
Diplomarbeit

Numerische Simulation von Systemkomponenten flexibler Steinschlagschutzsysteme

Nina Pressler

Datum(März 2011)



Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft
Department Mineral Resources and Petroleum Engineering
Montanuniversität Leoben

A-8700 LEOBEN, Franz Josef Straße 18
Tel.Nr.: +43/(0)3842-402-2001
Fax: +43/(0)3842-402-2002
bergbau@unileoben.ac.at

Ehrenwörtliche Erklärung

„Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.“

„I declare in lieu of oath that this thesis is entirely my own work except where otherwise indicated. The presence of quoted or paraphrased material has been clearly signalled and all sources have been referred. The thesis has not been submitted for a degree at any other institution and has not been published yet.“

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung in dieser Arbeit, wie z.B. TeilnehmerInnen, verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung für beide Geschlechter.

Vorwort, Widmung, Danksagung

Diese Arbeit entstand in Kooperation zwischen dem Institut für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft und dem Institut für Mechanik.

In diesem Zuge möchte ich mich gleich bei den Mitarbeitern des Instituts für Mechanik hier in Leoben für die großartige Betreuung bedanken. Ganz besonders unterstützt haben mich dort mein Betreuer Professor Thomas Antretter, Wolfgang, Mario und Ronald, die zu jeder Tages- und Nachtzeit ein offenes Ohr für meine Probleme und Fehlermeldungen hatten. Danke nochmals.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich beim Institut für Bergbaukunde, das mir diese Arbeit ermöglichte, besonders bei meinem Betreuer Christian Heiss, der mich immer wieder zu Versuchen am Steirischen Erzberg mitnahm und mir dort alles erklärte. Ohne ihn wäre diese Arbeit gar nicht erst zustande gekommen.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Eltern und meinem Bruder Michael, die immer hinter mir stehen und mir ein sorgenfreies Studium erst möglich gemacht haben, bei meinem Freund Daniel für die Unterstützung und das viele Verständnis, das er mir immer wieder entgegenbringt. Danke.

Zusammenfassung

Diese Arbeit schildert die mechanische Analyse von einem Steinschlagversuch der Energieklasse 2000 kJ am steirischen Erzberg von der experimentellen Erfassung bis hin zu einer numerischen Simulation mit dem Finite Elemente Programm Abaqus.

Der erste Teil beschäftigt sich mit der Definition der Aufgabenstellung und der Auswertung der Daten, die normgerecht, wie in der ETAG 027 vorgeschrieben, aufgezeichnet wurden.

Der zweite Teil schildert die Umwandlung der gemessenen in für die Simulation verwendbare Daten, einschließlich der benötigten Annahmen für die dreidimensionale Berechnung.

Im dritten Teil werden auf die Berechnung und die Vor- beziehungsweise Nachteile der entwickelten Modelle eingegangen. Das entwickelte Programm bietet die Möglichkeit, Eingangsparameter zu variieren und so kosten- und zeitsparend deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem zu berechnen.

Schlussendlich werden Ergebnisse und Verbesserungsvorschläge für zukünftige Simulationen diskutiert.

Abstract

This work describes the mechanical analysis of a rock fall test with a maximum energy level of 2000 kJ at the Styrian Erzberg starting with experimental measurements and leading to a numerical simulation using the finite element program Abaqus.

The first part deals with the definition of the task and the evaluation of the data according to the European standard ETAG 027.

The second part describes the preparation of the measured data for use in the simulations, including the required assumptions for the three-dimensional calculations.

The third part deals with the calculations and the advantages or disadvantages of the developed models, respectively. The simulations allow varying the input parameters enabling to estimate their impact on the overall system in an efficient and cost-effective way.

Finally, the results and proposals for improvements of future simulations will be discussed.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	1
2	Einführung in die Thematik - Steinschlagversuche	3
2.1	Definition der Begriffe	4
2.2	Bezeichnungen.....	9
3	Literatur.....	11
3.1	Richtlinie über die Typenprüfung von Schutznetzen gegen Steinschlag 2001 mit Ergänzung 2006 - Schweiz	12
3.2	ETAG 027	13
4	Versuchsanlagen	14
4.1	Schrägwurfanlage.....	15
4.2	Vertikalwurfanlage	16
4.3	Versuchsanlage in Wallis.....	18
5	Beschreibung des untersuchten Systems.....	19
5.1	Komponentenliste.....	21
5.2	Versuchsbeschreibung.....	24
5.2.1	Massebestimmung des Wurfkörpers.....	24
5.2.2	Zellenoffsets.....	25
5.2.3	Einschießen.....	25
5.2.4	Einstellungen für den Versuch.....	25
6	Auswertung der Daten	26
6.1	Bildauswertung	27
6.2	Seilkräfte.....	29
6.3	Koordinaten der Stütze	30
6.4	Koordinaten der Seile	31
6.5	Richtungsvektoren der Rückhalteseile.....	33
7	Analytisches Modell	34
7.1	Berechnung der Vektoren.....	35
7.2	Analytische Berechnung	36
7.3	Ergebnisse der analytischen Berechnung	38
8	FEM Modell.....	40
8.1	Modell – Träger	43
8.1.1	Elementtyp	44
8.1.2	Materialeigenschaften	44

8.1.3	Randbedingungen	46
8.1.4	Kraftaufbringung	47
8.1.5	Ergebnisse und Diskussion	47
8.2	Modell - Fangkonstruktion	49
8.2.1	Koordinatenbestimmung des Wurfkörpers	50
8.2.2	Elementauswahl	51
8.2.3	Materialeigenschaften	52
8.2.4	Randbedingungen	52
8.2.5	Kontakt	53
8.2.6	Ergebnisse und Diskussion	53
9	Ergebnisse - Verbesserungen	56
10	Ausblick	57
11	Literaturverzeichnis	58
12	Abbildungsverzeichnis	60
13	Tabellenverzeichnis	62
14	Abkürzungsverzeichnis	63
15	Anhang Inhaltsverzeichnis	I
A	Inputfile Träger	II
B	Inputfile Fangkonstruktion	VIII

1 Aufgabenstellung

Basierend auf Mess- und Auswertungsergebnissen von Systemprüfungen sollen die Ein- und Auswirkungen von Energieeinträgen in flexible Steinschlagschutzverbauungen auf Einzelkomponenten untersucht und numerisch simuliert werden, wobei der Schwerpunkt der Arbeit den Innenstützen des Verbausystems gewidmet sein soll.

1. Literaturrecherche
2. Auswertung des Feldversuches (V0709: System TSC-2000-ZD)
3. Analytisches Modell
4. Numerisches Modell

1. Literaturrecherche

Im Rahmen der Literaturrecherche soll einerseits der derzeitige „state of the art“ bezüglich numerischer Simulation von flexiblen Steinschlagschutzsystemen ermittelt werden und andererseits die Einsatzmöglichkeit und das Potential des Simulationsprogramms Abaqus für derartige Problemstellungen eruiert werden.

2. Auswertung des Feldversuches

Die Auswertung des Feldversuches V0709 soll in Kombination mit den Messdaten (Seilkräfte, etc.) die Basis der folgenden Modellierungen bilden. (Da es sich bei den Systemprüfungen um dynamische Prozesse handelt, müssen in diesem Arbeitsschritt nicht nur die Systemverformungen, Winkeländerungen und die resultierenden Bremskräfte ermittelt werden, sondern die Auswertungsergebnisse (zeitbezogen) den gemessenen Seilkräften gegenübergestellt werden.)

3. Analytisches Modell

Basierend auf den Ergebnissen aus Punkt 2. sollen für den maximalen Lastfall (bei maximaler Systemverformung im MEL –Test) die Belastungen der Innenstützen ermittelt werden und basierend auf der minimalen Zugfestigkeit der verwendeten Seile die mögliche Maximalbelastung der Stütze ermittelt werden. (Dieses Modell soll zukünftig die Trägerdimensionierung verbessern, indem der maximal mögliche Lastfall angenommen wird.)

4. Numerisches Modell

Die numerische Simulation dieser Innenstützen (basierend auf den analytischen Ergebnissen) im Programm Abaqus soll erstens das analytische Modell bestätigen und andererseits die Möglichkeit geben, diverse Eingangsparameter (Eintrittswinkel, etc.) zu variieren.

2 Einführung in die Thematik - Steinschlagversuche

Steinschlagschutzverbauungen werden immer bedeutender umso mehr Raum von der Bevölkerung in Anspruch genommen wird. Anwendung finden Steinschlagschutznetze zum Schutz von Häusern und Infrastrukturen, sie werden aber nicht ausschließlich im öffentlichen Bereich sondern auch im Bergbau eingesetzt. Ein großer Vorteil von den flexiblen Steinschlagschutzsystemen ist, dass sie platz- und kostensparend montiert und gewartet werden können, und es gibt keine Einschränkungen was Ihre Längenerstreckung betrifft.

Diese Arbeit beschäftigt sich nur mit der Modellierung des Verbaus mit besonderem Augenmerk auf die Innenstützen.

Die wichtigste Richtlinie ist zurzeit in diesem Bereich in Europa die ETAG 027 (Guideline for European Technical Approval) [1], einschließlich ihrer Ergänzungen. Zuvor gab es in Österreich keine gesetzliche Richtlinie für die Prüfung von Steinschlagschutznetzen. In der Schweiz galt die Richtlinie über die Typenprüfung von Schutznetzen gegen Steinschlag [2], herausgegeben vom Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL) und der Eidgenössischen Forschungsanstalt WSL. Seit dem Jahr 2008 ist in Europa die Richtlinie der ETAG 027 rechtskräftig, und es dürfen nur noch Systeme, die nach diesem Prüfstandard geprüft wurden, im öffentlichen Bereich aufgestellt werden.

Vorgesehene Verwendung für das Bauprodukt

ist das Stoppen von gelösten Steinen, die eine geneigte Ebene hinunter rollen. Das Zertifikat gilt für die Planung, Fertigung und Montage, wenn das Produkt den Richtlinien der ETAG 027 und deren Montagerichtlinien entspricht. Damit diese universell einsetzbar sind, müssen die Produkte ihre Funktionen in einem Temperaturbereich zwischen -40°C und +50°C erfüllen.

Anbieter auf diesem Gebiet in Europa

Die wichtigsten Anbieter auf diesem Gebiet kommen in Europa aus den Ländern Schweiz mit der Geobrugg AG und Isofer, Italien mit Maccaferri und Igor, Frankreich mit CAN und aus Österreich mit der Trumer Schutzbauten GmbH.

2.1 Definition der Begriffe

Die Begriffsdefinitionen stammen aus der ETAG 027 [1].

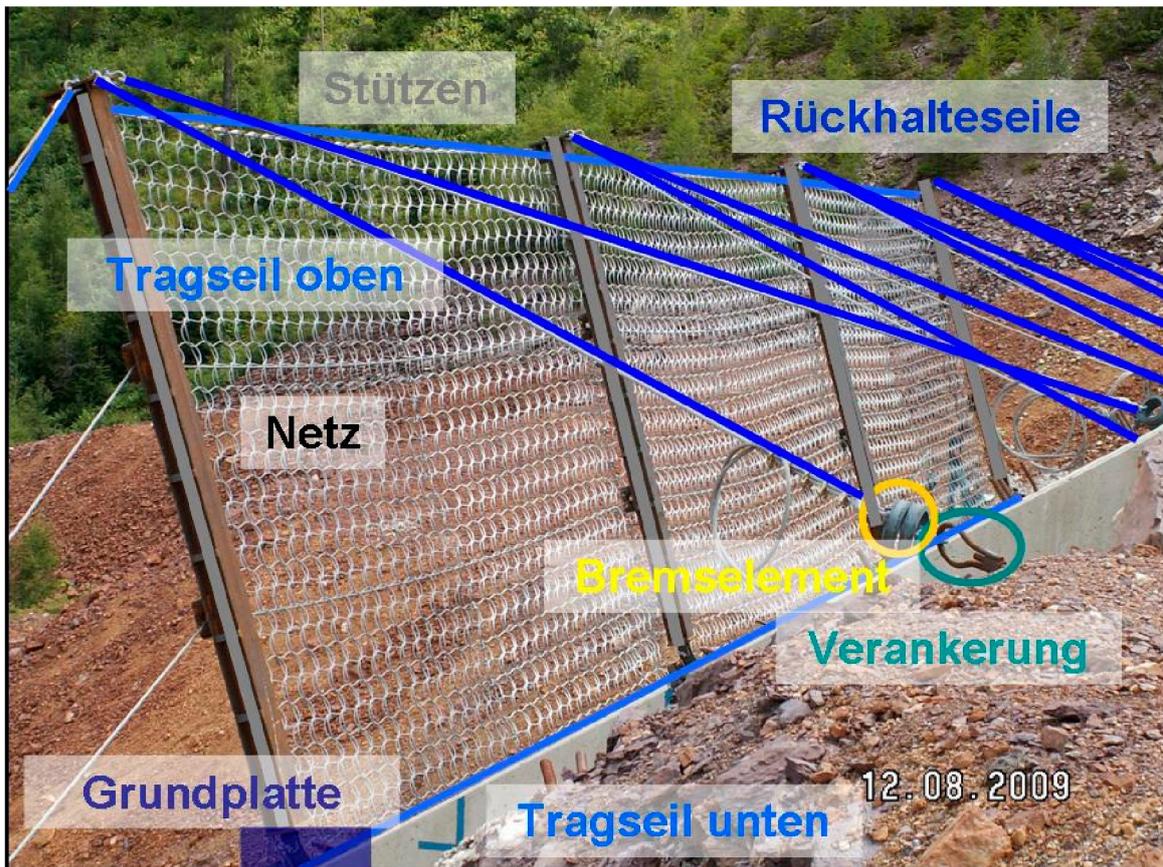


Abbildung 1: Seitenansicht eines Bausatzes für Steinschlagschutznetze

Energieeintrag Die kinetische Energie des Wurfkörpers beim Impact
SEL – Energieeintrag bei Gebrauchslast
MEL – Energieeintrag bei Maximallast

SEL-Versuch Der Energieeintrag entspricht der kinetischen Energie eines normalen Wurfkörpers beim Aufprall ins System (Abbildung 1). Der SEL-Test besteht aus zwei Schüssen, zwischen diesen ist keine Wartung des Systems zulässig. Der erste gilt als bestanden, wenn der Wurfkörper vom Bausatz gestoppt wird, es keine Brüche in den Verbindungskomponenten, Stützen und Seilen gibt, die Öffnung der Maschen des Netzes sich nicht um mehr als das Doppelte vergrößert hat, die Restnutzhöhe (ohne Entfernen des Wurfkörpers) des Bausatzes nach dem Versuch $\geq 70\%$ der Ausgangshöhe ist und der Wurfkörper

die maximale Auslenkung erreicht ohne den Boden zu berühren. Der zweite Schuss ist bestanden, wenn der Wurfkörper vom Schutznetz gestoppt wird und er die maximale Auslenkung erreicht ohne den Boden zu berühren.

MEL-Versuch Der Energieeintrag entspricht der kinetischen Energie eines genormten Wurfkörpers beim Aufprall ins System: $MEL \geq 3 \cdot SEL$. Der Versuch gilt als bestanden, wenn der Wurfkörper gestoppt und er die maximale Auslenkung erreicht ohne den Boden zu berühren.

Energieklasse Einteilung nach der Prüfenergie in 9 Energieklassen (Tabelle 1)

Die Steinschlagschutzsysteme werden nach den Energien der SEL- und MEL-Tests klassifiziert. Kein SEL-Test ist erforderlich für die Klassifizierung 0. Für die letzte Klasse wird der entsprechende Wert des SEL-Tests angegeben.

Tabelle 1: Klassen des Bausatzes für Steinschlagschutznetze - SEL-Test ETAG 027 [1]

Klassifizierung der Energieeinträge	0	1	2	3	4	5	6	7	8
SEL [kJ]	-	85	170	330	500	660	1000	1500	>1500
MEL\geq [kJ]	100	250	500	1000	1500	2000	3000	4500	>4500

Klassifizierung der Restnutzhöhe – MEL-Test ETAG 027 [1]

Kategorie A: Restnutzhöhe $\geq 50\%$ der Ausgangshöhe

Kategorie B: 30% Ausgangshöhe < Restnutzhöhe < 50% der Ausgangshöhe

Kategorie C: Restnutzhöhe $\geq 30\%$ der Ausgangshöhe

Bausatz für Steinschlagschutznetze

Er besteht aus mindestens drei funktionalen Netzmodulen und vier Stützen, einschließlich der benötigten Seile und Bremsenlemente (Abbildung 2).

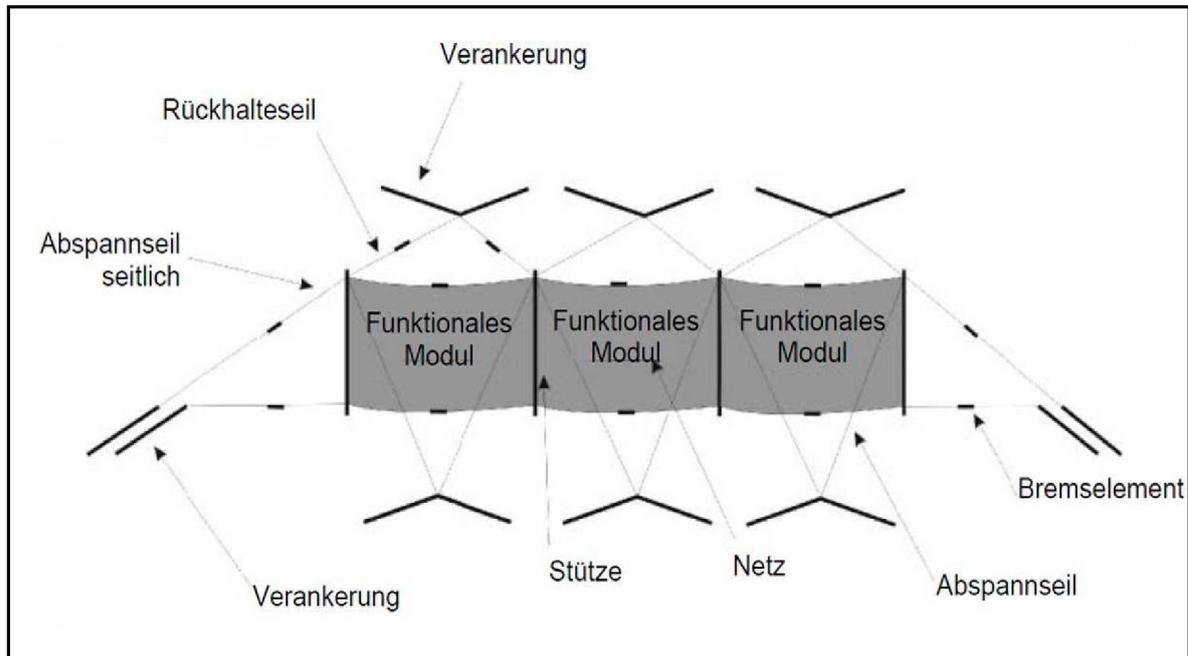


Abbildung 2: Rückansicht eines Bausatzes für Steinschlagschutznetze [1]

Referenzhang

Hang, der parallel zur Flugbahn verläuft und in den letzten Metern vor dem Einschlag eine maximale Abweichung von $\pm 20^\circ$ aufweist

Auslenkung

Entspricht dem Bremsweg des Wurfkörpers bis zum Umkehrpunkt seiner Flugbahn

Bremszeit

Zeitraum zwischen dem Impact und der maximalen Auslenkung

Ausgangshöhe h_N

des Netzes vor einer Belastung in Feldmitte rechtwinklig zur Bodenoberfläche gemessen (Abbildung 3)

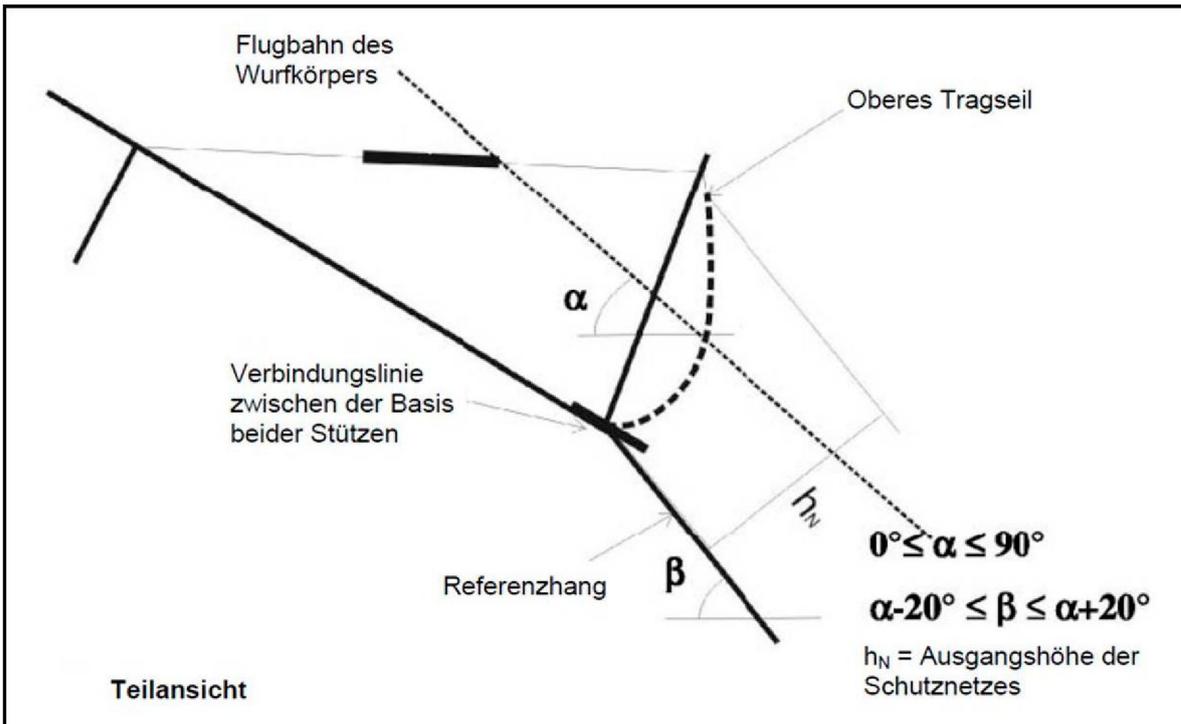


Abbildung 3: Ausgangshöhe des Schutznetzes [1]

Restnutzhöhe h_R des Netzes nach einer Belastung in Feldmitte rechtwinklig zur Bodenoberfläche gemessen, ohne Entfernung des Wurfkörpers (Abbildung 4)

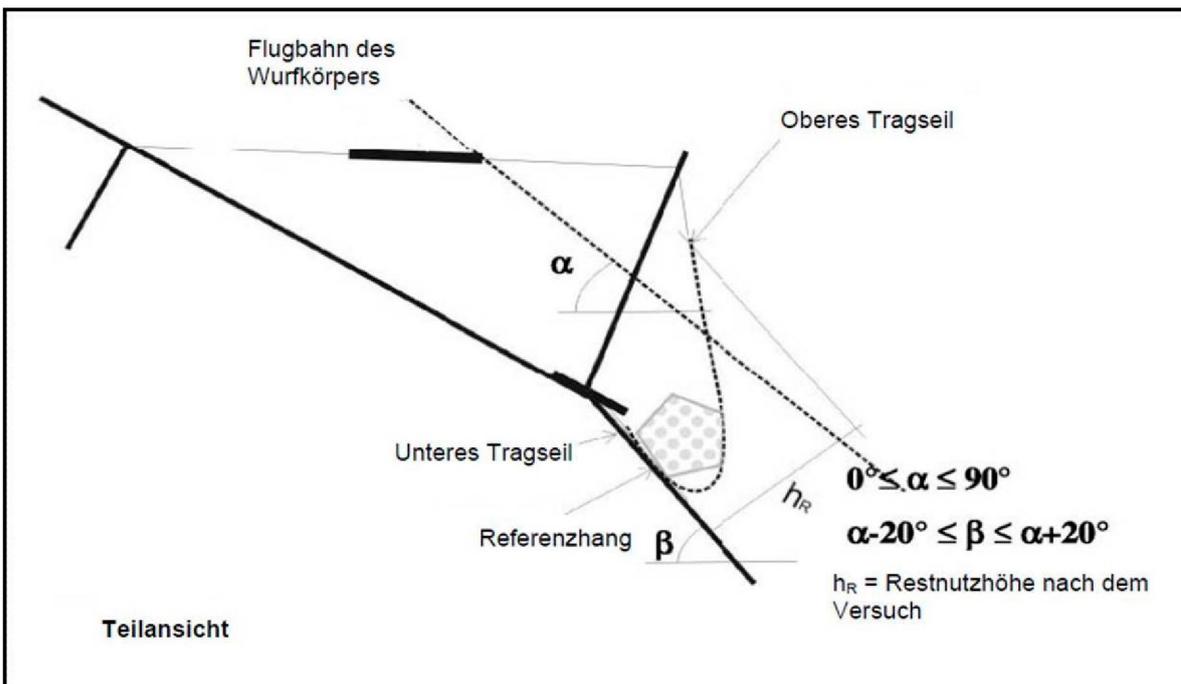


Abbildung 4: Restnutzhöhe [1]

Wurfkörper	Quaderförmiger Betonblock mit gleichen Seitenlängen s, wobei die Ecken auf einem Drittel der Seitenlänge abgeflacht sind (Abbildung 20)
Netze	Flächenhaft wirkendes Tragelement
Stützen	Teil der Stützkonstruktion, die Tragseile und Netze tragen
Tragseile	Tragelement zur Übertragung der Kräfte in die Stützen, Grundplatten und Rückhalteseile
Rückhalteseile	Bergseitige Seile zur Übertragung der Stützenkopfkkräfte in die Verankerungen
Abspannseile	Seile zur seitlichen Fixierung der Randstützen
Bremselemente	Elemente in Seilen, die Energie aufnehmen können
Grundplatten	Konstruktionsteil zur Verbindung der Stützen und eventuell der unteren Tragseile mit dem Fundament
Geflechtauflage	Bergseitig des Netzes befestigtes Drahtgeflecht
Verankerungen	Tragelement zur Übertragung der Seil- und Stützenkräfte in den Boden
Stützenabstand	Abstand zwischen zwei Stützen

2.2 Bezeichnungen

Die Begriffsdefinitionen stammen aus der ETAG 027 [1]. Diese Definitionen sind bildlich in Abbildung 5 und Abbildung 6 dargestellt.

α (deg)	Stützendrehung = Differenz der Stützenneigung infolge der Belastung
β (deg)	Winkel zwischen der Stütze und der Lotrechten
δ (deg)	Winkel zwischen der Stütze und der Hangsenkrechten
ψ (deg)	Hangneigung
a_l (m)	Stützenlänge
a_n (m)	Seilabstand = minimaler Abstand der oberen und unteren Tragseile nach Belastung
a_s (m)	Stützenabstand
a_v (m)	Seilabstand = minimaler Abstand der oberen und unteren Tragseile vor Belastung
b_e (m)	Endlage des Wurfkörpers nach Belastung
b_r (m)	Bremslauf = Längenänderung der Bremsselemente
b_s (m)	Länge des Bremsweges des Wurfkörpers (wird im Videobild gemessen)
d_o (m)	Durchhang des oberen Tragseiles in Feldmitte
d_u (m)	Durchhang des unteren Tragseiles in Feldmitte
h_n (m)	Restnutzhöhe = Netzhöhe nach Belastung
h_v (m)	Netzhöhe vor Belastung in der Hangsenkrechten gemessen
l_n (m)	Netzlänge zwischen dem oberen und unteren Tragseil nach Belastung (in Endlage)
l_v (m)	Netzlänge zwischen dem oberen und unteren Tragseil vor Belastung
s (m)	Kantenlänge des jeweiligen Wurfkörpers (Abbildung 20)
t_s (s)	Bremszeit = Zeitdauer zum zurücklegen des Bremsweges b_s

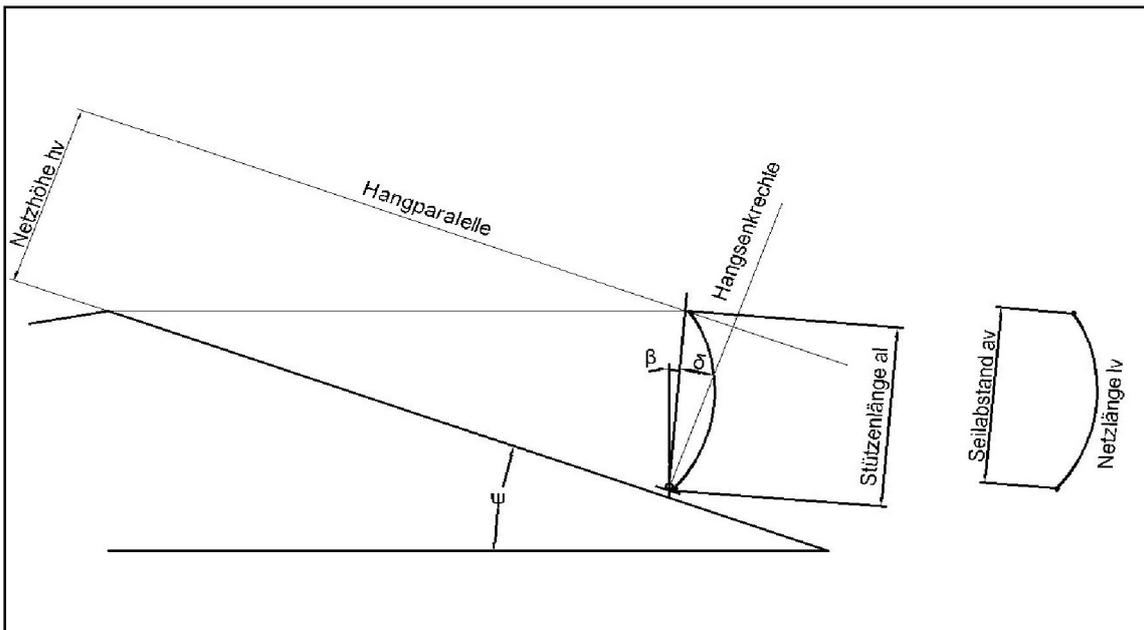


Abbildung 5: Bezeichnung der Winkel und Abmessungen

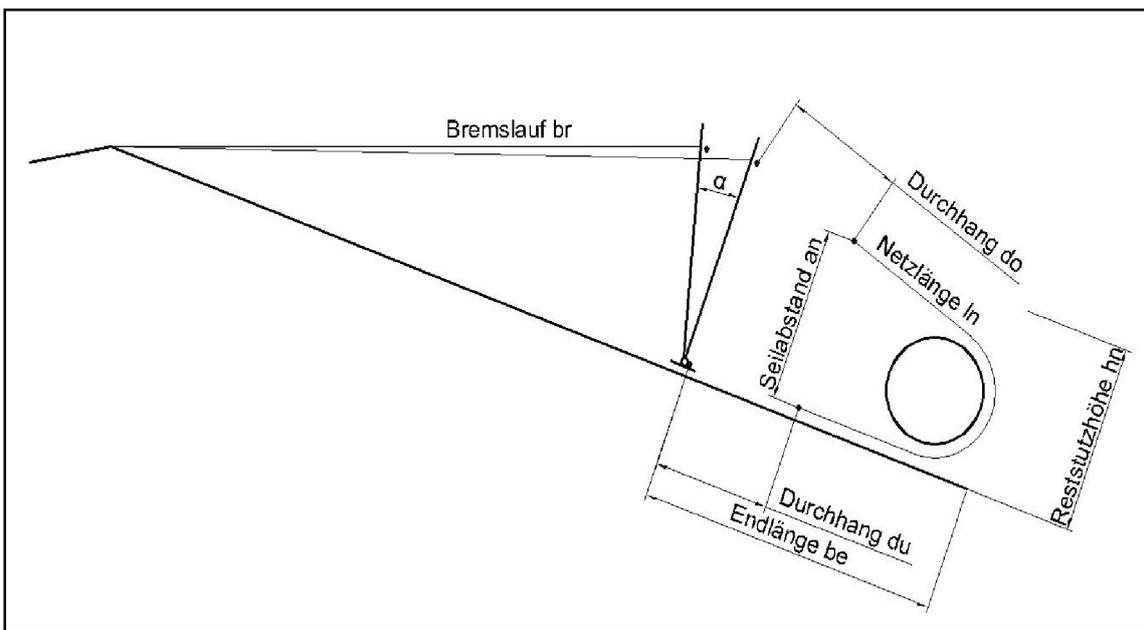


Abbildung 6: Lage der Tragseile nach der Belastung

3 Literatur

Veröffentlichungen zu diesem Thema in Europa gibt es hauptsächlich von den Ländern Schweiz und Italien. Einen Überblick über die geschichtliche Entwicklung der Steinfallschutzsysteme „Vom Holzzaun bis zu den heutigen hoch Energieabsorptionssystemen“ findet man in der Publikation [3]. Die meisten Publikationen beschäftigen sich mit dem Aufbau und der Verbesserung von Feldversuchen oder der Modellierung von Stein- und Blockschlägen [4] und [5]. Dieses Thema ist kein Bestandteil dieser Arbeit. Mit der Simulation von Netzsystemen beschäftigen sich die Publikationen [6] und [7], in diesen werden explizite Finite- Elemente Berechnungen verwendet. Zur Simulation diente das Finite- Elemente Programm Abaqus. Der einzige beschriebene Grund, warum man von diesem Abstand nahm und eigene Programme schrieb, war der Wunsch, über ein Berechnungssystem zu verfügen, das von teuren Lizenzen unabhängig ist. Feldversuchsergebnisse dienten der Systemkalibrierung.

Die Literaturrecherche zeigt, dass Abaqus ein geeignetes Berechnungsprogramm für die numerische Simulation dieser Fragestellungen darstellt.

In den folgenden Unterkapiteln werden kurz die wichtigsten Richtlinien auf diesem Gebiet in Europa erläutert.

3.1 Richtlinie über die Typenprüfung von Schutznetzen gegen Steinschlag 2001 mit Ergänzung 2006 - Schweiz

Eingeführt wurde die Richtlinie [2], um Systeme vergleichbar zu machen. Grundlage dafür war die Einführung einer neutralen und objektiven Prüfung. In dieser Richtlinie ist sowohl der Ablauf der Typenprüfung, die Einteilung der Systeme in Energieklassen und die Voraussetzung für den Erhalt von Subventionen, als auch die Aufgaben für die jeweiligen Fachleute geregelt. Diese Richtlinie gliedert sich prinzipiell in neun Teile, die Einleitung, den Zweck, die Abgrenzung, die Aufgaben der beteiligten Fachleute, die Definitionen und Bezeichnungen, die Typenprüfung, die Fundation, das Inkrafttreten und die Übergangsbestimmungen. Wesentlichster Unterschied zur ETAG 027 (Kapitel 3.2) ist, dass in der Schweizer Richtlinie auch die Anforderungen an das Fundament geregelt sind.

In Kapitel 5.2 „Definitionen allgemein zu Steinschlag“, werden die wesentlichen Begriffe gegeneinander abgegrenzt, hier ein Auszug der wichtigsten: [2]

<i>Steinschlag, Blockschlag</i>	<i>Fallen, Springen und Rollen von einzelnen Steinen ($\emptyset < 50 \text{ cm}$) und Blöcken ($\emptyset > 50 \text{ cm}$), wobei das Gesamtvolumen kleiner als 100 m^3 ist.</i>
<i>Felssturz</i>	<i>Sturz einer Feldmasse, die während des Sturzes bzw. beim Aufprall in Blöcke und Steine fraktioniert wird, wobei die Interaktion zwischen den Komponenten keinen massgebenden Einfluss auf die Dynamik des Prozesses haben.</i>
<i>Bergsturz</i>	<i>Absturz sehr grosser, im ursprünglichen Felsverband mehr oder weniger kohärenter Felsmassen unter Erreichung hoher Geschwindigkeiten, wobei der Transportmechanismus durch eine starke Wechselwirkung zwischen den Komponenten gekennzeichnet ist.</i>
<i>Aktive Massnahme</i>	<i>Schutzmassnahme, die dem Naturereignis aktiv entgegenwirkt, um die Gefahr zu verringern oder die Eintretenswahrscheinlichkeit wesentlich zu verändern (z.B. Schutznetze, Felsabdeckungen aus Netzen).</i>
<i>Passive Massnahme</i>	<i>Schutzmassnahme, die zu einer Reduktion des Schadens führen soll, ohne den Ablauf des Naturereignisses aktiv zu beeinflussen (z.B. raumplanerische Massnahmen).</i>

3.2 ETAG 027

Zu den wichtigsten Literaturquellen zählt die ETAG 027 [1], die europäische Richtlinie für Steinschlagschutzverbauungen, herausgegeben von der Europäischen Organisation für Technische Zulassungen (EOTA). In dieser Richtlinie ist genau festgelegt, welche Kriterien die Systeme erfüllen müssen.

Prinzipiell wird der Verbau in drei Gruppen gegliedert:

- Erstens in die **Fangstruktur**, welche den direkten Impact durch elastische oder plastische Verformung aufnehmen soll.
- Zweitens die **Abstützung**, welche nicht nachgiebig ist und die Verbindung zwischen der Fangstruktur und den Verbindungskomponenten darstellt.
- Drittens die **Verbindungskomponenten**, welche die Belastungen in den Grund übertragen sollen.

Hauptkomponenten und ihre Funktionen

Das Abfangen des Wurfkörpers erfolgt mittels Netzen, die üblicherweise aus Stahldrähten hergestellt werden. Das Netz fängt den Wurfkörper auf und überträgt die Energie durch elastische und plastische Verformung auf die Verbindungsteile, die Abstützung und das Fundament.

Die Abstützvorrichtungen können ganz unterschiedlich zusammengesetzt und gebaut werden. Diese können mit den Verbindungselementen, aber auch mit den Fangsystemen gekoppelt sein. Den Anbietern setzt die Richtlinie keine baulichen Grenzen. Ihre Aufgabe ist es, die Energie abzubauen, beziehungsweise eine kontrollierte Verformung zuzulassen, damit Spannungen verteilt und das System in Form gehalten wird.

Das Fundament und die Verankerung des Systems sind kein Bestandteil der ETAG 027.

4 **Versuchsanlagen**

In diesem Kapitel werden die prinzipiellen Versuchsanlagentypen vorgestellt.

Es gibt prinzipiell laut ETAG 027 zwei Anlagentypen:

- Schrägwurfanlagen
- Vertikalanlagen

Selbstverständlich ist es jedem Unternehmen freigestellt, noch zusätzliche Tests auf eigens konstruierten Anlagen durchzuführen. In diesem Kapitel wird eine dieser zusätzlichen Versuchsstätten vorgestellt, die von der WSL im Kanton Wallis betrieben wird.

Der Nachweis der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit für Steinschlagschutzsysteme kann zurzeit noch nicht rechnerisch erbracht werden. Aus diesem Grund sind für deren Gewährleistung Feldversuche im Maßstab 1:1 unerlässlich.

4.1 Schrägwurfanlage

Die Anlage wird von der Trumer Schutzbauten GmbH betrieben (Abbildung 7 - Abbildung 10), die Protokollierung der Prüfung übernimmt das Institut für Bergbaukunde an der Montanuniversität Leoben. Diese Anlage befindet sich am steirischen Erzberg Dreikönig Nord, die Anlagenkapazität ist derzeit mit 5 MJ begrenzt, somit bietet die Anlage die Möglichkeit, alle herkömmlichen Systeme nach den Richtlinien der EOTA zu prüfen. In der Anlage werden je nach Systemprüfung bis zu 16 Messzellen für die Bestimmung der Seilkräfte eingebaut. Mit diesen Zellen werden 2400 Messwerte pro Sekunde aufgezeichnet. Für die Bildauswertung werden die Versuche mittels High-Speed Kamera und Videokamera aufgezeichnet, diese werden normal zur Flugbahn positioniert und zeichnen bis zu 1000 Bilder pro Sekunde auf. Das Vorgängermodell dieser Versuchsanlage ist in der Publikation [8] beschrieben.



Abbildung 7: Schrägwurfanlage

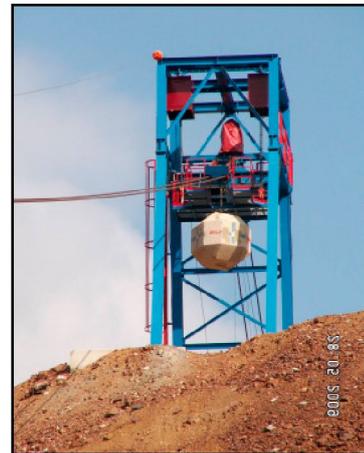


Abbildung 8: Schrägwurfanlage - Abwurf



Abbildung 9: Bremseselement für Laufkatze



Abbildung 10: Fangstruktur

4.2 Vertikalwurfanlage

Diese Anlage wird von der WSL gemeinsam mit der Geobruigg AG betrieben (Abbildung 11), welche die Anlage nutzt um eigene Systeme zu prüfen. Es können Wurfkörper bis zu einem Gewicht von 16 Tonnen getestet werden. In der Anlage sind je nach Systemprüfung bis zu 15 Messzellen installiert, welche die Seilkräfte ermitteln. Das Aufnehmen des Abbremsprozesses erfolgt mittels einer High-Speed Kamera, die bis zu 250 Bilder pro Sekunde aufnimmt. Die drei Netzfelder werden in einer Höhe von 15 m montiert, die Stützenneigung beträgt 30° gegenüber der Horizontalen.



Abbildung 11: Versuchsanlage Lochezen [9]

Die Besonderheit dieser Anlage ist, dass die Wurfkörper im Inneren mit einer Beschleunigungsmesstechnik (Abbildung 12) ausgestattet sind, mit welcher nachträglich der Abbremsprozess analysiert werden kann. Die Beschleunigungssensoren besitzen eine Abtastrate von 2000 bis 10000 Hz in einem Messbereich von ± 50 g zu ± 500 g.



Abbildung 12: Versuchskörper mit Beschleunigungssensoren [9]

In Lochezen, Schweiz, werden die Netze, Seile oder Bremsenlemente an einem 4 m x 4 m großen Versuchsrahmen aus Stahl (Abbildung 13), beim Aufprall der Steine untersucht.



Abbildung 13: Versuchsrahmen für Komponententests [9]

Die numerischen und analytischen Berechnungsmodelle werden mit diesen Daten überprüft. [9]

4.3 Versuchsanlage in Wallis

Im Kanton Wallis wurde von der WSL eine neue Versuchsanlage installiert (Abbildung 14). Diese besteht aus einer 20 m hohen Beschleunigungsrampe mit automatischem Steinauslösemechanismus oberhalb eines 50 m langen und 50° steilen Felsens. Durch diesen Versuchsaufbau ist es möglich, die wirkliche Bewegung von Steinschlägen zu simulieren – vom anfänglich senkrechten Fall des Steines, der in eine horizontale Flugbahn inklusive Rotation übergeht.



Abbildung 14: Versuchsanlage St. Leonhard [10]

Bei dieser Versuchsanlage wird die gesamte Teststrecke mittels High-Speed Kameras mit bis zu 250 Bildern pro Sekunde aufgenommen. Mit diesen Aufnahmen kann die Flugbahn der Steine, ebenso wie ihre Geschwindigkeit und kinetische Energie analysiert werden. Die Kräfte, die auf die Seile wirken werden mittels Kraftmessdosen mit einer Messrate von 2000 Hz berechnet. Zusätzlich werden die Daten, die aus dieser Versuchsanordnung stammen, für das Kalibrieren von Steinschlagsimulationsprogrammen verwendet. [10]

5 Beschreibung des untersuchten Systems

Beschreibung des 2000 kJ Systems

Vor jedem Versuch (Abbildung 15) werden die Systemkomponenten mit der Geräteliste überprüft und deren Einbau kontrolliert. Nach dem Versuch (Abbildung 16) werden die Komponenten abermals kontrolliert, vermessen und eventuell aufgetretene Mängel notiert. In Abbildung 15 bis Abbildung 18 ist deutlich ersichtlich, wie sich das System verformt. Entscheidend dabei ist, dass die maximal zulässige Systemverformung laut ETAG 027 [1] nicht überschritten wird.



Abbildung 15: Steinschlagverbauung vor dem Versuch



Abbildung 16: Steinschlagverbauung nach dem Versuch



Abbildung 17: Bremsenlemente vor & nach dem Versuch



Abbildung 18: Mittleres Verbaufeld vor & nach dem Versuch



Abbildung 19: Stützenfuß 2 vor & nach dem Versuch

5.1 Komponentenliste

Komponentenliste für den Versuchsaufbau V0709 der Trumer Schutzbauten mit der Auftrag Nr.: E07, 08,09-09

Projektbeschreibung BVH Steinschlagversuch 07-09, TSC-2000-ZD, MEL Test

Steinschlagversuch 08-09, TSC-2000-ZD, SEL Test

Steinschlagversuch 08-09, TSC-2000-ZD, SEL Test

Beschreibung

Pos.1

Steinschlagschutzsystem TSC-2000-ZD, Höhe 5.0 m – Oberbau, Stützstruktur roh,

Drahtseile nach EN12385-4, verzinkt nach EN10244-2, Klasse B, Omeganetz verzinkt nach EN10244-2, Klasse A

Basisdaten:

Werkhöhe	5 m
Energie	2000 kJ
Reihengesamtlänge	30 m
Anzahl der Reihen	1 Reihe
Zwischenabspannung	keine
Stützenabstand	10 m
Anzahl der Stützen	4
MEL	30 m
SEL	30 m

Stützenstruktur

Anzahl

Steinschlagstütze aus HEA 220, S 355 J2, roh, Trägerlänge 5120 mm	4
Grundplatte 790 x 250 x 20 mm, S 355 J2, mit aufgeschweißtem Ankeranschlagswinkel, roh (mit Rohrführung)	4
Gelenksbolzen Ø30 mm, Länge 130 mm, S 355 J2, roh, inkl. Splint	4
Unterlegscheiben 100 x 100 x 10 Ø45 mm nicht angesenkt, verzinkt	8

Drahtseile

Tragseil Ø22 mm, 6 x 36WS+IWRC, 1770 N/mm², verzinkt, einseitig verpresst mit Kausche

Länge 61 m, Reihe 1, MEL (12109014) 1

Länge 51 m, Reihe 1, MEL (12109003) 1

Länge 51 m, Reihe 1, SEL (12109014) 1

Mittelseil Ø20 mm, 6 x 19S+IWCR, 1770 N/mm², verzinkt, einseitig verpresst mit Kausche

Länge 50 m, Reihe 1, MEL (1218060) 2

Länge 50 m, Reihe 1, SEL (1218060) 2

Rückhalteseil Ø22 mm, 6 x 36WS+IWRC, 1770 N/mm², verzinkt, einseitig verpresst mit Kausche, Länge 21.5 m MEL (12109004) 1

Rückhalteseil Ø22 mm, 6 x 36WS+IWRC, 1770 N/mm², verzinkt, einseitig verpresst mit Kausche, Länge 11.5 m MEL (12109002 x 5, 1210903 x 2) 7

Seitenabspannseil Ø20 mm, 6 x 19S+ IWRC, 1770 N/mm², verzinkt, einseitig verpresst mit Kausche, Länge 11.5 m MEL (1218065) 2

Seitenabspannseil Ø20 mm, 6 x 19S+ IWRC, 1770 N/mm², verzinkt, einseitig verpresst mit Kausche, Länge 11.5 m MEL (1218060) 2

Netzrandseil Ø12 mm, 6 x 19S+IWRC, 1770 N/mm², verzinkt, einseitig verpresst, Länge 6.5 m MEL + SEL (12109052) 2

Bremselemente

Bremselement für Rückhalteseile AVT phx 60/30, 2.5 Umdrehungen, S 355 J2+N, roh, MEL, 9C7	8
Bremselement für Tragseile AVT phx 60/30, 3.5 Umdrehungen, S 355 J2+N, roh, MEL, 9D3	4
Bremselement für Mittelseil AVT phx 60/30, 4.5 Umdrehungen, S 355 J2+N, roh, MEL, 9C9	8
Bremselement für Rückhalteseile AVT phx 60/30, 2.5 Umdrehungen, S 355 J2+N, roh, SEL, 9C7	8
Bremselement für Tragseile AVT phx 60/30, 3.5 Umdrehungen, S 355 J2+N, roh, SEL, 9C8	4
Bremselement für Mittelseil AVT phx 60/30, 4.5 Umdrehungen, S 355 J2+N, roh, SEL, 9C9	8

Omeganetze 9.0/185, verzinkt nach EN10204-2, Klasse A

Reihe 1, MEL 5.00 x 5.35 m (090009, 34894)	2
Reihe 1, MEL 5.00 x 5.35 m (11409006; 10.46)	4
Reihe 1, SEL 5.00 x 5.35 m (11409006; 10.46)	4

Kleinteile

Schäkel 7/16“hochfest, geschweift, verzinkt (FK12) Netzverbindung	160
Schäkel 5/8“ hochfest, geschweift, verzinkt (FK12) Netzrandseile	2
Schäkel 7/8“ hochfest, geschweift, verzinkt (FK12) Mittelseile, Seitenabspannung, Rückhalteseile	44
Schäkel 1“ hochfest, geschweift, verzinkt (H3, FH20) Tragseile	8
Rundkauschen RW 22/IW 60 mm für Seil Ø18 -20 mm, verzinkt	4
Rundkauschen RW 28/IW 65 mm für Seil Ø22 -24 mm, verzinkt	10
Bügelseilklemmen nach EN13411-5, NG 22, verzinkt und gelb chromatiert	60
<u>Pos.2 Weitere Artikel</u>	
Ankerbügel Ø30 mm, IBO 38 roh, 9EC	30

5.2 Versuchsbeschreibung

5.2.1 Massebestimmung des Wurfkörpers

Zu den Versuchsvorbereitungen zählt auch die Bestimmung der Masse des Wurfkörpers (Abbildung 21). Diese wird in der Regel eine Woche vor dem Test, am Tag des Einschießens bestimmt. Die Masse wurde in diesem Fall am 22.06.2009 durch drei unabhängige Messungen bestimmt, dabei ergab sich ein Wert von 5253 kg. Die Kantenlänge des Wurfkörpers (Abbildung 20) ist bekannt und beträgt 1.42 m, damit konnte das Volumen (2.03 m^3), die mittlere Dichte (2.590 kg/m^3) und der Durchmesser der umschriebenen Kugel (1.739 m) berechnet werden.

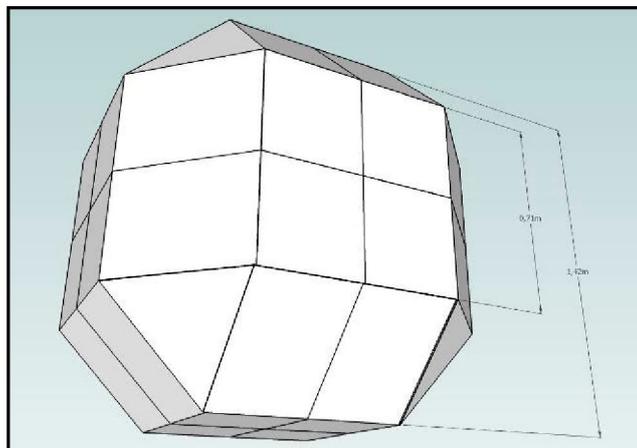


Abbildung 20: Geometrie des Wurfkörpers



Abbildung 21: Massebestimmung für das System TSC-2000-ZD

5.2.2 Zellenoffsets

Vor dem Einbau der Messzellen werden die Zellenoffsets bestimmt, um ihre Funktionen und ihre elektrischen Eigenspannungen zu bestimmen, welche dann von den gemessenen elektrischen Spannungen abgezogen werden, um die tatsächlichen Werte der Seilkräfte zu erhalten.

5.2.3 Einschießen

Vor jedem Versuch wird geprüft, ob der Wurfkörper mit den gewählten Einstellungen der Wurfanlage die richtige Flugbahn erreicht (Abbildung 23). Um die Bilder auswerten zu können, ist es notwendig vorher einen Maßstab (Abbildung 22) aufzunehmen. Anhand des Maßstabes ist es später möglich, die Pixel (horizontal als auch vertikal) in Meter umzurechnen und somit die genaue Trefferposition des Netzes zu bestimmen. Durch Kenntnis der Verbauhöhe und dessen Neigung kann die genaue Treffposition des Wurfkörpers vorausberechnet werden. Mit Hilfe der Bildauswertung, kann die Geschwindigkeit des Wurfkörpers und die verursachte Energie beim Einschlag in den Verbau bestimmt werden.



Abbildung 22: Maßstab beim Einschießen



Abbildung 23: Einschießen

5.2.4 Einstellungen für den Versuch

Vor dem Versuch werden die Zellen auf ihre Funktionstüchtigkeit überprüft, die Aufzeichnung und Überwachung der Messung erfolgt mittels des Softwareprogramms CatMan. Es werden 2400 Messwerte aufgezeichnet.

6 Auswertung der Daten

In diesem Kapitel werden:

- der Weg von der Durchführung der Feldversuche bis zur Generierung der Daten für die Simulation,
- die getroffenen Annahmen, die im Laufe der Auswertung nötig wurden, um eine Berechnung mit den gegebenen Daten zu ermöglichen,

beschrieben.

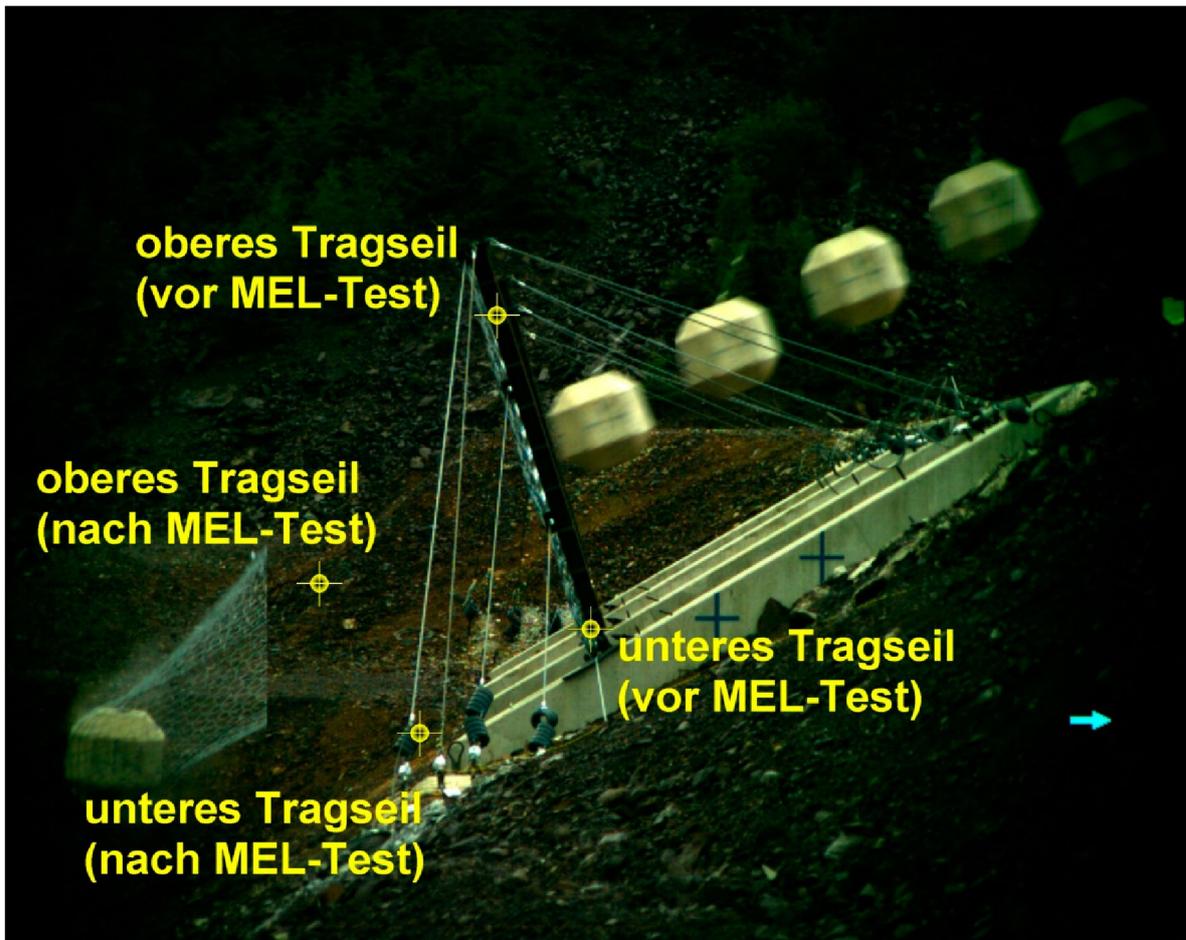


Abbildung 24: Versuchsabfolge [11]

6.1 Bildauswertung

Die Grundlage für die Auswertung bilden die Bilder der High-Speed Kamera (Abbildung 28). Die Erhöhung der Pixelzahl, von 1280 x 1024 auf 7680 x 6144 entspricht einer 600 % Pixel-Verkleinerung, dadurch wird der absolute Auswertungsfehler minimiert. Das Koordinatensystem wird so gewählt, dass die z-Achse vertikal, die x-Achse horizontal und die y-Achse in Verbaurichtung steht (Abbildung 25). Das Bildbearbeitungsprogramm GIMP fand bei der Auswertung Verwendung. Die Pixel aus dem Bild können mit Hilfe des aufgenommenen Maßstabes umgerechnet werden. Daraus resultierend ergibt sich ein Maßstab für die Horizontale (x-Achse) von 2.42 mm und für die Vertikale (z-Achse) von 2.44 mm pro Pixel.

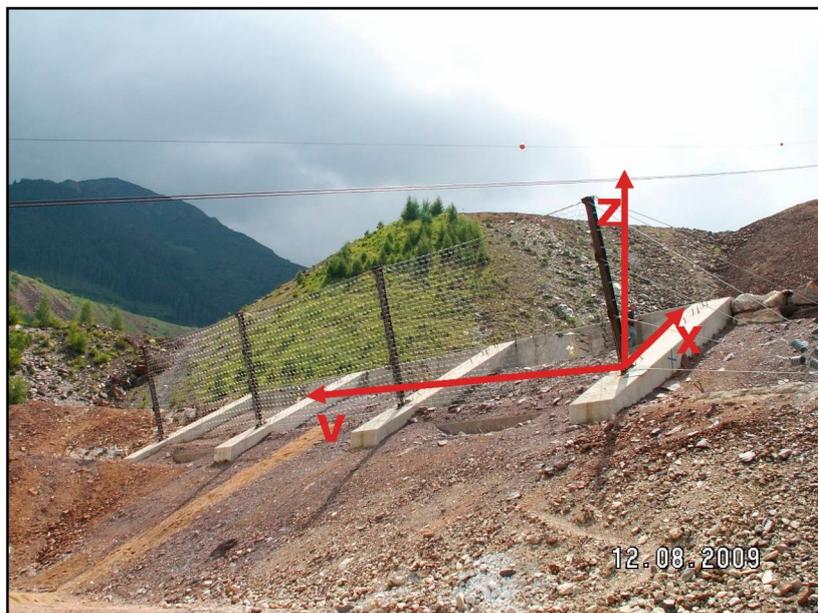


Abbildung 25: Globales Koordinatensystem

Die Koordinaten für die Stützenfüße kommen aus dem Lageplan der Versuchsanlage. Die Ausgangskordinaten für die Stützenköpfe ergeben sich aus den vor dem Versuch aufgenommenen Stützenneigungen. Genauer Kenntnis über die Stützenneigung jeder einzelnen Stütze hat man nur vor und nach dem Versuch. Die Bildauswertung ist während des dynamischen Prozesses die einzige Möglichkeit, die Neigung der Stützen zu bestimmen. Aufgrund der gewählten Kameraposition ist es anfangs nur schwer möglich den Neigungswinkel der

Stütze 1 zu bestimmen. Er kann erst bestimmt werden, wenn Stütze 1 im Bild deutlich von Stütze 2 unterscheidbar wird, und nicht mehr davon verdeckt wird. Es wird angenommen, dass Stütze 1 & 4 und Stütze 2 & 3 sich gleich verhalten, da sie sich auf den Bildern deckungsgleich präsentieren. Daraus ergibt sich zwangsläufig ein Ablesefehler, der bei einer Nachbearbeitung geglättet werden muss. Da für die Simulation nur der Verlauf bis zum Knicken der Stütze relevant ist, finden die Bilder ab Bild 44 „Zeitpunkt des Impacts“ bis einschließlich Bild 93 „Zeitpunkt des Knickens“ Verwendung (Abbildung 26 und Abbildung 27).

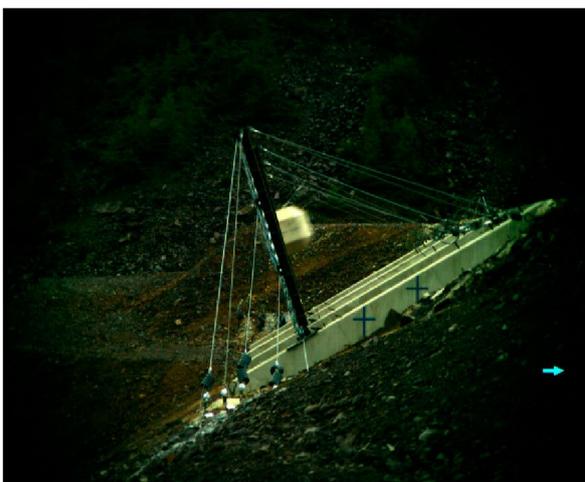


Abbildung 26: Bild 44 - Impact

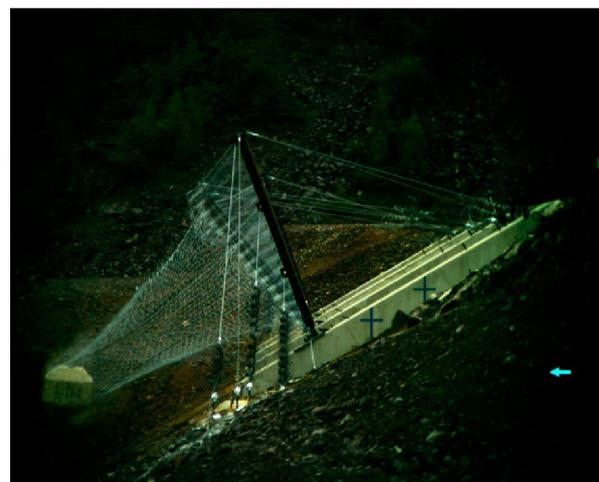


Abbildung 27: Bild 93 - Knickfall



Abbildung 28: Kameras

6.2 Seilkräfte

Die Messzellen (Abbildung 29 und Abbildung 30) zeichnen 2 bis 3 Messdaten pro 0.001 Sekunde auf (in einer geometrische Reihe von -2-2-3-2-3-). Daraus resultiert, dass jedem Bild nach manuellem Festlegen des Impactzeitpunktes 19 Messwerte zugeordnet werden.



Abbildung 29: Kraftmesszellen für Tragseile



Abbildung 30: Kraftmesszelle

6.4 Koordinaten der Seile

Die mittleren Seilabspannungen wurden grafisch in x- & z-Richtung gemessen (Abbildung 33). Die y-Richtung konnte über geometrische Beziehungen der Versuchsanlage berechnet werden (Abbildung 34). Das obere Tragseil wurde ähnlich wie die mittleren Seile grafisch ausgewertet, in y-Richtung folgt es allerdings einer anderen geometrischen Form angenähert durch eine Parabel. Sie liegt in einer anderen Ebene als die Aufnahme der Seilführung, deswegen war die Einführung eines lokalen Koordinatensystems notwendig. Die Daten aus dem globalen Koordinatensystem müssen in das lokale Koordinatensystem transformiert und mit Hilfe der geometrischen Beziehungen gelöst und wieder in das globale Koordinatensystem überführt werden. Die allgemeine Parabelgleichung (1) diente der Berechnung.

$$y = ax^2 + bx + c \quad (1)$$

Die drei Unbekannten können durch Aufstellen der Gleichung für drei bekannte Punkte der Parabel ermittelt werden. Diese Punkte der Parabel werden grafisch durch die Koordinaten für das obere Tragseil an den Stützen 2 & 3 und dem Scheitelpunkt der Parabel bestimmt. Durch Ableiten der Parabelgleichung erhält man die Tangente an die Parabel und somit die Richtung des Seilkraftvektors, der danach wieder in das globale Koordinatensystem transformiert wird. Mit Hilfe dieser Beziehung kann also die Richtung der Seilkräfte für alle Tragseile bestimmt werden.

Das untere Tragseil muss nicht berücksichtigt werden, da es auf der Bodenplatte geführt wird und somit nicht die Stützenneigung beeinflusst.

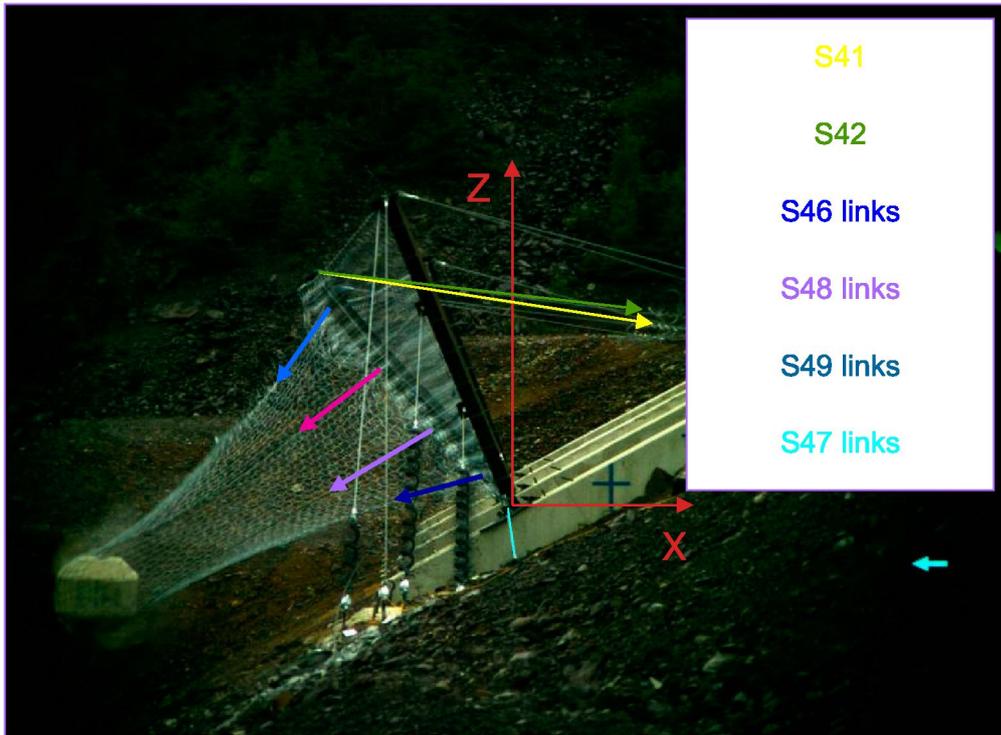


Abbildung 33: Ermittlung der Richtungsvektoren – Seil

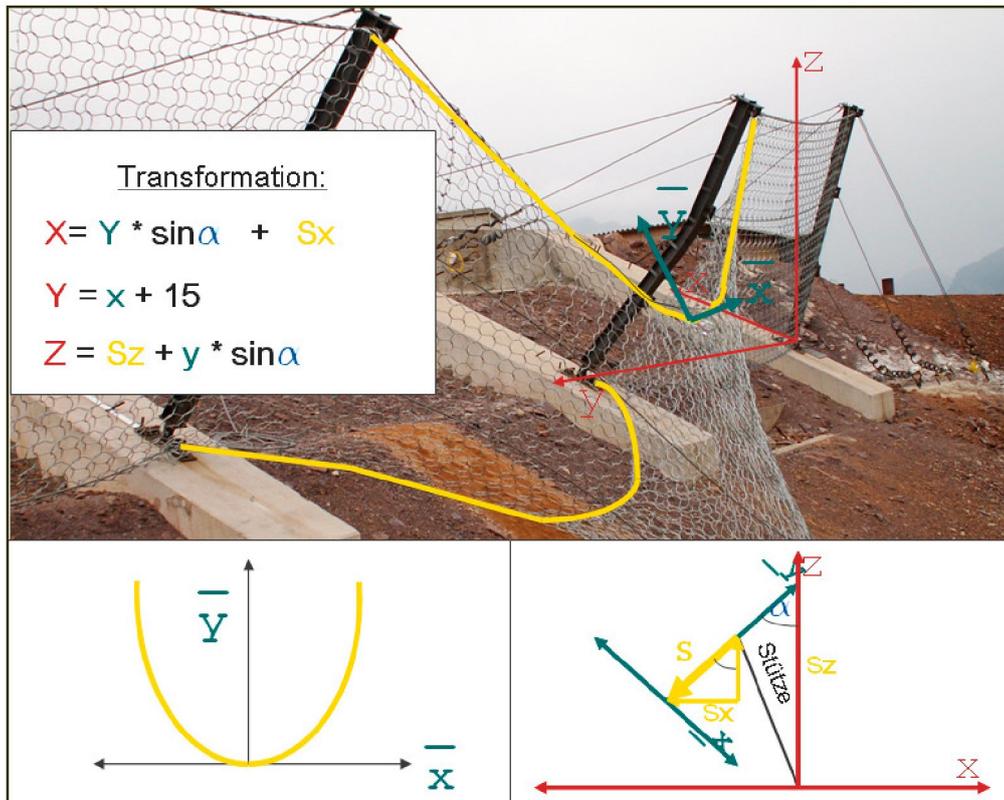


Abbildung 34: Lokales Koordinatensystem

6.5 Richtungsvektoren der Rückhalteseile

Die Koordinaten der Anker, in denen die Rückhalteseile montiert werden, sind bekannt. Aufgrund des bereits bestimmten oberen Stützenpunktes kann man die Richtungsvektoren der Rückhalteseile berechnen.

Die Rückhalteseile sind die einzigen Kräfte, deren Beträge mit den Messzellen direkt an der Stütze 2 gemessen werden können (Abbildung 35). Die anderen Seilkräfte werden außen, nach zweimaligem Umlenken an den Stützen 2 & 1 gemessen.



Abbildung 35: Messung der Kräfte direkt / indirekt

7 Analytisches Modell

Die Basis dieses Modells ist die starrkörpermechanische Beschreibung der Rotation der Stütze um die y-Achse während des Versuchs.

In Abbildung 36 ist die schematische Darstellung der Stütze 2 mit den auf sie wirkenden Seilkräften dargestellt. „S“ steht für Seilkraft, die Ziffern danach stehen für die Nummer der eingebauten Messzelle, links und rechts bezeichnen die Feldseite (Abbildung 52). Die Seilkraft S47 spielt für diese Berechnungen keine Rolle, da sie unterhalb des Stützengelenks geführt wird (Abbildung 19) und somit keinen Einfluss auf die Bewegung der Stütze hat.

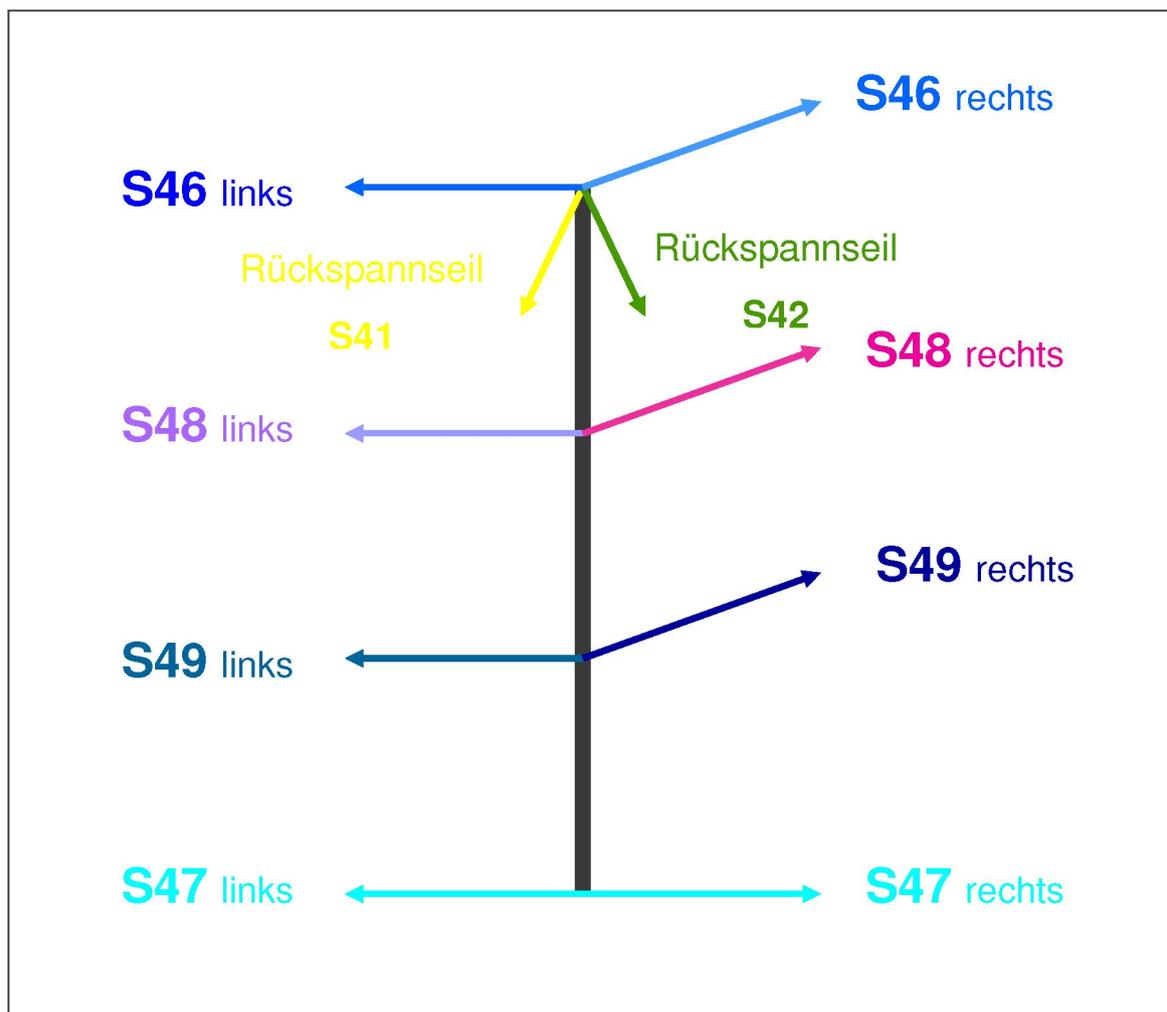


Abbildung 36: Angriffspunkte der Seilkräfte

7.1 Berechnung der Vektoren

Für die Berechnung ist es notwendig die Kräfte als dreidimensionale Vektoren darzustellen. Damit erzielte man die Verknüpfung der Bildauswertung mit den Aufzeichnungen der Kraftmessdosen. Für die Bestimmung der Richtungsvektoren mussten zunächst die Koordinaten der Anlenkpunkte ermittelt werden, wie im vorigen Kapitel 6 Auswertung der Daten beschrieben.

Für die Bestimmung der wirkenden Seilkräfte auf die Stütze ist es notwendig, dass der Betrag der Kraft, ihre Wirkungslinie und die Orientierung bekannt sind (2).

$$\vec{F} = F \vec{x} = F \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

Die Seilkräfte wirken an der Stütze immer paarweise (Abbildung 36), man kann diese zwei Kräfte auch einer resultierenden Kraft zuschreiben. Entscheidend ist jedenfalls, dass die Wirkungslinien dieser Kräfte im Allgemeinen nicht genau die Trägerlängsachse schneiden und somit ein Torsionsmoment zur Folge haben. Generell gilt für den Momentenbetrag einer Kraft \vec{F} in einem Bezugspunkt, Gleichung (3), wobei \vec{r} den Ortsvektor vom Bezugspunkt zum Angriffspunkt darstellt.

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} = \begin{pmatrix} r_x \\ r_y \\ r_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

7.2 Analytische Berechnung

Der Drallsatz (4) stellt das Analogon zum Schwerpunktsatz der klassischen Mechanik dar. Dabei entspricht dem Massenträgheitsmoment $I^{(A)}$ die Masse m , der Winkelbeschleunigung $\ddot{\phi}$ die Schwerpunktsbeschleunigung a und dem Moment $M^{(A)}$ die Kraft F . Der hochgestellte Index (A) bezeichnet den Bezugspunkt.

$$\sum_i M_i = I_i \ddot{\phi} \quad (4)$$

Der Drallsatz wird für die Stütze 2 (Abbildung 36) um die y-Ebene (Abbildung 25) angeschrieben. Daraus ergibt sich die Drallsatzkomponente in y-Richtung. Das Massenträgheitsmoment für die Stütze 2 in y-Richtung wird vereinfacht mit Formel (5) berechnet.

$$I_y = \frac{1}{3} m L^2 = 2158.32 \text{ kgm}^2 \quad (5)$$

Die Idee besteht darin, die noch unbekanntes beziehungsweise durch die Messung ungenügend genau bestimmten Seilkräfte dadurch zu ermitteln, dass die sich aus einer dynamischen Analyse des Trägers als Starrkörper ergebende Rotationsbewegung mit der aus der Bildanalyse gewonnenen Bewegung in Übereinstimmung gebracht wird. Als Ausgangspunkt werden die Messwerte für die Abspannseile als gegeben vorausgesetzt, da diese ja wie in Kapitel 6.5 unmittelbar ohne Verluste gemessen werden können. Die Messwerte für Tragseile (oberes, mittleres, unteres) müssen jedoch etwas korrigiert werden, da man aufgrund des oftmaligen Umlenkens bis zur Messzelle nicht mehr die original an der Stütze 2 wirkenden Kräfte vorliegen hat. Es besteht nun die Möglichkeit, diese Reibungsverluste über den aus der Bildauswertung erkennbaren Umlenkwinkel mit Hilfe der Euler-Eytelwein Gleichung (6) abzuschätzen und die gemessenen Seilkräfte damit entsprechend zu korrigieren. Angenommen wurde, dass die Reibung 0.5 beträgt. Der Umschlingungswinkel η muss in Radiant eingesetzt werden.

$$S_{links} = S_{rechts} e^{0.5\eta} \quad (6)$$

Diese Methode allein reicht jedoch nicht aus, um die Bewegung der Stütze richtig abbilden zu können. Man ist vielmehr darauf angewiesen die Seilkräfte für jedes

Zeitinkrement jeweils so anzupassen, dass daraus sich ein realistisches Inkrement des Neigungswinkels ergibt. In Abbildung 37 sieht man die Stützenbewegung der optischen Auswertung im Vergleich zu der mittels Drallsatz berechneten Bewegung nach Anpassung der Seilkräfte mittels realistischer Faktoren. Diese befinden sich zwischen 0.7 – 3, die Rückhalteseile wurden nicht verändert.

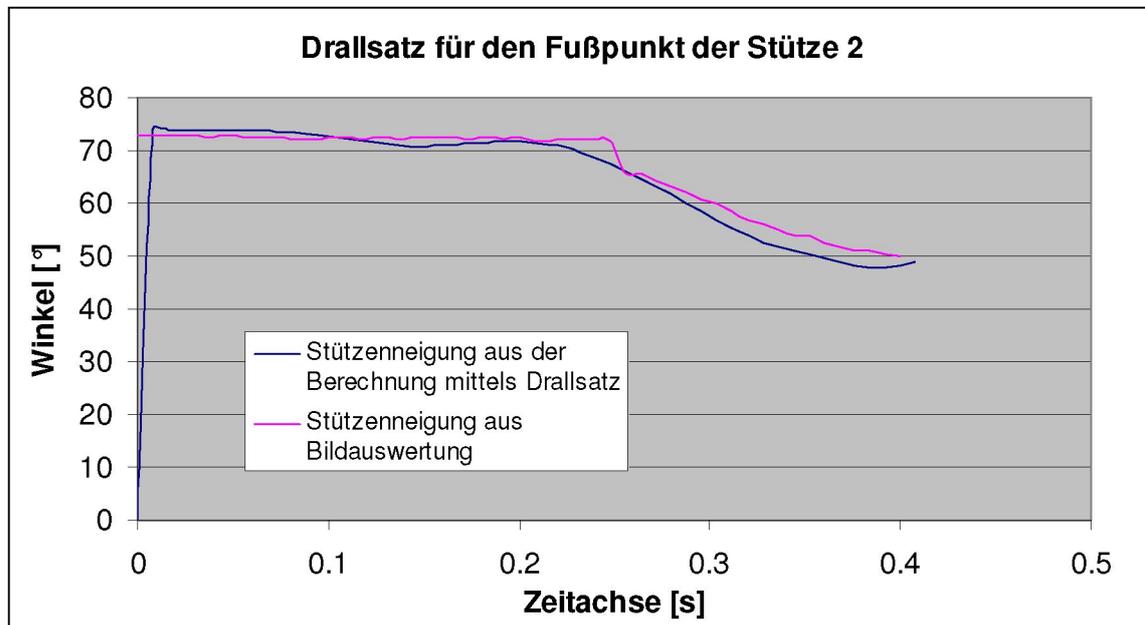


Abbildung 37: Analytische Berechnung – Stützenneigung

Leider führt so eine Vorgehensweise zu unnatürlich fluktuierenden Seilkräften, weshalb in weiterer Folge von dieser Methode Abstand genommen wird. Stattdessen müssen die Seilkräfte so gewählt werden, dass ihre Momentenwirkung auf den Drehpunkt (d.h. auf den Auflagerpunkt der Stütze), einerseits dem Trend des aus den Messwerten ermittelbaren Gesamtmoments folgt und andererseits im Großen und Ganzen die beobachtete Drehbewegung widerspiegelt. Zu diesem Zweck wird die zeitliche Momentenentwicklung durch ein Polynom angenähert, welches nach zweimaliger Integration (7) wieder eine polynomiale Annäherung der Entwicklung des Neigungswinkels (8) zur Folge hat.

1.Ableitung
$$\dot{\phi}_1 = \dot{\phi}_0 + \frac{\Delta t}{2}(\ddot{\phi}_0 + \ddot{\phi}_1) \quad (7)$$

2.Ableitung
$$\phi_1 = \phi_0 + \frac{\Delta t}{2}(\dot{\phi}_0 + \dot{\phi}_1) \quad (8)$$

7.3 Ergebnisse der analytischen Berechnung

Abbildung 38 zeigt den berechneten Verlauf des Neigungswinkels als Funktion der Zeit im Vergleich mit den Messungen. Die Kräfte in den Tragseilen werden dabei zunächst, wie in Kapitel 7.2 „Analytische Berechnung“ beschrieben, inkrementell angepasst. Das führte allerdings zu starken Fluktuationen im zeitlichen Verlauf des Gesamtmoments im Auflagerpunkt (Abbildung 39). In Abbildung 40 und Abbildung 41 sieht man die umgekehrte Betrachtung, wenn der Momentenverlauf angepasst wird. Daher wurde dazu übergegangen, die zeitliche Entwicklung des Neigungswinkels als Polynom zu beschreiben (Abbildung 42), den der in Abbildung 43 gezeigte Momentenverlauf zugrunde liegt. Offensichtlich ist eine hinreichend genaue Übereinstimmung mit den experimentellen Daten nicht möglich. Es mehren sich die Hinweise, dass insbesondere die gemessenen Kräfte in den Abspannseilen am Ende der Bewegung zu hohe Werte aufweisen. Daher wird in weiterer Folge von den analytischen Betrachtungen Abstand genommen und auf eine numerische Berechnung übergegangen.

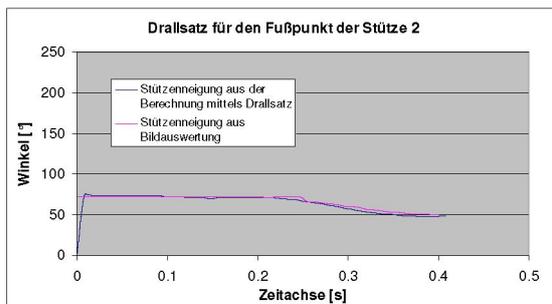


Abbildung 38: Anpassung Bewegung



Abbildung 39: Anpassung Bewegung - resultierender Momentenverlauf

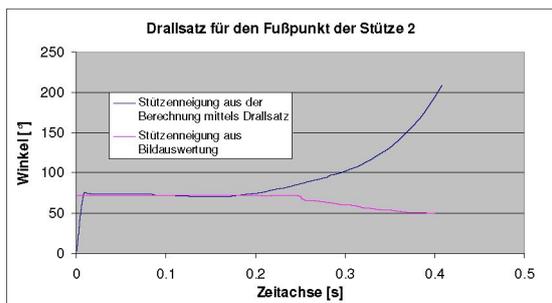


Abbildung 40: Anpassung Momentenverlauf – resultierende Bewegung



Abbildung 41: Anpassung Momentenverlauf – resultierende Bewegung

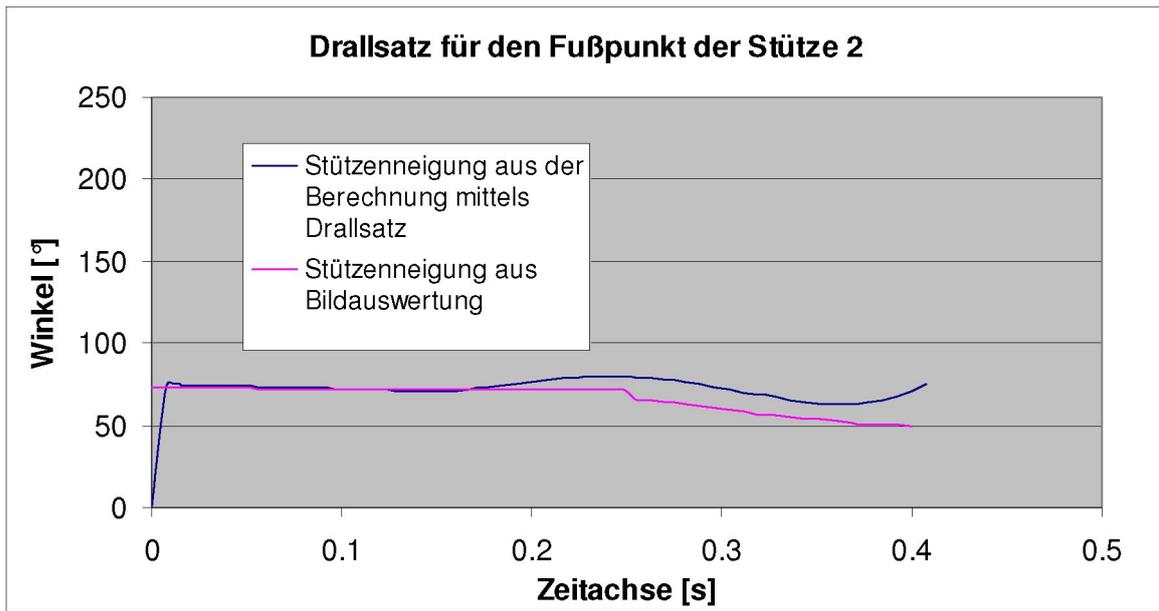


Abbildung 42: Stützenbewegung

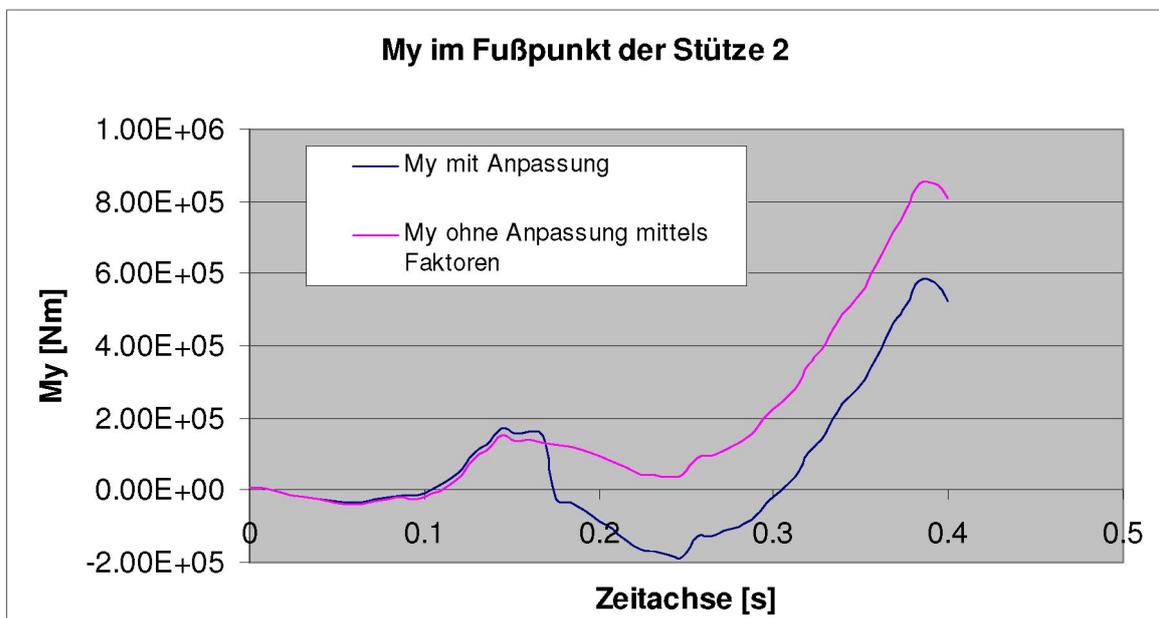


Abbildung 43: Momentenverlauf

8 FEM Modell

Für das numerische Modell wird die im Ingenieurwesen weit verbreitete Finite-Elemente- Methode (FEM) verwendet. Der grundsätzliche Ablauf einer solchen Analyse ist in groben Zügen in Abbildung 44 skizziert. Dabei fand das Programm Abaqus Version 6.9-1 Anwendung. Details zu den Hintergründen der FE- Methode findet man in einer Vielzahl von Fachbüchern, zum Beispiel [12], [13] und [14] oder auf den Internetseiten www.simulia.com und www.abaqus.com.

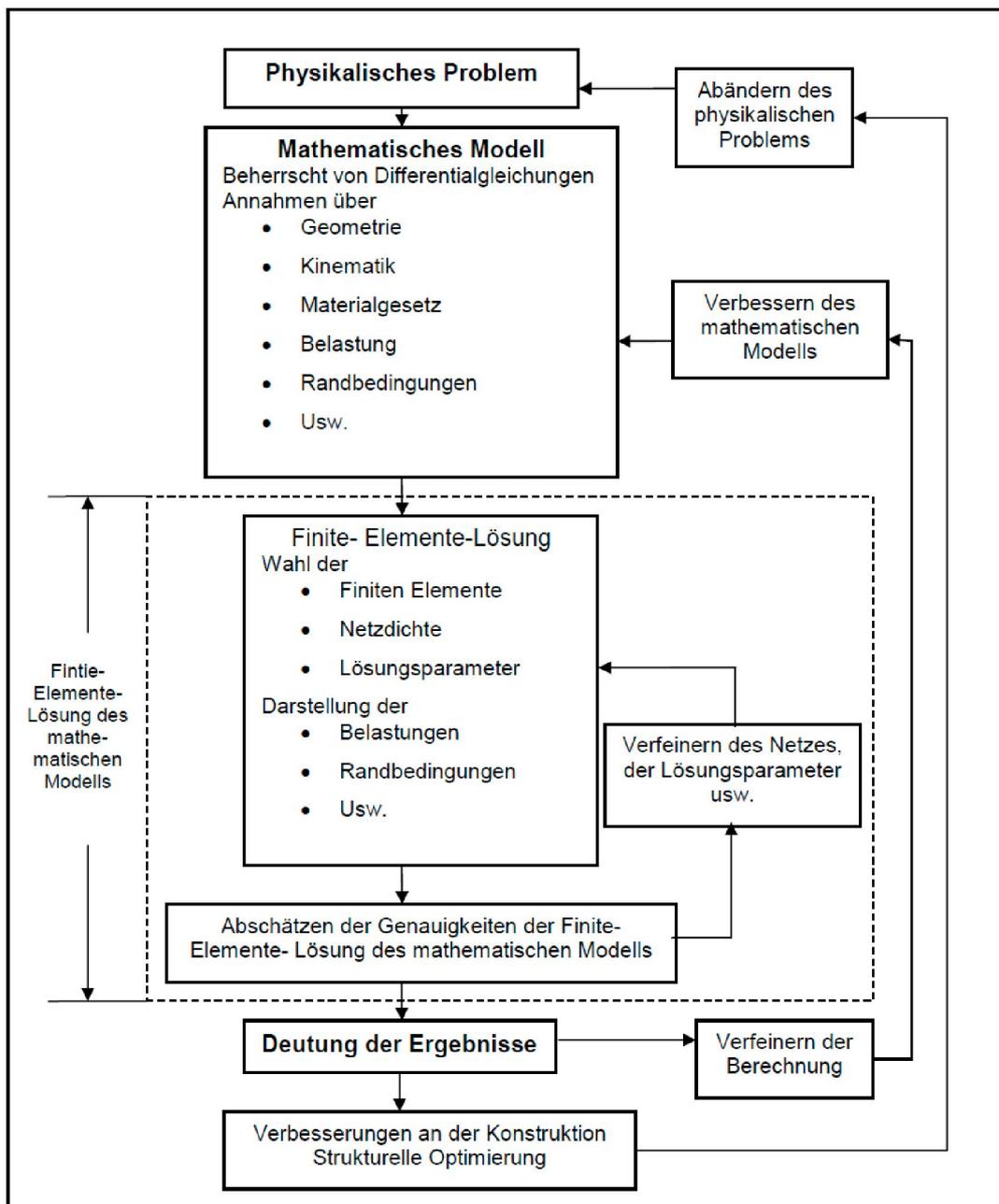


Abbildung 44: Der Prozess einer Finite- Elemente Berechnung [12]

Nichtlinearitäten

Die gegebene Problemstellung stellt insofern eine besondere Herausforderung hinsichtlich numerischer Simulation dar, als eine Vielzahl von Effekten auftritt, die nichtlineare Lösungsverfahren erfordern. Das muss insofern erwähnt werden, weil derartige Algorithmen die Belastung in kleinen Zeitschritten (Inkrementen) aufbringen, innerhalb derer durch iterative Verfahren ein Gleichgewichtszustand gefunden werden muss. Daraus resultiert eine große Anzahl an algorithmischen Operationen, welche unter Umständen zu langen Rechenzeiten führen können.

Es gibt prinzipiell drei Quellen für Nichtlinearitäten, wobei in dem zu untersuchenden System alle auftreten.

1 Geometrische Nichtlinearitäten

ergeben sich durch die Berücksichtigung großer Verformungen des Systems, das heißt die Verzerrungs- und Verschiebungs- Beziehungen dürfen nicht mehr linearisiert werden.

2 Nichtlineares Materialverhalten

findet man bei den Seilen, diese können zwar Zug, aber keinen Druck übertragen. Beim starken Ausdehnen der Bremsen verformen sich diese plastisch. Ein solches Materialverhalten kann ebenfalls nicht mehr mit einem linearen Materialgesetz abgedeckt werden.

3 Kontakt und Reibung

durch zunehmende Belastung des Systems verändern sich auch die Randbedingungen. In dem hier betrachteten Fall treten mit dem Eintreffen des Wurfkörpers in den Verbau, sowohl Kontakt als auch Reibkräfte auf.

Für die numerische Lösung der Bewegungsgleichungen stehen grundsätzlich zwei Verfahren zur Verfügung. Das ist zunächst einmal das implizite Zeitintegrationsverfahren, bei dem der Verschiebungszustand im jeweils nächsten Zeitpunkt $t+\Delta t$ auf iterativem Weg durch aufwändige Lösung eines gekoppelten Gleichungssystems berechnet wird. Diese Methode kommt zwar mit nur wenigen Zeitinkrementen aus, die Lösungssuche dauert allerdings innerhalb eines Zeitinkrements sehr lange. Im Gegensatz dazu arbeitet das explizite Zeitintegrationsverfahren innerhalb eines Inkrements sehr effizient, da das gekoppelte Gleichungssystem zu einer Serie von Einzelgleichungen zerfällt. Der große Nachteil dieser Methode besteht darin, dass dafür das Zeitinkrement eine gewisse kritische Größe nicht überschreiten darf, um numerisch stabil zu bleiben. Dieses Stabilitätskriterium ist sehr einschränkend und führt dazu, dass explizite Verfahren sehr viele Zeitinkremente benötigen und sich daher eher nur für Vorgänge kurzer Dauer eignen. Der hier betrachtete Impact erfüllt diese Voraussetzungen in beinahe idealer Weise, weshalb in dieser Arbeit die explizite Methode, die im Programm Abaqus/Explicit realisiert ist, Anwendung findet.

Bei diesem MEL-Test der Klasse 2000 kJ knickte zum Schluss eine der Innenstütze (Stütze 2). Im Vordergrund steht die Vorhersage des I-Trägers (Stütze 2), daher wird dieses Element separat modelliert und mit den Kräften aus Kapitel 6 „Auswertung der Daten“ beaufschlagt.

8.1 Modell – Träger

Das Trägermodell (Abbildung 45) wurde insofern vereinfacht, so dass die für die Berechnung verantwortlichen Charakteristika erhalten bleiben. Beispielsweise zeigen die Ergebnisse der Simulation ganz deutlich, dass für das strukturelle Verhalten der Stütze die Kopf- und Bodenplatte eine wichtige Rolle übernehmen. Dieses Modell besteht aus 5176 Elementen, die Verbindung zwischen Kopf- beziehungsweise Bodenplatte und dem I-Träger wird mit „Tie constraint“ erzeugt. Die Bewegung der Stütze ergibt sich durch Aufbringen der räumlichen Kraftvektoren (Kapitel 6.4). In den folgenden Unterkapiteln wird der Aufbau dieses Modells genau beschrieben.

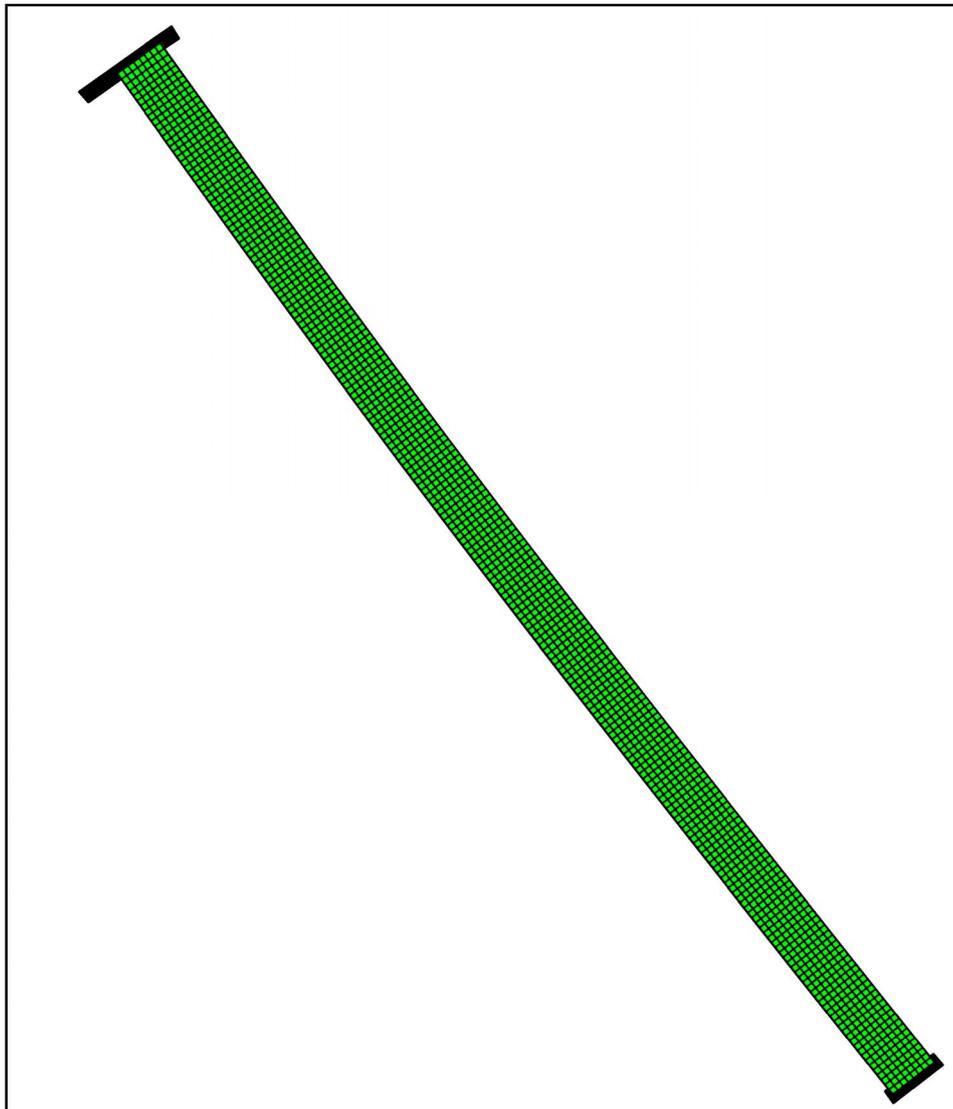


Abbildung 45: Modell Träger- vor Versuch (xz- Ebene)

8.1.1 Elementtyp

In diesem Modell werden Strukturelemente des Typs „S4R“ für die Stütze und die Kopf- und Bodenplatte verwendet (Abbildung 46), dargestellt sind die Knoten 1 bis 4 als auch die Integrationspunkte (1 bis 4) gekennzeichnet mit einem „x“. Details zu diesem Elementtyp finden sich in der Publikation [15]. Jeder Knoten hat 3 Verschiebungs- und 2 Verdrehfreiheitsgrade. Dieses Element eignet sich für die Modellierung dünnwandiger Konstruktionen, wie z.B. das Stegblech und die Flanschbleche des I-Trägers.

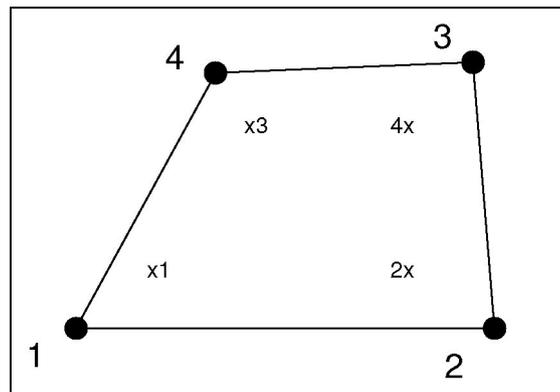


Abbildung 46: Strukturelement - Schalenelement S4R

8.1.2 Materialeigenschaften

8.1.2.1 Spannungs- Dehnungsdiagramm

Die Stützen sind aus einem Baustahl mit der Bezeichnung S 355 J2 gefertigt. Abaqus verlangt als Input für das Materialverhalten der Stützen folgende Wertepaare: σ , ε^{pl} . Die Fließkurve dieses Werkstoffs wurde am Institut für Umformtechnik der Montanuniversität Leoben mit Hilfe eines Zugversuchs ermittelt. Die solcherart gemessene Last-Verschiebungskurve entspricht zunächst unmittelbar der technischen Spannung über der technischen Dehnung aufgetragen (Abbildung 47). Diese Werte ergeben sich, wenn man den Kraft-, sowie den Verschiebungsmesswert jeweils auf die unverformte Ausgangsgeometrie bezieht. Für Abaqus müssen diese Daten erst in wahre Größen, also wahre Spannung (9) und wahre Dehnung (10) umgerechnet werden, dass heißt Kraft und Verschiebung beziehen sich auf die jeweils aktuelle, verformte Geometrie. Der E-Modul des S 355 J2 beträgt 193000 MPa und die

Querkontraktionszahl 0.3. Die Fließkurve kann mit mehrern Wertepaaren multilinear angenähert werden.

Gilt im Bereich der Gleichmaßdehnung:

$$\sigma = \frac{(1 + E) S}{1 + E^{el} (1 - 2\nu)} \quad (9)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + E) \quad (10)$$

$$E^{el} = \frac{S}{D} \quad (11)$$

- | | | | |
|----------|---------------------|---------------|-------------------------------|
| σ | wahre Spannung | ε | wahre Dehnung |
| E | technische Dehnung | E^{el} | elastische technische Dehnung |
| S | technische Spannung | ν |Querkontraktionszahl |
| D | E-Modul | | |

Tabelle 2: Umrechnungstabelle –technische in wahre Größen

techn. Spannung	techn. Dehnung		wahre Spannung	wahre Dehnung
N/mm ²	%	-	N/mm ²	-
375.70000	0.00	0.0000	375.40769	0.0000
376.92308	1.25	0.0125	381.33672	0.0124
400.00000	2.50	0.0250	409.66039	0.0247
453.84615	3.75	0.0375	470.42290	0.0368
484.61538	5.00	0.0500	508.33559	0.0488
538.46154	10.00	0.1000	591.64742	0.0953
553.84615	15.00	0.1500	636.19281	0.1398
546.15285	20.00	0.2000	654.64241	0.1823

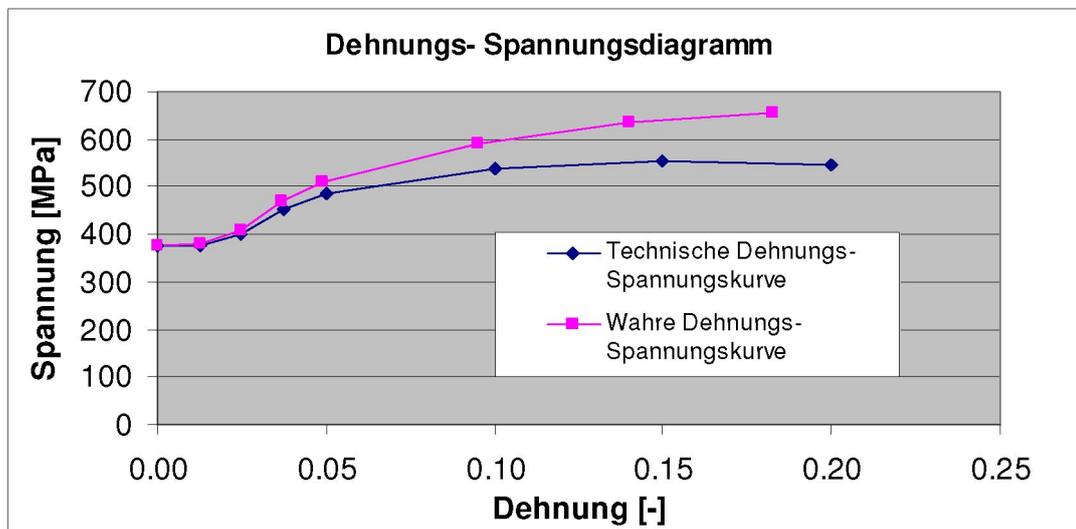
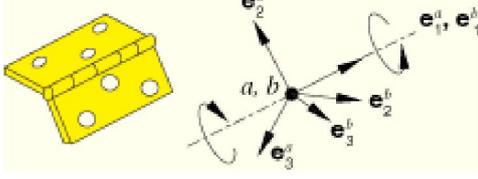
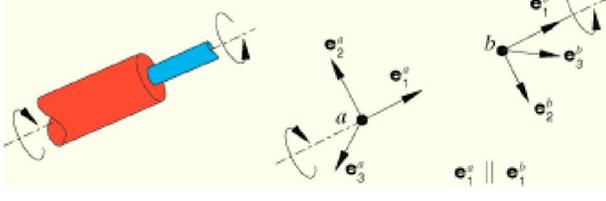
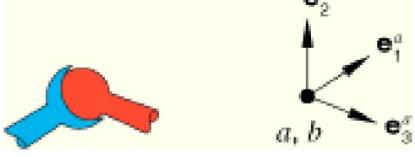


Abbildung 47: Dehnungs- Spannungsdiagramm S 355 J2

8.1.3 Randbedingungen

Dieses Modell kommt mit einer einzigen Randbedingung für den Stützenfuß aus. Es gibt in Abaqus prinzipiell drei verschiedene Ausbildungsarten für Gelenke:

<p>1. Scharnier 1 Verdrehfreiheitsgrad</p>	
<p>2. Sattelgelenk 2 Verdrehfreiheitsgrade</p>	
<p>3. Kugelgelenk 3 Verdrehfreiheitsgrade</p>	

Es wird ein Scharnier für die Simulation des Stützengelenks (Abbildung 48) gewählt. Dies entspricht insofern nicht ganz der Realität, weil die Lagerung im Stützenfuß bis zu einem gewissen Grad auch seitlich kippen kann, wenn man den Endzustand des Gelenks (Abbildung 49) betrachtet.



Abbildung 48: Fußgelenk der Stütze 2 vor Versuch



Abbildung 49: Fußgelenk der Stütze 2 nach Versuch

8.1.4 Kraftaufbringung

Die Stützenbewegung resultiert aus den Messwerten der High-Speed Kamera. Die Verschiebungen der Seilanlenkpunkte der mittleren Tragseile sind somit zu jedem Zeitpunkt bekannt und können als inhomogene Randbedingungen im FE-Modell aufgebracht werden. Am Stützenkopf werden hingegen die gemessenen Kräfte in den Rückspannseilen in Form von Punktlasten aufgebracht. Man beachte, dass die Kraftangriffspunkte etwas außermittig liegen und daher nur über das im Modell am Stützenkopf vorgesehene Abschlussblech aufgebracht werden können. Man beachte ferner, dass die Kraftresultierende nicht durch den Schubmittelpunkt des Trägerprofils verläuft, somit also ein zusätzliches Torsionsmoment auf den Träger ausübt. Die Stütze wurde im Stützenfuß mittig aufgelagert, d.h. im dort liegenden Knoten des FE-Netzes wurden die entsprechenden Freiheitsgrade gesperrt.

8.1.5 Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 50 zeigt nun die Verformungen der Stütze am Ende der Bewegung. Die dargestellte Variable ist die sogenannte akkumulierte plastische Dehnung, die zentrale Größe in den meisten Schädigungsmodellen.

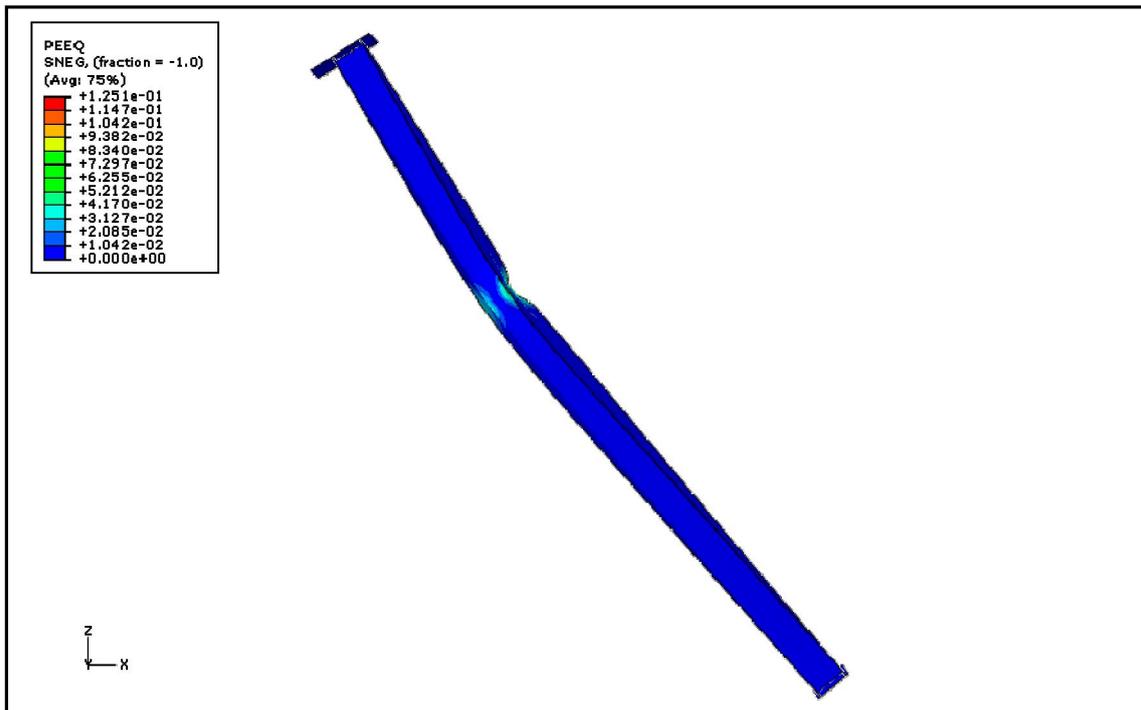


Abbildung 50: Modell Träger - nach Versuch (xz- Ebene)

Der Vergleich mit der Aufnahme aus Abbildung 51 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Deformationsfigur. Allerdings muss erwähnt werden, dass dieses Ergebnis nur dann zu erzielen ist, wenn die Rückspankräfte mit einem Faktor 0.5 abgemindert werden, was allerdings auch schon die analytischen Vorausbetrachtungen nahelegen. Eine mögliche Ursache dieser Diskrepanz zwischen den Messwerten und den sich aus der Modellierung zwingend ergebenden Zahlenwerten für diese Rückspankräfte könnte darin liegen, dass die Bildauswertung nicht perfekt mit der Signalauswertung synchronisiert wurde. Dieser Problematik kann, durch die Entwicklung neuer Messzellen, die direkt mit der High-Speed Kamera gekoppelt sind, Abhilfe geleistet werden. Dieses Projekt ist bereits in Planung. Wie Abbildung 50 zeigt, biegt sich die Stütze aus der xz- Ebene heraus. Diese schiefe Biegung ergibt sich aus der Exzentrizität der Belastung und wird auch im Experiment beobachtet.

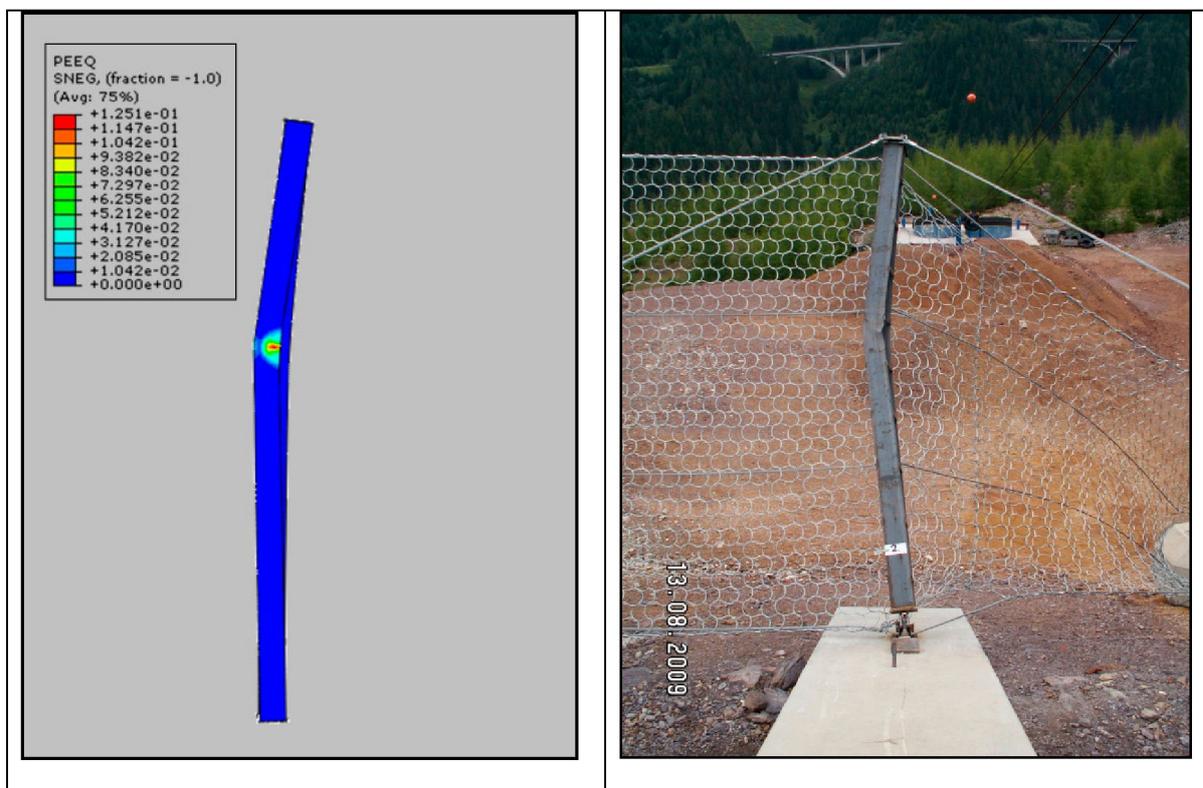


Abbildung 51: Modell Träger - nach Versuch (zy- Ebene)

8.2 Modell - Fangkonstruktion

Die Simulation entwickelte sich von Modell Träger (Kapitel 8.1) zum Modell Fangkonstruktion. Das Ergebnis des Modells Träger ist, was die Stützenbewegung betrifft, erst dann zufriedenstellend, wenn die Rückspankräfte, wie oben beschrieben, abgemindert werden. Das Modell Fangkonstruktion kommt mit weniger Annahmen aus, da sich die Richtungen der Seilkräfte rein durch Vorgeben der Wurfkörperbewegung ergeben, die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Seilkraftvektoren können so reduziert werden.

Das Modell Fangstruktur wird berechnet und dargestellt. Dieses Modell ist symmetrisch (Abbildung 52) bezüglich der xz- Ebene. Es wird deshalb nur die linke Seite simuliert (Abbildung 58). Wesentlichster Unterschied zum Modell Träger (Kapitel 8.1) ist, dass in diesem Modell das gesamte System simuliert wird. Es ist in diesem Modell nicht mehr notwendig, die Kraftvektoren an der Stütze aufzugeben. Der Wurfkörper wird mitsimuliert, wobei ihm dessen Bewegung vorgegeben wird, daraus resultiert die Verformung des Systems. Die Bremsenlemente werden nicht separat modelliert. Stattdessen wird deren nichtlineares Verformungsverhalten den Rückspanseilen zugerechnet. Das ist deshalb möglich, weil zu jedem Zeitpunkt sowohl die Seilkräfte als auch die Distanz zwischen den Seilanlenkpunkten bekannt ist, daraus lässt sich also ein effektives Materialverhalten der Seile ableiten.

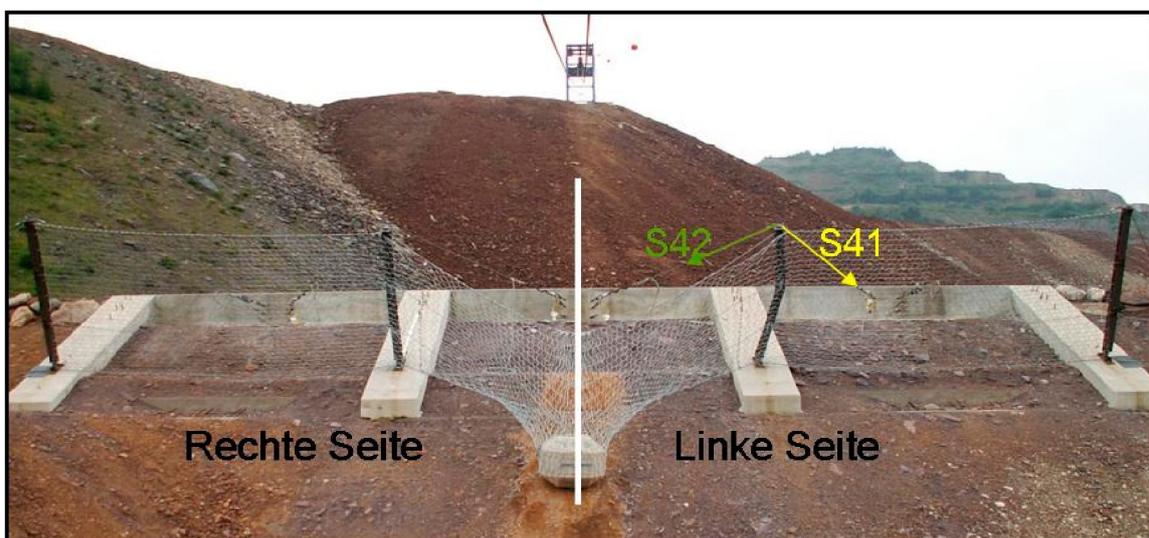


Abbildung 52: Fangkonstruktion – Steinschlagtest nach dem Versuch

8.2.1 Koordinatenbestimmung des Wurfkörpers

Die Schwerpunktkoordinaten des Wurfkörpers stammen aus der Bildauswertung. Die Flugbahn bis zum Eintreffen in den Verbau folgt der Form einer Parabel, die hier mit sehr guter Näherung durch eine Gerade ersetzt wird (Abbildung 53). In Abbildung 54 ist in grün die zeitliche Änderung des Wurfkörper-Schwerpunkts und in gelb die angenäherte Gerade dargestellt.

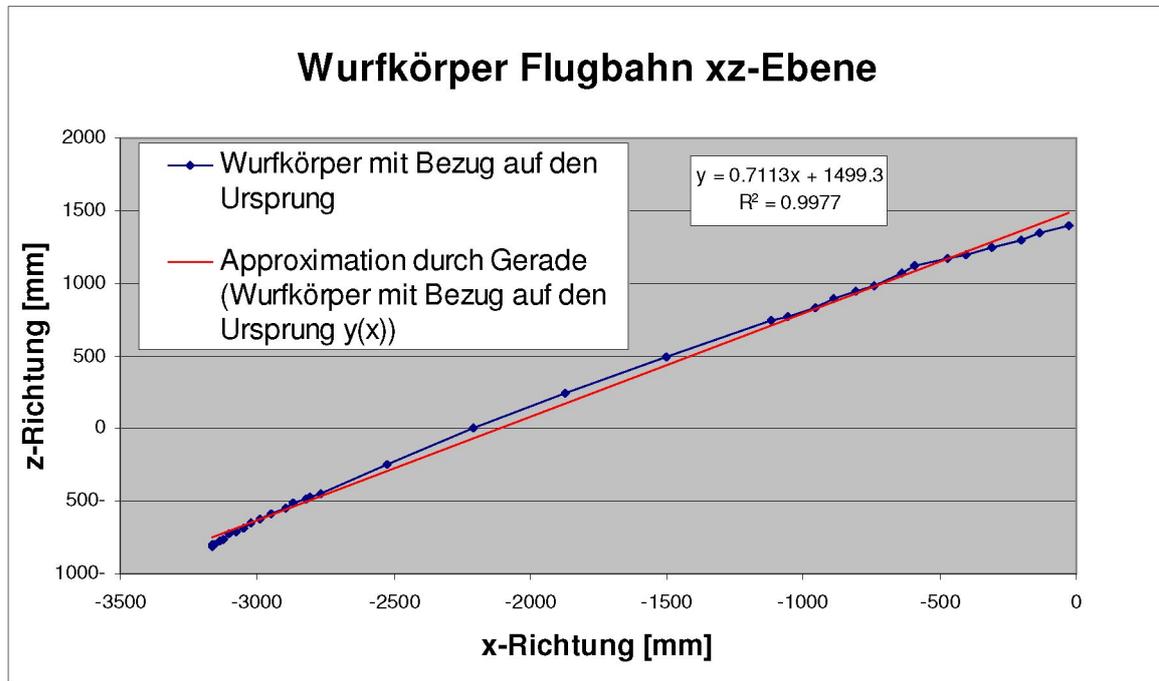


Abbildung 53: Flugbahn des Wurfkörpers (xz- Ebene)



Abbildung 54: Bild der Wurfkörperflugbahn (xz- Ebene)

8.2.2 Elementauswahl

Dieses Modell besteht aus mehreren Elementtypen. Für die Stütze werden Balkenelemente des Typs „B32“ mit sechs Freiheitsgraden pro Knoten gewählt. Die Stütze besteht aus 61 Knoten, die geometrische Form des I-Trägers wird als Elementeigenschaft in Form einer „Beam Section“ implementiert. Die Seile werden mit „Truss“ Elementen des Typs „T3D2“ mit nur drei Freiheitsgraden pro Knoten modelliert. „Truss“ Elemente sind lange, schlanke Strukturelemente, die nur axiale Kräfte übertragen können, jedoch keine Momente. Nähere Details zu den Elementtypen finden sich unter [15]. Ein besonderes Augenmerk gilt der Modellierung der Netze. Für sie werden ebenfalls „Truss“ Elemente verwendet. Allerdings ist die modellierte Netzfeinheit wesentlich geringer als in der Realität, die dadurch entstehende Diskrepanz wird durch geschickte Wahl der Materialeigenschaften dieser „Truss“ Elemente ausgeglichen, siehe das folgende Kapitel.

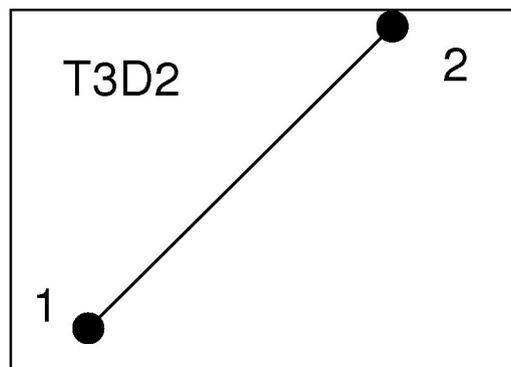


Abbildung 55: Truss Element T3D2

Der Wurfkörper wird idealisiert als Kugel angenommen und mittels „Rigid Surface“, type „Revolution“ konstruiert. „Rigid“ Elemente werden verwendet, um Oberflächen von starren Körpern für Kontakte zu definieren. Ein jeder „Rigid body“ besitzt einen Referenzpunkt, dem Eigenschaften wie die Gesamtmasse zugewiesen werden, und der dazu verwendet wird, die Bewegung des Körpers zu steuern.

8.2.3 Materialeigenschaften

Für die Stütze werden die bereits beschriebenen elastisch-plastischen Materialeigenschaften des S 355 J2 aus Kapitel 8.1.2.1 verwendet. Den Rückspannseilen werden, wie bereits oben beschrieben, die jeweiligen Materialeigenschaften abhängig von der Dehnung der Bremsenlemente zugeordnet. Eine besondere Schwierigkeit stellt die Modellierung der Tragseile dar, da in der Realität die Seile ja während der Systemverformung durch Seilführungen durchrutschen werden. Im Modell können die entsprechenden „Truss“ Elemente aber nur fix mit den Stützen verbunden werden. Diese Problem kann wiederum dadurch umgangen werden, dass den Seilen im Verlaufe der Bewegung variable Materialeigenschaften zugewiesen werden, die so eingestellt werden, dass die jeweils errechneten Seilkräfte den zu jedem Zeitpunkt gemessenen entsprechen. Für die Materialeigenschaften des Fangnetzes wird ganz ähnlich vorgegangen. Es ist zu beachten, dass das Kraft-Verformungsverhalten der Omega-Netze hochgradig nichtlinear sein wird, weil erst bei deren voller Ausdehnung die Lastaufnahmefähigkeit voll zum Tragen kommt. Daher wird im Modell ein fiktives plastisches Verhalten so angenommen, dass sich in der Rechnung wiederum zumindest annähernd die gemessenen Kräfte in den Tragseilen ergeben. Diese Vorgehensweise erscheint auf den ersten Blick nur eine sehr grobe Näherung zu ermöglichen. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass für das Verhalten des Gesamtsystems sowie für die Belastung der Stützen nur das integrale Materialverhalten des Verbundes aus Tragseilen und Netzen maßgeblich ist, nicht jedoch jenes der Einzelkomponenten.

8.2.4 Randbedingungen

Der Stützenfuß wird wieder als Scharniergelenk ausgebildet (Kapitel 8.1.3). Die Rückhalteseile werden an ihren Enden eingespannt, da sie in der Realität fix verankert sind. Die Mittelseile und Hilfsseile, die für die Ausbildung des Netzes erforderlich sind, werden in der Mitte / Symmetrieebene des Systems in y-Richtung fixiert. Die Mittelseile zur rechten Seite der Stütze 2 werden eingespannt, da Sie in Realität zur Stütze 1 laufen und dort zur Verankerung umgelenkt werden.

8.2.5 Kontakt

Es gibt in Abaqus prinzipiell zwei Methoden, um Kontakt- und Reibungsprobleme zu lösen, erstens unter Verwendung von Oberflächen, wie sie in diesem Modell gewählt werden, oder unter Verwendung von Kontaktelementen. Der erforderliche Kontakt zwischen Wurfkörper und Netz ist zusätzlich reibungsbehaftet, wobei der Reibungskoeffizient hier mit $\mu=1$ angenommen wird. In Abaqus/Explicit kann diese Art von Oberflächenkontakt allgemein als „general contact“ oder mittels „contact pair“ ausgeführt werden. Deswegen müssen als erstes die Oberflächen ausgewählt und ihnen Kontakteigenschaften mitgegeben werden.

8.2.6 Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 56 zeigt das FE- Modell des Gesamtsystems, von der Seite, d.h. von der y-Richtung aus betrachtet vor dem Impact. Die Ergebnisse der Berechnung (Abbildung 56 - Abbildung 58) zeigen das realistische Verhalten der Stütze 2. Beim direkten Vergleich (Abbildung 59 und Abbildung 60) werden die Punkte, die in dem System verbesserungswürdig sind, ersichtlich. Die Problematik mit den Rückspankräften ist in diesem Modell dieselbe wie bereits in Kapitel 8.1.5 diskutiert.

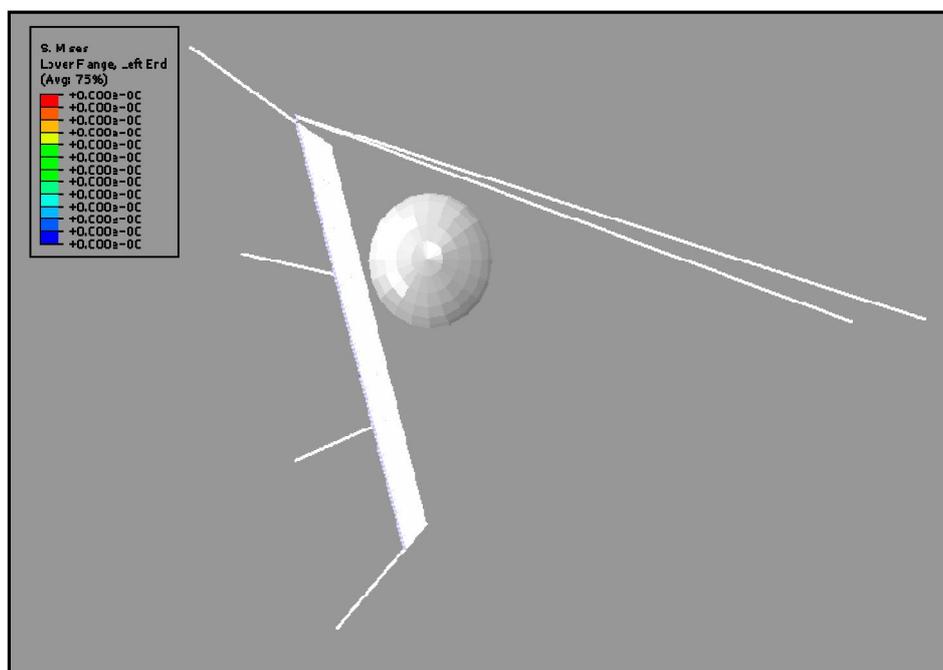


Abbildung 56: Modell Fangkonstruktion – vor Versuch (xz-Ebene)

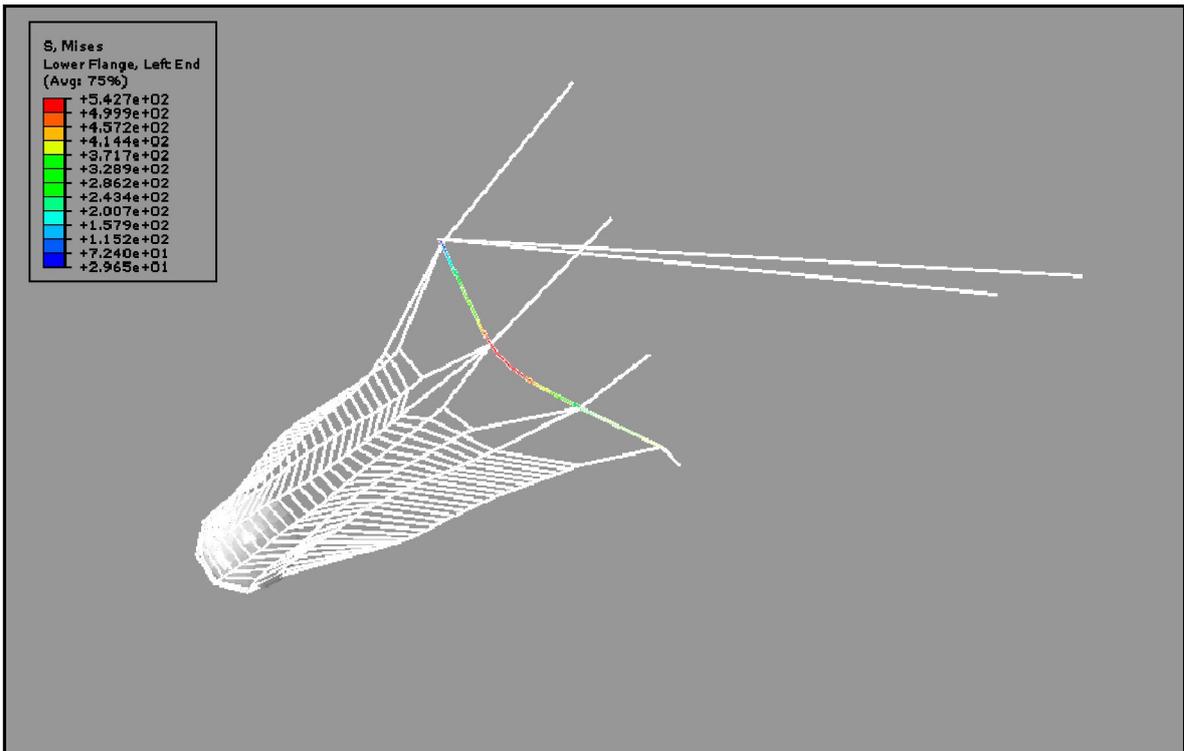


Abbildung 57: Modell Fangkonstruktion – nach Versuch (xz- Ebene)

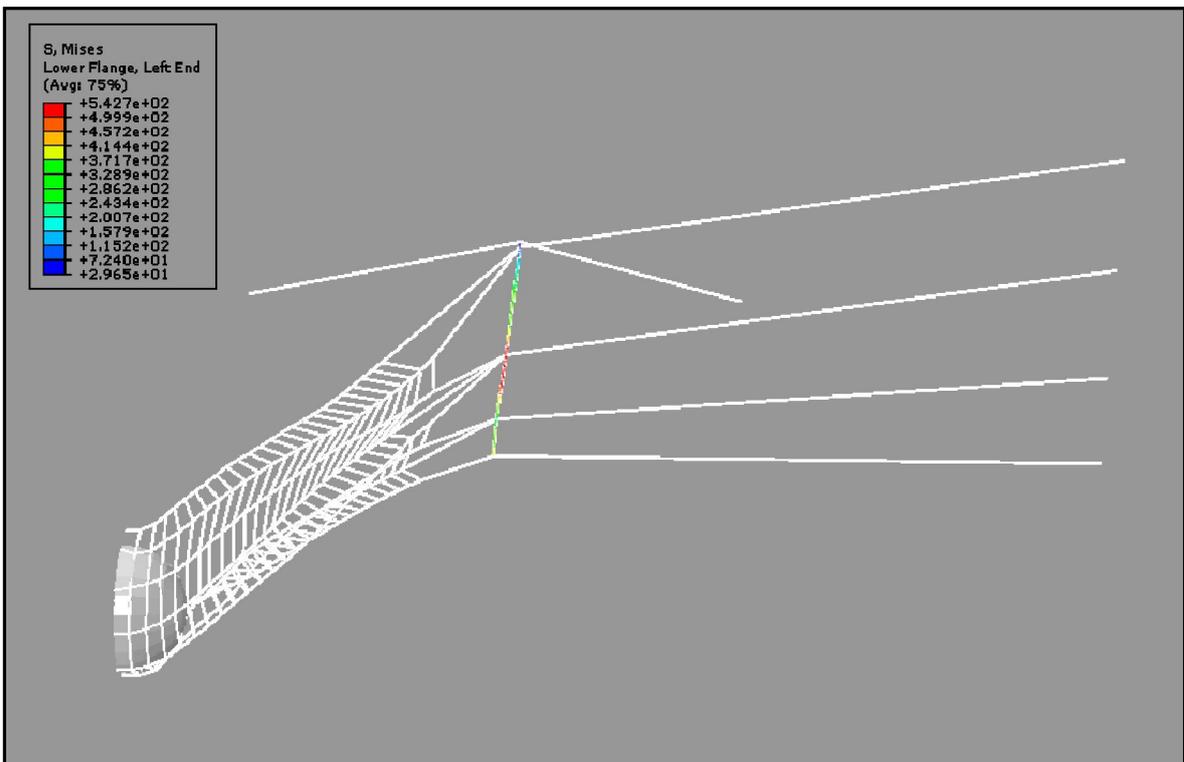


Abbildung 58: Modell Fangkonstruktion – nach Versuch (yz- Ebene)

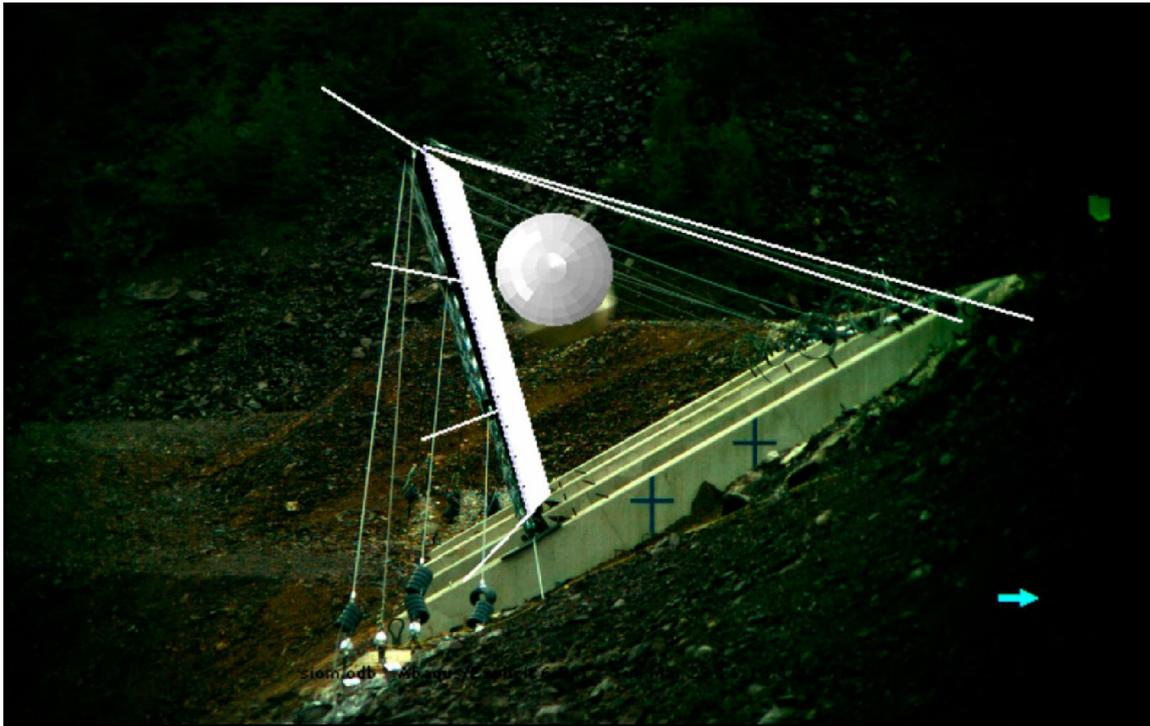


Abbildung 59: Modell zur Realität - Anfang



Abbildung 60: Modell zur Realität – Ende

Realitätsgetreuere Ergebnisse lassen sich in Zukunft generieren, indem das bestehende Modell in den Bereichen der Bremselemente und des Netzes verfeinert wird.

9 Ergebnisse - Verbesserungen

Diese Arbeit zeigt die experimentellen Untersuchungen eines Steinschlagtests im Vergleich mit einer begleitenden numerischen Analyse. Letztere sowie vorlaufende analytische Betrachtungen weisen auf eine Diskrepanz der erwarteten Rückspannkraft mit den Messwerten hin. Das ist eventuell auf Schwierigkeiten der Synchronisierung der gemessenen und der optischen Daten zurückzuführen, da diese nicht zeitpunktsbezogen aufgezeichnet wurden. In Zukunft wird dieses Problem durch zeitgleiche Triggerung der Kraftmesszellen mit der High-Speed Kamera eliminiert. Eine Aufnahme der yz – Ebene wäre vorteilhaft, denn je genauere und bessere Kenntnisse von dem Versuchsablauf vorliegen, desto aussagekräftigere Ergebnisse können von der Simulation erzielt werden. Selbstverständlich sollte man den Faktor der Wirtschaftlichkeit der Versuchsdurchführung nicht außer Acht lassen.

Mit Abschluss dieser Arbeit liegt ein Modell vor, das gute Ergebnisse für den untersuchten Fall liefert. Ein großer Vorteil dieses Modells ist, dass Daten bezüglich Materialeigenschaften, Trefferposition und Wurfkörper (Größe, Masse, Geschwindigkeit) sehr einfach und schnell geändert und neue Ergebnisse in kürzester Zeit ohne hohen Kosten- und Zeitaufwand produziert werden können.

Diese Arbeit zeigt sehr gut, in welche Richtung die Aufzeichnungen bei den Feldversuchen verbessert werden müssen, um in naher Zukunft eine Simulation durchführen zu können, deren Vorhersagen in sehr guter Näherung der experimentellen Realität entsprechen.

10 Ausblick

Die numerische Simulation stellt für die Zukunft ein gutes Werkzeug dar, um flexible Steinschlagschutznetze zu optimieren. Es ist jedoch zurzeit davon abzuraten, sich ganz auf die Simulation zu verlassen. Das jetzt vorliegende Modell ist noch viel zu wenig ausgereift, um Feldversuche gänzlich zu ersetzen. Es wäre wünschenswert, wenn es in Zukunft auch normal auf die im Modell als yz- Ebene (Abbildung 32) bezeichnete Perspektive verwertbare Bildaufzeichnungen gäbe, und wenn Messdaten direkt im Mittelfeld gemessen werden könnten, ohne dabei das Gesamtsystem zu beeinflussen. Bei allen Veränderungen des Systems beziehungsweise der Messung ist darauf zu achten, dass eine realitätsgetreue Versuchsdurchführung gewährleistet bleibt.

Bereits in Umsetzung ist eine zeitgleiche Triggerung der Messzellen mit den High-Speed Kameraaufnahmen. Diese Neuerung wird die Auswertung erleichtern und verbessern. Es gibt in diesem Bereich jedenfalls genügend Verbesserungspotential, um ein noch realitätsgetreueres Simulationsergebnis zu erzielen. Die Verwendung der geplanten Ergebnisse von den Einzelkomponententests wird definitiv zur Verbesserung der Aussagekraft der numerischen Analyse beitragen.

Die in dieser Masterarbeit aufgezeigten Methoden werden dazu beitragen, in Zukunft die Anzahl kostspieliger Versuchsreihen zu minimieren, und trotzdem die Qualität und Sicherheit der Steinschlagschutzsysteme zu garantieren und zu verbessern und somit deren weitere Entwicklung voranzutreiben.

11 Literaturverzeichnis

- [1] EOTA (European Organisation for Technical Approvals); ETAG 027 Guideline for European technical approval of FALLING ROCK PROTECTION KITS, EOTA, Brussels, 2008
- [2] Gerber, W.; Richtlinie über die Typenprüfung von Schutznetzen gegen Steinschlag. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Bern, 2001
- [3] Spang, R.M. und Bolliger, R.; Vom Holzzaun zum Hochenergienetz - die Entwicklung des Steinschlagschutzes von den Anfängen bis zur Gegenwart, Geobruigg, Romanshorn, 2001
- [4] Peila, D., Pelizza, S. und Sassudelli, F., Evaluation of Behaviour of Rockfall Restraining Nets by Full Scale Tests, Rock Mechanics and Rock Engineering, 31 (1), S.1- 24, 1998
- [5] Lininger, L.; Computersimulation von Stein- und Blockschlägen, Sonderdruck aus Felsbau, 18, 2000
- [6] Volkwein, A.; Numerische Simulation von flexiblen Steinschlagschutzsystemen, Dissertation, ETH Zürich, 2004
- [7] Cazzani, A., Mongiovi, L. und Spang, R.M.; Dynamic finite element analysis of interceptive devices for falling rocks, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39, S. 303- 321, 2002
- [8] Heiss, C.; Besonderheiten der Prüfung flexibler Steinschlagschutzverbauungen auf Schrägwurfanlagen am Beispiel "Steirischer Erzberg", Internationales Symposium INTERPRAEVENT, Riva/Trient, S. 49 - 58, 2004
- [9] Versuchsanlage für Steinschlagschutzbauten in Walenstadt (SG); Internet: http://www.wsl.ch/fe/lms/stationen/lochezen/index_DE, Abfrage: 28.04.2010
- [10] Erforschung der Steinschlagprozesse in St. Leonard (VS); Internet: http://www.wsl.ch/fe/lms/stationen/stleonhard/index_DE, Abfrage: 28.04.2010
- [11] Heiss, C.; Auswertungsprotokoll zur Systemprüfung TSC-2000 V0709, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Bergbaukunde, Bergtechnik und Bergwirtschaft, 2009
- [12] Bathe, K.J.; Finite-Elemente-Methoden, 2, Springer, Berlin, 2002
- [13] Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. and Zhu, J.Z.; The finite element method, Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 2005

- [14] Hughes, T.J.R.; The finite element method, Dover Publ., Mineola, NY, 2000
- [15] Habbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.; ABAQUS Manuals, Version 6.3,
Pawtucket, RI, 2002

12 **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Seitenansicht eines Bausatzes für Steinschlagschutznetze	4
Abbildung 2: Rückansicht eines Bausatzes für Steinschlagschutznetze [1]	6
Abbildung 3: Ausgangshöhe des Schutznetzes [1]	7
Abbildung 4: Restnutzhöhe [1]	7
Abbildung 5: Bezeichnung der Winkel und Abmessungen	10
Abbildung 6: Lage der Tragseile nach der Belastung.....	10
Abbildung 7: Schrägwurfanlage.....	15
Abbildung 8: Schrägwurfanlage - Abwurf	15
Abbildung 9: Bremseselement für Laufkatze.....	15
Abbildung 10: Fangstruktur	15
Abbildung 11: Versuchsanlage Lochezen [9]	16
Abbildung 12: Versuchskörper mit Beschleunigungssensoren [9].....	17
Abbildung 13: Versuchsrahmen für Komponententests [9]	17
Abbildung 14: Versuchsanlage St. Leonhard [10]	18
Abbildung 15: Steinschlagverbauung vor dem Versuch.....	19
Abbildung 16: Steinschlagverbauung nach dem Versuch	19
Abbildung 17: Bremsenelemente vor & nach dem Versuch	20
Abbildung 18: Mittleres Verbaufeld vor & nach dem Versuch.....	20
Abbildung 19: Stützenfuß 2 vor & nach dem Versuch	20
Abbildung 20: Geometrie des Wurfkörpers	24
Abbildung 21: Massebestimmung für das System TSC-2000-ZD	24
Abbildung 22: Maßstab beim Einschießen	25
Abbildung 23: Einschießen.....	25
Abbildung 24: Versuchsabfolge [11].....	26
Abbildung 25: Globales Koordinatensystem.....	27
Abbildung 26: Bild 44 - Impact.....	28
Abbildung 27: Bild 93 - Knickfall	28
Abbildung 28: Kameras	28
Abbildung 29: Kraftmesszellen für Tragseile	29

Abbildung 30: Kraftmesszelle	29
Abbildung 31: Stützegeometrie	30
Abbildung 32: Ermittlung der Stützenneigung	30
Abbildung 33: Ermittlung der Richtungsvektoren – Seil.....	32
Abbildung 34: Lokales Koordinatensystem	32
Abbildung 35: Messung der Kräfte direkt / indirekt	33
Abbildung 36: Angriffspunkte der Seilkräfte.....	34
Abbildung 37: Analytische Berechnung – Stützenneigung	37
Abbildung 38: Anpassung Bewegung.....	38
Abbildung 39: Anpassung Bewegung - resultierender Momentenverlauf	38
Abbildung 40: Anpassung Momentenverlauf – resultierende Bewegung	38
Abbildung 41: Anpassung Momentenverlauf.....	38
Abbildung 42: Stützenbewegung.....	39
Abbildung 43: Momentenverlauf.....	39
Abbildung 44: Der Prozess einer Finite- Elemente Berechnung [12].....	40
Abbildung 45: Modell Träger- vor Versuch (xz- Ebene).....	43
Abbildung 46: Strukturelement - Schalenelement S4R	44
Abbildung 47: Dehnungs- Spannungsdiagramm S 355 J2.....	45
Abbildung 48: Fußgelenk der Stütze 2 vor Versuch	46
Abbildung 49: Fußgelenk der Stütze 2 nach Versuch	46
Abbildung 50: Modell Träger - nach Versuch (xz- Ebene).....	47
Abbildung 51: Modell Träger - nach Versuch (zy- Ebene).....	48
Abbildung 52: Fangkonstruktion – Steinschlagtest nach dem Versuch	49
Abbildung 53: Flugbahn des Wurfkörpers (xz- Ebene).....	50
Abbildung 54: Bild der Wurfkörperflugbahn (xz- Ebene)	50
Abbildung 55: Truss Element T3D2.....	51
Abbildung 56: Modell Fangkonstruktion – vor Versuch (xz-Ebene).....	53
Abbildung 57: Modell Fangkonstruktion – nach Versuch (xz- Ebene)	54
Abbildung 58: Modell Fangkonstruktion – nach Versuch (yz- Ebene)	54
Abbildung 59: Modell zur Realität - Anfang	55
Abbildung 60: Modell zur Realität – Ende	55

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Klassen des Bausatzes für Steinschlagschutznetze - SEL-Test ETAG 027 [1].....	5
Tabelle 2: Umrechnungstabelle –technische in wahre Größen	45

14 Abkürzungsverzeichnis

BUWAL	Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (Schweiz)
WSL	Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Schweiz)
EKSL	Eidgenössische Expertenkommission Lawinen und Steinschlag (Schweiz)
MEL	Maximum Energy Level
SEL	Service Energy Level
ETAG	Guideline for European Technical Approval
EOTA	The European Organisation for Technical Approvals
MUL	Montanuniversität Leoben

15 Anhang Inhaltsverzeichnis

A – Inputfile Träger

B – Inputfile Fangkonstruktion

A – Inputfile Träger

*HEADING

Berechnung des Modells Träger

Dieses Modell wurde im Abaqus/CAE 6.9-1 erstellt

**Generated by: Abaqus/CAE 6.9-1

** Erstellung der einzelnen Teile

** PARTS

** Generierung der Stütze

*Part, name=BALKEN

*Node

1, -110., 105., 5035.

5125, -82.5, 105., 25.

*Element, type=S4R

1, 1, 32, 1326, 41

4896, 5125, 1322, 31, 1323

*Nset, nset=_PICKEDSETxy, internal

2, 4603

*Elset, elset=_PICKEDSETxy, internal

309, 4188

** Zuweisung der Materialeigenschaften

** Section: Section-1-_PICKEDSETxy

*Shell Section, elset=_PICKEDSETxy, material=STAHL

11., 5

*End Part

** Generierung der Bodenplatte

*Part, name=BODENPLATTE

*Node

1, 0., 0., 0.
121, 100., -100., 0.

*Element, type=S4R

1, 1, 10, 58, 25
100, 121, 53, 9, 54

*Nset, nset=_PICKEDSET2, internal, generate

1, 121, 1

*Elset, elset=_PICKEDSET2, internal, generate

1, 100, 1

** Zuweisung der Materialeigenschaften

** Section: Section-3-_PICKEDSET2

*Shell Section, elset=_PICKEDSET2, material=STAHL

20., 5

*End Part

** Generierung der Kopfplatte

*Part, name=PLATTE

*Node

1, -180., -120., 0.
209, 270., 120., 0.

*Element, type=S4R

1, 1, 2, 21, 20
180, 189, 190, 209, 208

*Nset, nset=_PICKEDSET2, internal, generate

1, 209, 1

*Elset, elset=_PICKEDSET2, internal, generate

1, 180, 1

**** Zuweisung der Materialeigenschaften**

** Section: Section-4-_PICKEDSET2

*Shell Section, elset=_PICKEDSET2, material=STAHL

20., 5

*End Part

**** Zusammenfügen der einzelnen Teile – Träger, Boden- und Kopfplatte**

** ASSEMBLY

*Assembly, name=Assembly

*Instance, name=BODENPLATTE-1, part=BODENPLATTE

Verschiebungsdaten

*End Instance

*Instance, name=PLATTE-1, part=PLATTE

Verschiebungsdaten

*End Instance

*Instance, name=BALKEN-1, part=BALKEN

Verschiebungsdaten

*End Instance

*Nset, nset=_PICKEDSETxx, internal, instance=part name

.....

*Elset, elset=_PICKEDSETxx, internal, instance=part name

.....

**** Definition der Oberfläche**

*Surface, type=ELEMENT/NODE, name=_PICKEDSURFxy, internal

__PICKEDSURFxy_SPOS_2, SPOS

.....

*Elset, elset=__PICKEDSURFxy_SNEG_2, internal, instance=part name, generate

1, 180, 1

.....

** Erstellen der Verbindung zwischen den einzelnen Teilen

** Constraint: SCHWEIßNAHTBP-1-1

*Tie, name=SCHWEIßNAHTBP-1-1, adjust=yes

.....

*End Assembly

** Hereinladen der Amplituden

*Amplitude, name=AMP-S_{xyz}, time=TOTAL TIME

Zeit bezogene Koordinaten des Wurfkörpers in xyz-Richtung

** Materialeigenschaften

** MATERIALS

*Material, name=STAHL

*Elastic

193000., 0.3

*Plastic

Plastische Daten des Stahlträgers

** Randbedingungen

** BOUNDARY CONDITIONS

** Name: Disp-BC-1 Type: Displacement/Rotation

*Boundary

_PICKEDSET92, 2, 2

.....

** Belastungsschritt

** STEP: impact

*Step, name=impact, nlgeom=YES, inc=1000

*Static, stabilize=0.0002, allsdtol=0.05, continue=NO

0.05, 0.368, 1e-06, 0.05

**** Randbedingungen für den Stützenfuß**

**** BOUNDARY CONDITIONS**

**** Name: Disp-BC-6 Type: Displacement/Rotation**

***Boundary, amplitude=AMP-48X**

_PICKEDSET95, 1, 1, 1.

**** Lasten**

**** LOADS**

**** Name: CFORCE-1 Type: Concentrated force**

***Cload, op=NEW, amplitude=AMP-S_{xyz}**

Krafteinleitungspunkt, Koordinatenrichtung_{xyz}, Faktor

**** Datenausgabe**

**** OUTPUT REQUESTS**

***Restart, write, frequency=0**

**** FIELD OUTPUT: F-Output-1**

***Output, field, variable=PRESELECT**

**** HISTORY OUTPUT: H-Output-1**

***Output, history, variable=PRESELECT**

***End Step**

**** Stabilisierung**

**** STEP: buckle**

***Step, name=buckle, nlgeom=YES**

Buckling at max load

***Static, stabilize=0.0002, allsdtol=0.05, continue=NO**

0.001, 0.04, 4e-07, 0.04

** Randbedingungen

** BOUNDARY CONDITIONS

** Name: Disp-BC-8 Type: Displacement/Rotation

*Boundary, fixed

_PICKEDSET35, 1, 1

** Lasten

** LOADS

** Aufgeben der Seilkräfte

** Name: CFORCE-1 Type: Concentrated force

*Cload, op=NEW

Krafteinleitungspunkt, Koordinatenrichtung_{xyz}, Faktor

.....

** Aufgeben der Rückspannseilkräfte – mittels Amplituden

** Name: CFORCE-14 Type: Concentrated force

*Cload, op=NEW, amplitude=AMP-S_{xyz}

Krafteinleitungspunkt, Koordinatenrichtung_{xyz}, Faktor

.....

** Ausgabedaten

** OUTPUT REQUESTS

*Restart, write, frequency=0

** FIELD OUTPUT: F-Output-2

*Output, field, variable=PRESELECT

** HISTORY OUTPUT: H-Output-2

*Output, history, variable=PRESELECT

*End Step

B – Inputfile Fangkonstruktion

*HEADING

Berechnung des Modells Fangkonstruktion

Abaqus/Explicit 6.9-1

** Generierung der Knoten

*NODE, NSET=AllNodes

Knotenkoordinaten

** Generierung der Stütze

*NGEN

1, 61, 1 Stützenkoordinaten

*ELEMENT, TYPE=B31

1, 1, 2

*ELGEN, ELSET=Stuetze

1, 60, 1, 1

** Erstellung der Seilelemente

*ELEMENT, TYPE=T3D2, ELSET=SK

*NGEN, NSET=xy

.....

*NFILL, NSET=xy

.....

*ELGEN, ELSET=xy

.....

*ELSET, ELSET=xy

.....

** Erzeugung von Zwängen zwischen gleichen Knoten mit verschiedenen Freiheitsgraden

*MPC

Link, 60, 212

.....

** Zuweisung der Seileigenschaften

*SOLID SECTION, ELSET=xy, MATERIAL=xx

....

** Generieren der vier Mittelseile im Feld

*NSET, NSET=xy

.....

** Erstellung des I- Trägerprofils

*BEAM SECTION, SECTION=I, MATERIAL=steel, ELSET=Stuetze

105, 210, 220, 220, 11, 11, 7

0, 1, 0

** Generierung des Fangkörpers

*Node, nset=RPM

5000, 60.5, 15010, 3396.48

*Surface, type=revolution, name=RigidSurface

60.5, 15010, 3396.48, 60.5, 16010, 3396.48

START, 869.5, 0

CIRCL, 0, -869.5, 0, 0

*Rigid Body, REF NODE=RPM, analytical surface=RigidSurface

*Surface, type=NODE, name=Fangkoerper

.....

**** Hereinladen der Amplituden**

*Amplitude, name=REX

Zeit bezogene Koordinaten des Wurfkörpers in x-Richtung

*Amplitude, name=REY

Zeit bezogene Koordinaten des Wurfkörpers in y-Richtung sind Null, da der Wurfkörper mittig in den Verbau eintrifft

*Amplitude, name=REZ

Zeit bezogene Koordinaten des Wurfkörpers in z-Richtung

**** Materialeigenschaften**

*MATERIAL, NAME=steel

*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC

193000, 0.3

*Plastic

Plastische Daten des Stahlträgers

*DENSITY

7.8e-9

*MATERIAL, NAME=xxx

*ELASTIC, TYPE=ISOTROPIC

210000, 0.3

*PLASTIC

Materialdaten für die Seile und das Netz

*DENSITY

7.8e-9

**** Herausschreiben der Daten zu einem bestimmten Zeitpunkt**

*Time Points, name=timepoints

0., 0.008, 0.016, 0.024, 0.032, 0.04, 0.048, 0.056, 0.064, 0.072, 0.08, 0.088, 0.096,
0.104, 0.112, 0.12, 0.128, 0.136, 0.144, 0.152, 0.16, 0.168, 0.176, 0.184, 0.192, 0.2,
0.208, 0.216, 0.224, 0.232, 0.24, 0.248, 0.256, 0.264, 0.272, 0.28, 0.288, 0.296,
0.304, 0.312, 0.32, 0.328, 0.336, 0.344, 0.352, 0.36, 0.368, 0.376, 0.384, 0.392, 0.4

**** Kontakt**

*Surface Interaction, name=Kontakt

*Friction

1.,

*** * Randbedingungen**

*BOUNDARY

Stütze	1, 1, 3
	1, 4
	1, 6
Mittelseile auf der linken Seite	108, 1, 3
	101, 1, 3
	102, 1, 3
	103, 1, 3
Mittelseile in Feldmitte / Symmetrieebene	237, 2
	337, 2
	437, 2
	537, 2
	637, 2
	737, 2
	837, 2
	937, 2
Rückspannseile	104, 1, 3
	204, 1, 3
Referenzpunkt des Wurfkörpers	RPM, 4, 6

** Belastungsschritt

*STEP, NAME=Impact

*DYNAMIC, Explicit

, 0.408

*Bulk Viscosity

0.06, 1.2

*BOUNDARY, TYPE=DISPLACEMENT, Amplitude=rex
RPM, 1, 1, 1000.

*BOUNDARY, TYPE=DISPLACEMENT, Amplitude=rex
RPM, 2, 2, 1000.

*BOUNDARY, TYPE=DISPLACEMENT, Amplitude=rez
RPM, 3, 3, 1000.

*Temperatur

AllNodes, 0.400

** Kontaktdefinition

** Interaction: Impact - Reibungslos

*Contact Pair, interaction=Kontakt, mechanical constraint=KINEMATIC
RigidSurface, Fangkoerper

** Ausgabedaten

*Restart, write, number interval=1, time marks=NO

*Output, field

*Node Output

RF, U, V, NT

*Element Output, directions=YES

LE, PE, PEEQ, S

*Output, history, frequency=0

*End Step