

# 1

Volume 13  
February 2020, S. 21-31  
ISSN 1865-7362

Sonderdruck

# Geomechanics and Tunnelling

Geomechanik  
und Tunnelbau



## Natural Hazards – Theory and Practice

### Rockfall embankments: Construction and Design Steinschlagschutzdämme: Konstruktion und Bemessung

**ÖGG** ÖSTERREICHISCHE  
GESELLSCHAFT FÜR  
GEOMECHANIK

Robert Hofmann  
Lars Vollmert

**Ernst & Sohn**  
A Wiley Brand

**NAUE**



# Rockfall embankments: Construction and Design

## Steinschlagschutzdämme: Konstruktion und Bemessung

The introduction of Austrian standard ONR 24810 provides a design concept for earth dams to protect against massive rockfall events. The essential basis for the concept is the differentiation into five construction types of rockfall embankments due to different system behaviour. The structure therefore has to be assigned to one type at the beginning of the design process. The types available for selection are a simple earth dam (type I), a dam with quarry stone facing (type II), a geosynthetic-reinforced dam without increased crosswise distribution of the impact loads (type III), a geosynthetic-reinforced dam with increased crosswise distribution (type IVa) and with strongly increased crosswise distribution (type IVb) of the impact loads. Eurocode 7 (EC 7) is considered accordingly. The design concept is currently being discussed and used in Austria, Switzerland, Germany and Norway. Presented are the design principle and the construction as executive summary.

**Keywords** rockfall embankments; model tests; geosynthetic-reinforced dams; ONR 24810

### 1 Introduction

In the course of an extensive research project, construction types of rockfall protection embankments were developed and the requirements for their geometry and reinforcement were determined. In particular the arrangement of reinforcement in the dam structure, design strength and tensile stiffness of the reinforcement have a decisive influence on the deformation behaviour of the construction and the ultimate limit state (ULS). For the geotechnical verification (GEO), a static equivalent load is estimated on the basis of the structural design concept, which will be presented below. This is determined using a dimensionless design diagram indirectly through the penetration depth of the design block and the design energy depending on the dam cross-section.

Construction types of dams are differentiated (Table 1). With geosynthetic-reinforced dams (Types III, IVa and IVb), the construction types differ in the arrangement, strain stiffness and tensile strength of the reinforcement, each as design value. Due to the reinforcement, there is greatly increased ductility, which permits activation of a large dam weight and thus absorbing very high energies, even with very slender constructions. Accordingly a significantly wider load distribution along the dam can be considered. For each construction type, extensive model tests were carried out to determine the necessary freeboard. The freeboard is defined as the distance from the

Mit der Einführung der ONR 24810 liegt ein Bemessungskonzept für Erddämme zum Schutz gegen massive Steinschlagereignisse vor. Wesentliche Grundlage bei dem Konzept stellt die Unterscheidung in fünf Bautypen von Steinschlagschutzdämmen mit unterschiedlichem Systemverhalten dar. Vor Beginn der Bemessung muss das Bauwerk einem Typ zugeordnet werden. Dabei stehen der reine Erddamm (Typ I), der Damm mit Steinschichtung (Typ II), der geokunststoffbewehrte Damm ohne erhöhte Querverteilung der Impaktlasten (Typ III), der geokunststoffbewehrte Damm mit erhöhter Querverteilung (Typ IVa) und mit stark erhöhter Querverteilung (Typ IVb) der Impaktlasten zur Auswahl. Bei der geotechnischen Nachweisführung wird der Eurocode 7 (EC 7) umgesetzt. Das Bemessungskonzept wird in Österreich, in der Schweiz, in Deutschland und Norwegen diskutiert und verwendet. Zusammenfassend vorgestellt werden die Bemessung und Konstruktion.

**Stichworte** Steinschlagschutzdämme; Modellversuche; geokunststoffbewehrte Dämme; ONR 24810

### 1 Einführung

Im Zuge eines umfangreichen Forschungsprojekts wurden Bauwerkstypen für Steinschlagschutzdämme entwickelt und deren Anforderungen an die Geometrie und die Bewehrung festgelegt. Insbesondere die Anordnung der Bewehrung im Dammbauwerk, die Bemessungsfestigkeit und die Dehnsteifigkeit der Bewehrung üben einen maßgebenden Einfluss auf das Verformungsverhalten der Konstruktion und die Grenztragfähigkeit aus. Für die geotechnische Nachweisführung (GEO) wird auf Grundlage des Bemessungskonzepts, das im Folgenden in den Grundzügen vorgestellt wird, eine statische Ersatzlast abgeschätzt. Diese wird mithilfe eines dimensionslosen Bemessungsdiagramms indirekt über die Eindringtiefe des Bemessungsblocks und die Bemessungsenergie in Abhängigkeit des Dammquerschnitts ermittelt.

Differenziert wird dabei nach dem Bautyp des Damms (Tabelle 1). Bei den geokunststoffbewehrten Dämmen (Typ III, IVa und IVb) unterscheiden sich die Bautypen nach der Anordnung, der Dehnsteifigkeit und der Zugfestigkeit der Bewehrung, jeweils als Bemessungswerte. Infolge der Bewehrung ergibt sich eine stark erhöhte Duktilität, die auch bei sehr schlanken Konstruktionen eine Aktivierung einer großen Dammmasse und damit die Aufnahme sehr großer Energien erlaubt. Demzufolge darf eine in Dammlängsrichtung signifikant breitere Lastverteilung angesetzt werden. Für jeden Bautyp erfolgte

**Tab. 1** Construction types of rockfall embankments  
Bautypen für Steinschlagschutzdämme

Construction type	Features
I	Simple earth dam
II	Dam with quarried stone facing
III	Geosynthetic-reinforced dam without increased crosswise distribution of the impact loads
IVa	Geosynthetic-reinforced dam with increased crosswise load distribution
IVb	Geosynthetic-reinforced dam with strongly increased crosswise load distribution

top of the design block to the dam crown in the direction of the fall line of the uphill embankment surface. A summary of the freeboard and the possible crosswise distribution of the construction types is shown in Table 2.

## 2 Construction types of rockfall protection dams

The differentiation of dam types for protection against rockfall enables adapted and thus economic construction depending on the intended protection level for the design energy, which varies greatly from project to project, and the geometry of the structure that is practical in the specific case. The following types are differentiated:

- Type I – Simple earth dam:  
Embankments of  $H/L = 2:3$  to maximum  $4:5$  are normally used without additional measures, depending on the quality of the dam material. Type I embankments are very unfavourable with regard to the impact angle of a rockfall event and thus demand much greater freeboard.
- Type II – Earth dams with quarried stone facing:  
Stone revetment on the uphill side enables steeper uphill embankment angles, reduces the freeboard and increases the loadbearing capacity for the loading case rock impact.
- Type III – Earth dams with geosynthetic reinforcement to support the embankment angle:  
With this dam type, the uphill embankment can be constructed steeper through geosynthetic reinforcement. The reinforcement also allows the activation of the dam cross-section above the failure joints. Figure 1 shows an example of a failure surface in a reinforced dam cross-section of Type III. This failure mechanism has also been observed in 1:1 tests in nature.
- Typ IVa and IVb – reinforced dams with longitudinal reinforcement:  
As with Type III, dams reinforced with geosynthetics can be made very slender and with steeper embankments. In addition to the geosynthetic reinforcement, which is installed crosswise to the dam axis as with Type III, this type also has geosynthetic reinforcement along the dam axis (Figure 2). The soil body, which is

**Tab. 2** Lateral extension and freeboard of the construction types  
Querverteilung und Freibord der Bautypen

Construction type	Lateral extension x-times block diameter $D$	Freeboard x-times block diameter $D$
I	5 to 6	2,0
II	5 to 6	2.0/1.0 (with $\beta_B \geq 50^\circ$ )
III	5 to 6	1.5/1.0 (with $\beta_B \geq 70^\circ$ )
IVa	6 to 7	1.5/1.0 (with $\beta_B \geq 70^\circ$ )
IVb	8 to 9	1.5/1.0 (with $\beta_B \geq 70^\circ$ )

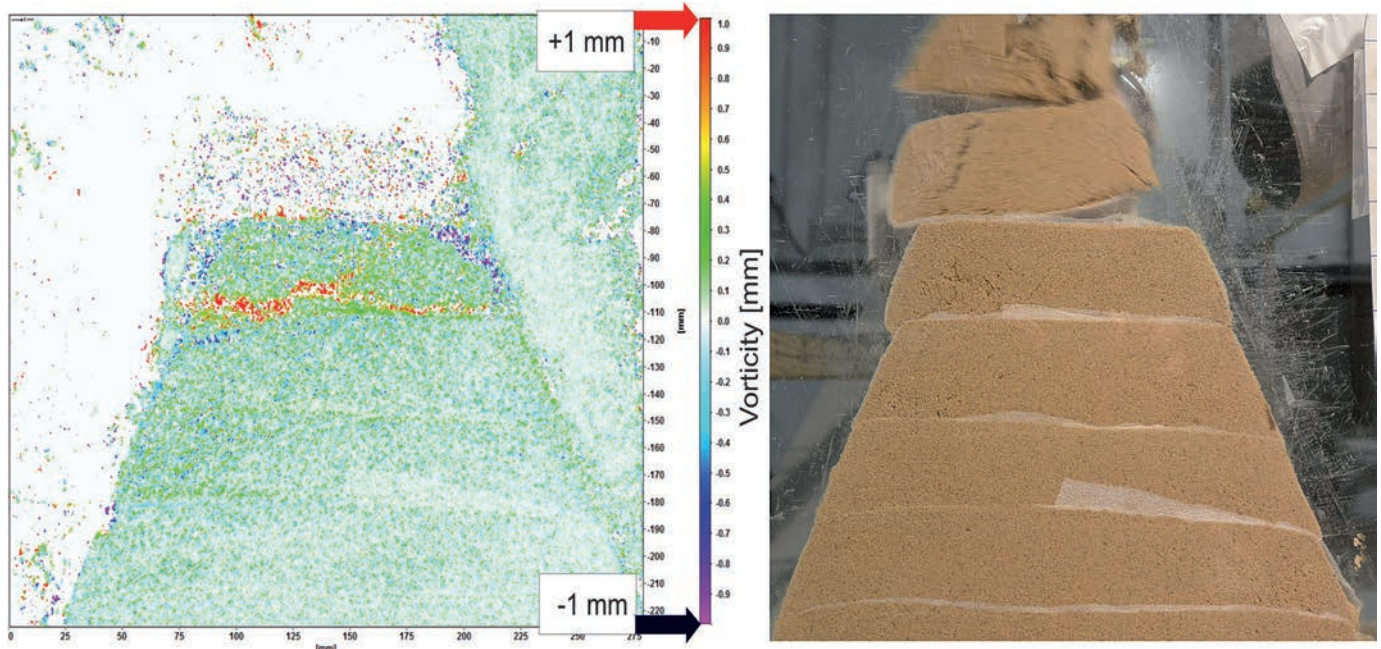
über umfangreiche Modellversuche weiter die Festlegung des erforderlichen Freibords. Das Freibord wird als der Abstand der Oberkante des Bemessungsblocks bis zur Dammkrone in der Richtung der Falllinie der bergseitigen Böschungsoberfläche bezeichnet. Eine Zusammenstellung des Freibords und der möglichen Querverteilung für die Bauwerkstypen zeigt die Tabelle 2.

## 2 Bautypen für Steinschlagschutzdämme

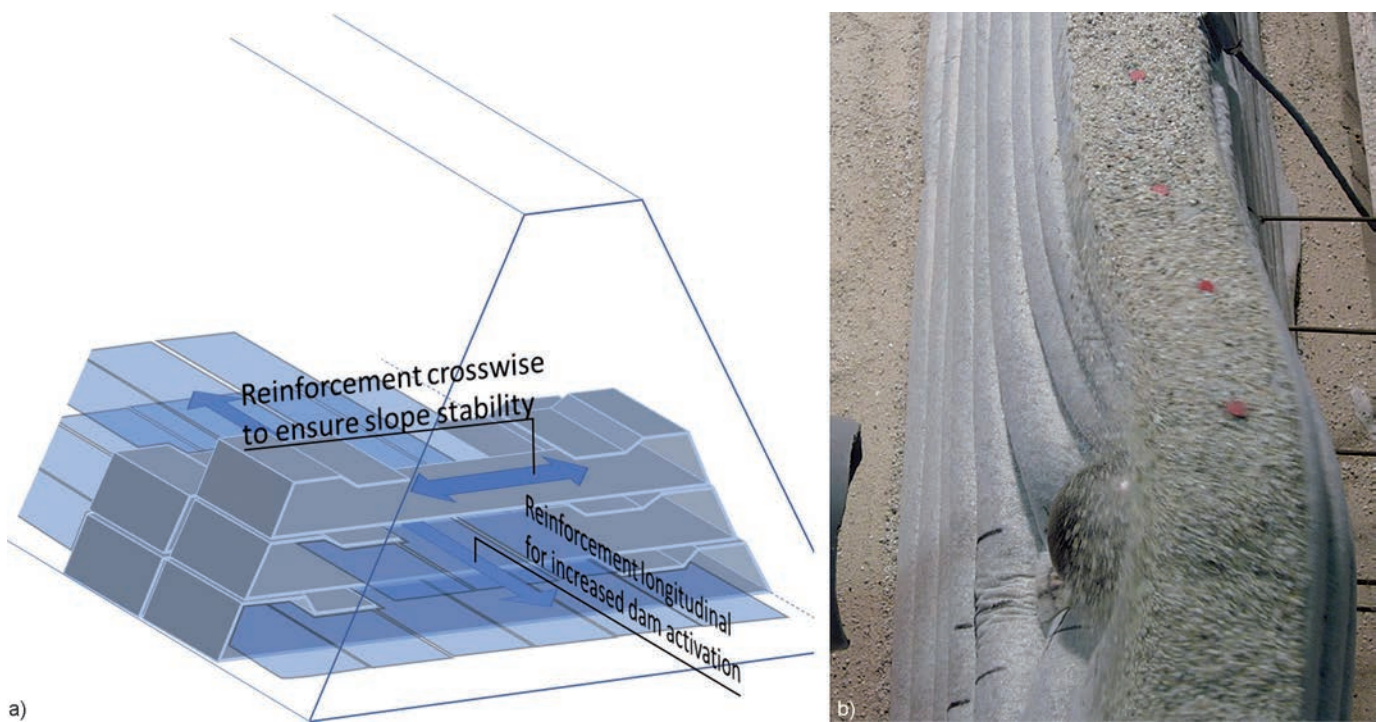
Die Differenzierung der Dammtypen zum Schutz gegen Steinschlag ermöglicht in Abhängigkeit des angestrebten Schutzniveaus für die projektspezifisch sehr unterschiedliche Bemessungsenergie und die jeweils mögliche Bauwerksgeometrie eine angepasste und damit wirtschaftliche Bauweise. Es werden folgende Typen unterschieden:

- Typ I – Reine Erddämme:  
In der Regel sind ohne Zusatzmaßnahmen, je nach Qualität des Dammschüttmaterials, Böschungsneigungen von  $2:3$  bis maximal  $4:5$  üblich. Diese Böschungsneigungen sind im Hinblick auf den Aufprallwinkel eines Steinschlagereignisses sehr ungünstig und erfordern demnach ein deutlich größeres Freibord.
- Typ II – Erddämme mit Steinschichtungen:  
Bergseitige Steinschichtungen ermöglichen bergseitig steilere Böschungsneigungen, verringern das Freibord und erhöhen die Tragfähigkeit beim Lastfall Steinschlag.
- Typ III – Erddämme mit Bewehrung aus Geokunststoffen zur Sicherung der Böschungsneigung:  
Die bergseitige Böschung wird bei diesem Dammtyp durch die Bewehrung mit Geokunststoffen übersteil ausgeführt. Die Bewehrung erlaubt die Aktivierung des oberhalb der Bruchfuge liegenden Dammquerschnitts. Bild 1 zeigt exemplarisch eine Bruchfläche im bewehrten Dammquerschnitt Typ III. Dieser Versagensmechanismus wurde auch bei 1:1-Versuchen in der Natur beobachtet.
- Typ IVa und IVb – Bewehrte Dämme mit Längsbewehrung:  
Wie beim Typ III können die mit Geokunststoffen bewehrten Dämme sehr schlank und mit steileren Böschungen ausgeführt werden. Ergänzend zur Geokunststoffbewehrung, die zur Sicherung der Steilbö-





**Fig. 1** Particle Image Velocimetry analysis of a model Type III – deformation of cross-section under impact from the right side [4]  
PIV-Auswertung eines Modellversuches am Typ III im Querschnitt – Verformung bei Impact auf der rechten Seite [4]



**Fig. 2** a) Schematic arrangement and effect of reinforcement Types IVa and IVb [4]; b) ductility of construction on the example of a dam Type IVa [4]  
a) Schematische Anordnung und Wirkung der Bewehrung Typ IVa und IVb [4]; b) Duktilität der Konstruktion am Beispiel Damm Typ IVa [4]

loaded by the local impact and displaced, is thus anchored to the right and left into the adjoining dam. This achieves a higher ductility of the construction along the dam, leading to activation of a longer section of the dam. As a result, a larger crosswise distribution can be assumed in the determination of the equivalent static force. The reinforcement must however have a certain design strength  $R_{B,d}$  and design strain stiffness  $J_d$  (Tables 3 and 4) in order to involve the adjoining sections of the dam in the load distribu-

tion wie beim Typ III quer zur Dammachse eingebaut wird, wird bei diesem Typ zusätzlich eine Geokunststoffbewehrung in Dammlängsachse angeordnet (Bild 2). Der durch den lokalen Impact beanspruchte und verschobene Bodenkörper wird dadurch nach rechts und links im angrenzenden Damm verankert. Hierdurch wird eine hohe Duktilität der Konstruktion in Bauwerkslängsachse erreicht, die zu einer Aktivierung eines größeren Dammschnitts führt. Infolgedessen darf bei der Ermittlung der statischen

**Tab. 3** Requirements for the reinforcement of geogrid-reinforced rockfall embankments Type IVa  
Anforderungswerte an die Bewehrung bei geogitterbewehrten Steinschlagschutzdämmen Typ IVa

Characteristic	Requirement for reinforcements with low strength/stiffness [kN/m]
Design strength $R_{B,d}$	Crosswise to dam axis: $\geq 110$ In dam axis: $\geq 30$
Design value of tensile stiffness $J_{d@5\%}$	Crosswise to dam axis: $\geq 2,200$ In dam axis: $\geq 550$

tion. The strain stiffness is determined with a reference stiffness of 5%.

The strain stiffness given in Tables 3 and 4 can be related to the layer spacing selected in each case without this leading to a change of system behaviour. This gain of knowledge has been accepted in the revised issue of ONR 24810:2017 [1]. The required values reduce proportionately in the ratio of the actual layer spacing to the model layer spacing. With a selected layer spacing of e.g. 0.6 m the required values to be maintained reduce in direct proportion to  $0.6 \text{ m}/1.0 \text{ m} = 0.6 = 60\%$  of the values from Tables 3 and 4. In practice, a layer spacing of  $\leq 0.8 \text{ m}$  should be selected to maintain the composite effect. Typical installation spacings are 0.6 m.

### 3 Verification concept for rockfall protection dams

#### 3.1 Basics

On impact, the rotating block first hits the uphill surface and then penetrates into the dam. This leads to considerable displacement and plastification in the dam section, activating the reinforcement, which hinders sliding on the forming sliding surface. Due to the side friction of the displaced soil body, adjoining dam sections to the sides are involved in load transfer, with the activated mass of the upper dam section, constructed with wrap-around reinforcement, providing the resistance and preventing mass loss or fill material “shooting out” of the uphill embankment. If longitudinal reinforcement is provided (Type IVa and Type IVb), the loaded section is “anchored” along the dam with greater longitudinal distribution of the impulse force applied to the dam.

#### 3.2 Maximum impact force – equivalent static force

The estimation of the maximum equivalent static force based on the deformation energy has been extensively described in [1] [2], with the basic established dynamic equations relating braking time, penetration depth, velocity and the mass of the body (block) being used and the equivalent static force  $F$  being estimated with equation (1). The maximum equivalent static force is distrib-

**Tab. 4** Requirements for the reinforcement of geogrid-reinforced rockfall embankments Type IVb  
Anforderungswerte an die Bewehrung bei geogitterbewehrten Steinschlagschutzdämmen Typ IVb

Characteristic	Requirement for reinforcements with high strength/stiffness [kN/m]
Design strength $R_{B,d}$	Crosswise to dam axis: $\geq 225$ In dam axis: $\geq 125$
Design value of tensile stiffness $J_{d@5\%}$	Crosswise to dam axis: $\geq 4,500$ In dam axis: $\geq 2,500$

Ersatzkraft eine größere Querverteilung angesetzt werden. Die Bewehrung muss jedoch eine bestimmte Bemessungsfestigkeit  $R_{B,d}$  und Bemessungsdehnsteifigkeit  $J_d$  (Tabellen 3 und 4) erfüllen, um den angrenzenden Dammschnitt an der Lastabteilung zu beteiligen. Die Dehnsteifigkeit wird dabei bei einer Bezugsdehnung von 5% ermittelt.

Die in Tabelle 3 und 4 angegebene Dehnsteifigkeit kann auf den jeweils gewählten Lagenabstand bezogen werden, ohne dass es zu einer Änderung des Systemverhaltens kommt. Dieser Erkenntniszugewinn wurde in die revidierte Fassung der ONR 24810:2017 [1] aufgenommen. Die Anforderungswerte reduzieren sich proportional im Verhältnis des tatsächlichen Lagenabstands zum Modelllagenabstand. Bei einem gewählten Lagenabstand z.B. 0,6 m reduzieren sich damit die einzuhaltenden Anforderungswerte direkt proportional auf  $0,6 \text{ m}/1,0 \text{ m} = 0,6 = 60\%$  der Werte nach Tabelle 3 und 4. In der Baupraxis sollte zur Einhaltung der Verbundwirkung ein Lagenabstand von  $\leq 0,8 \text{ m}$  gewählt werden. Übliche Einbauabstände liegen bei rund 0,6 m.

### 3 Nachweiskonzept für Steinschlagschutzdämme

#### 3.1 Grundlagen

Beim Impakt trifft der rotierende Block zunächst auf die bergseitige Oberfläche und dringt dann in den Damm ein. Dies führt zu erheblichen Verschiebungen und Plastifizierungen im Dammquerschnitt. Dadurch wird die Bewehrung aktiviert, sie verhindert das Abrutschen auf den sich ausbildenden Gleitflächen. Durch die seitliche Reibung des verschobenen Bodenkörpers werden seitlich angrenzende Dammbereiche an der Lastabtragung beteiligt. Dabei bildet die aktivierte Masse des oberen, in Polsterbauweise errichteten Dammschnitts, den Widerstand und verhindert einen Massenverlust bzw. das „Heraus-schießen“ des Schüttguts auf der Böschungsoberseite. Ist eine Längsbewehrung verbaut (Typ IVa und Typ IVb), wird der beanspruchte Abschnitt in der Dammlängsachse „verankert“, sodass sich eine größere Querverteilung der in den Damm eingetragenen Impulskraft ergibt.



uted in the next step onto the collaborating/activated dam width.

The equivalent static force or the maximum impact energy can be determined as follows:

$$F_k = \frac{v^2 m}{\delta} \quad (1)$$

with  $\delta$  the penetration depth in m,  $v$  velocity in m/s and  $m$  mass of the block in kg.

For the calculated verification with rigid bodies on flat models, a failure joint may be assumed running approximately in the impact direction. This however presumes that the soil is wrapped-around with geosynthetic-reinforcement and the dam mass can fully collaborate.

### 3.3 Determination of the penetration depth of the block into the dam body

To determine the dimensionless energy  $E^*$  with equation (2), the impact energy is first related in the design model with equation (3) to an idealised dam area (Figure 3) with a horizontal, flat adjoining area downhill surface. The relative height  $h_a$  of the relative dam section  $A_E^*$  with equation (4) serves as an indicator of the collaborating mass. The decisive parameters for the penetration depth of the impact body into the dam body are the geometric dimensions, relative height  $h_a$  (height of the lower edge of the impact body to the dam crown), crown width of the dam  $b$  and thus the dam section  $A_a$ , and density of the dam body  $\gamma$ . The penetration depth  $\delta$  is determined using the dimensionless diagram (Figure 4).

The dimensionless relative energy  $E^*$  is defined according to [1] [2] [3] [4] as follows:

$$E^* = \frac{E}{\gamma A_a D h_a} \quad (2)$$

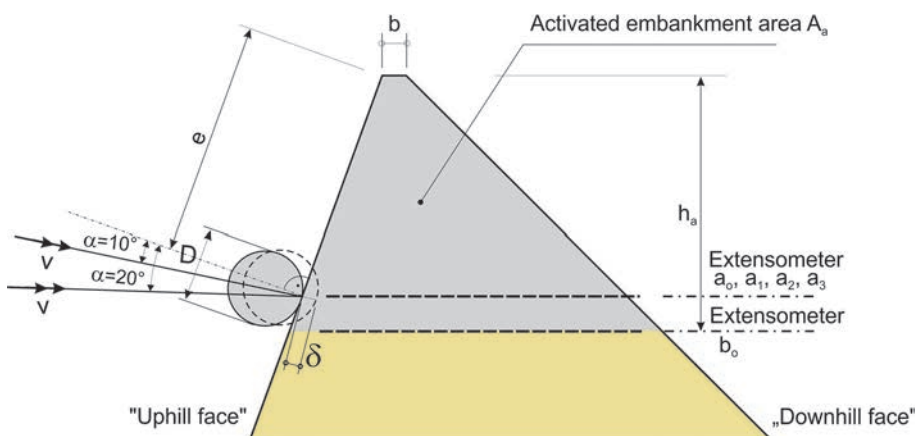


Fig. 3 Dam cross-section [4]  
Dammquerschnitt [4]

### 3.2 Maximale Stoßkraft – statische Ersatzkraft

Auf Grundlage der Deformationsenergie beim Aufprall wurde die Abschätzung der maximalen statischen Ersatzkraft in [1] [2] umfangreich beschrieben. Dabei wurden die etablierten dynamischen Grundgleichungen, welche die Bremszeit, die Eindringtiefe, die Geschwindigkeit, die Verzögerung sowie die Masse des Körpers (Block) verbinden, verwendet und die statische Ersatzkraft  $F$  mit Gl. (1) abgeschätzt. Die maximale statische Ersatzkraft wird im nächsten Schritt auf die mitwirkende/aktivierte Dammbreite verteilt.

Die statische Ersatzkraft bzw. die maximale Stoßkraft können wie folgt bestimmt werden:

$$F_k = \frac{v^2 m}{\delta} \quad (1)$$

Dabei ist  $\delta$  Eindringtiefe in m,  $v$  Geschwindigkeit in m/s und  $m$  Masse des Blocks in kg.

Für die rechnerischen Nachweise mit Starrkörpern an ebenen Modellen darf eine Bruchfuge angenommen werden, die ungefähr in Impaktrichtung verläuft. Dieses setzt aber voraus, dass der Boden in Polsterbauweise eingeschlossen ist und der Dammkörper vollständig mitwirken kann.

### 3.3 Ermittlung der Eindringtiefe des Blocks in den Dammkörper

Zur Ermittlung der dimensionslosen Energie  $E^*$  mit der Gl. (2) wird in dem Bemessungsmodell die Impaktenergie mit Gl. (3) zunächst auf eine idealisierte Dammsfläche (Bild 3) mit einer unteren horizontalen, ebenen Begrenzungsfläche bezogen. Die Bezugshöhe  $h_a$  des bezogenen Dammschnitts  $A_E^*$  mit Gl. (4) dient dabei als Indikator für die mitwirkende Masse. Die maßgebenden Parameter für die Eindringtiefe des Impaktkörpers in den Dammkörper stellen die geometrischen Größen, also die Be-

Kinetic energy of the impacting body [J]:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

with

- $m$  mass of the block [kg]
- $v$  velocity of the block [m/s]
- $\gamma$  density of the soil [kN/m<sup>3</sup>]
- $A_a$  relative dam area [m<sup>2</sup>]

$$A_a = \frac{1}{2}(b+c)h_a \quad (4)$$

- $D$  block diameter [m]
- $h_a$  relative height [m]
- $b$  crown width [m]
- $c$  relative base length of the activated dam area [m]
- $\delta$  penetration depth of the block into the dam [m]

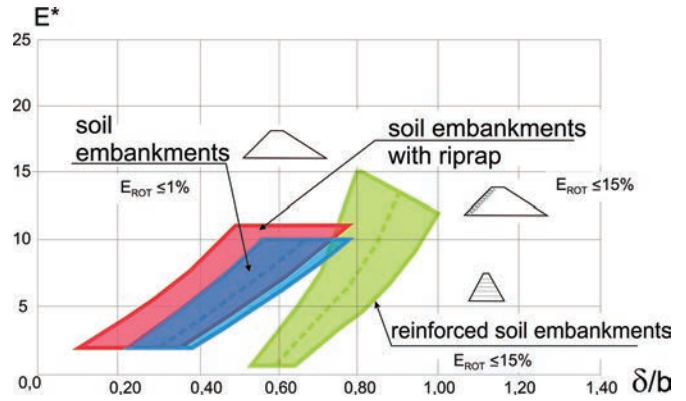
### 3.4 Influence of the soil

As a supplement to the model tests, which were carried out in 2012 and whose results have been published in [1], tests were carried out with various model soils. In addition to the test soil 1 described in [1] with a low cohesive content (max. 8% silt), tests were carried out with non-cohesive soil without any grain size < 0.063 mm (test soil 2) in order to investigate the influence or the lack of cohesion. Comparison of the model tests shows that the absolute displacements were less with the cohesionless test soil 2. Nonetheless, a sideways distribution corresponding to six times the block diameter or eight times the block diameter respectively could be demonstrated. From the observations of the model tests that were carried out, there were no relevant deviations regarding the sideways distribution and the failure body for test soil 2 compared to the model tests with test soil 1 for the range of the sideways distribution.

## 4 Statements in comparable regulations

### 4.1 Forestry office of the Canton Bern, department for natural hazards

In the guideline for the design of rockfall protection dams [5], reference is made to two investigations for rockfall protection galleries and the verification concept according to [3] and to ONR 24810 [1] for the verification of the limit state of loadbearing capacity according to SIA 267 [6] and SIA 267/1 [7]. It should however be noted that the actions resulting from rock impact are based on fall tests with protection galleries with soil protection and were not carried out for dams. The guiding geometric figures are summarised in Table 5. It is noticeable here that simple earth dams, dams with stone facing and geogrid-reinforced dams are not differentiated. For the freeboard, it is assumed that this would have to be increased for rein-



**Fig. 4** Diagram for estimating the penetration depth into dam structures (Types I, II, III, IVa and IVb) according to [1] [2] [3] [4] for a maximum proportion of rotational energy of 1% for Type I and 15% for Types II, III, IVa and IVb  
 Diagramm zur Abschätzung der Eindringtiefe für Dammkonstruktionen (Typ I, II, III, IVa und IVb) nach [1] [2] [3] [4] für einen maximalen Anteil der Rotationsenergie von 1% für Typ I und 15% für Typ II, III, IVa und IVb

zugshöhe  $h_a$  (Höhe der Unterkante des Impaktkörpers bis Dammkrone), die Kronenbreite des Damms  $b$  und damit der Dammschnitt  $A_a$ , sowie die Wichte des Dammkörpers  $\gamma$  dar. Die Eindringtiefe  $\delta$  wird über das dimensionslose Diagramm (Bild 4) ermittelt.

Die dimensionslose bezogene Energie  $E^*$  wird gemäß [1] [2] [3] [4] wie folgt definiert:

$$E^* = \frac{E}{\gamma A_a D h_a} \quad (2)$$

Kinetische Energie des einschlagenden Körpers [J]:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (3)$$

Mit

- $m$  Masse der Block [kg]
- $v$  Geschwindigkeit des Blocks [m/s]
- $\gamma$  Wichte des Bodens [kN/m<sup>3</sup>]
- $A_a$  Bezogene Dammsfläche [m<sup>2</sup>]

$$A_a = \frac{1}{2}(b+c)h_a \quad (4)$$

- $D$  Blockdurchmesser [m]
- $h_a$  bezogene Höhe [m]
- $b$  Kronenbreite [m]
- $c$  bezogene Basislänge der aktivierten Dammsfläche [m]
- $\delta$  Eindringtiefe des Blocks in den Damm [m]

### 3.4 Einfluss des Bodens

Als Ergänzung zu den Modellversuchen, die bis zum Jahr 2012 durchgeführt und deren Ergebnisse in [1] veröffentlicht wurden, erfolgten Versuche mit unterschiedlichen Modellböden. Zusätzlich zu dem in [1] beschriebenen

**Tab. 5** Geometric guidelines for rockfall embankments according to [5]  
Geometrische Richtgrößen für Steinschlagschutzdämme nach [5]

Geometric guidelines	Minimum value	Note
Crown width	$1.0 D - 1.2 D$	$D$ [m] – block diameter
Width of embankment at point of impact	$2.5 D$ to $3.3 D$	
Embankment height	$1.33 h_A$ to $1,5 h_A$	$h_A$ [m] – bounce height
Freeboard	$0.5 D$ to $1.0 D$	For dams with geogrid $\geq 1.0 D$
Slope of embankment uphill	$\geq 60^\circ$	

forced dams; in the view of the authors, the recommendations of ONR 24810 should be followed here.

## 4.2 Swiss Confederation (UVEK)

The statements in [8], which are based on several research projects at Lucerne University with small-scale quasi-2D tests and half scale 3D tests, are very similar to the statements in [5]. In the tests, as also in [3] and [4], the influence of block rotation was investigated and the necessity of considering this for the design of rockfall protection dams was recommended. From the model test, three geometric rules (crown width, dam width at the impact location and freeboard) could be derived for rockfall protection dams (Table 6). No design concept is however given for verification of the limit state of loadbearing capacity according to SIA 267 [6] and SIA 267/1 [7]. It is to be noted that all model tests were carried out using cohesive model soils with embankment slopes of up to 5:1 and no model grid was used. The model tests are therefore not applicable to various construction types, especially to geogrid-reinforced constructions.

## 5 Construction

The reinforcement is installed in horizontal layers staggered following the shape of the terrain (Figure 5) on loadbearing ground or if required on a deep foundation. In order to form the surface of the embankment, a formwork of steel mesh can be used, which provides a temporary function (Figure 6). In this case, the reinforcement

Versuchsboden 1 mit einem geringen Kohäsionsanteil (max. 8% Schluff) wurden Versuche mit nichtbindigen Böden ohne eine Korngröße  $< 0,063$  mm durchgeführt (Versuchsboden 2), um den Einfluss bzw. das Fehlen einer Kohäsion zu untersuchen. Der Vergleich der Modellversuche zeigte, dass die absoluten Verschiebungen mit dem kohäsionslosen Versuchsboden 2 geringer waren. Dennoch konnte eine Querverteilung, die dem sechsfachen Blockdurchmesser bzw. dem achtfachen Blockdurchmesser entspricht, nachgewiesen werden. Aus Beobachtungen bei den ausgeführten Modellversuchen ergaben sich für den Versuchsboden 2 damit hinsichtlich der Querverteilung und des Bruchkörpers keine relevanten Abweichungen im Vergleich zu den Modellversuchen mit Versuchsboden 1 für die Reichweite der Querverteilung.

## 4 Angaben in vergleichbaren Regelwerken

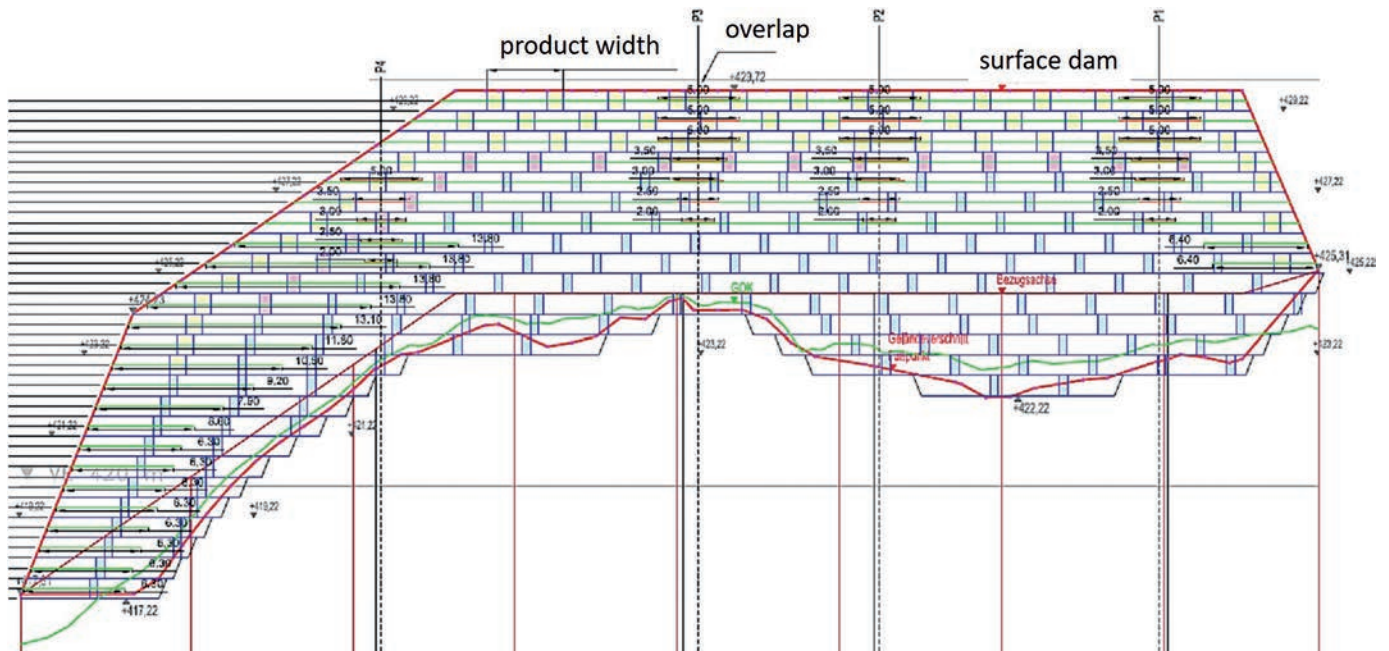
### 4.1 Amt für Wald des Kantons Bern, Abteilung Naturgefahren

Im Regelwerk über die Projektierung von Steinschlagschutzdämmen [5] wird für die Nachweise des Grenzzustands der Tragfähigkeit nach SIA 267 [6] und SIA 267/1 [7] auf zwei Untersuchungen für Steinschlaggalerien und das Nachweiskonzept nach [3] sowie die ONR 24810 [1] verwiesen. Dabei ist jedoch anzumerken, dass die Einwirkungen infolge Steinschlags auf Fallversuchen bei Schutzgalerien mit Bodenüberdeckung beruhen und nicht für Dämme durchgeführt wurden. Die geometrischen Richtgrößen sind in der Tabelle 5 zusammengefasst. Auffällig

**Tab. 6** Geometric guidelines for rockfall embankments according to [6]  
Geometrische Richtgrößen für Steinschlagschutzdämme nach [6]

Geometric guidelines	Minimum value	Notice
Crown width	$1.2 D$	$D$ [m] – block diameter
Width of embankment at point of impact	$3 D$	
Embankment width at the point of impact for protective dams with a supporting wall of natural stone in front of them	$2.5 D$	
Freeboard	$0.8 D$	For dams with geogrid $\geq 1.0 D$
Slope of embankment uphill	$\geq 60^\circ$	Independent of the embankment construction





**Fig. 5** Design and adaption of a rockfall embankment to the terrain [4]  
 Planerische Durchbildung und Anpassung eines Steinschlagschutzdamms an das Geländeprofil [4]



**Fig. 6** Building of a rockfall embankment by wrap-around method with temporary formwork, Type IVb [4]  
 Aufbau eines Steinschlagschutzdamms in Umschlagmethode mit temporärer Hilfsschalung, Bautyp IVb [4]

has to be folded back at the embankment surface and anchored back into the construction.

Normally, locally available material is used for the dam fill. The fill material mostly consisting of scree or broken rock is thus characterised by a changeable grading distribution and a large content of oversized grains or stones, which can lead to over-proportional installation damage to the reinforcement. The factors to reduce the structurally usable strength (design strength) used for damage to the reinforcement from regular grain sizes are therefore not applicable. The factors can be determined from installation damage on site analogously to EBGEO [9] or factors estimated on the safe side in the design phase can be checked (Figure 7).

The sloping surface should be designed to protect the structurally effective construction from statistically fre-

ist dabei, dass keine Unterscheidung in reine Erddämme, Dämme mit Steinschichtung und geogitterbewehrte Dämme erfolgt. Beim Freibord wird davon ausgegangen, dass dieses bei bewehrten Dämmen erhöht werden müsse; aus Sicht der Autoren sollte hierbei den Empfehlungen der ONR 24810 gefolgt werden.

#### 4.2 Schweizerische Eidgenossenschaft (UVEK)

Die Angaben in [8], die auf Grundlage von mehreren Forschungsprojekten an der Hochschule Luzern mit kleinmaßstäblichen quasi 2D-Versuchen und halbmaßstäblichen 3D-Versuchen erfolgten, sind sehr ähnlich zu den Vorgaben in [5]. Bei den Versuchen wurde, wie auch in [3] und [4], der Einfluss der Blockrotation untersucht und die Notwendigkeit der Berücksichtigung für den Entwurf und die Bemessung von Steinschlagschutzdämmen empfohlen. Aus den Modellversuchen konnten drei geometrische Regeln (Kronenbreite, Dammbreite am Aufprallort und Freibord) für die Steinschlagschutzdämme abgeleitet werden (Tabelle 6). Ein Bemessungskonzept für den Nachweis des Grenzzustands der Tragfähigkeit nach SIA 267 [6] und SIA 267/1 [7] wird jedoch nicht angegeben. Anzumerken ist, dass alle Modellversuche mit reinem (kohäsiven) Modellboden mit Böschungsneigungen bis zu 5:1 erfolgten und keine Modellgeogitter verwendet wurden. Die Übertragbarkeit der Modellversuche auf verschiedene Bautypen, speziell auf geogitterbewehrte Konstruktionen, ist daher nicht möglich.

#### 5 Konstruktion

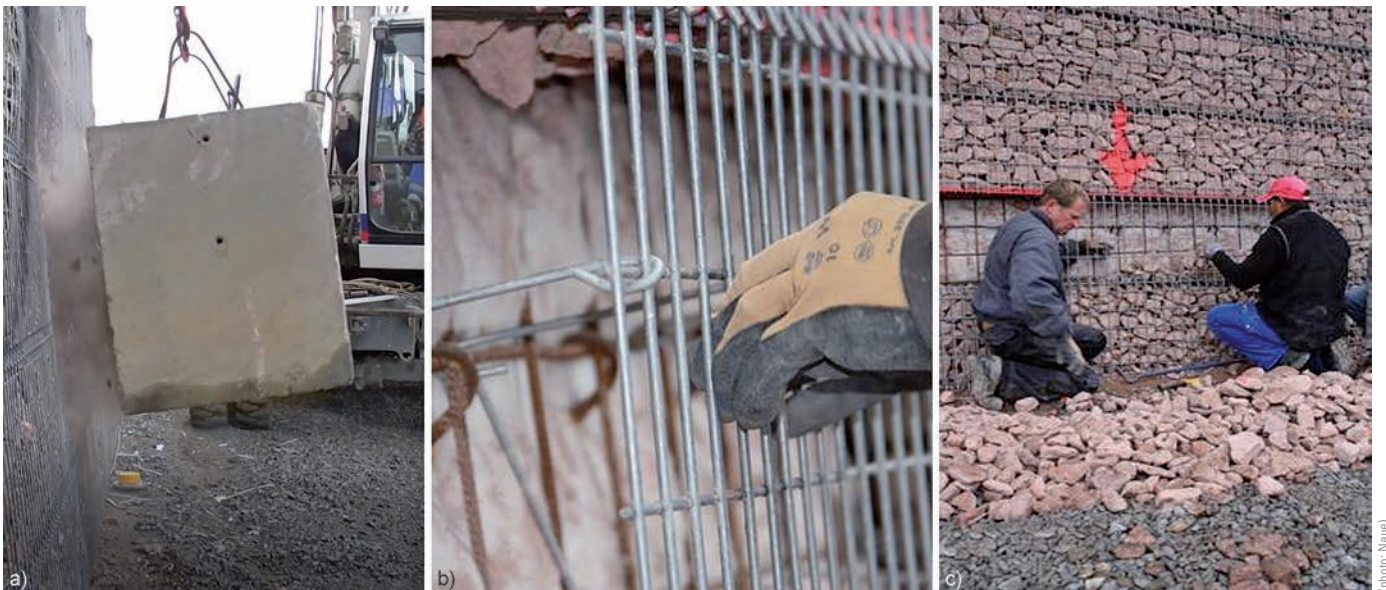
Der Einbau der Bewehrung erfolgt in horizontalen Einbaulagen, die dem Geländeverlauf folgend gestaffelt wer-





**Fig. 7** Installation damage test using project-specific crushed stone as fill material: a) geogrid marked ; b) placing of stony fill; c) compaction  
Ausführung von Einbaubeschädigungsversuchen vor Ort mit der projektspezifischen Steinschüttung: a) Markierung der Probestücke; b) Platzierung der Steinschüttung; c) Verdichtung

(photos: BGG Bauberatung Geokunststoffe)



**Fig. 8** Repairable double-layer facing (half-gabion) as protection to the static construction: a) exemplary damage test; b) installation of new facing [4]; c) new filling [4]  
Reparables zweischaliges Außenhautsystem (Halbgabione) zum Schutz der statischen Grundkonstruktion: a) exemplarischer Systemtest durch Anprall; b) Einsetzen eines neuen Frontelements [4]; c) neue Füllung [4].

(photo: Naue)

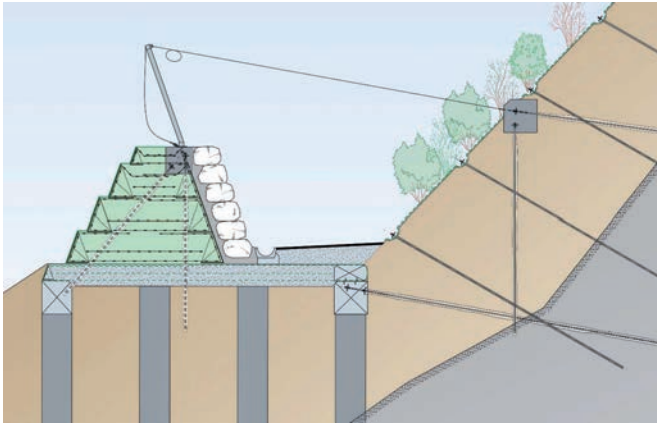
quent and regularly occurring rockfall events. The selection of two-layer systems (Figure 8) can reduce maintenance and ideally be suitable for repairing partial damage.

In order to be able to resist very high horizontal loads with very steep existing embankments, the coupling of very different construction processes can be useful. Figure 9 shows an example of a dam construction with longitudinal reinforcement corresponding to Type IVb and elevation on a geogrid-reinforced foundation layer (Figure 10). There are practically no limits to the possible dimensions of the structure in height and volume (Figure 11), so that very high calculated energies of considerably more than 35,000 kJ can be resisted. In practice, the

den (Bild 5) und auf dem tragfähigen Untergrund oder bei Bedarf auf einer Tiefgründung abgesetzt werden. Zur Herstellung der Böschungsoberfläche kann eine Schalung aus Stahlgittern genutzt werden, die eine temporäre Funktion übernimmt (Bild 6). In diesem Fall muss die Bewehrung an der Böschungsoberfläche umgeschlagen und in die Konstruktion zurückverankert werden (Umschlagmethode bzw. Polsterböschung).

Im Regelfall muss vor Ort anstehendes Material für die Dammschüttung eingesetzt werden. Das meist aus Hangschutt und Felsbruch bestehende Füllmaterial ist dabei durch wechselnde Kornverteilungen und einen großen Anteil an Überkorn und Steinen gekennzeichnet, die zu





**Fig. 9** Example of a dam with combined protection and foundation measures with longitudinal reinforcement according to Type IVb [10]  
 Beispiel für ein Dammbauwerk mit kombinierten Schutz- und Gründungsmaßnahmen mit Längsbewehrung analog Typ IVb [10]



**Fig. 11** Protection wall analogous to Type III with a construction height of up to 25 m and berm for maintenance works  
 Dammbauwerk analog Typ III als Schutzdamm mit einer Bauwerks-  
 höhe von bis zu 25 m und Zwischenberme für Wartungsarbeiten



**Fig. 10** Horizontal reinforcement of the load transfer platform as basis of the embankment [10]  
 Lastverteilungspolster als Basis für den Steinschlagschutzdamm [10]

available area and the self weight of the dam mass will demand a limitation of the geometry of the structure on very steep slopes.

## 6 Summary

With the development of ONR 24810, extensive experience has been gained in design and construction since the first version in 2015. Supplementary tests to further differentiate construction types have been taken into account in the new 2017 revision, which enables an optimisation of the structure with regard to construction and economics. As a result, the differentiation of five construction types of rockfall protection dams is sensible. The simple geosynthetic-reinforced steep embankment is supplemented with construction types with pronounced ductility along the dam, resulting from additional reinforcement by geogrids, activated to resist impact loads. The effects on the system behaviour permit calculated verification, even with very high impact loads. In prac-

überproportionalen Einbaubeschädigungen der Bewehrungen führen. Die für Regelkörnungen erstellten Faktoren für Einbaubeschädigung der Bewehrung zur Abminderung der statisch nutzbaren Festigkeit (Bemessungsfestigkeit) sind dann nicht anwendbar. Durch Einbaubeschädigungsversuche vor Ort analog zu EBGEO [9] können die Faktoren ermittelt oder die in der Planungsphase konservativ abgeschätzten Faktoren überprüft werden (Bild 7).

Die Böschungsoberfläche sollte so gestaltet sein, dass sie einen Schutz der statisch tragenden Konstruktion für die statistisch häufig und regelmäßig auftretenden Steinschlagereignisse darstellt. Durch die Wahl zweischaliger Systeme (Bild 8) kann sie wartungsarm und im Idealfall reparabel ausgeführt werden, um partielle Schäden nachbessern zu können.

Um bei sehr steilen Bestandsböschungen hohe Horizontallasten abtragen zu können, kann die Kopplung unterschiedlichster Bauverfahren sinnvoll werden. Bild 9 zeigt ein Beispiel einer Dammkonstruktion mit Längsbewehrung entsprechend Typ IVb und einer Aufständigung auf einem geokunststoffbewehrten Gründungspolster (Bild 10). Den möglichen Bauwerksabmessungen sind in Höhe und Volumen praktisch keine Grenzen gesetzt (Bild 11), sodass rechnerisch sehr hohe Energien von deutlich jenseits der 35.000 kJ aufnehmbar werden. In der Praxis wird aber die verfügbare Aufstandsfläche und das Eigengewicht der Dammmasse in den steilen Hängen eine Begrenzung der Bauwerksgeometrie erfordern.

## 6 Zusammenfassung

Mit der Entwicklung der ONR 24810 wurden seit der Erstfassung 2015 umfangreiche Erfahrungen in Bemessung und Ausführung gesammelt. Ergänzende Versuche zur stärkeren Differenzierung der Bautypen sind in die Neufassung 2017 eingeflossen. Hiermit wird eine Optimierung der Konstruktion in bautechnischer und wirtschaftlicher Hinsicht möglich. Als Ergebnis wird eine

tice, mixed construction types have meanwhile been realised, which sensibly combine the repertoire of available geotechnical measures and enable locally adapted constructions with a high degree of protection.

## References

- [1] ONR 24810 (2017): *Technischer Steinschlagschutz – Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung*. Austrian Standards Institute, Vienna.
- [2] ONR 24810 (2017): Technical protection against rockfall – Terms and definitions, effects of actions, design, monitoring and maintenance. Austrian Standards Institute, Vienna.
- [3] Hofmann, R.; Mölk, M. (2012): *Bemessungsvorschlag für Schutzdämme*. geotechnik 35, No. 1, pp. 22–33.
- [4] Hofmann, R.; Mölk, M.; Vollmert, L. (2017): *Steinschlagschutzdämme – Bemessungsvorschlag für verschiedene Bautypen*. geotechnik 40, No. 1, pp. 35–53.
- [5] Amt für Wald des Kantons Bern, Abteilung Naturgefahren: *Projektierung von Steinschlagschutzdämmen*.
- [6] SIA 267 (2013): Geotechnik.
- [7] SIA 267/1 (2013): Geotechnik – Ergänzende Festlegungen.
- [8] UVEK, Schweiz. Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (2015): *Erarbeitung von Grundlagen zur Bemessung von Steinschlagschutzdämmen*.
- [9] DGGT [Hrsg.] (2010): *Empfehlungen für den Entwurf und die Bewehrung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen – EBGEO*. Berlin: Ernst & Sohn.
- [10] Kunz, L.; Jost, S. (2019): *Schutz vor gravitativen Naturgefahren mit innovativer Erdbau-Technologie, CH-Weggis*. Tagungsband zum NAUE-Geokunststoff-Kolloquium.

## How to Cite this Paper

Hofmann, R.; Vollmert, L. (2020) *Rockfall protection dams: construction and design concept*. Geomechanics and Tunneling 13, No. 1, pp. 21–31. <https://doi.org/10.1002/geot.201900073>

This paper has been peer reviewed. Submitted: 19. November 2019; accepted: 23. December 2019.

Unterscheidung von fünf Bautypen von Steinschlagschutzdämmen sinnvoll. Die einfache geokunststoffbewehrte Steilböschung wird um Bautypen mit ausgeprägter Duktilität in Dammlängsachse ergänzt, die durch die Zusatzbewehrung aus Geogittern große Dammabschnitte zur Aufnahme von Impaktlasten aktivieren können. Die Auswirkungen auf das Systemverhalten erlaubt die rechnerische Nachweisführung auch bei sehr hohen Impaktlasten. In der Praxis sind zwischenzeitlich gemischte Konstruktionen ausgeführt worden, die das Repertoire der verfügbaren geotechnischen Maßnahmen sinnvoll kombinieren und örtlich angepasste Konstruktionen mit hohem Schutzniveau ermöglichen.

## Authors/Autoren



Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Robert Hofmann  
(corresponding author)  
robert.hofmann@uibk.ac.at  
Universität Innsbruck  
Institut für Infrastruktur, AB für Geotechnik und Tunnelbau  
Technikerstraße 13, 6020 Innsbruck



Dr.-Ing. Lars Vollmert  
lvollmert@bbgeo.com  
BBG Bauberatung Geokunststoffe GmbH & Co. KG  
Gewerbestraße 2, 32339 Espelkamp, Germany

## Zitieren Sie diesen Beitrag

Hofmann, R.; Vollmert, L. (2020) *Steinschlagschutzdämme: Konstruktion und Bemessung*. Geomechanik und Tunnelbau 13, H. 1, S. 21–31. <https://doi.org/10.1002/geot.201900073>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 19. November 2019; angenommen: 23. Dezember 2019.