



**BESONDERHEITEN DER PRÜFUNG FLEXIBLER
STEINSCHLAGSCHUTZVERBAUUNGEN AUF
SCHRÄGWURFANLAGEN AM BEISPIEL „STEIRISCHER ERZBERG“**

**CHARACTERISTICS OF THE TESTING OF ROCK FALL
PROTECTION KITS ON TRANSVERSAL TEST SITES ON EXAMPLE
“STEIRISCHER ERZBERG”**

Christian Heiss¹

ZUSAMMENFASSUNG

Systementwicklungen und Prüfungen flexibler Schutzverbauungen gegen Steinschlag auf der Schrägwurfanlage „Erzberg“ der Trumer Schutzbauten GmbH haben gezeigt, dass eine Systemprüfung mit ausreichend exakter Erfassung der Reaktionen eines geprüften Schutzsystems in Folge eines definierten Energieeintrages, eingebracht durch einen frei fallenden Wurfkörper, auch auf Schrägwurfanlagen wirtschaftlich und reproduzierbar gestaltet werden können. Im Vergleich zu vertikalen Krananlagen ist dabei der zeitliche und materielle Aufwand zum Erlangen konstanter Rahmenbedingungen etwas höher anzusetzen, dieser wird aber durch wesentliche Erleichterungen bei der Systemmontage kompensiert. Die angewandte Mess- und Auswertungsmethodik am Versuchsgelände „Erzberg“ beeinträchtigt die Systemcharakteristik nur unwesentlich und liefert somit nicht nur die benötigten Ergebnisse für Systemprüfungen, sondern auch ausreichend Daten zu technischen Weiterentwicklungen von flexiblen Schutzverbauungen gegen Steinschlag.

Key words: Schrägwurfanlage, Schutzverbauung, Steinschlag, flexibel

ABSTRACT

Developments of systems and tests of flexible rock fall protection kits at the transversal test site “Erzberg” of Trumer Schutzbauten GmbH have shown that a system test with an adequate data recording of a tested protection system with a defined energy impact, produced by a free falling object, can also be carried out economically und reproducibly at transversal test sites. In comparison to vertical test sites the efforts of time and material are higher to achieve constant basic conditions, but this can be compensated by a considerably easier installation of the system. The methods of measurement and evaluation used at the test site “Erzberg” affect the characteristics of the system only slightly and provide not only the necessary results for the system tests but also sufficient data for the technical development of flexible rock fall protection kits.

¹ Trumer Schutzbauten GmbH, Prüf- und Forschungszentrum Erzberg, Hauptplatz 7, 8700 Leoben, Österreich (Tel.: +43-3842-42748; Fax: +43-3842-42748; email: heiss.christian@aon.at)

EINLEITUNG

Der Mensch dringt heute aus verschiedenen Gründen heftiger denn je in alpine Landschaftsbereiche ein. Nicht nur diverse Freizeitvergügungen machen den Zugang zur Bergwelt in Verbindung mit infrastrukturellen Maßnahmen erforderlich, besonders das von der Globalisierung stark betroffene Transportwesen drängt sich zunehmend durch enge Gebirgstäler.

Nun sind aber gerade im alpinen Bereich der Mensch und dessen bauliche Objekte ständig durch Naturgefahren bedroht. Die Möglichkeit von Steinschlägen, Felsstürzen, Hangrutschungen und in den Wintermonaten die Gefahr von Lawinenabgängen bergen ein permanentes Risiko für die Bevölkerung in sich.

Um derartige Risiken zu reduzieren, sind bauliche Maßnahmen notwendig, die die Auswirkungen derartiger Naturgefahren minimieren bzw. deren Zustandekommen präventiv verhindern.

In den vergangenen zwanzig Jahren wurden nicht nur in der Naturgefahrenforschung, sondern auch in der technischen Entwicklung baulicher Schutzmaßnahmen große Fortschritte gemacht. Die Entwicklung am Sektor der Schutzverbauung gegen Steinschlag tendiert heute zu flexiblen Baukastensystemen, die montagefreundlich sind, leicht ins Gelände eingebaut werden können und deren Energieaufnahmekapazität derzeit bis 3.000 kJ reicht.



Abb1: flexible Schutzverbauung gegen Steinschlag
Fig1: flexible rock fall protection kit

Aufgrund der Systemkomplexität flexibler Schutzverbauungen gegen Steinschlag (basierend auf Fangnetzen) ist derzeit ein rein rechnerischer Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit dieser Systeme nicht möglich. Dies hat zur Folge, dass Steinschlagschutzsysteme in 1:1 Feldversuchen getestet und geprüft werden müssen, bevor sie in der Natur zum Einsatz kommen. Diese Tests erfordern aufwändige Versuchsanlagen und sind folglich mit einem hohen finanziellen Aufwand verbunden.

Steinschlagversuchsanlagen zur Prüfung flexibler Schutzverbauungen gegen Steinschlag existieren in der Schweiz, in Italien, Frankreich und Österreich (Steirischer Erzberg). Derzeit werden lediglich in der Schweiz die Schutzsysteme gegen Steinschlag auf einer vertikalen Krananlage geprüft. Bei den restlichen Versuchsanlagen handelt es sich um Schrägwurfanlagen, deren Versuchsanordnungen aber nur bedingt mit der am Steirischen Erzberg vergleichbar sind, da sich die Versuchsanlagen aufgrund topographischer Gegebenheiten stark differenzieren.

ALLGEMEINE SYSTEMBESCHREIBUNG FLEXIBLER SCHUTZSYSTEME GEGEN STEINSCHLAG

Bei flexiblen Schutzsystemen gegen Steinschlag, wie sie am Steirischen Erzberg entwickelt und geprüft werden, handelt es sich um Baumaßnahmen, die Objekte vor schädlichen Auswirkungen, hervorgerufen durch Steinschläge, schützen sollen. Der Erfolg dieser Art von Verbauung basiert zum Teil auf ihrer guten Anpassungsfähigkeit an Geländekonturen (vgl.: Abb1). Der ausschlaggebende Vorteil gegenüber starren Schutzsystemen ist jedoch ihre Eigenschaft, durch elastische und plastische Verformung von Systemkomponenten große kinetische Energien abzubauen zu können.

Im Wesentlichen besteht ein flexibles Schutzsystem gegen Steinschlag aus einer Abfangstruktur (Fangnetz), einer Verbindungsstruktur (meist Stahlseile), einer Stützstruktur (Stützen), deren Verankerung im Untergrund und, wenn nötig, einem Fundament. Bei hohen Energieeinträgen ist der Einbau von Energieabsorbierungselementen („Bremsen“elementen“) notwendig, um die entstehenden Seil- und Ankerkräfte möglichst gering zu halten.

ZIELSETZUNGEN EINER SYSTEMPRÜFUNG

Zielsetzung der Prüfung flexibler Schutzverbauungen gegen Steinschlag in 1:1 Feldversuchen ist eine wirtschaftliche und dennoch exakte Erfassung der Reaktionen des geprüften Schutzsystems bezüglich eines definierten Energieeintrages, der durch einen frei fallenden Wurfkörper hervorgerufen wird, um in weiterer Folge aussagekräftige Angaben über die Systemcharakteristik tätigen zu können. Dazu müssen Randbedingungen geschaffen werden, die eine Reproduzierbarkeit einzelner Systemprüfungen erlauben, sodass erfasste Daten leicht miteinander in Vergleich gebracht werden können.

EINFLÜSSE AUF DIE SYSTEMPRÜFUNG UND DEREN REPRODUZIERBARKEIT

Eine gute Reproduzierbarkeit von Systemprüfungen ist maßgeblich von der Ausführung der Wurfeinrichtung abhängig, da über sie der Wurfkörper in das Prüfobjekt gesteuert wird. Die Impaktposition, der Eintrittswinkel, die Eintrittsgeschwindigkeit und die Eintrittsenergie werden durch die Wurfanlage bestimmt.

Vertikale Krananlagen haben dabei einen wesentlichen Vorteil gegenüber Schrägwurfanlagen, da auf vertikalen Krananlagen die Bewegung des Wurfkörpers der einer beschleunigten, geradlinigen Bewegung entspricht. Der Wurfkörper fällt dabei durch die Erdanziehung beschleunigt vertikal in die Schutzverbauung. Die Position des Wurfkörpers beim Eintritt in das Schutzsystem, seine Eintrittsgeschwindigkeit [$v = \sqrt{2gh}$] und somit auch die kinetische Energie des Wurfkörpers beim Eintritt in das Schutzsystem [$E_{kin} = mv^2/2$] können dadurch ohne großen Aufwand rechnerisch ermittelt und variiert werden. Der Eintrittswinkel des Wurfkörpers bei seinem Erstkontakt mit der Schutzverbauung kann jedoch nur durch eine Änderung der Verbaueometrie (Neigung der Stützstruktur) erreicht werden.

Auf Schrägwurfanlagen wird der Wurfkörper gravimetrisch beschleunigt entlang einer Seilbahn geführt und erst kurz vor dem Schutzverbau ausgeklinkt. Die Bewegung des Wurfkörpers setzt sich dabei aus einer Vertikal- und Horizontalkomponente zusammen, deren Größen vom Trage seildurchhang im Moment des Ausklinkens, also von der Wurfkörpermasse abhängen.

Der wurfkörpermassenabhängige Trage seildurchhang und dessen Einfluss auf die Größe der Geschwindigkeitskomponenten machen eine exakte rechnerische Vorbestimmung der Flugbahn und in weiterer Folge eine exakte Vorbestimmung der Impaktposition und des Eintrittswinkels auf Schrägwurfanlagen nicht möglich. Bei kurzen „Seilfahrten“ wird eine exakte Ermittlung der Impaktposition noch durch Schwingungen des Trage seiles erschwert. Daher werden in der Praxis die Ausklinkpunkte für unterschiedliche Wurfkörper (Energieklassen) „eingeschossen“, um eine exakte vertikale Trefferposition zu erhalten.

Um ein naturgetreues Prüfzenario zu schaffen ist es notwendig, die zu prüfende Schutzverbauung so anzuordnen, dass der künstliche Energieeintrag einem natürlichen Steinschlag möglichst nahe kommt und sämtliche Systemkomponenten wirklichkeitsnahe beansprucht werden, um keine Über- bzw. Unterdimensionierung gewisser Systemkomponenten zu erhalten.

Wie die Anordnungsgeometrie des Schutzsystems beeinflusst auch der Einbau von Sensoren zur Seilkraftmessung in die Verbindungsstruktur der Schutzverbauung das Prüfergebnis wesentlich, da diese massebehaftete Fremdkörper darstellen und dadurch dynamische Prozesse verzögern. Auch hier muss darauf geachtet werden, die natürliche Systemcharakteristik nach Möglichkeit zu erhalten.

STEINSCHLAGVERSUCHSANLAGE „ERZBERG“

Die Steinschlagversuchsanlage am Steirischen Erzberg wurde im Jahr 2000 von der Trumer Schutzbauten GmbH in Form einer Schrägwurfanlage errichtet, um das in Eigenproduktion gefertigte, patentierte OMEGA-NETZ in diversen Verbausystemen zu testen.

Schon zu Beginn der Versuchsdurchführungen wurde eine enge Zusammenarbeit mit der Montanuniversität Leoben angestrebt. In Kooperation mit Instituten der Montanuniversität (Institut für Bergbau, Bergtechnik und Bergwirtschaft, Institut für Automation, Institut für Geomechanik und Tunnelbau) und der Firma Geodata Messtechnik Leoben wurde im Laufe der Zeit das Test- und Prüfverfahren optimiert und erweitert. So werden heute neben der Entwicklung und Prüfung flexibler Steinschlagschutzsysteme auf der Steinschlagversuchsanlage „Erzberg“ auch dynamische Tests an Einzelkomponenten (z.B.: Energieabsorbierungselementen) und statische Netzziehversuche durchgeführt. Die Versuchsanlage zur dynamischen Prüfung flexibler Steinschlagschutzsysteme ist derzeit für Energieeinträge von 100 kJ bis 1.000 kJ ausgelegt und soll in den folgenden Jahren für Energieeinträge bis 3.000 kJ ausgebaut werden.

Versuchsordnung der Prüfung flexibler Schutzsysteme gegen Steinschlag

Die Versuchsordnung der Prüfung flexibler Schutzsysteme gegen Steinschlag auf der Steinschlagversuchsanlage „Erzberg“ gliedert sich im Wesentlichen in folgende drei Bereiche:

- die Schrägseilbahn (Wurfeinrichtung)
- das Verbausystem (Prüfobjekt) und
- die Messeinrichtung

Schrägseilbahn



Abb2: Bergmast der Seilbahn und Laufwagen
Fig2: top station of the ropeway and carriage

Die Schrägseilbahn besteht aus einem Berg- und Talmast, einem Trageil und einem Laufwagen mit mechanischem Auslösemechanismus, der den Wurfkörper vor dem zu prüfenden Schutzsystem zum Ausklinken bringt, sodass dieser gravimetrisch beschleunigt frei in das Schutzsystem fallen kann.

Die Seilbahn erstreckt sich über drei Etagen des Eisenerzbergbaues. Der Höhenunterschied zwischen Tal- und Bergmast beträgt 56 m, der zwischen Verbausystem (Mittel- etage) und Bergmast 43,50 m.

Die theoretische Trageillänge beträgt 182 m. Im Vergleich zu anderen Schrägwurfanlagen folgt daraus eine relativ lange „Seilfahrt“ des Wurfkörpers bis zum Ausklinkpunkt, wodurch die beim Start auftretenden Trageilschwingungen bis zum Zeitpunkt des Ausklinkens stark gedämpft werden, was sich durchaus positiv auf die Treffergenauigkeit auswirkt.

Verbausystem

Das Verbausystem gliedert sich in einen immobilen und einen mobilen Teil. Der immobile Teil des Verbausystems besteht im Wesentlichen aus einer durchgehend fundamentierten Verbauchse (Fundamentierung) von etwa 22 m Länge, 1,5 m Breite und einer Fundamenttiefe von 1,5 m. Die durchgehende Fundamentierung dient als Auflage der Stützstruktur und als Arbeitsplattform.

Der immobile Verbauteil wird durch Seitenankergruppen (links und rechts der Schutzverbauung) und durch Rückhalteankergruppen ergänzt. Das Fundament ist derart gestaltet, dass Systeme mit unterschiedlichen Feldlängen und unterschiedlichen Lagerungen der Stützenfüße geprüft werden können. Dabei kann die Bodenbefestigung der Stützstruktur

- eingespannt (Stütze direkt mit Untergrund verbunden)
- verankert (Stütze über Pendelgelenk mit Bodenplatte verbunden, Bodenplatte durch Zug- und Druckanker mit Untergrund verbunden) oder
- schwimmend (Stütze über Pendelgelenk mit Bodenplatte verbunden, Bodenplatte zurückgespannt) ausgeführt werden.



Abb3:Schutzverbauung auf Versuchsanlage
Fig3: rock fall protection kit installed on test site

Die Kopfbefestigung der Stützstruktur erfolgt bei verankerter und schwimmender Gestaltung der Bodenplatten mittels Verbindungsstruktur (Rückhalteseilen) zu den Rückhalteankern.

Der mobile Teil des Verbausystems ist das eigentliche Prüfobjekt der Systemprüfung. Es handelt sich dabei um die Stützstruktur, Verbindungsstruktur und die Abfangstruktur des Schutzsystems. Auf eine detaillierte Beschreibung des mobilen Teils des Verbausystems kann hier nicht eingegangen werden, da die Ausführungsvarianten selbiger zu mannigfaltig sind.

Messeinrichtung

Bei Systemprüfungen flexibler Schutzverbauungen gegen Steinschlag ist vor, während und nach dem Prüfvorgang die Durchführung von Messungen erforderlich. Diese Messungen beeinflussen teilweise direkt die Prüfergebnisse, da Sensoren in das Prüfobjekt integriert werden müssen, teilweise wird die Aussage der Prüfergebnisse aber nur durch die Genauigkeit diverser Messungen und Auswertungen beeinflusst.

Die Verbaugeometrie vor und nach der Systemprüfung wird mit Maßband und Neigungswaage vermessen. Auch die Wurfkörperdimensionen werden mit Maßband aufgenommen. Um zukünftig für die Erstellung von Rechenmodellen präzisere (digitalisierte) Daten zu erhalten, aber auch aus sicherheitstechnischen Gründen, wird eine Vermessung des Verbausystems mittels elektro-optischen Vermessungsinstrumenten angestrebt.

Zur Ermittlung der resultierenden Eintrittsgeschwindigkeit und Eintrittsenergie des Wurfkörpers in das Schutzsystem wird dessen Freiflugphase mittels High-Speed-Kamera in

Verbauachsenrichtung aufgezeichnet. Die Auswertung der Einzelbilder (Aufnahmerate: 120 Bilder pro Sekunde) erlaubt weiters eine exakte Ermittlung der Eintrittsposition und des Eintrittswinkels des Wurfkörpers in das Prüfobjekt. Die Einzelbildauswertung der High-Speed- Aufnahme liefert auch die maximale Systemverformung, sowie den Bremsweg und die Bremszeit des Wurfkörpers im Verbausystem.



Abb4: Messzelle zur Seilkraftmessung

Fig4: measuring cell for cable force measurement

Der Einsatz von handelsüblichen Digitalkameras (Aufnahmerate: 25 Vollbilder bzw. 50 Halbbilder pro Sekunde) ermöglicht neben einer Kontrollaufnahme der Flugphase des Wurfkörpers auch die Beobachtung von Teilbereichen des Prüfobjektes (z.B.: Bremsselemente, Seilführungen). Durch die Aufzeichnung der Systemprüfung aus verschiedenen Richtungen kann auch eine exaktere Auswertung der Geometrieänderung des Verbausystems während des Abbremsvorganges erzielt werden.

Die Seil- und resultierenden Ankerkräfte werden durch eine eigens dafür entwickelte Sensorik gemessen und aufgezeichnet. Die Messeinrichtung umfasst 16 Messzellen (10 Zellen mit einer Nennlast von 400 kN, 6 Zellen mit einer Nennlast von 200 kN), die direkt in die Verbindungsstruktur der Schutzverbauung eingebaut werden können, einer Messzelle (Nennkraft: 100 kN), die zur Massebestimmung des Wurfkörpers herangezogen wird, sowie Computerhard- und Messsoftware. Das gesamte Messsystem ist mobil gestaltet, sodass ein nötiger Ortswechsel (z.B. bei Einzelkomponententests) diesbezüglich keine Probleme verursacht.

ABLAUF EINER SYSTEMPRÜFUNG VON SCHUTZVERBAUUNGEN GEGEN STEINSCHLAG

Die Durchführung von Systementwicklungen und die Prüfungen flexibler Schutzverbauungen gegen Steinschlag am Steirischen Erzberg durch die Trumer Schutzbauten GmbH werden von Instituten der Montanuniversität Leoben begleitet. Dabei agiert das Institut für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft als Kontrollorgan. Institutsmitarbeiter kontrollieren die ordnungsgemäße Durchführung von Systemprüfungen anhand von Checklisten, in denen neben technischen Daten des geprüften Prüfobjektes auch die verwendete Messanordnung detailliert beschrieben wird.

Eine Systemprüfung gliedert sich im Wesentlichen in drei Abschnitte:

- Vorbereitung der Systemprüfung
- Durchführung der Systemprüfung
- Auswertung der Prüfergebnisse

Vorbereitung der Systemprüfung

Die Hauptarbeitsschritte der Vorbereitung von Systemprüfungen beinhalten die Systemmontage und die Vorbereitung der Wurfeinrichtung (Einrichten des Ausklinkpunktes). Zur erstmaligen Bestimmung eines optimalen Ausklinkpunktes wird dieser durch einen Testschuss (Schuss ins Leere) eingeschossen. Dabei wird der horizontale Abstand des

Wurfkörpers zur Verbauchse und sein vertikaler Abstand zum Untergrund eruiert und als vorläufiger Ausklinkpunkt herangezogen. Der folgende Schuss wird mit einer Digitalkamera in Verbauchsenrichtung aufgezeichnet (vgl.: Abb5). Die Einzelbilddauswertung liefert die Impakthöhe des Wurfkörpers in das Verbausystem, den Eintrittswinkel, die Eintrittsgeschwindigkeit und die zu erwartende Eintrittsenergie. Liefert diese Auswertung Ergebnisse, die nicht dem Soll entsprechen, wird die Position des Ausklinkpunktes korrigiert, indem man entweder die Länge der Wurfkörperaufhängung ändert (Änderung des Vertikalabstands), oder den Ausklinkpunkt näher zum bzw. weiter vom Prüfobjekt verlegt.



Abb5: Trefferhöhenbestimmung (V0103)

Fig5: determination of impact height (V0103)

Dieser Vorgang bringt mit einer Änderung des Horizontalabstandes auch eine Änderung des Vertikalabstandes mit sich und macht die Durchführung eines zweiten „Testschusses“ unumgänglich, wobei bei einer Längenänderung der Wurfkörperaufhängung auf einen zweiten „Testschuss“ verzichtet werden kann. Auf diese Art kann die vertikale Trefferposition auf ± 10 cm vorausbestimmt werden. (Die Trefferposition in horizontaler Richtung wird durch die Verbaueometrie vorgegeben.)

Eine einfache Korrektur des Eintrittswinkels ist zur Zeit noch nicht möglich, da dieser vom horizontalen Abstand des Ausklinkpunktes von der Verbauchse abhängt, der wiederum von der Wurfkörpermasse (Tragseildurchhang) kleinräumig vorgegeben wird. (Je schwerer der Wurfkörper, desto kleiner der Eintrittswinkel).

Ist jedoch der optimale Ausklinkpunkt einmal bekannt, wird dieser vor einer Systemprüfung eingemessen und der Auslösemechanismus für diesen Punkt eingestellt.

Die Systemmontage wird von Fachleuten durchgeführt. Aufgrund der horizontalen Arbeitsplattform kann dieser Vorbereitungsschritt maschinell unterstützt ausgeführt werden, was eine wesentliche Zeitersparnis mit sich bringt. Parallel zur Systemmontage werden die Messzellen zur Seilkraftmessung in das Prüfobjekt integriert. Dabei ist besonders darauf zu achten, das die Systemcharakteristik durch den Einbau der Messzellen nicht allzu sehr beeinflusst wird.

Zu den Vorbereitungsarbeiten zählen weiters die Massebestimmung des Wurfkörpers, die mit der firmeneigenen Messeinrichtung vor jeder Systemprüfung durchgeführt wird, und die Vorbereitung der schon erwähnten Checklisten.

Durchführung der Systemprüfung

Am Tag der Systemprüfung wird die Versuchs- und Messanordnung von Mitarbeitern des Instituts für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft kontrolliert. Sämtliche Systemkomponenten des Prüfobjektes werden nachgemessen und mit dem Datenblatt der Checkliste verglichen. Die Positionen der Messzellen zur Seilkraftmessung werden überprüft und die Lage der Tragseile im zentralen Trefferfeld werden eingemessen. Weiters werden vor jeder Systemprüfung die Hauptkomponenten des Prüfobjekts fotografisch festgehalten.

Die Systemprüfung selbst wird in Verbauchsenrichtung mit einer High-Speed-Kamera und einer handelsüblichen Digitalkamera aufgezeichnet. Drei weitere Digitalkameras, deren Positionen von Prüfung zu Prüfung variieren, liefern weitere Aufnahmen der Systemprüfung. Die auftretenden Seilkräfte können in bis zu 16 Positionen gemessen werden. Aufgrund der handlichen Messzellen (Zellenmasse: etwa 7 kg) wird das Prüfergebnis durch den Einbau der Sensoren nur minimal beeinflusst.

Wie schon vor der Systemprüfung werden auch nach der Systemprüfung die Hauptkomponenten des Prüfobjekts photographisch festgehalten, die Lage der Tragseile im zentralen Trefferfeld eingemessen und die Resultate sowie etwaige Schäden am Verbausystem schriftlich aufgezeichnet.

Auswertung der Prüfergebnisse

Die Prüfergebnisse werden von Mitarbeitern der Trumer Schutzbauten GmbH ausgewertet. Dieser Arbeitsschritt wird wiederum vom Institut für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft kontrolliert.

Die Auswertung der Prüfergebnisse gliedert sich in die Einzelbildauswertungen der verschiedenen Aufnahmen, die Auswertung der Seilkraftmessung und einer Gegenüberstellung dieser zwei Auswertungen.

Bei den Einzelbildauswertungen nimmt die Auswertung der High-Speed-Aufnahmen eine besondere Stellung ein. Aus ihr werden über Auswertung der Freiflugphase die Eintrittsgeschwindigkeit, die vertikale Eintrittsposition, der Eintrittswinkel sowie über die Auswertung der Bewegung des Wurfkörpers im Schutznetz die maximale Systemverformung, der Bremsweg, die Bremszeit und in weiterer Folge die Verzögerung und die auf den Wurfkörper wirkende Bremskraft ermittelt. Einzelbildauswertungen der Digitalaufnahmen liefern eine sehr gute Kontrolle dieser Auswertung.

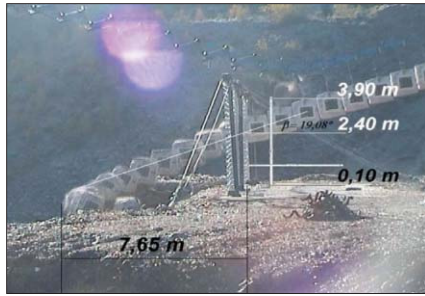


Abb6: vertikale Trefferposition und Eintrittswinkel (V1203)

Fig6: vertical impact position and angle of impact (V1203)

Die Einzelbildauswertungen liefern im Wesentlichen die auf den Wurfkörper wirkenden Kräfte. Die Auswertung der Seilkräfte hingegen liefert Aussagen über die Belastungen der Systemkomponenten und somit des Prüfobjektes. Erst die Gegenüberstellung beider Auswertungen liefert letztendlich eine umfassende Aussage über die Systemcharakteristik und die eigentliche Energieabsorptionskapazität der geprüften Schutzverbauung.

• Einzelbildauswertung der High-Speed-Aufnahmen²

Die Einzelbildauswertung der High-Speed-Aufnahmen (Freiflugphase und Bewegung des Wurfkörpers im Netz) erfordert konzentriertes Arbeiten, da Bildpunkte exakt bestimmt werden müssen um in weiterer Folge über einen ermittelten Umrechnungsfaktor (mm/pixel) die Positionen des Wurfkörpers in Abhängigkeit der Zeit genau ermitteln zu können (vgl.: Abb9). Eine hohe Bildauflösung ist dabei ein Vorteil. Die erhaltenen Bewegungskurven können durch Polynomen angenähert werden. Diese ergeben, nach der Zeit abgeleitet, die resultierenden Geschwindigkeitskomponenten in vertikaler und horizontaler Richtung (vgl.: Abb7). Die Freiflugphase des Wurfkörpers wird dabei über eine horizontale Weglänge von knapp über 4 m beobachtet, wodurch etwa 20 Aufnahmen der High-Speed-Kamera zur Auswertung herangezogen werden können. Mit der ermittelten Wurfkörpermasse und der resultierenden Geschwindigkeit wird die Eintrittsenergie (kinetische Translationsenergie) berechnet. Der Impaktwinkel wird über die erste Ableitung der Flugbahnannäherung (vgl.:

² Die angeführten Auswertungsergebnisse (Einzelbildauswertung und Seilkraftmessung) stammen von verschiedenen Systemprüfungen und können nicht in direkten Zusammenhang gebracht werden.

Abb8) gerechnet. Die vertikale Impaktposition, sowie die horizontale Systemverformung werden über die ermittelten Umrechnungsfaktoren bestimmt (vgl.: Abb6).

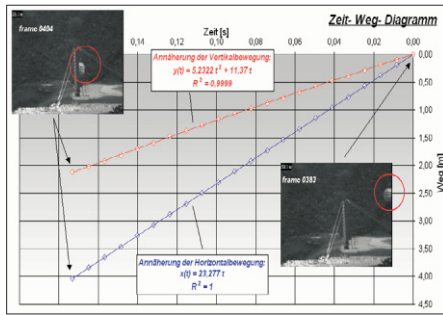


Abb7: Bewegung der Freiflugphase (V1303)
Fig7: movement of free flight phase (V1303)

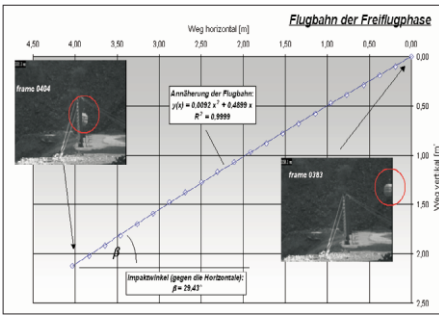


Abb8: Flugbahn der Freiflugphase (V1303)
Fig8: flight path of free flight phase (V1303)

Freiflugphase (Auswertung)									
Randbedingung:		Maßstab:							
Masse des Flugkörpers:		1.676 kg		Horizontal:		1pixel= 14,50 mm			
Fallbeschleunigung:		9,81 m/s²		Vertikal:		1pixel= 33,93 mm			
Bezeichnung		Auswertung			Ausgleich			Weg	
Nummer	frame Nr.	Zeit absolut [ms]	x-Wert pixel	y-Wert pixel	Zeit [s]	x-Wert pixel	y-Wert pixel	x-Wert [m]	y-Wert [m]
1	frame 0383	3.158,09	742,5	73,5	0,0000	0,0	0,0	0,0000	0,0000
2	frame 0384	3.166,33	729,5	76,5	0,0082	-13,0	3,0	0,1885	0,1018
3	frame 0385	3.174,57	716,5	79,0	0,0165	-26,0	5,5	0,3771	0,1866
4	frame 0386	3.182,82	703,5	82,0	0,0247	-39,0	8,5	0,5656	0,2884
5	frame 0387	3.191,07	689,5	85,0	0,0330	-53,0	11,5	0,7687	0,3902
6	frame 0388	3.199,31	676,5	87,5	0,0412	-66,0	14,0	0,9573	0,4750
7	frame 0389	3.207,56	663,5	90,5	0,0495	-79,0	17,0	1,1458	0,5788
8	frame 0390	3.215,81	650,0	93,5	0,0577	-92,5	20,0	1,3416	0,6786
9	frame 0391	3.224,07	637,0	96,5	0,0660	-105,5	23,0	1,5302	0,7804
10	frame 0392	3.232,30	623,5	99,5	0,0742	-119,0	26,0	1,7260	0,8821
11	frame 0393	3.240,54	610,5	102,0	0,0824	-132,0	28,5	1,9145	0,9670
12	frame 0394	3.248,79	597,0	105,0	0,0907	-145,5	31,5	2,1103	1,0688
13	frame 0395	3.257,04	583,5	108,0	0,0989	-159,0	34,5	2,3061	1,1705
14	frame 0396	3.265,28	570,5	111,0	0,1072	-172,0	37,5	2,4947	1,2723
15	frame 0397	3.273,53	557,0	114,0	0,1154	-185,5	40,5	2,6905	1,3741
16	frame 0398	3.281,78	544,0	117,0	0,1237	-198,5	43,5	2,8790	1,4759
17	frame 0399	3.290,02	530,5	120,5	0,1319	-212,0	47,0	3,0748	1,5946
18	frame 0400	3.298,27	517,5	123,5	0,1402	-225,0	50,0	3,2634	1,6964
19	frame 0401	3.306,51	504,0	127,0	0,1484	-238,5	53,5	3,4592	1,8152
20	frame 0402	3.314,76	491,0	130,0	0,1567	-251,5	56,5	3,6477	1,9170
21	frame 0403	3.323,01	478,0	133,0	0,1649	-264,5	59,5	3,8363	2,0188
22	frame 0404	3.331,25	464,5	136,0	0,1732	-278,0	62,5	4,0321	2,1205

Eintrittsgeschwindigkeit und Energie	
Geschwindigkeit gemittelt:	
Geschwindigkeit horizontal (Mittel über Weg):	23,29 m/s
Geschwindigkeit vertikal (Mittel über Weg):	12,25 m/s
resultierende Geschwindigkeit:	26,31 m/s
Energieeintrag:	580,04 kJ
Geschwindigkeit aus Approximation:	
Horizontal: x(t) = 23,277 t	v _x (t=0,1732) = 23,28 m/s
Vertikal: y(t) = 5,2322 t² + 11,37 t	v _y (t=0,1732) = 13,18 m/s
resultierende Geschwindigkeit:	26,75 m/s
Energieeintrag:	599,66 kJ

Abb9: Einzelbildauswertung der Freiflugphase (V1303)
Fig9: detail screen analysis of free flight phase (V1303)

Die Bewegung des Wurfkörpers in der Schutzverbaumung wird ebenfalls durch Polynome angenähert. Die zweite Ableitung dieser Polynome nach der Zeit ergibt die Verzögerungskomponenten in vertikaler und horizontaler Richtung und diese mit der Wurfkörpermasse multipliziert die auf den Wurfkörper wirkenden Kräfte. Die Anzahl der dabei zur Auswertung herangezogenen Aufnahmen hängt von der Systemcharakteristik ab, die vom Bremsweg und der resultierenden Bremszeit bestimmt wird.

Die Einzelbildauswertungsergebnisse der High- Speed- Aufnahmen werden durch die Einzelbildauswertung der Digitalaufnahmen und einer Energiebilanzrechnung (Energieeintrag = Energieabbau) kontrolliert.

- Seilkraftauswertung

Die Seilkräfte werden in unterschiedlichen Positionen der Verbindungsstruktur gemessen. Dabei werden über einen Zeitraum von 10 s 24.000 Messwerte pro Messzelle aufgezeichnet. Die Messergebnisse geben Auskunft über die Kraftwirkung in der Verbindungsstruktur, die Belastung der Stützstruktur und der Verankerung, sowie den Energieabbau durch Brems-elemente (vgl.: Abb10).

Aufgrund der geringen Messzellenmassen und -dimensionen können Sensoren auch in die Verbindungsstruktur (Tragseile) des zentralen Trefferfeldes eingebaut werden, wodurch die Belastungen der Stützstruktur direkt eruiert werden können.

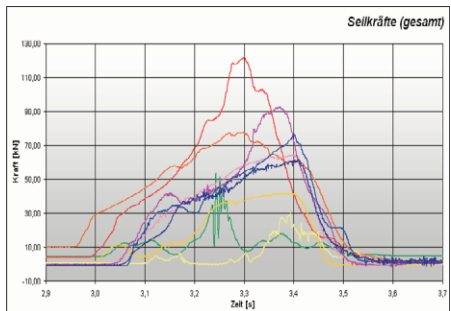
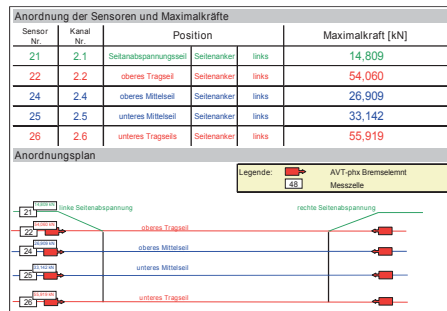


Abb10: Sensoranordnung und Maximalkräfte (V1503) **Abb11:** Seilkraftverläufe (V1203)

Fig10: position of measuring cells and maximum **Fig11:** time dependent rope forces (V1503) forces (V1503)

ERKENNTNISSE AUS SYSTEMPRÜFUNGEN AUF DER SCHRÄGWURFANLAGE „ERZBERG“

Die Systementwicklungen und die Prüfungen von Schutzverbauungen gegen Steinschlag auf der Schrägwurfanlage „Erzberg“ der Trumer Schutzbauten GmbH haben in den vergangenen zwei Jahren gezeigt, dass auch auf Schrägwurfanlagen Systemprüfungen reproduzierbar gestaltet werden können und dabei der wirtschaftliche Aufwand möglichst klein gehalten werden kann.

Die Versuchsanordnung einer Schrägwurfanlage entspricht dabei eher den natürlichen Gegebenheiten, als die einer vertikalen Krananlage, da die Flugbahn des Wurfkörpers dabei nicht einer beschleunigten geradlinigen Bewegung entspricht, wie sie in der Natur nur selten vorkommt. Eine Konsequenz dieser Versuchsanordnung ist ein höherer Aufwand zum Erreichen gewisser Rahmenbedingungen, der jedoch durch eine wesentliche Montageerleichterung des Verbausystems kompensiert wird. Der Auswertungsaufwand der Prüfergebnisse und die Genauigkeit selbiger ist sowohl auf Schrägwurfanlagen als auch auf vertikalen Krananlagen gleich einzuschätzen.

Aus sicherheitstechnischen Gründen ist eine Schrägwurfanlage einer vertikalen Krananlage aber immer vorzuziehen.