variante H1 möglich.



Figur 63
Energieaufwand der Errichtungsphase für die ausgeführten Varianten in Beton B1 und in Holz H1 (tatsächliche Transportdistanzen) sowie die Varianten mit erweiterten Transportdistanzen (B2 und H2) und die Variante H3 mit geringeren Transportdistanzen aufgrund der Verwendung von regionalem Holz [65].

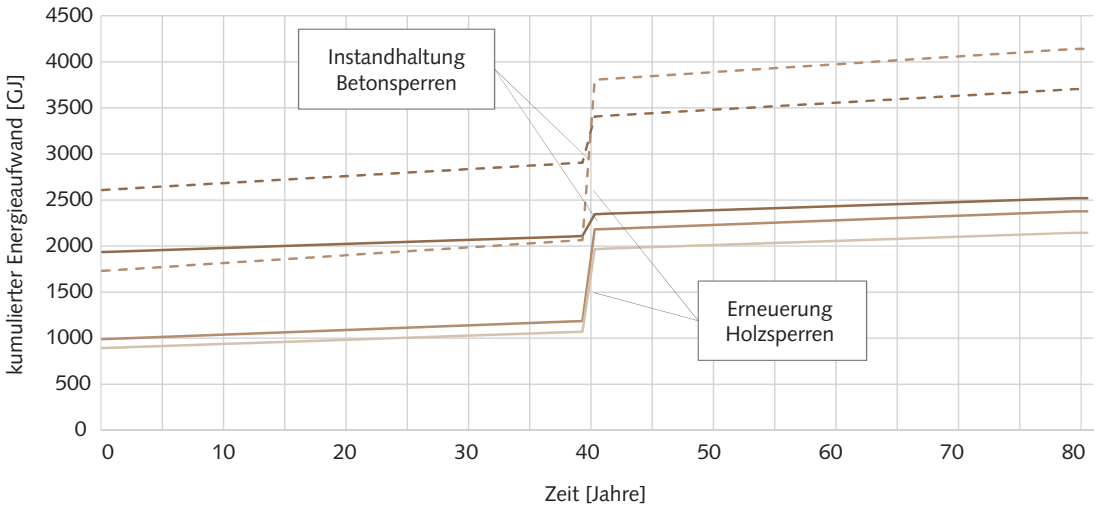
In Bezug auf die Treibhausgase zeigen die Ergebnisse der Errichtungsphase in den realen Varianten B1 und H1 (vgl. Figur 64), dass beim Betonquerbauwerk die Herstellung des Ortbetons relevant ist. Bei der Holzvariante spielen die Transporte und der Maschineneinsatz auf der Baustelle eine deutlich grössere Rolle. Die gesamten THG-E der Betonbauwerke betragen 278 t CO_2-eq. und jene der Holzbauwerke 87 t CO_2-eq. Im Unterschied zur Primärenergie sind die THG-E der Betonbauwerke somit etwa dreimal höher als jene der Holzbauwerke. Betrachtet man allerdings nur den Maschineneinsatz auf der Baustelle, so sind die Emissionen bei der Holzbauweise um 12 t CO_2-eq. höher als bei der Errichtung der Betonbauwerke. Der Einfluss der Transportdistanzen auf die CO_2-Belastung kann anhand der Varianten B2 (17 % höhere THG-E in Bezug auf B1) und H2 (56 % höhere THG-E in Bezug auf H1) abgelesen werden. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Höhe der Treibhausgasemissionen ganz wesentlich von den Transportdistanzen der Baustoffe zur Baustelle abhängt.



Figur 64
Treibhausgasemissionen der Errichtungsphase für die ausgeführten Varianten in Beton B1 und in Holz H1 (tatsächliche Transportdistanzen) sowie die Varianten mit erweiterten Transportdistanzen (B2 und H2) und die Variante H3 mit geringeren Transportdistanzen aufgrund der Verwendung von regionalem Holz [65].

- Maschineneinsatz
- Transporte zur Baustelle
- Produktion von Baumaterial

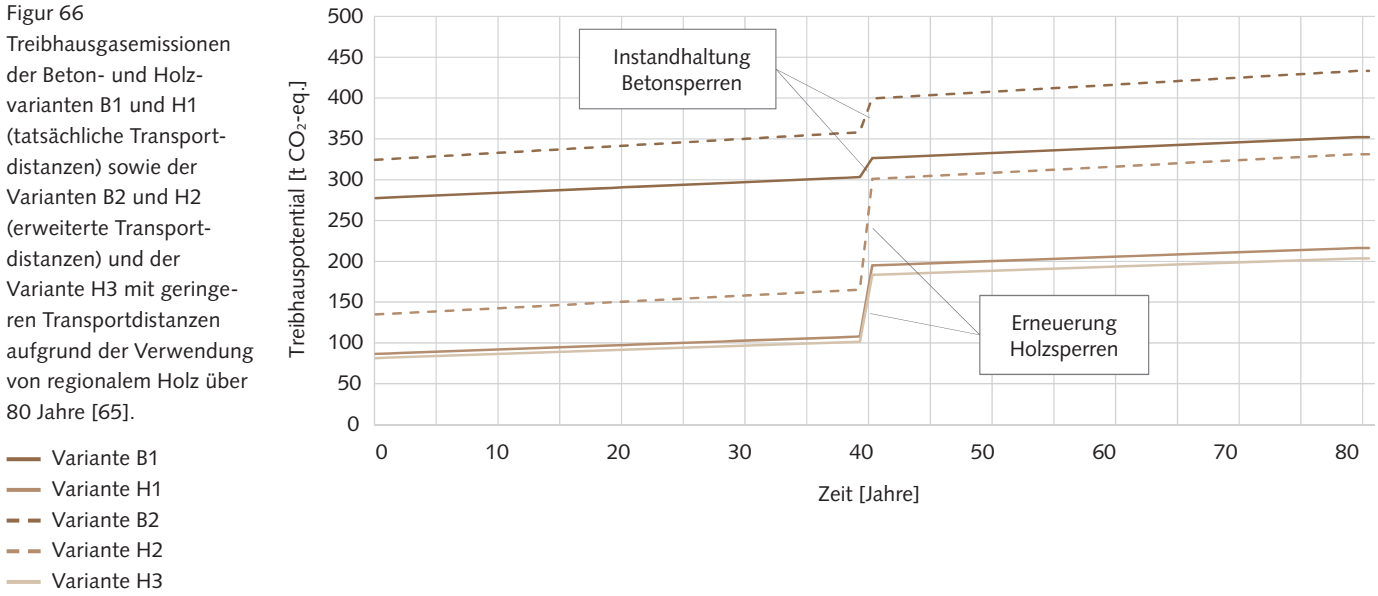
Bei der Errichtung der Variante H1 werden im Vergleich zu Variante B1 945 GJ an Energieaufwand eingespart. Unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus (Betrachtungszeitraum von 80 Jahren, mit Instandhaltung (Beton) bzw. Neubau (Holz) nach 40 Jahren und Deponierung nach 80 Jahren), in welchem die Holzkästen einmal komplett erneuert werden sollten, weisen beide Varianten einen annähernd gleichen Energieaufwand auf (vgl. Figur 65). Die Variante H2 ist die einzige Holzvariante, welche aufgrund der längeren Transportdistanzen nach 80 Jahren um 436 GJ schlechter bilanziert als die Betonbauwerke (B2). Das zeigt noch einmal deutlich die Bedeutung der Transportdistanzen für Baumaterialien auf.



Figur 65
Energieaufwand der Beton- und Holzvarianten B1 und H1 (tatsächliche Transportdistanzen) sowie der Varianten B2 und H2 (erweiterte Transportdistanzen) und der Variante H3 mit geringeren Transportdistanzen aufgrund der Verwendung von regionalem Holz über 80 Jahre [65].

- Variante B1
- Variante H1
- Variante B2
- Variante H2
- Variante H3

Beim Vergleich der Varianten B1 und H1 erhält man nach der Errichtung der Bauwerke einen Unterschied in der Treibhausgasbilanz von 192 t CO_2-eq. zugunsten der Ausführung in Holz. Am Ende eines 80 Jahre umfassenden Betrachtungszeitraums ergibt sich ein Unterschied von noch 135 t CO_2-eq. (vgl. Figur 66). Eine Gegenüberstellung der Varianten B2 und H2 zeigt, dass sich nach 80 Jahren die Differenz von 189 t CO_2-eq. auf 102 t CO_2-eq. reduziert. Der emissionsbedingte Vorteil von Holzbauwerken gegenüber den Betonbauwerken halbiert sich für die getroffenen Annahmen über den Lebenszyklus.



Figur 66
Treibhausgasemissionen der Beton- und Holzvarianten B1 und H1 (tatsächliche Transportdistanzen) sowie der Varianten B2 und H2 (erweiterte Transportdistanzen) und der Variante H3 mit geringeren Transportdistanzen aufgrund der Verwendung von regionalem Holz über 80 Jahre [65].

8.5 Schlussfolgerungen

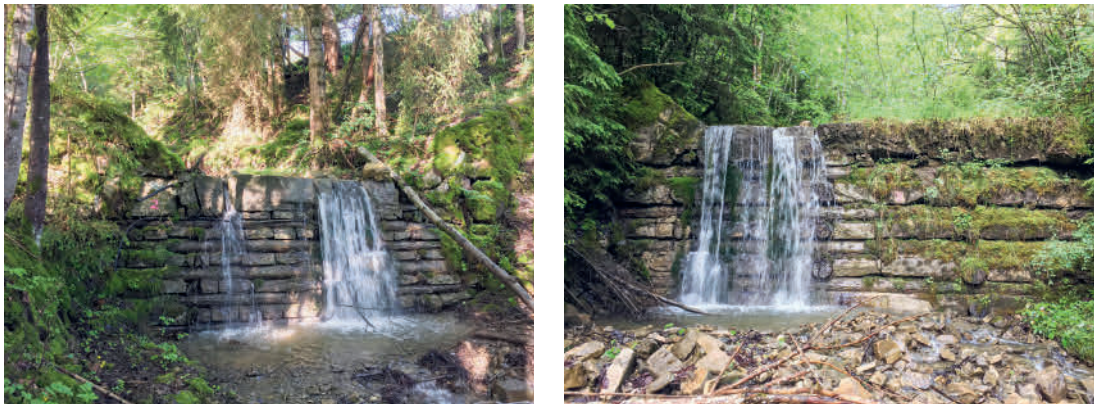
Das Fallbeispiel zeigt, dass Holzbauwerke meistens ‹ökologischer› sind als Betonbauwerke. Die verschiedenen Varianten machen deutlich, dass in der Errichtungsphase die Holzbauwerke im Vergleich zu den Betonbauwerken besser bilanzieren. Unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus der Bauwerke sowie der erhöhten Transportwege bilanzieren die Betonwerke hinsichtlich des Primärenergiebedarfs besser als die Holzbauwerke. An dieser Stelle sei noch einmal auf die angenommene Nutzungsdauer von 40 Jahren für die Holzbauwerke verwiesen (auch wenn, wie in dieser Dokumentation gezeigt, bei günstigen Bedingungen eine deutliche höhere Nutzungsdauer möglich ist) und darauf, dass die Betonbauwerke in dieser Beispielrechnung nicht rückgebaut werden. Hinsichtlich Treibhauspotentials weisen Holzbauwerke auch bei erweiterten Transportdistanzen einschliesslich des gesamten Lebenszyklus einen Vorteil auf.

Daher empfiehlt es sich bei der Errichtung von Schutzbauten aus Rundholz besonders, auf die Regionalität des Baustoffes und der damit verbundenen geringeren Transportdistanzen Wert zu legen. Dauerhafte Holzarten, wie z. B. die Edelkastanie oder Lärche, die sich für die Verwendung in Schutzbauten eignen, wachsen auch im Schweizer Wald. Mit Hilfe der Ökobilanzierung können die ‹ökologischen Unterschiede› quantitativ ermittelt werden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen ist es möglich, die Baustellenprozesse, die Arbeitsweisen, den Material- und Maschineneinsatz unabhängig vom Baustoff zu optimieren.

Bei der Errichtung von Schutzbauten im Zusammenspiel mit der ingenieurbiologischen Bautechnik kann die Ökobilanz noch bessere Ergebnisse erzielen. Einerseits, weil der Einsatz von regionalem bzw. standortgerechtem Pflanzenmaterial sowieso vorteilhaft ist, und andererseits, weil die Vegetation (als lebender Baustoff) auch während der Nutzungsphase CO_2 sequestriert und damit einen positiven Einfluss auf die Gesamtbilanz hat. [70] [71]

Ein zusätzliches Argument für die Verwendung von Holz bzw. lebendem Pflanzenmaterial ist auch die Ästhetik. Ein Bauwerk aus natürlichen und standortgerechten Materialien fügt sich besser in die Landschaft ein und kann nach einigen Jahren teilweise gar nicht mehr als Bauwerk erkannt werden. Betonbauwerke hingegen werden immer als Fremdkörper bzw. als vom Menschen geschaffene Bauwerke in der Natur zu erkennen sein.

Eine Ökobilanz kann als Steuerungsinstrument für die Planungs- und Ausführungsentscheidungen beim Bau von Schutzbauten genutzt und somit zur Minimierung von Umweltauswirkungen eingesetzt werden. Sie ist bestens geeignet, um einen aktiven Beitrag zur Umsetzung von Klimawandelanpassungsstrategien zu leisten.



Figur 67
Sperrenbauwerk im Schaferabach in der Gemeinde Plaffeien FR. Einige Sperren im Schaferabach sind nachweislich zwischen 1940 und 1945 erbaut worden und bestehen somit seit über 75 Jahren unverändert.

9 Resümee

Die nachstehenden Hinweise nehmen Argumente auf, welche zum Teil bereits in den verschiedenen Kapiteln erwähnt sind. Sie haben allgemeinen Charakter und sind nicht per se auf jede Situation anwendbar. Die Vor- und Nachteile des Holzeinsatzes bedürfen je nach Umständen einer vertieften Analyse.

9.1 Vorteile des Holzeinsatzes für Schutzbauten

Aus ökologischer Sicht ist Holz und Rundholz im besonderen ein Naturprodukt, welches unmittelbar mit einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung verbunden sein sollte. Sein Wachstum produziert dank Fotosynthese Sauerstoff und fixiert CO_2; später wird das Holz in einem natürlichen Kreislauf wieder abgebaut. Der Baustoff Rundholz ist deshalb dank der Speicherung von CO_2 im verbauten Holz kurzfristig positiv, längerfristig (bei der Nutzung von lokalen Ressourcen) weitgehend neutral hinsichtlich klimarelevanter Treibhausgase.
Bei lokalem Einsatz sind Aufbereitung, Lagerung, Transport sowie die Erstellung eines Bauwerks aus Holz gegenüber anderen Baustoffen mit deutlich tieferem Energieaufwand und weniger Emissionen verbunden.



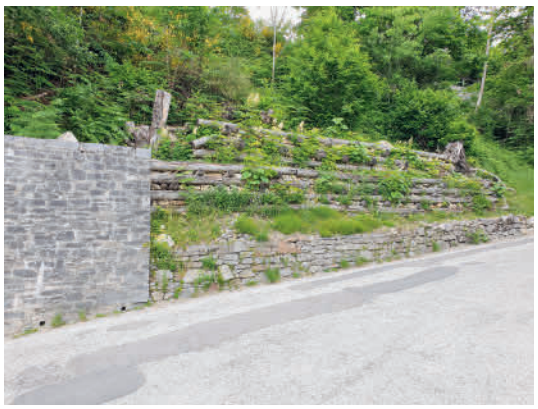
Figur 68
Querbäume als einfache Steinschlagschutzmassnahme.

Umweltrisiken aufgrund von Fremd- und Giftstoffen sind bei unbehandeltem Holz gegenüber anderen Baustoffen ausgeschlossen. Weiter kann auf das Einbringen von zusätzlichen Baustoffen weitgehend verzichtet werden, mit Ausnahme von Verbindungsmitteln aus Metall (Schrauben, Nägeln, Platten etc.). Diese Punkte sind sehr relevant und sollten mit Blick auf den Rückbau und das Vermeiden von Gift- und Abfallstoffen in der Natur immer mit beachtet werden.
Die günstigen ökologischen als auch ästhetischen Aspekte, etwa die Integration in das Landschaftsbild, können allfällige Widerstände aus Bevölkerung und Umweltkreisen bei Genehmigungsverfahren reduzieren.
Aus wirtschaftlicher Sicht ist unverarbeitetes Stammholz sehr kostengünstig, insbesondere bei der Verwendung nahe des Einschlagsortes. Lokal und fachgerecht eingesetzt, führt sein Einsatz zu kostengünstigen Lösungen. Meist entfallen ein späterer Rückbau und die damit verbundenen Aufwendungen.
Die Logistik für die Baustelle ist meist einfacher; gerade auch in unwegsamem Gelände kann es sich um den optimalen Baustoff handeln.
Verbauungen zum Schutz gegen Naturgefahren gehören weitgehend zum Aufgabenbereich der öffentlichen Hand. Damit sind oft Gemeinden oder allenfalls Genossenschaften als Trägerschaften von Projekten direkt betroffen. Diese Trägerschaften verfügen oft über Waldeigentum und können gegebenenfalls das Holz in Form von Eigenleistungen selbst liefern.
Aus sozialer Sicht findet die Wertschöpfung von Projekten mit Holzeinsatz verstärkt auf lokaler und regionaler Ebene statt. Der Einsatz lokaler Bauequipen oder Forstgruppen, allenfalls auch von Personal der Trägerschaften selbst, kann lokales Know-how und nicht zuletzt das Bewusstsein der Bevölkerung für die Existenz von Naturgefahren und Schutzbauten erhalten und fördern. Die Risikoprävention, z. B. auch auf ortsplanerischer Ebene, kann dadurch erleichtert werden.

Aus technischer Sicht wird Holz idealerweise immer dort eingesetzt, wo die Funktion der Werke nach deren Zerfall durch die aufkommende Vegetation übernommen werden kann. Typischerweise ist dies der Fall bei Lawinen- oder Gleitschneeverbauungen unterhalb der Waldgrenze oder bei Rutschungs- und Erosionsverbauungen. Eingedecktes Holz kann die Bodenfeuchtigkeit und -qualität erhöhen und damit die Vegetalisierung und Wurzelbildung fördern. Es ist auch möglich, dass aus anderen Gründen eine beschränkte Lebensdauer akzeptiert oder in speziellen Fällen gar angestrebt wird.
Das vergleichsweise geringere spezifische Gewicht von Holz (2–4-mal kleiner gegenüber Erdmaterial oder Beton und Blöcken) erleichtert den Transport und macht seinen Einsatz besonders geeignet bei schlechtem und gleitanfälligem Baugrund. Holzverbauungen sind tendenziell flexibel und elastisch; langsame Hangverformungen und Setzungen führen nicht sofort zu einem Versagen des Bauwerks.
Holz ist sehr einfach bearbeitbar; die Dimensionen einzelner Bauteile können während des Baufortschritts laufend der Situation angepasst werden.
Bei der Planung bestehen im allgemeinen vereinfachte Anforderungen an notwendige konzeptuelle und rechnerische Bemessungen. In vielen Fällen kann von Beginn weg auf eine Überbemessung gesetzt werden, weil am Baustoff nicht gespart werden muss, der Alterung des Holzes und der Veränderung seiner Eigenschaften Rechnung zu tragen ist und auf Erfahrungswerte abgestellt werden kann.

Aus Sicht des Unterhalts ist festzuhalten, dass die oben bereits genannten Vorteile bei einem gut geplanten und richtigen Holzeinsatz ebenfalls gelten. Gegenüber Baustoffen wie Stahl oder Beton sollte aber ein etwas erhöhter Kontroll- und Unterhaltsaufwand vorgesehen und akzeptiert sein.
Hauptsächlich beim Bau von Wildbachsperren können relevante Unterhaltsprobleme auftreten, weil hier der Ersatz einzelner Bauteile schwierig oder zu aufwendig sein kann. Unterhaltsarbeiten werden darum am besten auf punktuell auftretende Problemstellen konzentriert, welche einfach instand gestellt werden können. Am Ende der Lebens- und Nutzungsdauer ist dann gegebenenfalls der Ersatz der Werke einzuplanen.
Bei Rutschungs- und Erosionsverbauungen in Kombination mit Ingenieurbiologie kann der Unterhalt weitestgehend wegfallen. Kommt hinzu, dass eine spätere Wald- und Vegetationspflege einfacher ist.
Bei Sohlensicherungen von Wasserableitungsgräben (und auch bei Faschinen) ist der Unterhalt dank dem nassen Holzzustand grundsätzlich gering.
Bei Lawinen- und Gleitschneeverbauungen beschränkt sich der Unterhalt auf die Kontrolle und den allfälligen Ersatz von einzelnen Bauteilen oder -werken nach schneereichen Wintern.
Es entfällt in den meisten Fällen ein allfälliger Rückbau.





Figur 69 (links) und Figur 70 (rechts) Holzkästen zur Stabilisierung von Hängen mit Vegetation, welche sich gut in das Landschaftsbild einfügen.

9.2 Nachteile des Holzeinsatzes für Schutzbauten

Gerade weil es sich um einen natürlichen Baustoff mit einem von der Natur vorgegebenen Nährstoffkreislauf handelt, liegt der weitaus wichtigste Nachteil in der beschränkten Lebensdauer von Schutzbauten aus Holz im Freien sowie in der im Laufe der Zeit abnehmenden Festigkeit und Tragfähigkeit infolge der natürlichen Zersetzung des Holzes. Wie in der vorliegenden Publikation dargelegt, ist die Lebens- und Nutzungsdauer von Schutzbauten aus Holz extrem variabel. Je nach Umständen kann die Funktionstauglichkeit bereits nach minimal zehn Jahren kompromittiert sein, andererseits kann sie aber auch 100 Jahre erreichen. Die richtige Planung und Ausführung solcher Werke spielen bei diesem Punkt eine zentrale Rolle. Der Baustoff Holz hat im Naturgefahrenmanagement wegen seiner Heterogenität und der eingeschränkten Lebensdauer manchmal einen eher schwierigen Stand. Oft werden bei der Bemessung von Schutzbauten aus Rundholz empirische Vorgehen angewandt. Gerade auch deshalb waren oder sind Planungsbüros unsicher im Umgang mit diesem Baustoff. Wie können geforderte Nachweise zur Tragsicherheit und Funktionstauglichkeit erbracht werden? Wie soll mit den Unsicherheiten im Zusammenhang mit Holzeinsatz umgegangen werden? Interessante Forschungsarbeiten, Publikationen und Projekte zur Verbesserung der Akzeptanz für den Einsatz von Holz bei Schutzbauten haben diese Situation in den letzten 20 Jahren deutlich verbessert (siehe dazu auch Kapitel 3 der vorliegenden Publikation).

Der Umgang mit solchen Unsicherheiten ist auch bei Baustoffen wie armiertem Beton oder Mauerwerken nicht immer einfach. Um nur einige Beispiele zu nennen: Die Katastrophe von Gondo VS im Jahr 2000 nach dem Versagen einer Stützmauer, unterspülte oder zerstörte Betonsperren in Wildbächen, der Rückbau früherer Kanalisierungen von Talflüssen und Ufersicherungen nach dem Paradigmenwechsel im Wasserbau, der notwendige Ersatz von permanenten Lawinenverbauungen wegen Fundationsproblemen (Permafrost) demonstrieren klar, dass wir nicht für die Ewigkeit bauen. Weiter können Veränderungen beim Prozessgeschehen oder nicht zuletzt auch bei den Präventionsansätzen (z. B. verstärkte Risikoreduktion auf der Seite der Schadenpotentiale, Anpassungen von Schutzzielen) die notwendige Lebens- und Nutzungsdauer von Schutzbauten gegen Naturgefahren massgeblich verändern.



Figur 71 (links)
Eine vollständige Eindeckung kann die Nutzungsdauer auch von weniger dauerhaften Holzarten wie Fichte deutlich erhöhen.



Figur 72 (rechts)
Mit dauerhaften Holzarten wie Edelkastanie erhöht sich ebenfalls die Nutzungsdauer der Tragwerke.

9.3 Allgemeine Abwägung zur Frage des Holzeinsatzes

Detaillierte Informationen zu diesem wichtigen Aspekt finden sich in den verschiedenen Kapiteln dieser Publikation, besonders auch in den Abschnitten ‹Grenzen des Einsatzes von Holzverbauungen›. Trotz den vielen Vorteilen, welche Holz als Baustoff bietet, kann es auch triftige Gründe für andere Bauweisen geben. Bei der Planung eines konkreten Projekts sollte diese Wahl aufgrund einer bewussten Abwägung erfolgen. Die folgenden Aspekte können bei dieser Abwägung helfen.

- Sind einer oder mehrere Vorteile (hauptsächlich ökologischer und wirtschaftlicher Natur), welche der Einsatz von Holz bietet, im vorliegenden Fall relevant?
- Passt das Bauwerk aus Holz in seine Umgebung?
- Können eine beschränkte Nutzungsdauer und ein allenfalls notwendiger späterer Ersatz akzeptiert werden?
- Darf das Bauwerk im Verlauf der Zeit eine reduzierte Tragfähigkeit aufweisen?
- Kann die Vegetation die stabilisierende Wirkung mittel- und langfristig übernehmen?
- Sind die Risiken im Fall eines Versagens des Werks beschränkt respektive akzeptierbar?

Wenn diese Fragen weitgehend positiv beantwortet werden können, ist die Entscheidung für Holz gut abgestützt.



Figur 73 (links)
Holzkasten zum Schutz vor Ufererosion mit Holzwolle und Weidenstecklingen.



Figur 74 (rechts)
Dreibeinböcke und Steinschlagschutzwand aus Holz sichern Infrastruktur.

10 Partner

Caprez Ingenieure AG
Via vers Mulins 19
7513 Silvaplana
Tel. +41 81 838 77 00
www.caprez-ing.ch
silvaplana@caprez-ing.ch

Die Firma Caprez Ingenieure AG, gegründet im Jahr 1963, ist heute mit 16 Standorten zwischen Zürich und St. Moritz vertreten. Die Standorte agieren eigenständig und sind lokal stark vernetzt. Gleichzeitig profitiert das Unternehmen vom ständigen Wissenstransfer untereinander. So auch im Kompetenzbereich Forst, Umwelt und Naturgefahren.

Castagnostyle Sagl
Al Dosso
6807 Taverne
Tel. +41 79 132 31 30
verkauf@castagnostyle.ch
www.castagnostyle.ch

Castagnostyle, Treffpunkt der Kastanienholzprofis – Unsere Kompetenz sind Holzhandlung, Holzerei, Verbauungen, Spielplätze, Naturschutz usw. Die Firma gehört zu einer Gruppe von Forstbetrieben und befindet sich mitten in den besten Kastanienwuchsgebieten der Schweiz. Wir beschäftigen Holzprofis und bilden Forstwartlernende aus.

fim
Bruno Brunner
Glütschbachstrasse 3
3661 Uetendorf
Tel. +41 33 345 04 75
info@fim-uetendorf.ch
www.fim-uetendorf.ch

Die Firma fim ist als Zulieferant die erste Anlaufstelle für die Forstwirtschaft. Sie verfügt über ein umfangreiches Sortiment der Marken Caravaggi, Maxwald, AMR und einen grosszügigen Stihl-Shop, bei welchem in der ganzen Produktpalette des Markenherstellers gestöbert werden kann.

Forst Aletsch
Alt Chirchwäg 59
3984 Fieschertal
Tel. +41 27 971 30 07
info@forstaletsch.ch
www.forstaletsch.ch

Wir setzen auf Holz aus unseren Wäldern: für den Schutz vor Naturgefahren bauen wir damit Dreibeinböcke und Hangsicherungen. Die Gemeinden unterstützen wir bei Wanderweginstandstellungen- und dem Wanderwegunterhalt. Für Querabschläge, Brücken, Stege, Tritte und Zäune nutzen wir ebenfalls heimisches Holz.
Das meiste unseres Holzes geht an Sägereien und die Holzindustrie. Den Rest verarbeiten wir in praktische Dinge wie Tische, Bänke, Blumen- und Brunnentröge sowie in einzelne Spielgeräte bis hin zu grossen Spielplätzen und Seilparks.

Lindner Suisse GmbH
Bleikenstrasse 98
9630 Wattwil
Tel. +41 71 987 61 51
holzwolle@lindner.ch
www.lindner.ch

Seit 1920 entwickelt und produziert Lindner Suisse GmbH Holzwolle-Spezialartikel aus gesundem, zertifiziertem Schweizer Holz nach Rezeptur und nach Schweizer Holzwolle-Standard: für Infrastruktur-, Garten- und Landschaftsbau, Wasserbau, Erosionsschutz, Drainage, Tierhygiene, als Anzündhilfe oder Verpackungsmaterial. Zudem stellt Lindner Suisse hochwertige Füllmaterialchips her und ist Ansprechpartner für ein bedarfsorientiertes Verpackungssortiment.

11 Literatur

[1] Andres, N., Badoux, A. (2019): Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2018. Wasser Energie Luft, 111. Jahrgang, Heft 1, S. 29–38

[2] PLANAT (2004): Sicherheit vor Naturgefahren – Vision und Strategie. PLANAT Reihe 1/2004, S. 40

[3] Margreth, S., Schweizer, J. (2018): Coaz – Pionier der schweizerischen Lawinenforschung. Bündner Wald 71: S. 72–79

[4] Brändli, U.-B., Abegg, M., Allgaier Leuch, B. (2020): Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der vierten Erhebung 2009–2017. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Bundesamt für Umwelt, Bern

[5] Losey, S., Wehrli, A. (2013): Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, S. 29

[6] Thali, U. (2006): Schutzwirkung des Waldes anhand des Felssturz-Ereignisses ‹Wilerwald›, Gurtnellen, vom 31. Mai 2006. Altdorf: Kanton Uri, Bericht Schweiz Nationalstrassen N2, S. 21

[7] Olmedo, I., Bourrier, F., Bertrand, D., Berger, F., Limam, A. (2018): Dynamic analysis of wooden rockfall protection structures subjected to impact loading using a discrete element model. Eur. J. Environ. Civil Eng. 24, S. 1430–1449

[8] Ringenbach, A., Stihl, E., Bühler, Y., Bebi, P., Bartelt, P., Rigling, A., Christen, M., Lu, G., Stoffel, A., Kistler, M., Degonda, S., Simmler, K., Mader, D., Caviezel, A. (2021): Full scale experiments to examine the role of deadwood on rockfall dynamics in forests, Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss. [preprint], https://doi.org/10.5194/nhess-2021-319, in review, 2021

[9] Ammann, M. (2006): Schutzwirkung abgestorbener Bäume gegen Naturgefahren. ETH Diss. Nr. 16638, S. 190

[10] Dorren, L., Berger, F., Frehner, M., Huber, M., Kühne, K., Métral, R., Sandri, A., Schwitter, R., Thormann, J., Wasser, B. (2015): Das neue nais-Anforderungsprofil Steinschlag. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 166 (1), S. 16–23

[11] Bigot, C. (2014): Cinématique de décomposition et rôle de protection pare-pierres du bois mort: le cas des rémanents. Diss. Université de Grenoble, S. 216

[12] Hararuk, O., Kurz, W.A., Didion, M. (2020): Dynamics of dead wood decay in Swiss forests. For. Ecosyst. 7, S. 36

[13] Begemann, W., Schliechtl, H.M. (1986): Ingenieurbiologie. Handbuch zum naturnahen Wasser- und Erdbau. Bauverlag, S. 216

[14] Moos, C., Bebi, P., Schwarz, M., Stoffel, M., Sudmeier-Rieux, K., Dorren, L. (2018): Ecosystem-based disaster risk reduction in mountains. Earth-Science Reviews 177, S. 497–513

[15] Böll, A., Gerber W., Graf F., Rickli, C. (1999): Holzkonstruktionen im Wildbach-, Hang- und Runsenverbau. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

[16] Norm SN EN 335 (2013): Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Gebrauchsklassen: Definitionen, Anwendung bei Vollholz und Holzprodukten. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich

[17] Lignum (2021): Holzbautabellen 1 – Handbuch für die Bemessung, Zürich

[18] Butin, H. (1983): Krankheiten der Wald- und Parkbäume. Leitfaden zum Bestimmen von Baumkrankheiten. Georg Thieme Verlag, New York

[19] Bosshard, H.H. (1984): Holzkunde. Band 3: Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes. 2. Aufl., Birkhäuser Verlag

[20] Florineth, F. (2014): Langjährige Hangsicherung durch bepflanzte Holzkrainerwände in Südtirol. Ingenieurbiologie 3/14

[21] Meierhofer, U.A., Zumoberhaus, M. (1992): Holzkonstruktionen im Wanderwegbau. Band 153, BUWAL

[22] Nötzli, K. (2002): Ursachen und Dynamik von Fäulen an Holzkonstruktionen im Wildbachverbau. Dissertation der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich Nr. 14974

[23] Norm SN EN 350 (2016): Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich

[24] Findlay, W.P.K. (1962): The preservation of timber. Adam & Charles Black, London

[25] Lignum (2021): Lignatec 33, Verklebte Laubholzprodukte für den statischen Einsatz, Zürich

[26] Nötzli, K., Böll, A., Graf, F., Sieber, T.N., Holdenrieder, O. (2008): Influence of decay fungi, construction characteristics, and environmental conditions on the quality of wooden check-dams. Forest Products Journal, 58 (4), S. 72–79

[27] Rickli, C., Graf, F. (2014): Wildbachsperren aus Fichte und Tanne: Festigkeit und Pilzbefall in den ersten Jahren. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 165 (4), S. 79–86

[28] Norm SIA 267 (2013): Geotechnik. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich

[29] Norm SIA 260 (2013): Grundlagen der Projektierung von Tragwerken. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich

[30] Norm SIA 261 (2020): Einwirkungen auf Tragwerke. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich

[31] Norm SIA 261/1 (2020): Einwirkungen auf Tragwerke – Ergänzende Festlegungen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich

[32] Böll, A. (1997): Wildbach- und Hangverbau. Berichte der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Nr. 343

[33] Technische Regel ONR 24801 (2013): Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Statische und dynamische Einwirkungen; Austrian Standards International – Standardisierung und Innovation, Wien

[34] Margreth, S. (2007): Lawinenverbau im Anbruchgebiet. Technische Richtlinie als Vollzugshilfe. Umwelt-Vollzug Nr. 0704. Bundesamt für Umwelt, Bern, WSL Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos

[35] Technische Regel ONR 24805 (2010): Permanenter technischer Lawinenschutz – Benennungen und Definitionen sowie statische und dynamische Einwirkungen. Austrian Standards International, Wien

[36] Technische Regel ONR 24806 (2011): Permanenter technischer Lawinenschutz –Bemessung und konstruktive Ausgestaltung. Austrian Standards International, Wien

[37] Leuenberger, Franz (2003): Bauanleitung Gleitschneeschutz und temporärer Stützverbau. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos

[38] Norm SIA 265 (2021): Holzbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich

[39] Norm SIA 265/1 (2018): Holzbau – Ergänzende Festlegungen. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich

[40] Technische Regel ONR 24802 (2011): Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Projektierung, Bemessung und konstruktive Durchbildung. Austrian Standards International, Wien

[41] Norm SIA 263 (2003): Stahlbau. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich

[42] Fernández-Raga, M., Palencia, C., Keesstra, S., Jordán, A., Fraile, R., Angulo-Martínez, M., Cerdà, A. (2017): Splash erosion. A review with unanswered questions. Earth-Science Reviews, 171, S. 463–477

[43] Ziegler, A.D., Sutherland, R.A., Giambelluca, T.W. (2000): Partitioning total erosion on unpaved roads into splash and hydraulic components: The roles of interstorm surface preparation and dynamic erodibility. Water Resources Research, 36 (9), 2787-27

[44] Bernatek-Jakiel, A., Poesen, J. (2018): Subsurface erosion by soil piping: significance and research needs. Earth-Science Reviews, 185, Oct. 2018, S. 1107–1128

[45] Schwarz, M., Poesen, J., Rey, F., Holbling, D., Phillips, C. (2020): Bio-physical performance of erosion and sediment control/mitigation techniques – an international comparison to common practices in New Zealand. LC3891

[46] Lifa, I. (2014): Entwicklung und Anwendung von naturbelassener Holzwolle für die Hangsicherung. Ingenieurbiologie 3/14

[47] Zeller, J., Trümpler, J. (1984): Rutschungsentwässerung. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

[48] Cislaghi, A., Cohen, D., Gasser, E., Bischetti, G. B., Schwarz, M. (2019): Field measurements of passive earth forces in steep, shallow, landslide-prone areas. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 124, S. 838–866. https://doi.org/10.1029/2017JF

[49] Gray, D. H., Sotir, R. B. (1996): Biotechnical and soil bioengineering slope stabilization: a practical guide for erosion control. John Wiley & Sons

[50] Schwarz, M., Giadrossich, F., Cohen, D. (2013): Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. Hydrol. Earth Syst. Sci., 17, S. 4367–4377

[51] Schwarz, M., Rist, A., Cohen, D., Giadrossich, F., Egorov, P., Büttner, D., Stolz, M., Thormann, J.-J. (2015): Root reinforcement of soils under compression. J. Geophys. Res. Earth Surf., 120, S. 2103–2120, doi:10.1002/2015JF003632

[52] Florin, F. (2004): Pflanzen statt Beton. Handbuch zur Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik. Berlin/Hannover, Patzer Verlag

[53] Flepp, G., Robyr, R., Scotti, R., Giadrossich, F., Conedera, M., Vacchiano, G., Fischer, C., Ammann, P., May, D., Schwarz, M. (2021): Temporal Dynamics of Root Reinforcement in European Spruce Forests. Forests 12 (6):815, https://doi.org/10.3390/f12060815

[54] Bischetti, G. B., De Cesare, G., Mickovski, S. B., Rauch, H. P., Schwarz, M., Stangl, R. (2021): Design and temporal issues in Soil Bioengineering structures for the stabilisation of shallow soil movements. Ecological Engineering, 169, 106309

[55] Tron, S., Perona, P., Gorla, L., Schwarz, M., Laio, F., Ridolfi, L. (2015): The signature of randomness in riparian plant root distributions. Geophysical Research Letters, 42 (17), S. 7098–7106

[56] Technische Regel ONR 24800 (2009): Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und ihre Definition sowie Klassifizierung. Austrian Standards International – Standardisierung und Innovation, Wien

[57] Bergmeister, K., Suda, J., Hübl, J., Rudolf-Miklau, F. (2009): Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele. Ernst & Sohn, Berlin

[58] Suda, J., Bergmeister, K. (2020): Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. In: Bergmeister, K., Wörner, J.-D., Fingerloos, F. (Hrsg.), Betonkalender 2020, S. 501–724; Ernst & Sohn Verlag, Berlin

[59] Angerholzer, F. (1913): Über die Länge des Vorfeldes bei Querwerken in Wildbächen. Centralblatt für das gesamte Forstwesen, 39, S. 504–509

[60] Rudolf-Miklau, F., Sauermoser, S. (2011): Handbuch Technischer Lawinenschutz. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin

[61] Tabler, R. (2003): Controlling Blowing and Drifting Snow with Snow Fences and Road Design. Final Report NCHRP Project 20-7 (147), Tabler & Associates, Laramie, Wyoming

[62] von Carlowitz, H. C. (1713): Sylvicultura Oeconomica, Johann Friedrich Braun Verlag, Leipzig

[63] WECD – World Commission on Environment and Development (1987): Our common Future. Oxford University Press

[64] Norm SN EN ISO 14040/A1:2021 (2021): Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006/Amd 1:2020). Änderung A1. Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur

[65] Von der Thannen, M., Paratscha, R., Smutny, R., Strauss, A., Hufnagl, H., Lampalzer, T., Rauch, H. P. (2018): Zur Ökobilanz von Schutzbauwerken. Ein Fallbeispiel mit Varianten. In: Wildbach- und Lawinenverbau. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions-, und Steinschlagschutz. 82. Jg. H. 182, S. 282–303. Bregenz,Verein der Diplom-Ingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs

[66] Norm SN EN ISO 14044:2006 (2006): Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006). Schweizerische Normen-Vereinigung, Winterthur

[67] Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.-J., Doka, G., Dones, R., Heck, T., Hellweg, S., Hischier, R., Nemecek, T., Rebitzer, G., Spielmann, M. (2005): The ecoinvent database: overview and methodological framework. International Journal of Life Cycle Assessment, Vol. 10, S. 3–9

[68] BAFU (2015): Online Non-Road-Datenbank, Bundesamt für Umwelt BAFU, https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/luft/zustand/non-road-datenbank.html, zuletzt abgerufen am 22.03.2018

[69] BMLFUW (2006): Richtlinien für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und Priorisierung von Massnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung gemäss § 3 Abs. 2 Z 3 Wasserbautenförderungsgesetz 1985. Teil I: Kosten-Nutzen-Untersuchung (KNU) und standardisierte Nutzenuntersuchung. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion Forstwesen, Wien

[70] von der Thannen, M., Hoerbinger, S., Paratscha, R., Smutny, R., Lampalzer, T., Strauss, A., Rauch, H. P. (2017): Development of an environmental life cycle assessment model for soil bioengineering constructions. European Journal of Environmental and Civil Engineering, http://dx.doi.org/10.1080/19648189.2017.1369460

[71] von der Thannen, M., Hoerbinger, S., Muellebner, C.,Biber, H., Rauch, H. P. (2021): Case study of a water bioengineering construction site in Austria. Ecological aspects and application of an environmental life cycle assessment model. Int. J. Energy Environ., Eng. 12, S. 599–609. https://doi.org/10.1007/s40095-021-00419-8

Lieferbar in der Reihe Lignatec









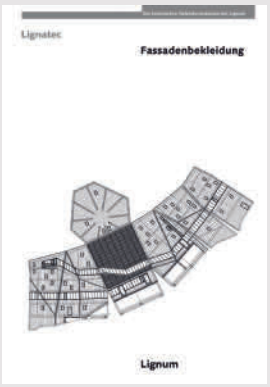






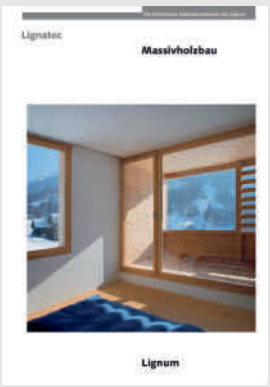


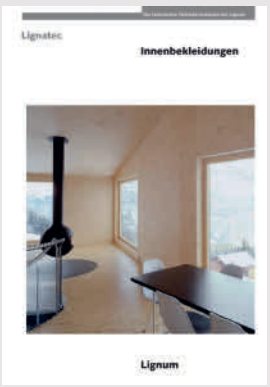


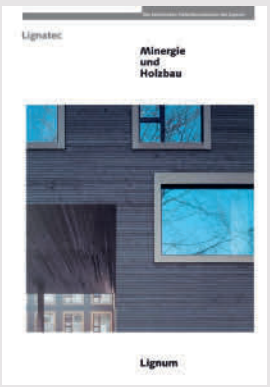


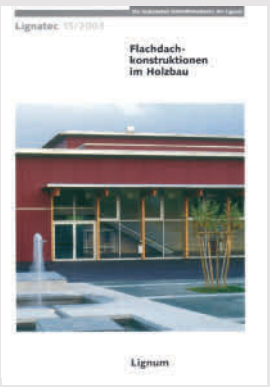












www.lignum.ch/shop/lignatec

Impressum

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU
Aktionsplan Holz

Lignatec
Die technischen Holzinformationen der Lignum

Herausgeber
Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, Zürich
Sandra Burlet, Direktorin

Massgebliche finanzielle Unterstützung
Bundesamt für Umwelt BAFU, Aktionsplan Holz

Finanzielle Unterstützung
Präventionsstiftung der kantonalen Gebäudeversicherungen

Koordination
Gunther Ratsch, Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, Zürich
Walter Krättli, Fobatec, Maienfeld
Hervé Bader, Fobatec, Lyss

Bildnachweis
Titelbild: Forst Aletsch (C. Pfammatter, Visp); 1, 7: WSL; 2: BABS; 3: L. Dorren; 5, 6, 25, 26, 72: Castagnostyle; 8: Lindner Suisse; 9, 12 links, 20, 23, 27, 29, 30, 31, 32: M. Schwarz; 10: D. Polster; 12 rechts, 13, 14, 15, 19: Amt für Wald und Naturgefahren des Kantons Graubünden; 28, 42, 74: Forst Aletsch (C. Pfammatter); 31 links: Archiv Forstbetrieb Madrisa; 33, 34, 35, 36, 37, 38 links, 39 D, 40, 41: J. Suda; 39 A, B, C, 43: Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung; 44, 45, 46, 47, 48, 50, 51, 52, 54, 55, 56, 57, 59, 60: S. Margreth; 49: WEU-AWN-NGA Bern; 53: P. Diener; 24, 38 rechts, 67, 69, 71: Fobatec

Gestaltung und Realisation
bido-graphic GmbH, Muttenz

Administration/Versand
Lignum, Zürich

Druck
Kalt Medien AG, Zug

Die Schriftenreihe Lignatec informiert zu Fachfragen bezüglich der Verwendung von Holz als Bau- und Werkstoff.
Lignatec richtet sich an Planer, Ingenieure, Architekten sowie an die Ver- und Bearbeiter von Holz. Lignatec wird zunehmend in der Ausbildung auf allen Stufen eingesetzt.
Ein Sammelordner ist bei der Lignum erhältlich.

Mitglieder der Lignum erhalten ein Exemplar jeder Lignatec-Ausgabe gratis.
Weitere Einzelexemplare für Mitglieder CHF 15.–
Einzelexemplar für Nichtmitglieder CHF 35.–
Sammelordner leer CHF 10.–
Preisänderungen vorbehalten

Das Copyright dieser Publikation liegt bei Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, Zürich. Eine Vervielfältigung des Werks oder von Teilen desselben, die Wiedergabe von Inhalten im Internet und die Einspeisung von Inhalten in Datenbanken ist nur mit ausdrücklicher schriftlicher Genehmigung des Herausgebers zulässig.

Haftungsausschluss
Die vorliegende Publikation wurde mit grösster Sorgfalt und nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Die Herausgeber, Autoren und Fachlektoren haften nicht für Schäden, die durch die Benutzung und Anwendung der vorliegenden Publikation entstehen können.

LIGNUM
Holzwirtschaft Schweiz
Mühlebachstrasse 8, 8008 Zürich
Tel. 044 267 47 77, Fax 044 267 47 87
info@lignum.ch
www.lignum.ch

Lignatec 34/2022
Naturgefahren mit Holz begegnen
Erschienen im Juli 2022
ISSN 1421-0320