



Anwendung von flexiblen Netzabdeckungen zur Sicherung in Felsböschungen – Erkenntnisse aus Großfeldversuchen, Folgerungen für die Praxis

Flexible Netzabdeckungen werden im alpinen Bereich bereits seit einigen Jahrzehnten für die Sicherung von Felsböschungen gegen instabile Felsblöcke oder kritische Felsmassen eingesetzt. Die Anordnung der Sicherungsmaßnahme basierte dabei oft auf langjährigen Erfahrungen von einzelnen Spezialisten.

Adäquate Bemessungskonzepte fehlten, oder es wurden stark vereinfachte Modelle verwendet. Um das Tragverhalten von flexiblen Netzabdeckungen und deren Zusammenwirken mit Nägeln beziehungsweise Verpresspfählen besser zu verstehen und um die Kraftverteilung eingehend zu analysieren und den Einfluss von dynamischen Einwirkungen zu untersuchen, wurden in Felsberg bei Chur in der Schweiz ausführliche Großfeldversuche durchgeführt. Dieser Beitrag fasst die Erkenntnisse und Folgerungen für die praktische Anwendung von an Nägeln beziehungsweise Verpresspfählen verankerten, flexiblen Netzabdeckungen zusammen.

Flexible Felssicherungssysteme eröffnen oft interessante und wirtschaftliche Anwendungsmöglichkeiten. Vielfach werden beziehungsweise werden noch quadratische oder rechteckige Netzabdeckungen aus Litzenseilen mit einem Durchmesser von üblicherweise 8 bis 10 mm eingesetzt, welche in den Kreuzungspunkten mit Kreuzklemmen oder Drahtwicklungen gegenseitig verbunden sind. Teilweise wird zur Versteifung des Randbereichs ein entlang der Peripherie laufendes, dickeres Seil eingesetzt. Ein Vertreter dieser Systeme ist beispielsweise das Pentifix-system. Das Nagelraster wird durch die Größe und Geometrie der Paneele bestimmt. Eine projektspezifische Anpassung und somit die Optimierung der Vernagelung wird dadurch schwierig. Ursprünglich wurden solche Systeme für die Sicherung von Kriechhängen eingesetzt. Eine Deformation des Sicherungssystems wurde bewusst in Kauf genommen. Neben dem großflächigen Einsatz (Bild 1) werden flexible Netzabdeckungen oft auch für die Sicherung von einzelnen, kritischen Felsblöcken eingesetzt, welche Personen oder Infrastrukturbauten gefährden können (Bild 2).

Aufgrund materialtechnologischer Innovationen wurde es möglich, Litzenseile mit ihren 0,8 bis 1,0 mm dicken Einzeldrähten durch statisch äquivalente Spiralseile mit einem Durchmesser



Bild 1. Schutzgonten, Wildhaus, Schweiz.

Autoren

Dipl. Bauing. ETH. Daniel Flum, Geschäftsführer, Rüeegger+Flum AG, St. Gallen, Schweiz

Dipl. Bauing. FH/MSc CU. Armin Roduner, Leiter Geotechnik, Geobrug AG, Schutzsysteme, Romanshorn, Schweiz

Mag. Geologie Daniela Engl, Junior Researcher für Ingenieurgeologie, AlpS – GmbH, Innsbruck, Österreich

Flum, Roduner, Engl: Anwendung von flexiblen Netzabdeckungen zur Sicherung in Felsböschungen – Erkenntnisse aus Großfeldversuchen, Folgerungen für die Praxis

der Drähte von 3,0 bis 4,0 mm zu ersetzen. Zudem wurde der Herstellungsprozess soweit optimiert, dass nun Netze maschinell in Rollen produziert werden können. Dies hat auf die Anwendung einen maßgebenden Einfluss: Mussten früher die Paneele einzeln installiert und an Nägeln befestigt werden, welche jeweils im Eckbereich des Netzes anzuordnen sind, so können heute stattdessen 3,5 m breite Netze in Rollen bis zu einer Länge von 20 m und einem Gewicht von 190 kg rationell und flächig verlegt werden. Diese werden seitlich mittels Schäkeln kraftschlüssig und mit minimalem Schlupf miteinander verbunden. Über einfache Krallplatten kann das Netz bestmöglich gegen die Felsoberfläche gespannt werden. Neben einem ebenfalls verbesserten Korrosionsschutz liegt die wohl bedeutendste Neuerung in der freien Anordnung der Verankerungen. Dies erlaubt eine optimale Anpassung der Vernagelung an die projektspezifischen Gegebenheiten, was sich positiv auf das Tragverhalten auswirkt. Dieser Schritt war ein wesentlicher Meilenstein in der Entwicklung der Netzabdeckungen.

Durch die freie Wahl der Anordnung der Nägel beispielsweise rund um einen kritischen Block kann dieser optimal über eine rückverankerte Netzabdeckung gesichert werden (Bilder 3 und 4). Was heißt optimal? Unter Einsatz von möglichst wenigen Verankerungspunkten soll der Block so gesichert werden, dass sich dieser in seiner Lage nur soweit verschieben kann, wie es die Projektanforderungen erlauben. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Block nicht direkt über einen Dübel oder eine Verankerung stabilisiert werden kann.

Ein Vertreter dieser neuen Art der Felsicherung, welcher die Voraussetzung der freien Wahl der Nagelanordnung erfüllt, ist das Spider-Felssicherungssystem der Geobrugg AG, Romanshorn, Schweiz. Das verwendete Spiralseil besteht aus jeweils drei miteinander verseilten hochfesten Stahldrähten mit einem Durchmesser von 4 mm und einer Zugfestigkeit von mindestens 1770 N/mm². Dieses wird zuerst zu einer zickzackförmigen Spirale gebogen und sodann durch gegenseitiges Eindrehen zu einem Netz verarbeitet. Die Enden der Spiralseile sind jeweils miteinander verknötet, um volle Lastübertragung zwischen benachbarten Paneelen zu ermöglichen.

Anschließend wird näher auf das Versuchskonzept des Großfeldversuchs, auf die durchgeführten Einzelversuche und die maßgebenden Einflussgrößen eingegangen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen werden zusammengefasst. Die Großfeldversuche wurden im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojekts der Geobrugg AG, der Rüeegger+Flum AG, St Gallen, Schweiz, dem alpS-Zentrum, Innsbruck, Österreich für Naturgefahren und Risikomanagement und der Uni Innsbruck durchgeführt.

Versuchskonzept

Die Großfeldversuche hatten zum Ziel unter möglichst realitätsgetreuen Bedingungen das



Bild 2. Gondo, Schweiz.



Bild 3. Taubenlochschlucht bei Biel in der Schweiz.



Bild 4. Walenstadt in der Schweiz.

Flum, Roduner, Engl: Anwendung von flexiblen Netzabdeckungen zur Sicherung in Felsböschungen – Erkenntnisse aus Großfeldversuchen, Folgerungen für die Praxis



Bild 5. Ausbruchnische als Versuchsgelände.



Bild 6. Anordnung der Verankerungen.



Bild 7. Übersicht Calanda-Gebirgsstock westlich von Chur, Graubünden, Schweiz.

Tragverhalten des Felsicherungssystems, das Zusammenwirken der Systemkomponenten und die Richtung sowie die Größe der Kräfte, welche vom instabilen Block über das Netz in die einzelnen Verankerungspunkte eingeleitet werden, im Maßstab 1:1 unter verschiedenen Randbedingungen zu untersuchen.

Hierzu konnte am Fuß des Calanda-Gebirgsstocks in der Gemeinde Felsberg westlich von Chur, Graubünden, Schweiz, ein idealer Standort gefunden werden, welcher für Transportfahrzeuge zugänglich war und betreffend Arbeitssicherheit den Anforderungen genügte (Bild 5). Dank der Unterstützung durch die dortige Gemeinde und einen lokalen Unternehmer konnte die Versuchseinrichtung rasch erstellt und die notwendigen Hilfsmittel problemlos zur Verfügung gestellt werden.

Es handelt sich bei dem Versuchsstandort um eine U-förmige, nach unten hin offene Ausbruchnische. Die Gleitfläche fällt mit ca. 55° nach vorne und somit gegen das Rheintal ab. Die Bankungsdicke der anstehenden Kalke beträgt in diesem Bereich ca. 0,4 m und entspricht der Mächtigkeit der ausgebrochenen Platte. Die Karbonatformation gehört den helvetischen Schichten an und wurde durch die Gebirgsbildung steil gestellt.

Die Breite der Nische beträgt an ihrer Oberseite ca. 2,5 m und weitet sich nach unten bis auf ca. 4,0 m auf. Die Länge in der Falllinie misst etwa 3,5 m. Der untere Bereich der Versuchsanlage ist über eine Höhe von ca. 2,5 m mehr oder weniger vertikal ausgebildet.

Unmittelbar oberhalb der Versuchsanlage wurde zur Erfüllung arbeitssicherheitlicher Erfordernisse ein leichter Fangzaun errichtet, um kleinere Steine, welche zum Beispiel durch Steinböcke oder durch Witterungseinflüsse gelöst werden könnten, zurückzuhalten.

Zur punktuellen Verankerung des Netzes wurden ober- und unterhalb sowie beidseitig der Nische je drei Nägel vom Typ GEWI mit $D = 28$ mm installiert (Bild 6). Zusätzlich wurden in der Nische selbst seitlich je zwei Anker angeordnet. Diese Anordnung erlaubte Versuche unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Verankerungskonfigurationen.

Zusätzlich konnten oben sowie unten je ein Litzenseil mit einem Durchmesser $D = 14 \text{ mm}$ seitlich gegen Spiralseilanker mit $D = 14,5 \text{ mm}$ verspannt werden. Die Einspannungslänge der Nägel betrug $1,0$ bis $1,5 \text{ m}$, diejenige der Spiralseilanker $1,5 \text{ m}$. Die Abstände der Nägel zueinander maßen in der jeweiligen Gruppe etwa $1,0 \text{ m}$. Die Bilder 9 bis 12 zeigen die Anordnung der Verankerungen.

Um Versuche unter möglichst naturnahen Bedingungen durchführen zu können, wurde ein mehr oder weniger quaderförmiger Versuchsblock aus dem benachbarten Steinbruch verwendet, dessen Rauigkeit dem im Bereich der Versuchsanlage anstehenden Gestein entspricht. Seine Masse betrug $1\ 160 \text{ kg}$. An der Oberkante des Versuchsblocks wurden zwei zu Schlaufen gebogene Bewehrungsstäbe eingemörtelt. Über diese konnte der Block an einem Aufzugsseil (Typ Habegger) aufgehängt und in Position gebracht werden (Bild 8).

Der Verschiebungsweg des Blocks wurde über einen Seilzugpotentiometer mit einer maximalen Messlänge von $1\ 500 \text{ mm}$ gemessen (Bild 13).

Zur Bestimmung der Kräfte, welche über das Netz in die verschiedenen Verankerungspunkte abgetragen wurden, sind eigens hierfür entwickelte Kraftmessplatten aus Aluminium eingesetzt worden. Dadurch war es möglich, diese optimal auf die Versuchsbedingungen anzupassen.

Bei Großfeldversuchen besteht das Hauptproblem darin, alle relevanten Einflüsse erfassen zu können. In diesem Fall sind insbesondere Zwängungen, welche zwangsläufig entstehen und messtechnisch nicht quantifizierbar sind, bestmöglich zu vermeiden. Auf der Basis langjähriger Versuchserfahrungen wurden deshalb die Verankerungen unter Berücksichtigung der Geometrie der Nische so gewählt, dass diese mehr oder weniger frei und ohne Zwängungen auslenken beziehungsweise belastet werden können. Neben der elektronischen Aufnahme (Bild 15) der Kräfte wurden die Richtungsvektoren der Kraftmessdosens vor und nach dem Versuch ermittelt (Bild 16). Dadurch war es möglich, die Reaktion des Netzes und der Randseile auf die Verankerungen sehr realitätsgetreu zu bestimmen. Auch wurde versucht, den Block plötzlich ins Rutschen zu bringen. Dies wurde über ein Hanfseil erreicht, welches dank der Reibung durch zweimaliges Herumführen um die Aufhängung von Hand gelöst werden konnte (Bild 14).

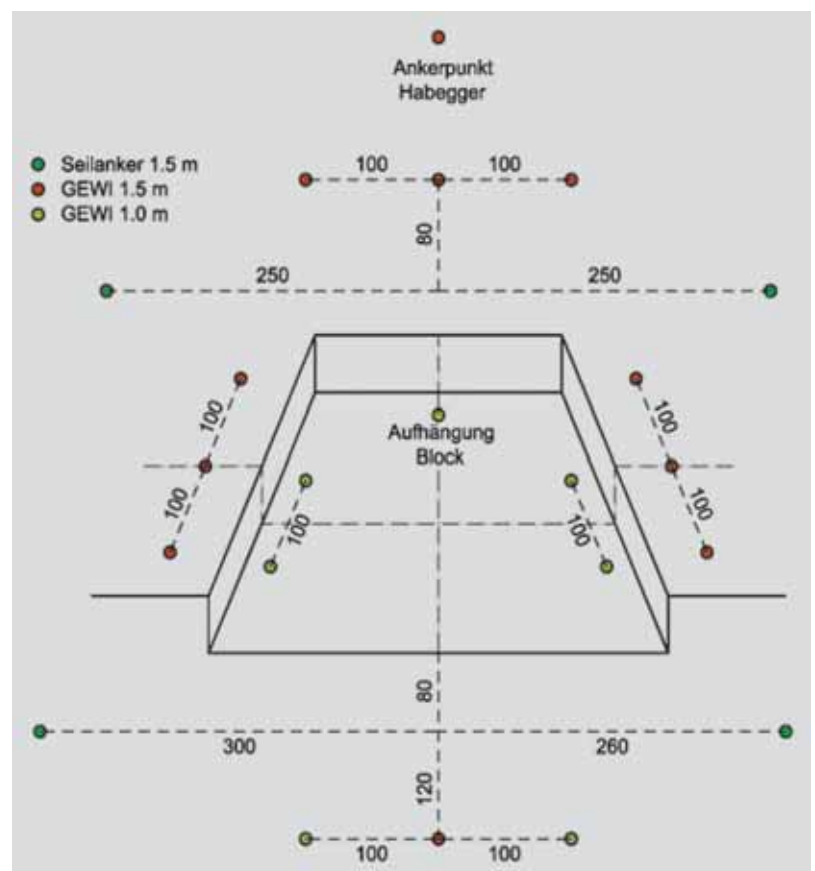
Als Basis für die Rückrechnung wurden die Verankerungspunkte mit einer Genauigkeit von $\pm 5 \text{ cm}$ eingemessen. Das Bild 17 zeigt die räumliche Lage der Verankerungen. Der Aufhängepunkt ist mit A bezeichnet. Die Punkte 13 bis 16 stellen die Positionen der Spiralseilanker dar.

Reibungsversuche

Bevor mit den eigentlichen Versuchen mit einer Netzabdeckung begonnen wurde, wurden Reibungsversuche als Grundlage für die spätere Analyse der Kräfte durchgeführt (Bild 18). Der



Bild 8. Positionierung des Versuchsblocks.



Reibungswinkel zwischen dem Versuchsblock und der Gleitfläche konnte hierdurch bestimmt werden, wobei zwischen der Haft- und der Gleitreibung zu unterscheiden ist.

Bild 9. Anordnung der Verankerungen.

Flum, Roduner, Engl: Anwendung von flexiblen Netzabdeckungen zur Sicherung in Felsböschungen – Erkenntnisse aus Großfeldversuchen, Folgerungen für die Praxis



Bild 10. Einrichten der Versuchsanlage.



Bild 11. Gesamtansicht der Versuchseinrichtung ohne Berücksichtigung eines Randseils.



Bild 12. Versuch zur Untersuchung des Einflusses des Randseils auf das Tragverhalten und die Kräfte.



Bild 13. Blockaufhängung und Wegmessung.



Bild 14. Hanfseil zum Lösen des Blocks.



Bild 15. Elektronische Datenerfassung.

Flum, Roduner, Engl: Anwendung von flexiblen Netzabdeckungen zur Sicherung in Felsböschungen – Erkenntnisse aus Großfeldversuchen, Folgerungen für die Praxis



Bild 16. Messung der Richtung und Neigung der Kraftmessdosen mit Geologenkompass und Neigungsmessgerät.

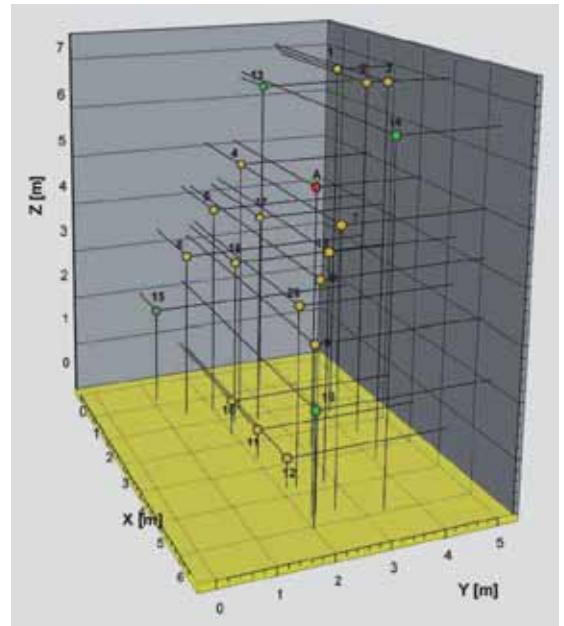


Bild 17. Räumliche Lage der Anker als zentralperspektivische Seitenansicht.



Bild 18. Versuchsaufbau, Reibungsversuche.

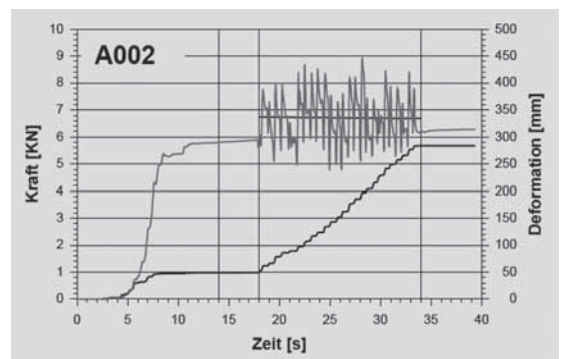


Bild 19. Ergebnis eines Reibungsversuchs zur Ermittlung der Gleitreibung. Die dunkle, treppenförmige Linie beschreibt die Verschiebung des Blocks über die Zeit; die graue Linie zeigt die Kraft im Seilzug über die Zeit. Die Kurven bis zum Beginn bei 17 s resultieren aus der Entlastung durch den Kettenzug.

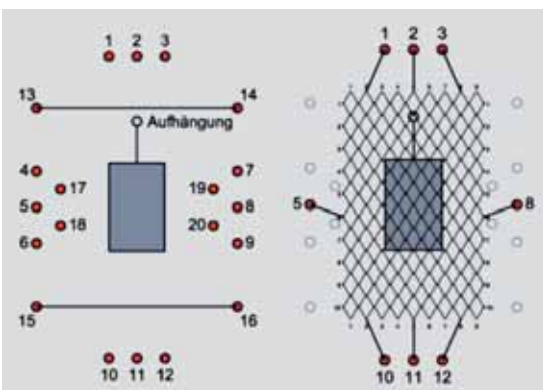


Bild 20. Übersicht und Konfiguration I.

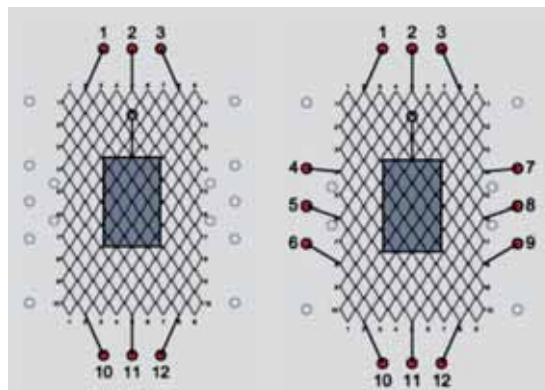


Bild 21. Konfigurationen II (links) und III (rechts).

Flum, Roduner, Engl: Anwendung von flexiblen Netzabdeckungen zur Sicherung in Felsböschungen – Erkenntnisse aus Großfeldversuchen, Folgerungen für die Praxis

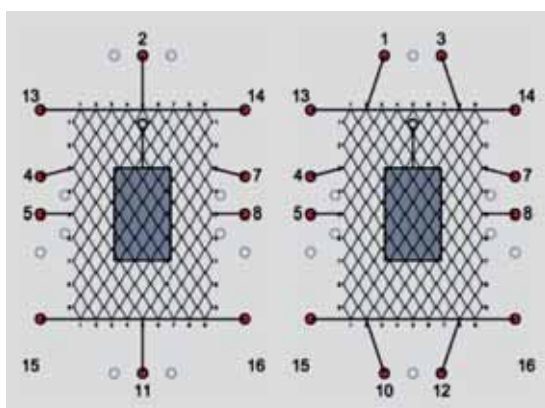


Bild 22. Konfiguration IV (links) und V (rechts).

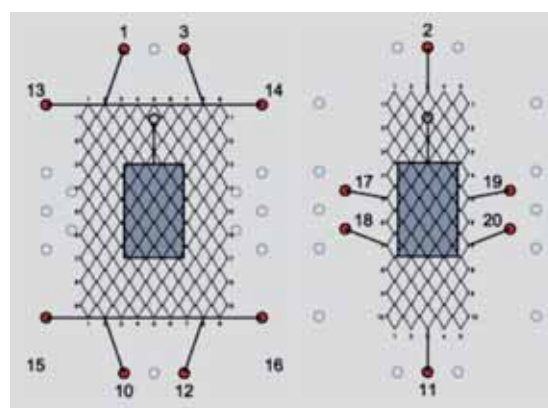


Bild 23. Konfiguration VI (links) und VII (rechts).



Bild 24. Versuch 7, bei Versuchsbeginn.



Bild 25. Versuch 7, bei Versuchsbeginn.



Bild 26. Versuch 7, bei Versuchsende.



Bild 27. Versuch 6, Konfiguration I.

Für die Ermittlung der Haftreibung wurde die Kraft gemessen, welche es benötigte, den Block an Ort und Stelle zu halten.

Um die Gleitreibung zu bestimmen, wurde der Block über einen Seilzug des Typs Habegger geradlinig und über eine Strecke von ca. 0,20 bis 0,25 m herabgelassen und die Kraft in Abhängigkeit der Zeit und der Verschiebung aufgetragen (Bild 19). Der Grund für die Schwankungen in der Kraft liegt in der Hebelbewegung bei Betätigung des Seilzugs.

Als Ergebnis aus den Reibungsversuchen errechnete sich für die Haftreibung ein Reibungswinkel von $\varphi_H = 28 - 29^\circ$ und für die Gleitreibung ein Reibungswinkel von $\varphi_G = 24 - 25^\circ$.

Großfeldversuche

Insgesamt wurden 29 Versuche durchgeführt. Dabei wurden 7 verschiedene Verankerungskonfigurationen berücksichtigt.

Da eine Diskussion der Versuchsergebnisse aller Konfigurationen den Rahmen dieses Beitrags sprengen würde, wird die Beschreibung und Analyse auf zwei Beispiele begrenzt. Es wird dabei auf Versuch 7 unter Berücksichtigung der Konfiguration I und auf Versuch 20 mit der Konfiguration V eingegangen (Bilder 20 bis 23).

Versuch 7

Die Bilder 24 bis 27 zeigen die Situation bei Versuchsbeginn sowie nach Auffangen des Blocks.

Das Bild 28 zeigt die räumliche Orientierung der Kraftvektoren in den Verankerungen vor sowie nach dem Versuch. Die Richtung dieser Vektoren ist unter Berücksichtigung ihrer Beträge für die Gleichgewichtsanalyse maßgebend.

Mit einer Messfrequenz von 25 Hz konnte der Verlauf der Kräfte über die Zeit ausreichend genau aufgenommen werden. Dabei ist zwischen der Belastung unmittelbar beim Einschlag (Peak) und der Kräfte zu dem Zeitpunkt, nachdem sich der Block wieder in Ruhe befindet (Residualwert), zu unterscheiden.

Im Versuch 7 beträgt beispielsweise die maximale Kraft in der Verankerung 11 (Kraft in der Mitte unten, vergleiche Bild 20) 11,2 kN und fällt anschließend auf 9,1 kN ab. Die Beschleunigung des Blocks sowie die Steifigkeit des Systems beim Abbremsvorgang haben einen direkten Einfluss: Je länger sich der Block beschleunigen kann, desto größer werden die dynamischen Einwirkungen (Tabelle 1).

Über das verwendete Messgerät konnten maximal 8 Kanäle parallel gemessen werden. Somit war es möglich, neben dem Wegaufnehmer insgesamt noch weitere 7 Kräfte zu messen. Als Folge davon konnte die Kraftmessdose bei der Verankerung 1 beim Versuch 7 nicht mit angeschlossen werden. Jene Werte in der Tabelle 1 wurden unter Berücksichtigung der Kräfteverteilung rund um den Block entsprechend interpoliert.

Die maximalen Kräfte unter dynamischen Einwirkungen sind wesentlich abhängig von der



Bild 28. Räumliche Orientierung der Kraftvektoren.

Tabelle 1. Dynamische Einwirkungen, residuale Kräfte und Verhältnisse im Versuch 7.

Oben	1	2	3	1+2+3
Dynamisch [kN]	5,5	5,8	5,2	16,6
Residual [kN]	4,6	4,9	4,1	13,6

Unten	10	11	12	10+11+12
Dynamisch [kN]	2,7	11,2	0,6	14,5
Residual [kN]	2,2	9,1	0,3	11,6

Seitlich	5	8	Ø
Dynamisch [kN]	5,1	4,2	4,7
Residual [kN]	4,2	3,6	3,9

Verhältnisse Kräfte unten : oben	η
Dynamisch	0,87
Residual	0,85

Verhältnisse Kräfte seitlich : oben	ζ
Dynamisch	0,28
Residual	0,29

Verhältnisse dynamisch-residual	κ_{DR}
Oben	1,22
Unten	1,25
Seitlich	1,20

Flum, Roduner, Engl: Anwendung von flexiblen Netzabdeckungen zur Sicherung in Felsböschungen – Erkenntnisse aus Großfeldversuchen, Folgerungen für die Praxis

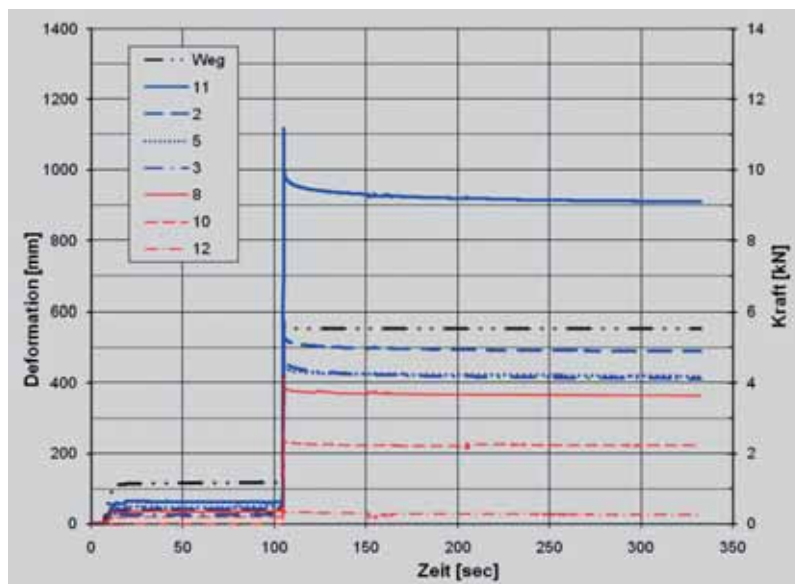


Bild 29. Gemessene Kräfte in den Verankerungen.

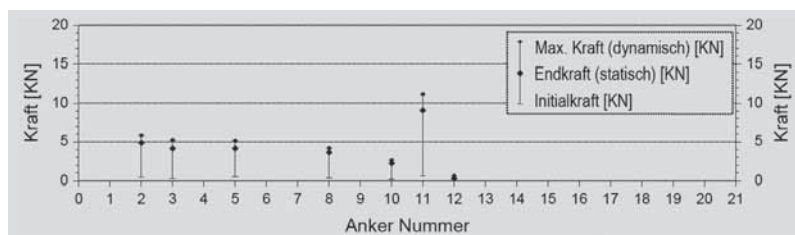


Bild 30. Maximale und residuale Kräfte im Versuch 7.

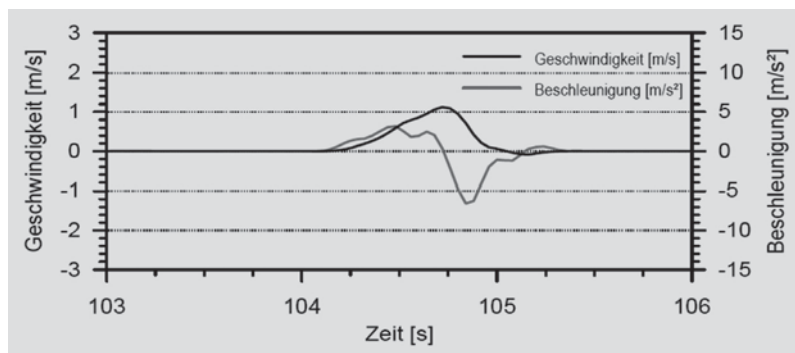


Bild 31. Geschwindigkeit und Beschleunigung.

Beschleunigung beziehungsweise der Verzögerung beim Abbremsvorgang. Durch einfache beziehungsweise zweifache Ableitung der Verschiebung über die Zeit wurde die Geschwindigkeit respektive die Beschleunigung ermittelt. Im Versuch 7 beispielsweise resultieren folgende Maximalwerte (Bild 31):

- maximale Geschwindigkeit = 1,12 m/s
- maximale Beschleunigung = +3,19 m/s²
- maximale Verzögerung = -6,58 m/s²

Werden die Kräfte aus der dynamischen Einwirkung und die jeweiligen maximalen Residualkräfte mit den Kräften verglichen, welche auf der Basis des Ruvolum Rock-Konzepts [1] unter Berücksichtigung einer dreidimensionalen Gleichgewichtsbetrachtung rein statisch ermittelt werden, so ergeben sich die in der Tabelle 2 zusammengefassten Faktoren.

Dieses Beispiel zeigt, dass durch den dynamischen Einfluss die in Realität auftretenden,

Tabelle 2. Statisch ermittelte Kräfte und Verhältnisse.

Kräfte aus statischer Rückrechnung	kN
Gesamtkraft nach oben abzutragen	9,2
Gesamtkraft nach unten abzutragen	7,8
Gesamtkraft je seitlich abzutragen	2,8

Verhältnisse dynamisch-statisch	K_{DS}
oben	1,80
unten	1,85
seitlich	1,69

Verhältnisse residual-statisch	K_{RS}
oben	1,48
unten	1,48
seitlich	1,41



Bild 32. Versuch 20 bei Versuchsbeginn.



Bild 33. Oberer, rechter Bereich bei Versuchsbeginn.



Bild 34. Obere Aufhängung bei Versuchsbeginn.



Bild 35. Bei Versuchsende.



Bild 36. Bei Versuchsende.



Bild 37. Auslenkung des unteren Randseils.

maximalen Kräfte deutlich größer sind als die rein statisch abgeschätzten. Im Versuch 7 resultiert beispielsweise ein Faktor von $\kappa_{DS} = 1,69 - 1,85$.

Auch ist zu erkennen, dass die im System verbleibenden, residualen Kräfte immer noch ungefähr einen Faktor von $\kappa_{RS} = 1,41 - 1,48$ höher sind als die statisch ermittelten. Dies ist dadurch zu erklären, dass durch das Hineinrutschen in das Netz der Felsblock zusätzlich gegen den Untergrund verkeilt wird. Das System ist nicht so elastisch, dass der Felsblock ausreichend zurückfedern kann und das Netz wieder entlastet wird. Durch diese Zwängung erhöht sich die Sicherheit des Blocks gegen ein weiteres Abrutschen, da zusätzliche Reibung mobilisiert wird.

Versuch 20

Der Versuch 20 basiert auf der Konfiguration V. Dabei ist oben und unten je ein 14-mm-Litzenseil seitlich gegen die Spiralseilanker mit $D = 14,5$ mm verspannt (Verankerungspunkte Nr. 13 bis 16; Bilder 32 bis 34). Oben und unten ist das Netz zusammen mit den Randseilen jeweils an zwei Anker aufgehängt. Seitlich wird das Netz ebenfalls über zwei Anker gehalten. Die seitlichen Ränder sind nicht zusätzlich über Randseile verstärkt. Die

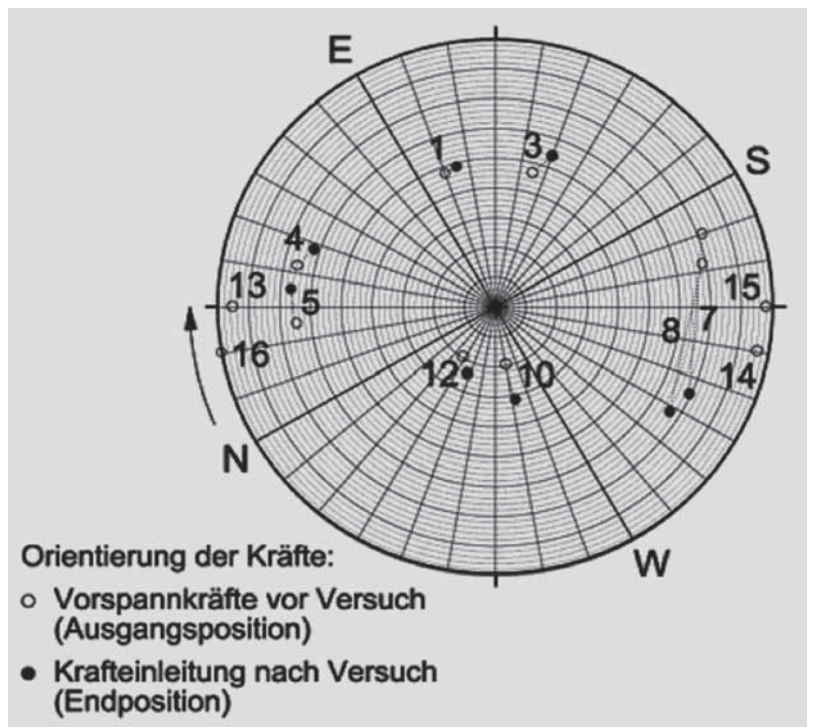


Bild 38. Räumliche Orientierung der Kraftvektoren.

Bilder 35 bis 37 zeigen die Situation bei Versuchs-ende. Durch die Anordnung der Tragseile wird die Steifigkeit der Sicherungsmaßnahme und damit verbunden der Lastabtrag wesentlich beeinflusst. Die räumliche Orientierung der Kraftvektoren gibt das Bild 38 wieder.

Im Gegensatz zu Versuch 7 werden im Versuch 20 nun auch gewisse Kräfte über das obere und untere Tragseil abgetragen. Die Analyse des Kräfteabtrags wird dadurch komplexer.

In der Tabelle 3 sind die Kräfte aus der maximalen dynamischen Einwirkung (Peaks) sowie die entsprechenden Residualwerte dargestellt. Die im Bild 39 erwähnten Kräfte Su und So entsprechen dabei den Kräften in den Randseilen unten und oben. Die Kraft in der Verankerung 5 wurde aufgrund der Ergebnisse aus den anderen Versuchen auf 50% der Kraft in der Verankerung 4 gesetzt. Diese Versuche mit Randseilen zeigten ein

mehr oder weniger symmetrisches Tragverhalten. Deshalb wurden die Kräfte in den seitlichen Verankerungen 7 und 8 gleich den Werten in den Verankerungen 4 und 5 gewählt.

Im Vergleich zum Versuch 7 war der Beschleunigungsweg mit 1 050 mm ungefähr doppelt so lang. Dies hatte auf die maximale Geschwindigkeit und die Beschleunigung einen direkten Einfluss. Folgende Maximalwerte wurden im Versuch 20 gemessen (Bild 40):

- maximale Geschwindigkeit = 2,30 m/s
- maximale Beschleunigung = +6,42 m/s²
- maximale Verzögerung = -15,67 m/s²

Die Beschleunigung war im Versuch 20 im Vergleich zum Versuch 7 um den Faktor 2,0 und die Verzögerung gar um den Faktor 2,4 größer. Durch die Anordnung der Randseile wirkte das Sicherungssystem steifer. Die Tatsache, dass im Versuch 20 je zwei seitliche Verankerungen mitwirkten, hatte sicherlich ebenfalls einen versteifenden Einfluss.

Das Verhältnis der nach oben abzutragenden Kräfte zur Summe der nach unten gerichteten Kräfte reduziert sich auf $\eta = 0,52 - 0,64$. Dafür gewinnen die seitlichen Verankerungen mit $\zeta = 0,52 - 0,61$ an Einfluss.

Werden die Kräfte aus der statischen Rückrechnung (Tabelle 4) mit den gemessenen, dynamischen Maximalwerten verglichen, so resultiert ein Verhältnis von $\kappa_{DS} = 2,3 - 2,7$. Interessant ist, dass die Verhältnisse κ_{RS} nahezu 1,0 betragen. Dies bedeutet, dass sich der Block durch die Anordnung der Tragseile weniger einklemmt und sich das System deutlich elastischer verhält. Die residualen Kräfte können in diesem Fall mit einer ausreichenden Genauigkeit mit einer einfachen Gleichgewichtsbetrachtung abgeschätzt werden.

Tabelle 3. Dynamische Einwirkungen, residuale Kräfte.

Verankerungen oben	1	3	1+3
dynamisch [kN]	9,2	8,8	18,0
residual [kN]	3,3	3,6	6,9

Verankerungen unten	10	12	10+12
dynamisch [kN]	5,9	3,4	9,3
residual [kN]	2,7	1,7	4,4

Verankerungen seitlich	4 / 7	5 / 8	4+5/7+8
dynamisch [kN]	7,4	3,7	11,1
residual [kN]	2,4	1,2	3,6

Randseile	oben	unten
dynamisch [kN]	6,5	15,0
residual [kN]	2,3	6,1

Verhältnisse Kräfte unten : oben	η
dynamisch	0,52
residual	0,64

Verhältnisse Kräfte seitlich : oben	ζ
dynamisch	0,61
residual	0,52

Verhältnisse dynamisch-residual	κ_{DR}
Verankerungen oben	2,63
Verankerungen unten	2,13
Verankerungen seitlich	3,09
Randseil oben	2,77
Randseil unten	2,45

Tabelle 4. Statisch ermittelte Kräfte und Verhältnisse.

Kräfte aus statischer Rückrechnung	kN
Gesamtkraft nach oben abzutragen	6,8
Gesamtkraft nach unten abzutragen	4,1
Gesamtkraft je seitlich abzutragen	4,1

Verhältnisse dynamisch-statisch	κ_{DS}
oben	2,6
unten	2,3
seitlich	2,7

Verhältnisse residual-statisch	κ_{RS}
oben	1,0
unten	1,1
seitlich	0,9

Erkenntnisse und Folgerungen für die Praxis

Spiralseilnetze, welche nach der Art von Maschengeflechten hergestellt werden, ermöglichen dank ihrer hohen Zugfestigkeit in Längs- und in Querrichtung sowie der hohen Knotenfestigkeit, welche bei punktueller Beanspruchung in den Befestigungen, aber auch beim Kräfteintrag wichtig sind, neue Möglichkeiten bei der Sicherung von instabilen, absturzgefährdeten Blöcken in steilen Felsböschungen.

Zuvor gemachte Modellversuche im Maßstab von 1:3,5 zur Natur sowie auch die hier vorgestellten Großfeldversuche zeigten dabei eine gute Übereinstimmung der gemessenen Kräfte mit jenen der Berechnung mit einem einfachen, theoretischen 2-D-Modell.

Die Großfeldversuche bewiesen die Praxistauglichkeit von Netzabdeckungen wie zum Beispiel des Felssicherungssystems Typ Spider. Zudem konnten in verschiedenen Versuchen in Abhängigkeit der Anordnung der Verankerungen die Kräftevektoren in deren Richtung und im jeweiligen Betrag ermittelt werden. Dabei spielt die Beschleunigungsstrecke des Blocks eine wesentliche Rolle. Aus den Versuchen können folgende Erkenntnisse und Folgerungen für die Praxis hergeleitet werden:

- Wird ein kritischer Felsblock auf der Grundlage der Gleichgewichtsbetrachtung rein statisch bemessen, so können die Kräfte in den Verankerungen teils massiv unterschätzt werden. Wie aus den Versuchen zu erkennen ist, können die Kräfte aus dem dynamischen Einfluss die statisch ermittelten Kräfte um einen Faktor von 1,5 – 2,5 oder mehr übersteigen. In der Bemessung von flexiblen Felssicherungssystemen ist folglich ein dynamischer Beiwert κ_{DS} zu berücksichtigen.
- Grundsätzlich werden die Kräfte eher nach oben abgetragen. Wie groß das Verhältnis η der Kräfte nach oben zu denen nach unten ist, hängt davon ab, wie die Verzahnung des Blocks mit der Netzabdeckung ist und ob Randseile eingesetzt werden.
- Die Großfeldversuche haben gezeigt, dass beim Einsatz eines großmaschigen Netzes zur Sicherung von individuellen Felsblöcken ein Randseil oben und unten und – falls möglich – auch seitlich anzuordnen ist. Damit kann das Tragverhalten des Systems wesentlich verbessert werden.

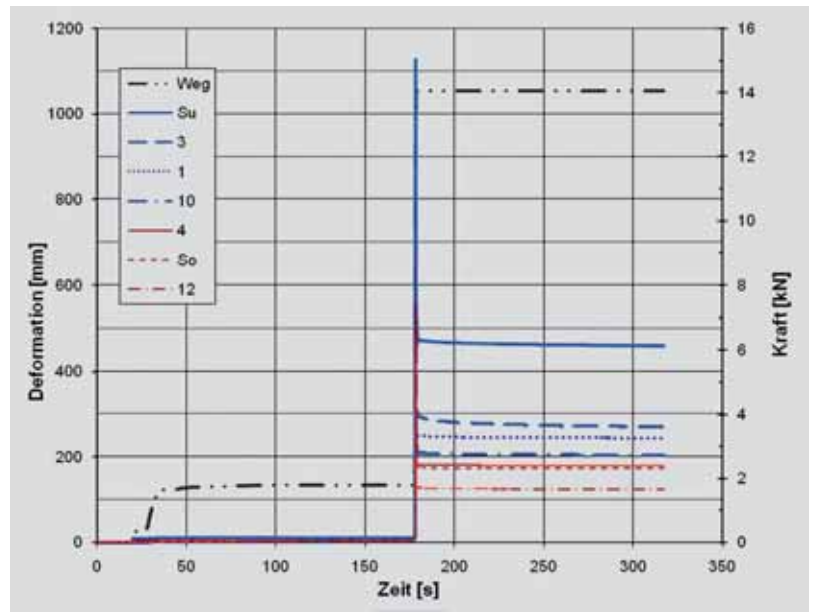


Bild 39. Gemessene Kräfte in den Verankerungen.

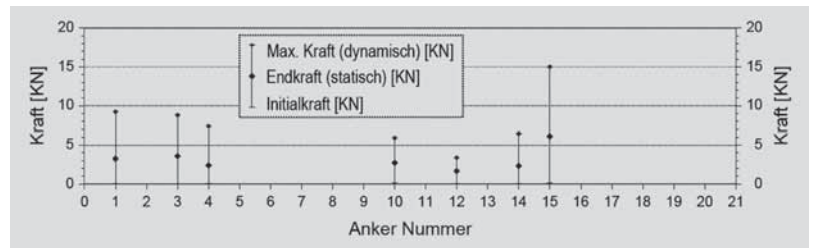


Bild 40. Maximale und residuale Kräfte als Grafik.

- Die Bemessung von flexiblen Felssicherungssystemen kann auf der Basis eines einfachen Modells geführt werden, welches auf der Gleichgewichtsbetrachtung beruht. Die einzelnen Verhältnissfaktoren und vor allem die dynamischen Auswirkungen sind zwingend auf die lokalen und projektspezifischen Gegebenheiten anzupassen.

Literatur

[1] Rüegger, R.; Flum, D.: Eine neue Generation von Spiralseilnetzen zur Sicherung von Felsböschungen – Versuche, Bemessung, Anwendungsbeispiele. Technische Akademie Esslingen, 6. Kolloquium: Bauen in Boden und Fels, Ostfildern, Deutschland, Januar 2008.

Wir verlegen den Untergrund in den Vordergrund.

