

Großfeldversuche bringen neue Erkenntnisse zur Stabilisierung von Rutschungen mit flexiblen Böschungsstabilisierungssystemen

DIPL.-ING. ARMIN RODUNER, DIPL.-GEOL. EBERHARD GRÖNER, Geobrugg AG, Romanshorn (CH), und FSR & DIPL.-GEOL. DANIEL FLUM, Rüegger+Flum AG, St. Gallen (CH), und FSR

1. Einleitung

Im Rahmen eines Forschungsprojektes der Kommission für Technologie und Innovation des Departements für Wirtschaft, Bildung und Forschung der Schweiz und unter Leitung der Fachhochschule Burgdorf wurden insgesamt 23 Grossfeldversuche mit flexiblen Böschungsstabilisierungssystemen durchgeführt. Durch Variation der Nagelabstände und des Bodenmaterials konnte das Tragverhalten der unterschiedlichen Systeme eingehend analysiert werden. Dies erlaubt einen objektiven Systemvergleich bei ähnlichen Verhältnissen.



Bild 1: Gesamtansicht Versuchseinrichtung

2. Versuchseinrichtung

Die Versuchseinrichtung besteht aus einem 13 x 15 m grossen Stahlrahmen, welcher über eine Fläche von 10 x 12 m mit Bodenmaterial bis zu einer Schichtstärke von 1.2 m gefüllt werden kann. Die Neigung des Rahmens lässt sich über einen 500 to Kran durch Anheben zwischen 0 und 85° variieren (Bild 1). Damit die Gleitflächen von oberflächennahen Instabilitäten sich innerhalb des Schüttmaterials ausbilden und nicht dem Bretterboden folgen, wurden zur Erhöhung der Rauhigkeit am Boden in Querrichtung Holzlatten aufgebracht. Die Geflechtabdeckung wurde oben und unten an Randseile vernäht. Diese wiesen je nach Sicherungssystem einen Durchmesser von 14 – 22 mm auf (Bild 2). Um einen Ausschnitt aus einer unendlich langen Böschung möglichst realitätsgetreu nachzubilden, wurde die Geflechtabdeckung seitlich über U-Profile gegen den Rahmen verschraubt. Dies entspricht einer linear unverschieblichen Lagerung. Als Nägel wurden GEWI D = 28 mm bzw. D = 32 mm mit vermorteltem Hüllrohr eingesetzt. Die Verbindung zur Rahmenkonstruktion erfolgte über eine am Nagel angeschweißte Flanschplatte, welche gegen eine weitere Stahlplatte verschraubt wurde. Der Nagel gilt als biegesteif mit dem Rahmen verbunden. Auf eine herkömmliche Vermörtelung des Nagels musste verzichtet werden. Zur Befestigung des Geflechtes wurden auf das Geflecht abgestimmte Krallplatten verwendet.

Die Geflechtabbahnen wiesen eine Breite von 2.0 - 3.5 m auf und wurden über systemspezifische Verbindungsmittel miteinander kraftschlüssig verbunden (Bild 3). Um ein Herausrieseln des rolligen Kieses durch die Maschen zu verhindern, wurde ab dem 4. Versuch unter der Geflechtabdeckung ein Gewebe mit einer Öffnungsweite von 20 x 20 mm ohne statischer Funktion aufgelegt.



Bild 2: Versuch Nr. 5, TECCO® G65/3 + P33, bei Versuchsbeginn, sandiger Kies 0 - 63 mm, Nagelraster 2.5 x 2.5 m, Randbefestigung oben

3. Bodenmaterial

Als Bodenmaterial wird zum einen ein Rundkies mit einer Korngrösse von 16 – 32 mm verwendet. Dieses rollige Material fällt beim Einbau stets in die dichteste Lagerung. Es wiederspiegelt zwar nur bedingt die natürlichen Verhältnisse, im Hinblick auf möglichst vergleichbare Randbedingungen eignet es sich jedoch optimal für Versuchszwecke.

Zum anderen wurde ein sandiger Kies aus gebrochenem Recyclingmaterial mit einer Korngrösse von 0 – 63 mm verwendet. Dieses weist eine gute Verzahnung auf und ist einem Gehängeschutt ähnlich. Tabelle 1 fasst die Bodenkennwerte auf charakteristischem Niveau zusammen. Diese basieren auf langjährigen Erfahrungswerten und dienen für Vergleichsrechnungen. Der Reibungswinkel des rolligen Kies entspricht dabei der Neigung des Schüttkegels in unmittelbarer Nähe.



Bild 3: Versuch Nr. 5, TECCO® G65/3 + P33, sandiger Kies 0 - 63 mm, mit Verbindungsclips und unterlegtem Gewebe

Bodenmaterial	$\varphi' k$ [°]	$C' k$ [kN/m ²]	γk [kN/m ³]
Rundkies, 16 – 32 mm	33	0	20
Sandiger Kies aus gebrochenem Recyclingmaterial, 0 – 63 mm	38	0	21

Tabelle 1: Bodenkennwerte

4. Messeinrichtung

Die Oberfläche inkl. Nagelköpfe und Stahlrahmen als Referenzebene wurde über Laserscans flächig abgetastet. Der Scan wurde nach einer Neigungsänderung von 5° jeweils wiederholt.

Zur Verifizierung der Scandaten und zur Überwachung der Deformationen während dem Versuch wurden die Verschiebungen des obersten mittleren Nagels über ein Seilpotentiometer gemessen. Zudem wurden die Kräfte im oberen und unteren Tragseil über speziell auf die Verhältnisse angepasste Kraftmessdosen ermittelt. Mittels Dehnmessstreifen können Informationen zu Einwirkungen auf ausgewählte Nägel bei sich ändernden Verhältnissen gewonnen werden. Eine detaillierte Analyse dazu erfolgt im Rahmen einer Dissertation.

5. Versuchsergebnisse

Für die Analyse des Trag- und Verformungsverhaltens von flexiblen Böschungsstabilisierungssystemen werden im Folgenden Laserscans bei einer Neigung des Stahlrahmens von 60° miteinander verglichen. Bild 4 zeigt den Zustand für ein hochfestes Stahldrahtgeflecht vom Typ TECCO® G65/4 mit einer Zugfestigkeit von 250 kN/m in Längsrichtung und einer Krallplatte P66 mit einer Breite von 66 cm mit Rundkies bei einem Nagelraster von 3.5 x 3.5 m.

Bild 5 zeigt dieselbe Anordnung jedoch unter Verwendung des TECCO® G65/3 mit einem Drahtdurchmesser von 3 mm und einer Zugfestigkeit von mindestens 150 kN/m. Das stärkere Geflecht verhält sich unter denselben Bedingungen steifer. Die Deformationen sind geringer und das Bodenmaterial ist weniger nach unten gerutscht.

Wird Bild 5 mit Bild 6 verglichen, wird folgendes deutlich: Zum einen werden kleinere Krallplatten verwendet (33 cm breite Krallplatte vom Typ P33

anstelle von 66 cm breiten Krallplatten vom Typ P66). Zum anderen kommt ein hochfestes Stahldrahtgeflecht mit einem Drahtdurchmesser von 2 mm mit einer Zugfestigkeit in Längsrichtung von mindestens 65 kN/m zum Einsatz. Der stabilisierende, seitliche Einfluss einer kleineren Krallplatte ist geringer als bei einer grösseren mit ausreichender Biegesteifigkeit. Zudem wird ein etwas schwächeres Geflecht unter denselben Randbindungen stärker beansprucht, was sich durch etwas grössere Deformationen mit einem breiteren und etwas mehr nach unten gerutschten Bauch bemerkbar macht.

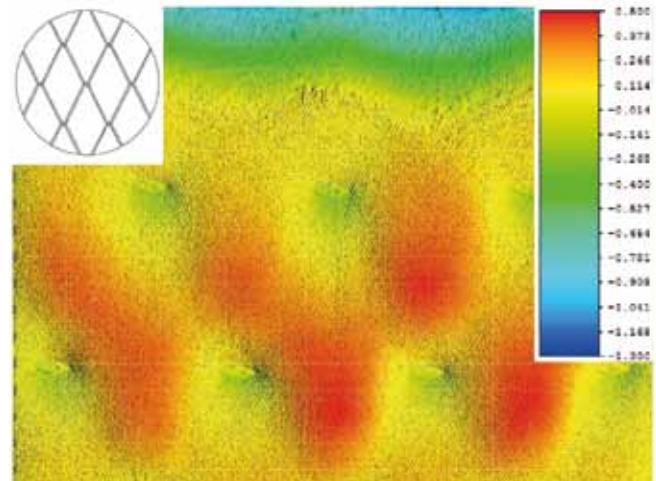


Bild 4: Test Nr. 12, TECCO® G65/4 + P66, Nagelraster 3.5 x 3.5 m, Rundkies 16 - 32 mm, $\alpha = 60^\circ$

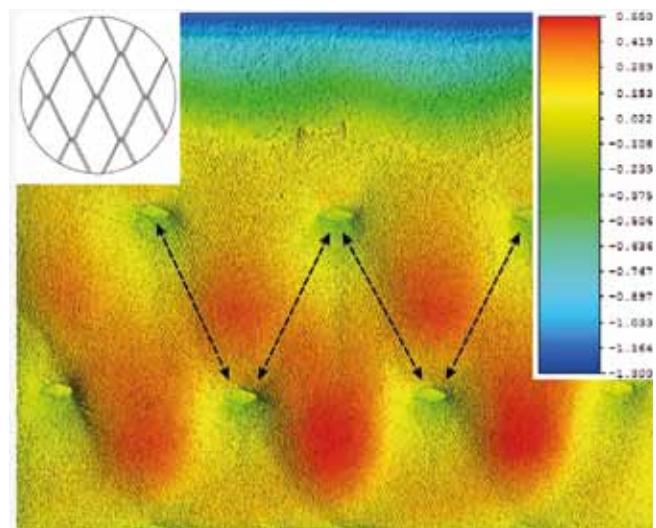


Bild 5: Test Nr. 14, TECCO® G65/3 + P66, Nagelraster 3.5 x 3.5 m, Rundkies 16 - 32 mm, $\alpha = 60^\circ$

Der Unterschied zwischen Bild 6 und Bild 7 liegt im verwendeten Bodenmaterial sowie im Geflecht. Wird Bodenmaterial mit besserer Verzahnung sowie ein deutlich stärkeres Stahldrahtgeflecht mit identischer Maschengrösse eingebaut, sind deutlich geringere Deformationen zu erwarten. Die Grossfeldversuche zeigten auch den positiven Einfluss der Installation der Krallplatten in vorab angelegten Vertiefungen. Durch das Anlegen von Mulden kann das Geflecht bereits während der Installation aktiv gespannt werden. Dadurch lassen sich die Deformationen beim Anheben des Stahlrahmens wesentlich reduzieren, was sich massgebend auf das Tragverhalten des Gesamtsystems auswirkt.

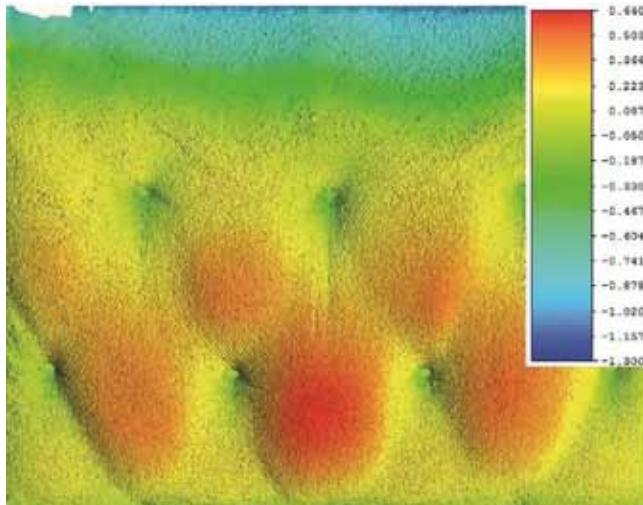


Bild 6: Test Nr. 17, TECCO® G65/2 + P33, Nagelraster 3.5 x 3.5 m, Rundkies 16/32 mm, $\alpha = 60^\circ$

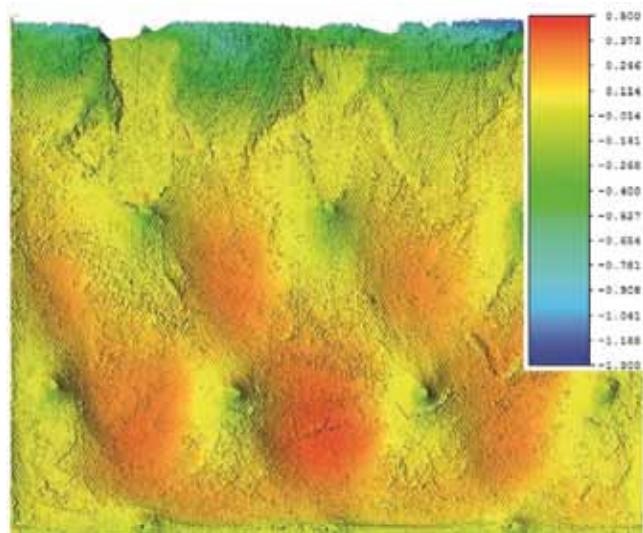


Bild 7: Test Nr. 13, TECCO® G65/4 + P33, Nagelraster 3.5 x 3.5 m, sandiger Kies 0 - 63 mm, $\alpha = 60^\circ$

Die Maschengeometrie spielt im Zusammenhang mit der Kraftübertragung von Geflecht auf die Vernagelung ebenfalls eine wesentliche Rolle. Seit der Einführung von hochfesten Stahldrahtgeflechten mit rhombusförmigen Maschen wird bewusst ein Nagelraster empfohlen, dessen Nagelreihen um den halben horizontalen Nagelabstand seitlich zu einander versetzt angeordnet sind. Früher waren quadratische Nagelraster üblich.

Wird der horizontale Nagelabstand a identisch dem Nagelabstand in der Falllinie b gesetzt, so wird zwischen den Nägeln ein Feld von $a \times 2b$ aufgespannt. Bei der Betrachtung des Kraftflusses von Nagel zu Nagel (Bild 5) fällt auf, dass dieser der Maschengeometrie folgt. Begünstigt durch einen möglichst direkten Kraftabtrag wirkt sich diese Tatsache positiv auf das Trag- und Deformationsverhalten aus.



Bild 8: Test Nr. 4, $\alpha = 65^\circ$

Bild 8 zeigt den Bereich um die Krallplatte. Außerdem ist der stabilisierende Einfluss der Platten zu erkennen und illustriert neben der Beanspruchung des Geflechtes auf Abscheren primär am oberen Krallplattenrand, dass die Verbindungen der Geflechtabbahnen untereinander kraftschlüssig sein müssen und einen wesentlichen Bestandteil des Gesamtsystems darstellen.

6. Verifizierung Bemessungskonzept RUVOLUM

Das Bemessungskonzept RUVOLUM wurde auf der Grundlage von langjährigen Erfahrungen im Bereich von flexiblen Böschungsstabilisierungssystemen entwickelt und konnte im Jahr 2000 anhand von Modellversuchen verifiziert werden. Die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Grossfeldversuche erlauben es erstmals, den theoretischen Modellansatz und die getroffenen Annahmen unter realistischen Bedingungen und mittels wiederholbaren Versuchen zu überprüfen.

Bild 9 zeigt einen Zweikörpergleitmechanismus, welcher zwischen Nägeln herausgleiten möchte und durch die Geflechtabdeckung zusammen mit den Nägeln daran gehindert wird. Bild 10 illustriert den Querschnitt des Bruchkörpers unter dem stabilisierenden Einfluss der Krallplatten. Der für die Bemessung massgebende Bruchmechanismus weist schliesslich eine Breite von a_{red} auf.

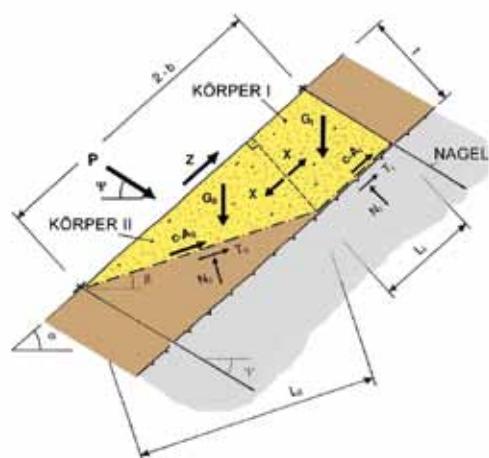


Bild 9: Zweikörpergleitmechanismus in der Untersuchung von oberflächennahen Instabilitäten nach dem RUVOLUM-Konzept

Die grafische Auswertungen der Laserscans zeigen bereits eine gute Überstimmung mit dem Modellansatz nach dem RUVOLUM-Konzept. Nun sollen Vergleichsrechnungen durchgeführt werden. Dabei ist zwischen der Bemessungssituation unter Berücksichtigung der entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerte gemäß EUROCODE 7 und dem Bruchzustand zu unterscheiden.

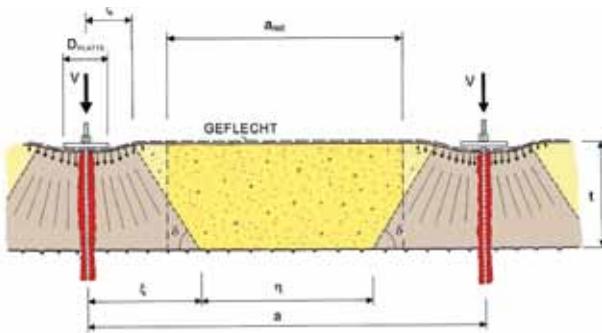


Bild 10: Reduzierter Querschnitt infolge des stabilisierenden Einflusses der seitlichen Krallplatten bzw. Nägel nach dem RUVOLUM-Konzept

Für die Rückrechnung sollen als Beispiel die Ergebnisse des Grossfeldversuches Nr. 11 unter Verwendung des Stahldrahtgeflechtes TECCO® G65/3 in Kombination mit Krallplatten vom Typ P33 und Nägeln vom Typ GEWI D = 32 mm mit einem Abrostungszuschlag von 4 mm auf den Durchmesser bezogen dienen. Die ersten oberflächennahen Bewegungen traten bei einer Neigung von $\alpha = 53^\circ$ auf (Bild 11). Das Geflecht wurde schliesslich bei $\alpha = 80^\circ$ durchgestanzt.



Bild 11: Test Nr. 11, TECCO® G65/3 + P33, Nagelraster 3.5 x 3.5 m, sandiger Kies 0 - 63 mm, $\alpha = 53^\circ$, erste oberflächennahe Rutschungen

Wird das im Versuch Nr. 11 eingesetzte flexible Böschungsstabilisierungssystem auf der Basis des RUVOLOM-Konzeptes nach EUROCODE 7 bemessen, resultiert unter Berücksichtigung der Parameter in Tabelle 2 eine maximal zulässige Böschungsneigung von $\alpha = 50^\circ$. Wird der Nagelraster auf 3.40 x 3.40 m reduziert, erhöht sich die zulässige Böschungsneigung auf $\alpha = 53^\circ$.

Die Ergebnisse der Rückrechnung korrelieren sehr gut mit der Situation, in welcher erste oberflächennahe Instabilitäten zu beobachten waren. Werden alle Teilsicherheitsbeiwerte gleich 1.00 gesetzt, wird der Radius des Druckkegels auf $Z = 0.30$ m erhöht, der Tragwiderstand des Geflechtes auf punktuelle Krafteinleitung beim oberen Nagel mit $Z = 30$ kN voll ausgenutzt und wird die Nagelneigung nach wie vor senkrecht zur Böschungs-oberfläche angenommen, tritt der Bruch rechnerisch bei einer Neigung von $\alpha = 76^\circ$ ein. Dieses Ergebnis stimmt ebenfalls sehr gut mit den Versuchsergebnissen überein.

Parameter	
Böschungsneigung	$\alpha = 50^\circ$
Nagelabstand horizontal	$a = 3.50 \text{ m}$
Nagelabstand in der Falllinie	$b = 3.50 \text{ m}$
Schichtdicke	$t = 1.00 \text{ m}$
Radius des Druckkegels	$\xi = 0.15 \text{ m}$
Neigung des Druckkegels zur Horizont.	$\delta = 45^\circ$
Reibungswinkel des Bodens	$\varphi_k = 38^\circ$
Kohäsion Boden	$c_k = 0 \text{ kN/m}^2$
Raumgewicht Boden	$\gamma_k = 20 \text{ kN/m}^3$
Böschungsparallele Kraft	$Z = 15 \text{ kN}$
Nagelneigung zur Horizontalen	$\Psi = 40^\circ$
Teilsicherheitsbeiwert Reibungswinkel	$\gamma_\varphi = 1.25$
Teilsicherheitsbeiwert Kohäsion	$\gamma_c = 1.25$
Teilsicherheitsbeiwert Raumgewicht	$\gamma_\gamma = 1.00$
Modell-Unsicherheitsbeiwert	$\gamma_{mod} = 1.10$

Tabelle 2: Parameter für Rückrechnung

7. Unterschiedliche Sicherungssysteme

Neben Geflechtabdeckungen mit rhombusförmigen Maschen wurden Hexagonalstahldrahtgeflechte mit Vertikalseilen sowie schwere Quadratmaschengeflechte getestet. In Abhängigkeit der Maschengeometrie mussten dabei wesentliche Unterschiede im Tragverhalten festgestellt werden. Bild 12 und 13 zeigen ein Hexagonaldrahtgeflecht mit einer Maschengröße von 80 x 100 mm und einem Drahtdurchmesser von 2.7 mm kombiniert mit Vertikalseilen mit einem Durchmesser von 8 mm in Abständen von 30 cm zu einander.



Bild 12: Test Nr. 7, Hexagonalstahldrahtgeflecht 80x100/2.7 mm mit Vertikalseilen in Abständen von 30 cm

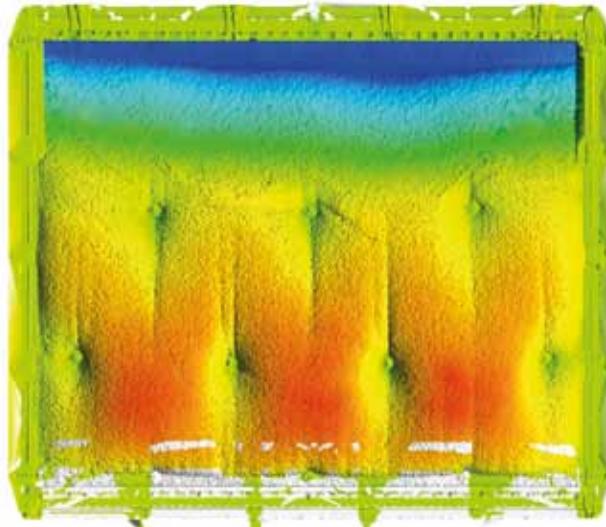


Bild 13: Test Nr. 7, Hexagonalstahldrahtgeflecht mit Vertikalseilen in Abständen von 30 cm, Nagelraster 3.5 x 3.5 m, Rundkies 16/32 mm, $\alpha = 60^\circ$

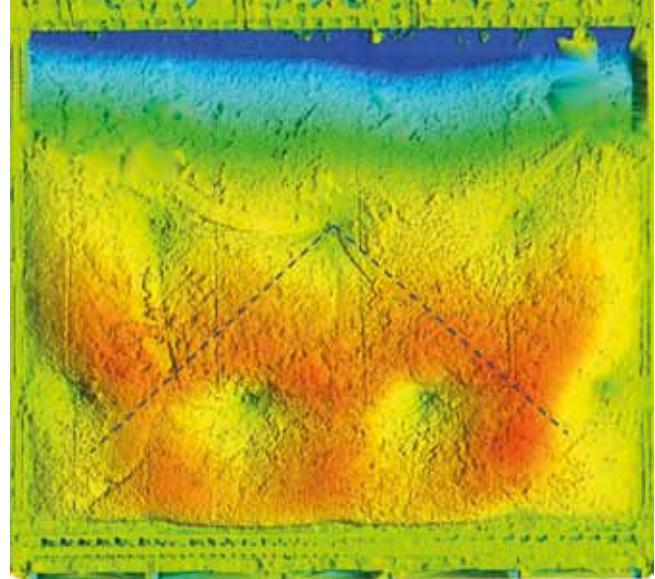


Bild 15: Test Nr. 8, Quadratmaschengeflecht 50 x 50 / 4.6 mm, Nagelraster 3.5 x 3.5 m, Rundkies 16/32 mm, $\alpha = 60^\circ$



Bild 14: Test Nr. 8, Quadratmaschengeflecht 50 x 50 / 4.6 mm

Die Versuchsanordnung für Test Nr. 8 entsprach derjenigen für Versuch Nr. 7. Als Geflechtabdeckung wurde hingegen ein Quadratmaschengeflecht mit einer Maschengröße von 50 x 50 mm und einem Drahtdurchmesser von 4.6 mm mit darauf angepassten Krallplatten verwendet. Bild 14 zeigt das Geflecht.

Als Bodenmaterial wurde der Rundkies 16 – 32 mm verwendet. Der Nagelraster betrug 3.5 x 3.5 m. Wie die Auswertung des Laserscans zeigt, konnten die Lasten aufgrund der vertikal dominierten Struktur nicht bzw. nur bedingt auf die Nägel abgetragen werden. Eine Lastkonzentration und grösere Deformationen im Fussbereich der Böschung waren die Folge. Durch die Struktur des Geflechtes vorgegeben möchte dieses die Kräfte unter rund 45° seitlich abtragen wie in Bild 15 mit den blau gestrichelten Linien angedeutet. Wird derselbe Nagelraster wie bei den anderen Versuchen ausgeführt, treffen die Kraftvektoren ausgehend vom oberen Nagel nicht auf einen unteren.

Der Kräfteabtrag erfolgt über Umlagerungen mit der Folge von grösseren Deformationen. Um die Situation zu verbessern, müsste die Nagelanordnung auf die Struktur des Geflechtes angepasst bzw. der Nagelabstand in der Falllinie entsprechend reduziert werden.

Zur Charakterisierung der Geflechte bzw. der Sicherungssysteme wurden die stabilisierenden Winkel auf Bemessungsniveau und auf Grundlage der Grossfeldversuche ermittelt. Hierfür wurde der Reibungswinkel des verwendeten Bodens mit 33° um den Böschungswinkel auf Bemessungsniveau, wie oben beschrieben ermittelt, reduziert. Es hat sich gezeigt, dass das Hybridegeflecht, das schwere Quadratmaschengeflecht 50 x 50x 4.6 und das TECCO G65/2 auf demselben Niveau mit 8° bzw. 9° liegen. Mit dem TECCO G65/3 und der P33 Krallplatte erzielt man den doppelten Stabilisierungswinkel. Je nach verwendeter Krallplatte können mit dem TECCO G65/4 Stabilisierungswinkel von 23° und 27° ermittelt werden was einer Erhöhung um den Faktor 1.5 bzw. 3.0 zu den vorgenannten Sicherungssystemen entspricht (Tabelle 3).

	Reibungs-winkel [°]	Dimensionierungs-neigung [°]	Stabilisierter Winkel [°]
G65/2 mit P33	33	42	9
G65/3 mit P33	33	51	18
G65/3 mit P66	33	55	22
G65/4 mit P33	33	56	23
G65/4 mit P66	33	60	27
Hybridgeflecht	33	42	9
Quadratmasch.	33	41	8

Tabelle 3: Ergebnisse der Rückrechnung für die verschiedenen Netze auf Bemessungsniveau.

8. Zusammenfassung

Die durchgeführten Grossfeldversuche bilden eine ideale Basis, um das Tragverhalten flexibler Böschungsstabilisierungssysteme besser zu verstehen, diese weiter zu entwickeln und optimal auf projektspezifische Bedürfnisse anpassen zu können. Die Grösse des Versuchsrahmens scheint vernünftig gewählt zu sein, um oberflächennahe Instabilitäten zu simulieren. In ergänzenden Versuchen sollen weitere Erkenntnisse auch zu Einwirkungen auf den Nagel und insbesondere im Nagelkopfbereich gewonnen werden. Das Bemessungskonzept RUVOLUM konnte entsprechend verifiziert werden. Die Ergebnisse stimmen gut mit den Versuchsergebnissen und den über die letzten 15 Jahre gemachten Erfahrungen überein. Es basiert auf einem Modellansatz, welcher die realen Verhältnisse vereinfachend jedoch ausreichend genau darstellt.