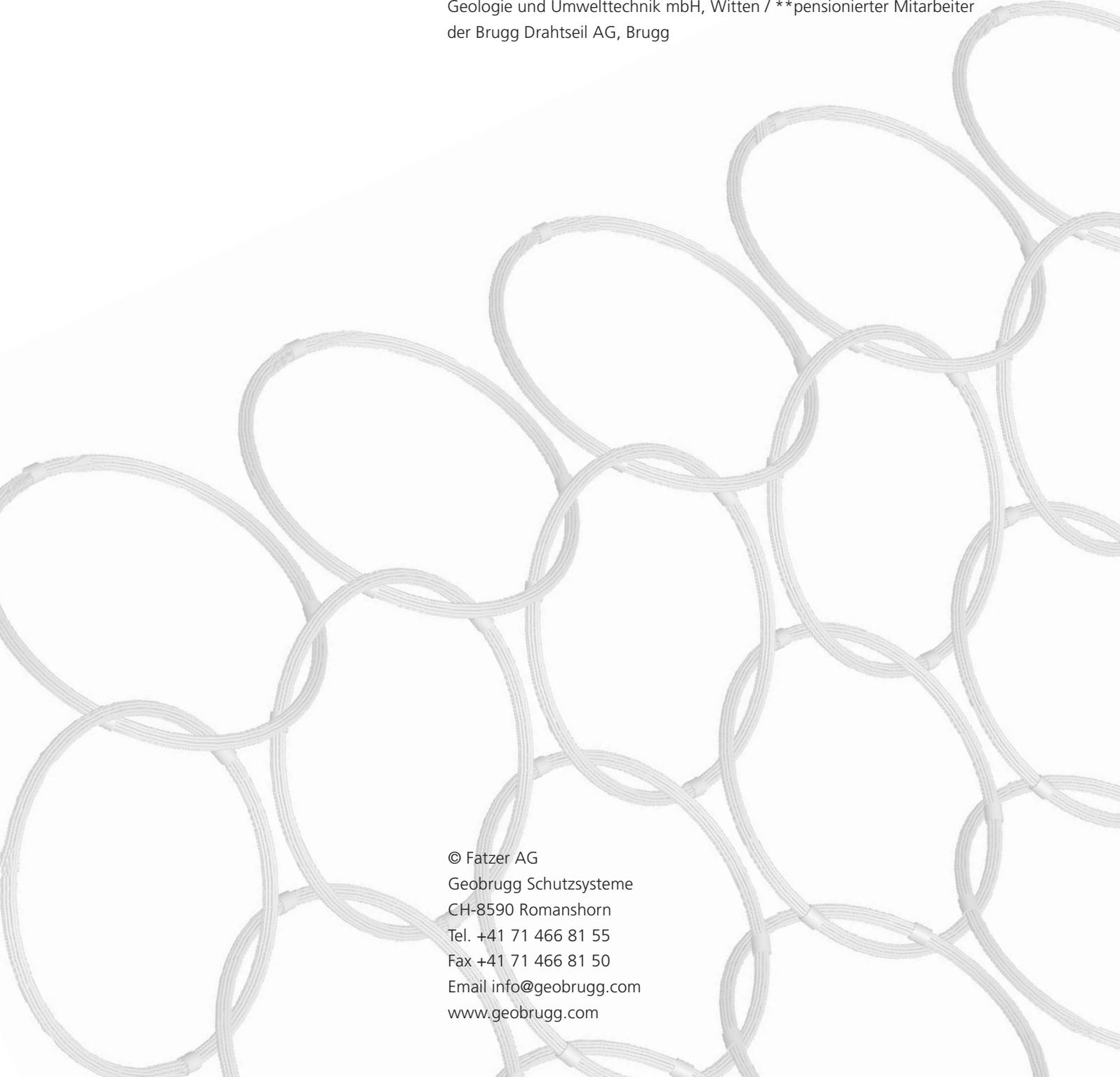


Jubiläumstagung GeobruGG
Walenstadt, 13. Juni 2001

Vom Holzzaun zum Hochenergienetz – die Entwicklung des Steinschlagschutzes von den Anfängen bis zur Gegenwart

Auszug aus Referat von Dr. rer. nat. Raymund M. Spang* und Dipl.-Ing.
Reinhold Bolliger** / *Dr. Spang Ingenieurgesellschaft für Bauwesen
Geologie und Umwelttechnik mbH, Witten / **pensionierter Mitarbeiter
der Brugg Drahtseil AG, Brugg



© Fatzer AG
GeobruGG Schutzsysteme
CH-8590 Romanshorn
Tel. +41 71 466 81 55
Fax +41 71 466 81 50
Email info@geobruGG.com
www.geobruGG.com

Zusammenfassung

*Zum 50. Jubiläum der Erfindung der Drahtseilnetze durch eine Firma der Gruppe Brugg wird die von dieser massgeblich geprägte Geschichte der Steinschlagschutz-
zäune erstmals vorgestellt. Es wird zunächst auf die Ursprünge des Steinschlagschut-
zes im Lawinenschutz eingegangen. Die Entwicklung von der Holz- zur Stahlstütze,
von Netzen mit Rechteckmaschen zum Ringnetz, von der Einfach- zur Doppelseil-
führung, von der Gründung über Einzelfundamente zur Gründung über Mikropfähle
und von der Verzinkung zum Galfan-Verfahren wird beschrieben. Der heute er-
reichte Stand wird dargestellt. Schliesslich wird auf sich abzeichnende Entwick-
lungstendenzen hinsichtlich noch höherer Energieaufnahmen, numerischer Bemessungs-
verfahren und europäischer Systemzertifizierungen eingegangen.*

Einleitung

Zum 50. Jubiläum der Erfindung der Drahtseilnetze durch eine Firma der Gruppe Brugg erschien es die Mühe wert, die von dieser massgeblich geprägte Geschichte der Steinschlagschutzzäune erstmals zusammen zu tragen, zumal eine Veröffentlichung zu diesem Thema bislang nicht vorliegt. Während sich der Lawinenschutz bis in das Jahr 1518 zurückverfolgen läßt, hat sich ein entsprechendes Schutzbedürfnis gegen Steinschlagsrisiken vermutlich erst aus dem 1834 beginnenden Eisenbahnbau entwickelt. Immerhin wurden in den 50 Jahren zwischen 1835 und 1885 in Europa 195.833 km, weltweit 487.343 km Eisenbahnstrecken gebaut, von denen ein erheblicher Teil durch Gebirgsregionen verlief. Mit dem spurgebundenen, im Vergleich zu den Pferdekutschen schnellen Fahrzeug mit langem Bremsweg und einer wesentlich größeren Anzahl potentiell gefährdeter Passagiere waren die Anforderungen an einen sicheren und hindernisfreien Fahrweg sprunghaft gestiegen. Mit dem Höhepunkt des Eisenbahnbaus in Deutschland zwischen 1870 und 1880 war bereits eine große Anzahl an heute noch lesenswerten Lehrbüchern zu fast allen dabei anfallenden geotechnischen Fragestellungen erschienen. Steinschlagschutz wird allerdings nicht erwähnt. Dieser wurde bis zu Beginn der 50er Jahre des vorigen Jahrhunderts vor allem mit eisenbahnspezifischen Materialien, mit aus Schienen und Holzschwellen zusammengesetzten starren Prallwänden betrieben.

Erste Anwendung

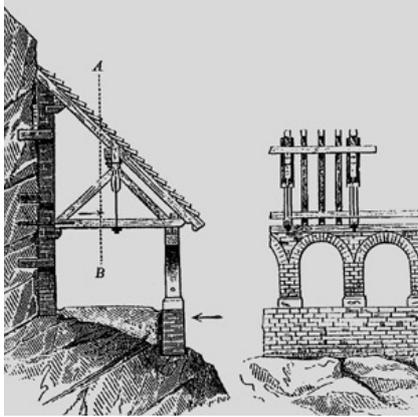


Abb. 1



Abb. 2



Abb. 3

In seinem Lehrbuch «Der Strassenbau» führt AHLBURG (1870, 315) im Kapitel «Verschiedene, zu den Kunstbauten zu zählende Vorrichtungen und Anlagen» an, daß «an Gebirgsstraßen .. zum Schutz des Verkehrs auch wohl noch besondere Vorrichtungen gegen das Herabgleiten des Trümmergesteins, welches sich durch die Verwitterungsprozesse bildet, .. erforderlich» sei. Er illustriert seine Feststellung mit der in Abb. 1 wiedergegebenen Galerie. Weitere Schutzmöglichkeiten führt er nicht auf.

Vermutlich wurden einfache Steinschlagschutzzäune aus Stahlstützen und horizontal gespannten Drahtseilen bereits früher eingesetzt, das erste Patent erhielt die Wiener Firma Josef Kaim Bau- und Sprengunternehmung 1959. Der Zaun bestand aus schlaffen horizontalen Drahtseilen, zwischen die vertikale Seile geflochten wurden.

Die Verwendung von Drahtseilnetzen begann im Lawinenschutz mit Dreiecknetzen mit rechteckigen Maschen, die zunächst auf Holzstützen, später auf Stahlstützen aufgespannt wurden (Abb. 2). Die Maschenweite betrug 20 x 20 cm. Der erste Einsatz war vor 50 Jahren 1951 am Schafberg in Pontresina, im Engadin. Die damaligen Kabelwerke Brugg AG erhielten auf diese neue Art des Lawinenschutzes 1952 ein Patent. Drahtseilnetze waren bereits zuvor als Sprengschutznetze verwendet worden. Die Netze wurden zunächst einzeln aufgestellt (Abb. 3). Erst in den Folgejahren entwickelte der an der ETH Zürich lehrende Professor HÄFELI, auf den heute noch gültige Bemessungsverfahren für Lawinenverbauungen aus Drahtseilnetzen zurückgehen, die Idee der Reihenverbauung.

Die Erfahrung lehrte, daß Lawinenverbauungen in der schneefreien Zeit immer wieder Steinschlag ausgesetzt waren und diesen zurückhielten. Diese Beobachtung hat BINDSCHÄDLER, ein verdienter Mitarbeiter der Kabelwerke Brugg AG, dazu geführt, Drahtseilnetze auch für den originären Steinschlagschutz einzusetzen. Das weltweit erste aus Drahtseilnetzen bestehende Steinschlagschutzbauwerk wurde 1958 in Brusio in der Südschweiz zum Schutz der Freileitungen Campocologno – Cavaglia errichtet. Das auch für heutige Verhältnisse mit 5 m hohe, aus Rechtecknetzen mit den Abmessungen 3 x 5 m bestehende Bauwerk stand auf einer Steinmauer und wurde durch Stahlträger aufgespannt. Die zweite Steinschlagsicherung mit Drahtseilnetzen wurde bereits 1959 bei Ardez im Unterengadin ebenfalls auf einer Stützwand errichtet. Bei Pfäfers wurden Drahtseilnetze 1959 gegen Eisschlag an einer Straße eingesetzt.



Abb. 4

Ein eindrucksvolles Beispiel für die Schutzwirkung von Lawinenverbauungen auch gegen Steinschlag bot sich 1961 an der 1954 am Stotzigberg, Vasön, im Kanton St. Gallen errichteten Lawinenverbauung. Hier wurden etwa 3 m Felsblöcke problemlos zurückgehalten (Abb. 4).

Erste Feldversuche

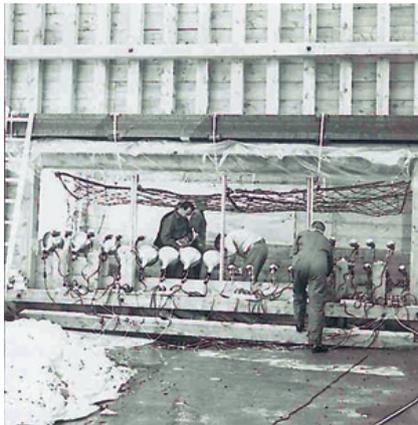


Abb. 5

Bei diesen ersten Anwendungen gegen Steinschlag standen Bemessungsverfahren, wie sie im Lawinenschutz Standard geworden waren, noch nicht zur Verfügung. Es war deshalb nicht bekannt, welche Energie die Bauwerke aufnehmen konnten. Dies führte 1962 zu den ersten systematischen Steinschlagversuchen. In Brunnen am Vierwaldstätter See, ebenfalls in der Schweiz, wurden 520 N schwere Steine von einem Getreidesilo aus einer Fallhöhe von 45 m mit einer für heutige Verhältnisse minimalen Energie von 23 kJ in horizontal in einem Stahlrahmen mit Nylonseilen befestigte Drahtseilnetze geworfen (Abb.5). Trotz der erfolgreich verlaufenen Versuche – das Netz nahm die Steine ohne Schäden auf – wurde an der betreffenden Stelle der Axenstrasse dann doch eine heute noch bestehende sehr aufwendige Galerie gebaut.

Auf Anregung der BLS-Bahn wurden 1968 an der Lötschberg-Südrampe bis 10 kN schwere Steine einen Hang hinab in eine aus drei Feldern bestehende Steinschlagverbauung aus Diagonaldrahtseilnetzen gerollt. Die geforderte Energieaufnahme der Bauwerke war noch gering. Die Beteiligten erkannten jedoch, daß eine wünschenswerte Erhöhung der Energieaufnahme, ausgedrückt durch die durch den Steinschlag am System verrichtete mechanische Arbeit, bei begrenzter Kraftaufnahme des Systems nur mit möglichst großen Verschiebungswegen zu erreichen war.

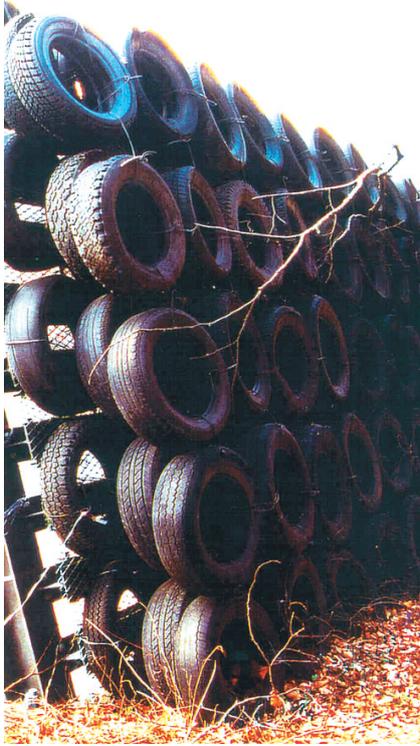


Abb. 6

Die Bruchdehnung normaler Stahlseile mit 2,5 bis 3 % reichte dafür nicht aus. Es gelang schließlich Drähte mit einer Bruchdehnung von bis 15 % zu entwickeln. Die Festigkeiten waren jedoch zu gering, der Effekt blieb deshalb ebenfalls gering. Den Durchbruch brachten erst Bremsenlemente, die praktisch nur durch die Erhaltung der Auffangwirkung des Bauwerks limitierte Bremswege ermöglichen. Welche Größenordnung die Entwicklung inzwischen erreicht hat, sei vorweggenommen: bei den als Weltrekord einzustufenden aktuellen Versuchen auf der neuen Versuchsanlage in Walenstadt wurde ein 96 kN schwerer Block aus einer freien Fallhöhe von 32 m nach einem Verformungsweg von 7,2 m ohne Schäden am Schutzsystem vollständig gestoppt. Die unter Einschluß des Verformungsweges ermittelte kinetische Energie betrug dabei 3,000 kJ. Das als Kontrast in Abb. 6 gezeigte System hätte gerade wegen seiner sehr massiven Konstruktion nur einen Bruchteil davon aufgenommen.



Abb. 7

Systematische Steinschlagversuche zur Entwicklung von Systemen mit grösserem Arbeitsvermögen erfolgten ab 1975 auf dem Firmengelände der Kabelwerke Brugg AG in Zusammenarbeit mit dem Zürcher Ingenieurbüro HEIERLI (HEIERLI, 1976). Dabei wurden bis zu 10 kN schwere Betonblöcke von einem Autokran im freien Fall aus bis 20 m Fallhöhe in horizontal aufgespannte Drahtseilnetze geworfen. Das Traggerüst bestand aus Stahlträgern (Abb. 7). Bei den Versuchen wurden schließlich erstmalig Bremsenlemente eingesetzt.

Bremselemente

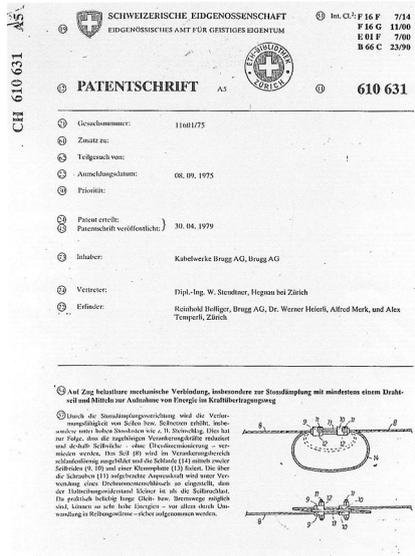


Abb. 8

Bremselemente erlaubten die erwünschten grossen Verschiebungen bei gleichzeitiger Energiedissipation über Reibungsarbeit. Es war das erste Mal, daß Bremselemente mit Drahtseilnetzen zum Steinschlagschutz eingesetzt wurden. BOLLIGER und HEIERLI konnten diese Seilbremsen 1975 zum Patent anmelden (Abb. 8). Bremselemente in verschiedenen Ausführungen sind seitdem integraler Bestandteil der meisten auf dem Markt befindlichen Steinschlagschutzzäune. Wie unterschiedlich die in den Jahren danach von Mitbewerbern entwickelten Bremselemente sind, zeigen die folgenden Beispiele.

Ab ca. 1979 wurden in Frankreich Bremselemente aus 3 aufeinander liegenden Stahlplatten verwendet (Abb. 9). Bei einem Bremsweg von 6 m soll eine über den Bremsweg annähernd lineare Energieaufnahme von 160 kJ erreicht worden sein.

Eine Schweizer Unternehmung setzt seit 1985 eine von ihr entwickelte Plattenbremse als Bremselement ein, bei der das Drahtseil durch Bohrungen in einer Stahlplatte geflochten wird. Die Energieaufnahme beträgt bei Bremswegen zwischen 1 und 1,5 m 50 bzw. 75 kJ.

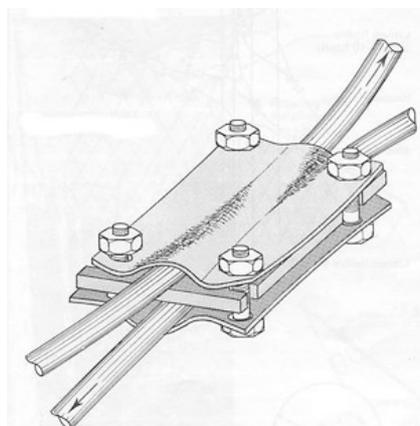


Abb. 9

Aus Italien stammt die Entwicklung eines Bremselementes, bei dem ein Stahlrohr durch einen Konus aufgeweitet wird. Diese Verformungsbremse nimmt nach Herstellerangaben bei unbekanntem Weg 50 kJ auf (Abb. 10).

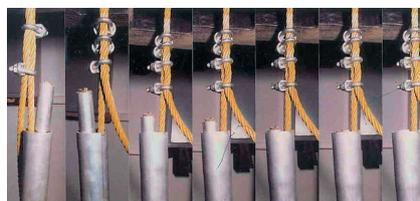


Abb. 10a



Abb. 10b



Abb. 11a



Abb. 11b

Auf den von ihr unter der Bezeichnung SIFA – Bremsring entwickelten und heute in modifizierter Form bei der GEOBRUGG im Gebrauch befindlichen Bremsring erhielt die FATZER AG 1991 ein Patent. Bei diesem Bremsring verläuft das Seil in einem ringförmig gebogenen Rohr. Die beiden Rohrenden waren zunächst mittels einer Stahlplatte mit einander verschweißt, heute sind sie mit einer Aluminiumhülse verpresst (Abb. 11). Die Aluminiumhülse verhindert das seitliche Aufreißen des Rings infolge des Moments des nicht in einer Ebene liegenden Kräftepaars aus den Seilen und vergrößert die Energieaufnahmefähigkeit signifikant. Die Vorteile des neuen Bremsrings, der nach der Fusion der beiden Firmen zur Geobrugg die Brugg'sche Seilbremse ersetzte, waren:

- Die Bremsringe hatten eine wesentlich geringere Toleranz im Ansprechverhalten.
- Die Bremsringe ließen sich nach dem Einbau in das Seil mit geringem Aufwand verschieben.
- Beim Ansprechen des Bremsrings wurde das Seil durch die Rohrwandung nicht verletzt, seine Bruchlast blieb auch bei großen Verschiebungswegen erhalten.

Die Energieaufnahme der Bremsringe hat sich seit den Anfängen nicht wesentlich verändert. Sie liegt je nach Seildurchmesser zwischen 70 und 140 kJ. Leider ist die Annahme irrig, die Energieaufnahme eines Steinschlagschutzsystems könne durch Aneinanderreihung beliebig vieler Bremsselemente auf jede beliebige Höhe gesteigert werden, weil Bremsselemente in Nachbarfeldern aufgrund der Trägheit des Systems nicht bis in beliebige Entfernung vom Einschlagpunkt aktiviert werden können.

Die für die Wartung wesentliche Frage, ab wann ein Bremsselement nach einem Steinschlag ausgetauscht werden muss, hängt vom noch zur Verfügung stehenden Verschiebungsweg und von der zu erwartenden Grösse nachfolgender Steinschläge im Verhältnis zum Bemessungsereignis ab. Selbstverständlich dürfen Bremsselemente erst im Bereich des Bemessungsereignisses überhaupt ansprechen, kleinere Ereignisse muß das System allein elastisch aufnehmen.

Es konnten aufgrund des Patentrechtes immer nur Teile des Systems patentiert werden, nicht das Gesamtsystem, insofern fehlte es nicht an Nachahmern, mit denen sich auch in Einzelfällen wegen patentierter Teile Patentstreitigkeiten ergaben. Im Unterschied zu verschiedenen Mitbewerbern, die nur Händler, nur Entwickler oder nur Produzenten waren, verfolgten sowohl die Kabelwerke Brugg AG, als auch die Fatzter AG

– heute unter dem gemeinsamen Dach GEOBRUGG – konsequent den Weg einer eigenen Entwicklung, einer eigenen Produktion und eines eigenen Vertriebs. Produktionsstätten in den USA, in China und seit jüngstem auch in Japan stellen hierfür ein beredtes Zeugnis dar.

Drahtseilnetze



Abb. 12a



Abb. 12b



Abb. 12c

In den Anfängen wurden bei den Lawinenverbauungen Rechtecknetze verwendet. Schon bald erkannte man aber die Vorteile von Dreiecknetzen. Diese ließen sich mit Bezug auf den Lawinenschutz einfacher berechnen, sie paßten sich auch leichter an unebenes Gelände an. Bei den Kabelwerken Brugg AG wurden für den Steinschlagschutz von Anfang an ausschliesslich Vierecknetze verwendet, wobei diese zur Anpassung an unebenes Gelände nicht zwingend rechteckig sein mußten, sondern auch trapezförmige Grundrisse aufweisen konnten. Dagegen sind in der Firmenbroschüre einer österreichischen Firma aus 1973 Dreiecksnetze sowohl für den Lawinen-, als auch für den Steinschlagschutz abgebildet.

Die ersten Drahtseilnetze für den Lawinen- und den Steinschlagschutz waren parallel geflochtene Netze, später wurden dann diagonal geflochtene Netze verwendet. Beide wurden von Hand hergestellt. Das endlose Maschenseil wurde mit einem umlaufenden Randseil verflochten. Bei den Fallversuchen 1975 in Birr kamen bereits Diagonalnetze zum Einsatz. Ab 1990 kamen Ringnetze hinzu, die die Diagonalnetze für Steinschlagschutzzwecke heute bei der GEOBRUGG vollständig verdrängt haben (Abb. 12). Bei einem Schweizer Mitbewerber sind nach wie vor Diagonalnetze im Einsatz, mit denen derzeit Energieaufnahmen bis 2.000 kJ möglich sind.

Die ersten Ringnetze bestanden aus gespleißten Ringen und stammten aus Marinebeständen der 40er Jahre des vorigen Jahrhunderts, wo sie zum Schutz von Häfen gegen U-Bootangriffe genutzt worden waren. Nachteilig war dabei der schwer zu entfernende Korrosionsschutz aus Cosmolin, der bei der Entfernung durch Lösungsmittel Entsorgungsprobleme, bei Einsatz ohne vorherige Reinigung Probleme beim Handling der klebrigen, stark riechenden Netze aufwarf.

Wegen ihrer 6 Nachbarringe waren die U-Bootnetze sehr schwer; da die Masse beim Aufschlag von Blöcken beschleunigt werden muß, waren sie in der Energieaufnahme den Diagonalnetzen überlegen. U-Bootnetze wurden weltweit nicht mehr hergestellt. Die Bestände gingen zu Ende. Es mußten deshalb neue Wege gefunden werden. Spleißen als mühsame und teure Handarbeit wurde zunächst durch Seilkonstruktionen mit Stahl-Presshülsen ersetzt. Erste neue Ringnetze wurden 1982 – 1984 bei den Kabelwerken Brugg AG für den Schutz von Staudämmen vor Torpedos im mittleren Osten hergestellt.

Zur Materialeinsparung wurden schließlich Netze mit nur noch 4 Nachbarringen entwickelt; sechsfach verhängte Netze gleichen Ringdurchmessers haben pro m² ca. 20% mehr Ringe als vierfach verhängte. Für letztere erhielt die Fatzter AG 1993 ein Patent. Den eigentlichen Fortschritt brachte 1996 die Entwicklung einer Fertigungsstraße, die die Ringnetze mittels Roboter vollautomatisch herzustellen gestattete. Damit ergab sich eine erheblich wirtschaftlichere Fertigung, der Preis der Ringnetze wurde gegenüber dem der Diagonalnetze konkurrenzfähig.

Für das System CAN (Patent FATZER AG) werden auch heute noch sechsfach verhängte U-Bootnetze verwendet.

Trotz der hohen Flexibilität und Festigkeit der Drahtseilnetze hat sich bei den Versuchen 1989 in Kalifornien gezeigt, daß ein bergseitig aufgelegtes Maschendrahtnetz

nicht nur, wie bereits aus den Fallversuchen 1975 in Birr bekannt, zum Rückhalten von Steinen unterhalb der Maschenweite des Drahtseilnetzes, sondern auch zur Aufnahme und Verteilung der Rotationsenergie eine unverzichtbare Ergänzung darstellt. Die Hinterlegung von Steinschlagschutznetzen mit Maschendraht ist heute Standard.

Nicht nur die Netzgeometrie, sondern auch der für die Netze verwendete Werkstoff war einem Wandel unterworfen. Grundsätzlich wurden für die Diagonalnetze Litzenseile und für die Ringnetze Spiralseile verwendet. Ab 1996 wurden die Ringnetze dann aus Drähten aus Seildraht hergestellt, die zu einem Bündel aus parallelen Drähten zusammengepreßt wurden. Die Drahtbündel ließen sich einfacher herstellen.

Interessante Parallelentwicklungen erfolgten in Frankreich. Dort wurden zunächst für die Lawinenverbauung, später auch für den Steinschlagschutz Netze aus Nylonbändern eingesetzt. Diese haben sich jedoch nicht bewährt und sind deshalb vom Markt verschwunden.

Seilklemme

Bei den Rechtecknetzen waren die Maschenseile zunächst an den Kreuzungspunkten verknotet, später wurden die nur bei dünnen Seilen verwendbaren Knoten durch Drahtseilklemmen und vor allem Kreuzklemmen ersetzt. Die bis 1993 bei den Kabelwerken Brugg AG verwendeten Kreuzklemmen mit einfachem Kraftschluss erwiesen sich bei den ersten Feldversuchen mit über einen Hang abrollenden Steinen in Big Sur, Kalifornien, als nicht stabil genug, sie wurden deshalb 1989 durch die auch heute noch verwendeten Kreuzschlitzklemmen mit Formschluß ersetzt.

Ein Schweizer Mitbewerber verwendete ab 1985 Netze mit verschraubten Bügelmatten an den Seilkreuzungen. 1995 wurde auf Formschlußklemmen umgestellt.

Für die Sicherung von Seilendverbindungen wurden und werden handelsübliche Bügelseilklemmen in der nach DIN 1142 vom Seildurchmesser abhängigen Anzahl verwendet.

Netzbefestigungen



Abb. 13

Die ersten Netze waren – wie beim Lawinenschutz üblich – direkt an den Stützen befestigt (Abb.13). Diese punktuelle Befestigung erwies sich als Schwachstelle, wobei auch die Einführung der Seilbremsen eine andere Art der Befestigung erforderte. In der Folgezeit wurden die Netze dann über horizontale Tragseile zwischen den Stützen befestigt. Die Befestigung der Netze an den Tragseilen erfolgte zunächst über Seilklemmen bzw. mit einem Nahtseil.

Die Führung des Tragseils war zunächst einfach, das obere Tragseil verlief von der einen seitlichen Abspannung des betreffenden Werks über den ersten Stützenkopf mit einer eigens dort eingesetzten Seilführung bis zur Abspannung am gegenüberliegenden Ende, das untere Tragseil verlief zwischen den äußeren Stützen. Die Bremsen waren in die Tragseile eingebunden. Dies schränkte jedoch die Beweglichkeit der Bremsen ein und führte zu Schäden an der Netzbefestigung.

1988 setzten sich, infolge starkem Druck von Mitbewerbern, die sog. Doppelseilführung durch, bei der oben und unten jeweils 2 parallel verlaufende Tragseile angebracht sind. Die Netzelemente werden feldweise im Wechsel an einem Seil befestigt, an dem jeweils freien Seilabschnitt sind die Bremsen befestigt. Netze und Seilbremsen sind damit unabhängig voneinander beweglich. Dadurch konnte das Energieaufnahmevermögen bei ansonsten gleichbleibenden Abmessungen vervierfacht bis verfünffacht werden.

Die Kabelwerke Brugg AG waren zunächst im Projekt Bannwald Altorf 1978 einen anderen Weg gegangen. Die Netze wurden innerhalb der Felder hälftig am einen und hälftig am anderen Seil befestigt, auch hier waren die Seilbremsen am jeweils freien Teil angebracht; die Seile verliefen allerdings nicht parallel, sondern kreuzten sich. Der Kreuzungspunkt war durch eine Bride gesichert. Diese Doppelseilführung ging auf eine Idee von PETITPIERRE, ehemals Kabelwerke Brugg AG, zurück. Sie wurde 1978 – im Bannwald Altdorf – zum ersten Mal verwendet. Die parallele Doppelseilführung wurde von GEOBRUGG weiterentwickelt um dem System eine maximale Elastizität bei gleichzeitig möglichst grosser nach Treffern verbleibender Wirkungshöhe zu geben. Die hälftige Teilung wurde aufgegeben, die Befestigung der Netze erfolgt jetzt an beiden parallel verlaufenden Tragseilen bis zu den bei den Stützen angeordneten Bremsen, dann nur noch am vor der Stütze verlaufenden Seil. Das eine Tragseil ohne Bremsen mit dem daran befestigten Netz verläuft jeweils talseitig der Stütze, das Seil mit den Bremsen läuft über die Seilführung an der Stütze. Damit ist das eine Seil mit den Bremsen an der Stütze gehalten, das andere nicht. Das Seil mit den Bremsen ist frei beweglich und kann deshalb auch – wie erwünscht – auf Ereignisse in Nachbarfelder ungehindert reagieren.

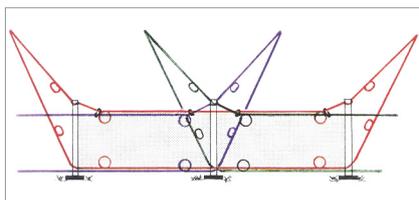


Abb. 14

Abb. 14 zeigt eine bei der Fitzer AG vor 1992 verwendete Seilführung unter Ein- schluß der Rückverankerung der Stützen.

Stützen



Abb. 15

Die Stützen waren, wie bereits erwähnt, in den Anfängen der Lawinerverbauung aus Holz. Bereits bei den ersten Einsätzen für den Steinschlagschutz wurden jedoch Stahlstützen verwendet. Beim ersten Einsatz 1958 in Brusio waren es Rohrstützen. Schon früh wurden Profilträger verwendet. Zum Einsatz kamen zuerst Schienenprofile, dann IPB-, später vor allem HEB-Profile und in einigen wenigen Verbauungstypen weiter Rohrstützen. Für spezielle Anwendungen und bei bestimmten Systemen sind darüber hinaus Kniehebelstützen mit Zug- oder Druckstreben im Einsatz.

Um die Schäden bei Stützentreffern zu minimieren, besaßen bereits die Stützen in Brusio Kreuzgelenke (Kardangelenke), so daß sie keine Biegemomente aufnehmen konnten (Abb. 15). Seit 1978 wurden sog. starre Gelenke verwendet, die eine Sollbruchstelle in Form einer mit zwei Schrauben an der Stütze befestigten Platte besaßen. Die Platte verbog sich ggf. bei einer Einwirkung, die die Gründung der Stütze und die Stütze selbst noch schadlos aufnehmen konnten. Ein solches starres Gelenk wurde zum ersten Mal in Goppenstein an der Lötschberg-Südrampe verwendet.

Heute besitzen die Stützen meist ein echtes Gelenk, bei dem z.B. bei GEOBRUGG ein weiches, aus zwei Stahlblechen bestehendes Zwischenstück eine Federwirkung quer

Stützengründung

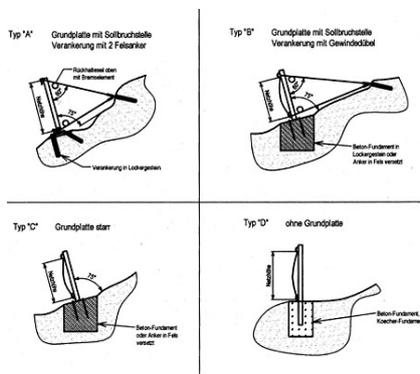


Abb. 16

zur Stützebene zuläßt, wodurch Schäden an der Stütze und an der Gründung durch sein rechtzeitiges Versagen nicht auftreten können.

Die Gründung der Stützen erfolgte zunächst – soweit sie nicht auf Stützmauern oder auf Stahlbetonkonstruktionen aufstanden – über Einzelfundamente aus Beton. Die Stützen wurden über eine Grundplatte mittels Schwerlastdübeln auf dem Fundament verschraubt. Seit etwa 1989 wird im Regelfall auf das insbesondere in nicht standfesten Böden aufwendige Einzelfundament verzichtet. Die Gründung erfolgt über eine Grundplatte, die durch 2 Nägel fixiert wird. Der Bergseitige wird im Regelfall unter 45° gegen die Vertikale bergseitig geneigt, der talseitige als Mikropfahl vertikal hergestellt. Der bergseitige Nagel erhält damit mehr Zug, der talseitige Schub und Druck. Beide werden allerdings am Kopf auch erheblich auf Biegung beansprucht, weshalb der oberflächennahe Abschnitt heute meist durch ein Stahl-schutzrohr verstärkt wird. Das Rohr kommt dem als Korrosionsschutz eingesetzten Zementstein zugute, indem es den Kopfbereich biegesteifer macht und die Verformungen begrenzt.

Je nach Standfestigkeit des Untergrundes werden die Verbundpfähle aus GEWI-Stählen oder aus Selbstbohrankern, z.B. System Ischebeck, hergestellt. Abb. 16 zeigt Stützengründungen für verschiedene Bodenverhältnisse, die zum Teil nebeneinander verwendet wurden.

Lediglich einzelne Systeme aus Frankreich kommen ohne Stützengründungen aus. Die talseitig der Netzebene stehenden Rohrstützen werden über spezielle Fussplatten mit dornartig wirkenden Blechen auf den Boden gestellt und mit Bodenseilen zu den bergseitigen Anker abgesspannt.

Rückverankerung

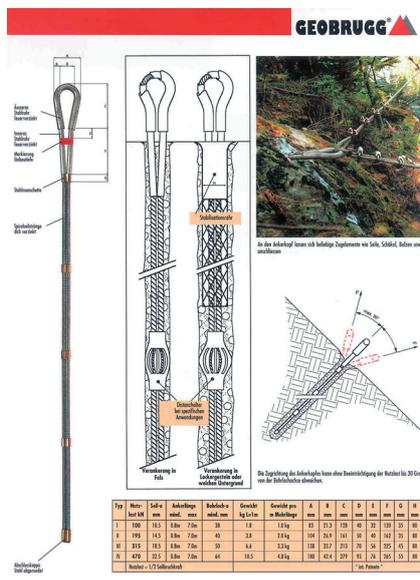


Abb. 17

Auch bei der Rückverankerung der Stützen ergab sich eine Entwicklung. Die Stützen waren zunächst einfach in der Ebene der Fallrichtung bergseitig rückverankert. 1988 erfolgte dann bei einzelnen Unternehmen die Umstellung auf die stabilere, im Grundriss V-förmige Rückverankerung durch 2 Seile, die damit auch eine parallel zur Zaunebene auftretende Kraftkomponente aufnehmen konnte. Je nach System kann heute bei Energien unter 300 kJ bei entsprechender Dimensionierung von Stützen und Verankerung auf eine Rückverankerung ganz verzichtet werden. Auf eine Rückverankerung wird zum Beispiel verzichtet, wenn der Auffangraum befahrbar bleiben soll.

Die Krafteinleitung von Abspannseilen in den Hang erfolgte zunächst allgemein über mit Schraubösen versehene schlauffe Stabanker – in der Regel als SN-Anker hergestellte GEWI-Anker. Seit 1962 werden mehrheitlich Seilanker verwendet, die wegen ihrer fehlenden Biegesteifigkeit zu einer erwünschten momentenfreien Einleitung nicht in Achsrichtung wirkender Einwirkungen sorgen (Abb.17). Der im Kopfbereich mit Schlaufenrohren doppelt korrosionsgeschützte Seilanker wurde von GEOBRUGG 1993 patentiert.

Stützenabstände

Die Stützenabstände waren bei den ersten Anwendungen noch relativ klein. In Brusio waren es lediglich 3 m. Bis Ende der 80er Jahre waren Stützenabstände von 4 bis 6 m üblich, mit Ausnahme des bereits oben erwähnten Projektes Bannwald Altorf, wo bereits 10 m Stützenabstand gebaut wurden. Im Zuge von Feldversuchen in Beckenried (1988 bis 1991) setzte sich durch, daß größere Stützenabstände nicht nur die Wahrscheinlichkeit unerwünschter direkter Stützentreffer und von Treffern auf die Rückhalteseile reduzierten, sondern auch die Systeme flexibler machten mit dem Ergebnis höherer Energieaufnahmen. Ein Stützenabstand von 10 m ist seit 1992 bei GEOBRUGG, heute auch bei den meisten anderen Systemen Standard. Die größeren Stützenabstände führten auch zu einer Reduktion der Aufwendungen für die Stützen und Verankerungen. Sie führten allerdings auch – um höhere Energieaufnahmen überhaupt erst zu ermöglichen – für das Bemessungsereignis zu wesentlich größeren Auslenkungen der Netze von 50 bis 60 % des Stützenabstandes. Die Bauwerke mussten deshalb weiter von den gefährdeten Objekten weggerückt werden. Wo dies nicht möglich ist, sind die Stützenabstände zu verringern oder sind weitere Rückverankerungen einzubauen.

Korrosionsschutz

Es wurden von Anfang an nach DIN 2078 verzinkte Seile, Stützen und Verbindungsmittel verwendet. Seit 1996 bietet GEOBRUGG unter dem Handelsnamen Supercoating nach dem Galfan-Verfahren (Zn/Al-Verfahren) korrosionsschutzgeschützte Systeme an. Bei diesem Verfahren wird das Zink mit 5 % Aluminium legiert. Dieser Korrosionsschutz bietet nach unabhängigen Gutachten, zum Beispiel der EMPA-Materialprüfanstalt, eine um das ca. dreifache längere Lebensdauer. Er ist insbesondere dann angezeigt, wenn Schutzbauwerke dem Sprühnebel von Streusalz oder aus anderen Gründen besonders aggressiven Bedingungen – zum Beispiel in Küstennähe – ausgesetzt sind.

Neben der Verzinkung wurden insbesondere in der Vergangenheit zusätzlich zur Verzinkung mit grüner Rostschutzfarbe versehene Netze verwendet. Damit sollte dem Landschaftsschutz besser entsprochen werden.

Montage und Unterhalt

War die Errichtung eines Schutzbauwerks zunächst noch eine Arbeit für Spezialisten, so vereinfachte sich diese durch entsprechende Montagehilfen und ausgefeilte Montageanleitungen soweit, daß eine nicht auf entsprechende Arbeiten spezialisierte Baufirma in einfachem Gelände und bei guter Zugangsmöglichkeit in der Lage ist, nach kurzer Einweisung ein System eigenständig zu installieren. Auch dieser Zustand ist das Ergebnis einer Entwicklung. Seit 1991 bestehen die Zäune aus entsprechend einfach zu montierenden Baukastensystemen. Dagegen montierten die Vorgängerfirmen der GEOBRUGG zunächst ihre Systeme überwiegend mit eigenen Mannschaften oder unterstützten die ausführenden Firmen mit ständig anwesenden Monteuren. Auch heute noch ist es bei allen Systemen üblich, daß ein Vertreter des Herstellers bei der technischen Abnahme der Bauwerke mitwirkt, um Montagefehler auszuschließen.

Die insbesondere bei größerer Steinschlagfrequenz wesentliche Frage nach dem Wartungsaufwand und den damit verbundenen Aufwendungen wurde im Verlauf der Entwicklung stets ernst genommen, es wird auf die Maßnahmen zum Schutz der Gründung und den einfachen Austausch von aktivierten Bremsselementen hin-

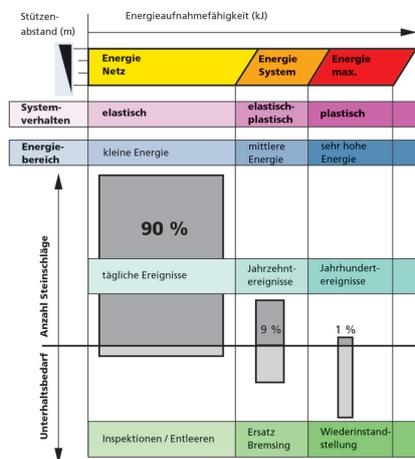


Abb. 18

gewiesen. Ohne Steinschlagbelastung in der Höhe des Bemessungsereignisses ist das System ohnehin wartungsfrei. Ein erheblicher Fortschritt zur Minimierung der Unterhaltungskosten wurde mit der von GEOBRUGG (HALLER 1996) entwickelten Bemessungsphilosophie OPTUS[®] erreicht, der entsprechend Abb. 18 eine Einteilung der Steinschlagenergie nach der Häufigkeit ihres Auftretens am konkreten Standort zugrunde liegt. Häufige Ereignisse dürfen nicht zu Schäden am System führen, 10-Jahresereignisse dürfen die Bremsen beanspruchen; erst Ereignisse mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von mindestens 50 Jahren dürfen zu reparaturbedürftigen Schäden führen. Ueber diesen steht das Bemessungsereignis, das unter Inkaufnahme schwerer Schäden noch zurückgehalten werden muß.

Dem häufig bestehenden Problem, daß die Steinschlagschutzsysteme im Wald oder an Waldrändern errichtet werden und damit die Waldbewirtschaftung behindern, wurde mit der Entwicklung einfach umzulegender Systeme begegnet.

In Laubwäldern erfordert die Beräumung der Auffangräume von Ästen und Laub alle paar Jahre jedoch nach wie vor einen nicht zu vernachlässigenden Unterhaltungsaufwand. Das verrottende Laub führt zur Bildung von Huminsäuren, die den Korrosionsschutz beanspruchen. Die Beseitigung von Sturmschäden durch umstürzende Bäume kann bei geringer Steinschlagfrequenz die aufgrund von Steinschlag erforderlichen Reparaturaufwendungen erheblich übersteigen.

Besondere Vorkehrungen konstruktiver Art sind insbesondere bei mehr als 2 m hohen Zäunen für die Beseitigung von Steinen aus dem Auffangraum erforderlich, soll ein mühsamer Längstransport über die meist schnell verbuschten Auffangräume bis zur nächsten Unterbrechung vermieden werden. Hier ist nach entsprechender Zerkleinerung der Blöcke auf eine unschädliche Größe – mittels Abbauhammer oder ggf. auch durch Bohr- und Sprengarbeit – das vielfach mögliche einfache Lösen des Netzes an der Unterseite oder seitlich an den Stützen hilfreich.

Feldversuche

Die beschriebenen Entwicklungen wären allein am Reißbrett kaum möglich gewesen. Maßgeblicher Entwicklungsfaktor bei GEOBRUGG war sicherlich die Erfahrung, die die verantwortlichen Mitarbeiter durch die glückliche Verbindung aus Akquisition, technischer Beratung, Einbindung in die Produktion, Bauüberwachung und Entwicklungstätigkeit sammeln konnten. So erfolgte ein perfektes Feedback aus den einzelnen, sonst üblicherweise getrennten Tätigkeiten. Hinzu kamen die im Haus vorhandenen langjährigen Erfahrungen eines führenden Drahtseilherstellers und – ganz wesentlich – die mit hohem Mitteleinsatz und wissenschaftlicher Akribie betriebenen systematischen Versuche an Systemkomponenten im eigenen Prüflabor und an kompletten Systemen im Gelände.

Den oben beschriebenen Versuchen bei Brunnen (1962), am Lötschberg (1968), und auf dem Firmengelände in Birr (ab 1975) folgten bei GEOBRUGG 1989 die in Zusammenarbeit mit der kalifornischen Strassenbaubehörde CALTRANS durchgeführten Abrollversuche an einem 35m hohen Hang bei Big Sur, 1991 die Abrollversuche im alten Steinbruch von Oberbuchsiten und ab 1991 die Wurfversuche im Steinbruch bei Beckenried. 1997 liefen fast parallel Feldversuche in Shayupin, Taiwan und in Itsukaichi, Japan. Seit April 2001 laufen die aktuellen Versuche in der neuen Ver-

suchsanlage von Walenstadt, nachdem – Ironie des Schicksals – eine akute Steinschlaggefährdung deren Fertigstellung um mehr als ein halbes Jahr verzögert hatte.

Verschiedene, europäische Mitbewerber sahen sich veranlasst, ebenfalls systematische Versuche durchzuführen, zum Beispiel eine Schweizer Unternehmung im Jahre 1985 in einer Kiesgrube in Verbindung mit einem Erstauftrag. Die Versuche wurden ebenfalls durch das Zürcher Ingenieurbüro HEIERLI betreut. Es wurden Freifallversuche mit einer Masse von 10 kN aus einer Höhe von 20 m (200 kJ) ausgeführt. Das getestete System bestand aus einem Netzelement, das in einen 5 x 5 m großen Stahlrahmen eingespannt und mit 4 Bremsselementen versehen war. Der Rahmen war über eine Grube gelegt. Zum Einsatz kamen speziell entwickelte Plattenbremsen, die auch heute noch verwendet werden. Ähnliche Fallversuche über einer Grube wurden 1988 auch bei der FATZER AG mit dem SIFA-Bremsring (Stahlrohr) ausgeführt.

Nach Angaben von GERBER (2001) wurden allein in der Schweiz seit 1987 auf 7 verschiedenen Testanlagen (Beckenried, Oberbuchsiten, Giswil, Trübbach, Lungern, Rüthi und Walenstadt insgesamt 343 Versuche durchgeführt. Die bisher größte Anzahl/ Jahr erfolgte 1991 mit 74 Versuchen. Lediglich in Beckenried wurden Abrollversuche ausgeführt; in Rüthi und Walenstadt erfolgten bzw. erfolgen (Walenstadt) noch Freifallversuche; an den übrigen Versuchsorten waren Seilbahnen für Schiefe Würfe installiert.

Die durch GEOBRUGG und ihre Vorgänger massgeblich gestaltete Entwicklung dieser 43 Jahre läßt sich am eindrucksvollsten anhand der Tatsache illustrieren, daß die Energieaufnahme in dieser Zeit von anfänglich 50 bis 70 kJ auf 3.000 kJ gestiegen ist. Die Energieaufnahmekapazität hat sich demnach etwa sechszigfach – um dieses Maß sind die durch entsprechende Steinschlagschutzbauwerke gesicherten Verkehrswege, Siedlungen und Anlagen seit 1958 sicherer geworden. Allein diese Tatsache wäre bereits Grund genug für dieses Fest und für ein allgemeines herzliches Dankeschön an die Beteiligten. Gleichzeitig haben sich die Kosten pro Laufmeter Verbauung pro kJ fast im Gleichschritt verringert.

Energieaufnahme

Obwohl sie alle unter dem Begriff Steinschlagschutzzaun firmieren und ähnliche Größenordnungen an Energie aufnehmen, unterscheiden sich die heute am Markt befindlichen Systeme erheblich, nicht zuletzt in der Größe des Bremswegs, den sich dabei aufbauenden Bremskräften und in den dadurch in den Gründungen und Rückverankerungen aufzunehmenden Kräften. Noch gravierender ist der unterschiedliche Grad der Nachweisführung, welche Energie die Systeme tatsächlich unter sonst gleichen Bedingungen aufnehmen, welche Einwirkungen in den Gründungen und in den Rückverankerungen auftreten und wie hoch der Unterhaltungsaufwand ist.

Für die weitere Entwicklung wirkungsvoller Steinschlagschutzzäune wurde die etwa 1980 gegebene Verfügbarkeit leistungsfähiger Steinschlagsimulationsprogramme entscheidend. In den Ausschreibungen ließen sich jetzt neben der Bauwerkshöhe Energieaufnahmen fordern, die durch die Hersteller mittels Versuchen nachzuweisen waren. Gleichzeitig nahm die Größe der geforderten Energieaufnahmen zu. Steinschlagsimulationen sind heute zusammen mit der geotechnischen Kartierung und

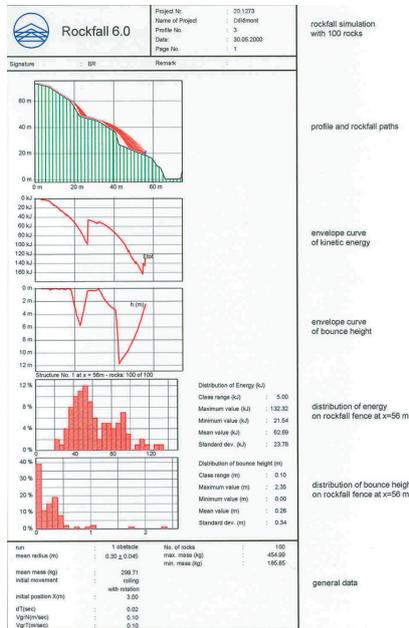


Abb. 19

der Risikobeurteilung Stand der Technik bei der Planung und Dimensionierung von Steinschlagschutzmaßnahmen (Abb. 19).

Standardisierung

Aus prinzipiellen Gründen konnte die Normung mit der stürmischen Entwicklung der Schutzsysteme nicht Schritt halten. Kann doch nur genormt werden, wofür es eine allgemein anerkannten Stand der Technik gibt. So existieren zwar Normen aus anderen Technikbereichen über Seilverbindungen, Stahlbauteile, Drahtseile und Korrosionsschutz durch Verzinkung, nicht jedoch über Steinschlagschutzbauwerke als Systeme. Einen Anfang hat inzwischen in Deutschland die im Dezember 1999 in Kraft getretene Neuauflage der Erdbauvorschrift der Deutschen Bahn AG, die Ril 836, gesetzt.

Bislang gibt es auch keine Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassungen für Steinschlagschutzsysteme, den Autoren sind auch keine Zulassungen im Einzelfall bekannt, wie sie in Deutschland die Bauaufsichtsbehörden der Länder oder das Eisenbahnbundesamt erteilen könnten. Nur wenige auf dem Markt befindliche Systeme können von unabhängigen Institutionen beaufsichtigte und ausgewertete Versuche vorweisen (SPANG 2000). Viele Anbieter sind mit Veröffentlichungen über ihre Versuche sehr zurückhaltend, die betreffenden Firmenbroschüren sind nicht frei erhältlich und wenig aussagefähig. Auftraggeber haben deshalb häufig das Problem, sich ohne genormte bzw. ohne feste Kriterien als dem dafür untauglichen Preis zwischen verschiedenen Systemen entscheiden zu müssen.

Nicht nur aus diesem Grunde sind der im Jahr 2000 gegründete Arbeitskreis der EOTA und die Einrichtung des Versuchsstandes für Zertifizierungsversuche am Walensee in Verbindung mit der seit Juni 2001 in Kraft befindlichen Schweizer Richtlinie des BUWAL ein wesentlicher Fortschritt. Die Vertikaltestanlage (Versuche im freien Fall) erlaubt klar definierte, reproduzierbare und damit vergleichbare Tests für die verschiedenen Anbieter und Systeme. Die Versuche werden durch die WSL beaufsichtigt, das Versuchsprogramm folgt der o.a. Richtlinie. Aus wirtschaftlichen Gründen muß wohl akzeptiert werden, daß dabei nicht alle wünschenswerten

Testvarianten durchgesetzt werden konnten. Die mit der Richtlinie beabsichtigte Zertifizierung nach einheitlichen Kriterien ist damit das Ergebnis eines kleinsten gemeinsamen Nenners.

Im Hinblick auf die weitere Entwicklung von Steinschlagschutzsystemen mit noch höherer Energie hoffen die Autoren, daß die Freifallversuche ohne Drall ausschließlich in das Zentrum des Feldes nicht das Ende einer Versuchspraxis sind, die gerade bei den mit Drall erfolgten Abroll – und indirekten Wurfversuchen in der Vergangenheit überraschende Einsichten beschert hat. Hohe Rotationsgeschwindigkeiten führen zu einer stärkeren Einbuße an nutzbarer Resthöhe, sie kann nach der Erfahrung zu einem einer Kreissäge ähnlichen Verhalten insbesondere bei plattigem, scharfkantigem Steinschlag und zum Versagen deutlich unterhalb der Entwurfsenergien führen. Treffer in die Ecken oder an den Rändern führen zu kleineren Energieaufnahmen als in die Mitte des Feldes. Treffer auf Rückhalteseile und Stützen können die Stabilität mancher Systeme insgesamt gefährden. Abrollversuche und/oder Versuche aus dem schiefen Wurf mit vorherigem Bodenkontakt oder auch Freifallversuche, bei denen der Block über entsprechend über seinen Umfang aufgewickelte Seile einen Drall erhält, und eine Verteilung der Auftreffpunkte über das ganze exponierte System wären wünschenswert.

Für Einsätze unter den immer strenger werdenden Umweltschutzvorschriften wäre auch ein entsprechendes Umweltverträglichkeitszertifikat von einigem Nutzen.

Niedrigenergiesysteme

Interessanterweise blieb von der beschriebenen Entwicklung auch der Markt für Niedrigenergiesysteme nicht unberührt. Das zu Beginn der Entwicklung im wesentlichen von Schwellenwänden besetzte Marktsegment wird heute ebenfalls durch Konstruktionen aus Stahldrahtnetzen (Ringnetze, Diagonaldrahtseilnetze, Stahldrahtgeflechte) eingenommen. Schwellenwände und ähnlich massive Bauwerke werden heute aus Gründen des Landschaftsschutzes und ganz wesentlich aus Kostengründen nur noch in Ausnahmefällen ausgeführt. Steinschlagschutzzäune aus Stahldrahtnetzen erfüllen deshalb heute für Energieaufnahmen bis 3.000 kJ alle Anforderungen an ein geprüftes, sicheres, wirtschaftliches und ökologisch verträgliches Schutzsystem.

Ausblick Nach übereinstimmender Meinung aller Beteiligten ist die vor wenigen Wochen erreichte Energieaufnahme von 3.000 kJ ein Meilenstein, jedoch längst noch nicht das Ende der Entwicklung. Eine Energieaufnahme von 5.000 kJ erscheint in den nächsten Jahren erreichbar. Die seit einiger Zeit laufende GEOBRUGG-Projektarbeit einer numerischen Berechnung der Systeme und die in Aussicht genommenen Forschungsvorhaben auf nationaler und europäischer Ebene lassen bereits jetzt erwarten, daß das kostspielige Prüfen und Optimieren in 1:1 Versuchen in wenigen Jahren zumindest rechnerisch unterstützt werden kann. Es erscheint zwingend dabei auch den Einfluss der in der Natur stets vorhandenen Rotationsenergie in die Berechnung einzubeziehen.

In den letzten Jahren haben sich Stahldrahtnetze neben dem Steinschlagschutz weitere Anwendungsgebiete erschlossen, von denen einige in Zukunft in ihrer Bedeutung in vergleichbare Ränge aufsteigen dürften, zum Beispiel:

- Hang- und Felsabdeckungen
- Anwendungen im Lawinenschutz
- Anwendungen zum Schutz gegen Muren
- Schutz gegen Holzschlag und Eisschlag
- Sprengschutz
- Terrorismusabwehr/Objektschutz

Die beiden Autoren dieses Festbeitrags haben den Steinschlagschutz auf einer guten Wegstrecke begleitet, Herr Bolliger an maßgebender Stelle von 1960 bis 1990 bei den Kabelwerken Brugg AG. Beide wünschen für die nächsten 50 Jahre Steinschlag- und Böschungsschutz alles erdenklich Gute.

- Literatur**
- AHLBURG, (1870): Der Strassenbau mit Einschluss der Construction der Strassenbrücken; Lehrbuch für den Unterricht an technischen Lehranstalten, sowie zum Selbststudium für Strassenbau- Ingenieure.- Braunschweig.
 - HALLER, B. (1996): Merkmale moderner Steinschlagschutzsysteme und deren Dimensionierung.- Techn. Akad. Esslingen.
 - HEIERLI, W. (1976): Schutz gegen Felssturz und Steinschlag mit Drahtseilnetzen.- Bern.
 - JOHN, K.W. & SPANG, R.M. (1979): Steinschläge und Felsstürze – Voraussetzungen – Mechanismen – Sicherungen. – UIC-Tag. Schutz der Bahnanlagen gegen Steinschlag und Felssturz, Schlußbericht, Kandersteg.
 - ROCHET, L.(1979): Protection contre les éboulements rocheux par filets métalliques.- Bull. Liaison Labo P. et Ch., 101, 21 – 27.
 - SPANG, R.M. (2000): Standardisierung von Prüfverfahren für Steinschlagschutzbarrieren – Ziele und aktueller Stand.-Techn. Akad. Esslingen, 2. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, 18. und 19. 01. 2000.

Abbildungen _____

- 1 Steinschlagschutzgalerie, AHLBURG (1870)
- 2 Lawinenschutznetze
- 3 Lawinenschutznetz, Einzelfeld mit Holzrahmen
- 4 Steinschlag in eine Lawinenverbauung am Stotzigberg, Vasön, Kt. St. Gallen, 1961.
- 5 Steinschlagversuche in Brunnen, 1962.
- 6 Starre Steinschlagverbauung als Stahlkonstruktion mit Auflage aus Altreifen bei Matsubarako, Nagano Prefecture, Japan.
- 7 Freifallversuche in Birr, 1975.
- 8 Patentschrift für die Seilbremse der Kabelwerke Brugg AG von 1975.
- 9 Plattenbremse aus Frankreich (1979).
- 10 Bremsselement (Italien)
- 11 Bremsring der GEOBRUGG, vor und nach der Beanspruchung.
- 12 Ringnetzverbauung der GEOBRUGG an der Via Mala, 1996.
- 13 Steinschlagversuche an der Lötschberg – Südrampe, 1968.
- 14 Seilführung beim Schutzsystem der Fatzer AG, vor 1993.
- 15 Stütze mit Kardangelenk, System Kabelwerke Brugg AG, 1958.
- 16 Stützengründungen System GEOBRUGG.
- 17 Seilanker System GEOBRUGG.
- 18 Dimensionierungsansatz OPTUS® der GEOBRUGG.
- 19 Steinschlagsimulation mit ROCKFALL 6.0, Dr. SPANG GmbH.

