Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr. 1, SKZ-KFE gGmbH,

Nr. 2, Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

> vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

> > geförderten Vorhaben 15717 N

Erarbeitung und Verifizierung von Auswahlkriterien für geosynthetische Erosionsschutzsysteme

(Bewilligungszeitraum: 01.03.2009 - 31.08.2011)

der AiF-Forschungsvereinigung

Fördergemeinschaft für das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum e.V.,

Würzburg, 28.11.2011

Dr.-Ing. Ernö Németh (Foschungsstelle Nr. 1)

Dipl.-Ing. Jürgen Eppel (Forschungsstelle Nr. 2) Name und Unterschrift des der Projektio (er(s) an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:

*

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Veitshöchheim, 28 M. Zom Ort. Datum

Zusammenfassung

AiF-Nr.: 15717 N

Erarbeitung und Verifizierung von Auswahlkriterien für geosynthetische Erosionsschutzsysteme

Angesichts des sich abzeichnenden Klimawandels mit der erwarteten Zunahme an Starkniederschlägen auf der einen, aber auch längeren Trockenperioden auf der anderen Seite, kommt der Sicherung erosionsgefährdeter Erdbauwerke gemeinsam mit stresstoleranten Pflanzenmischungen in Zukunft eine noch größere Bedeutung zu. Allerdings fehlen Erkenntnisse darüber, welches Erosionsschutzsystem, bei welchen Standortbedingungen, Bodenverhältnissen und Begrünungsvarianten aus bau- und vegetationstechnischer Sicht eingesetzt werden kann.

Im Laufe des Forschungsprojekts wurden dafür geeignete Laborprüfverfahren entwickelt und erprobt, die die Ausgangsbedingungen konstant halten und einen Vergleich ermöglichen. Parallel dazu wurden Felduntersuchungen durchgeführt, die eine praxisnahe Austestung der verschiedenen Erosionsschutzsysteme unter Standortbedingungen ermöglichen.

Im Rahmen von Feldversuchen wurden acht unterschiedliche Erosionsschutzsysteme in ihrer Wirkungsweise auf die Bodenerosion und auf die Vegetationsentwicklung getestet. Neben Erosionsschutzsystemen aus natürlichen Rohstoffen wie Kokos, Stroh, Jute, Schafwolle kamen auch Kunststoffprodukte aus Polypropylen (PP), Polyester (PET) und Polyamid (PA) zur Anwendung. Die Erosionsschutzsysteme wurden in Kombination mit zwei Saatgutmischungen getestet. Zur Aussaat kamen in einer praxisnahen Vorgehensweise, der für das Bauwerk ursprünglich vorgesehene Standardlandschaftsrasen RSM 7.1.2 und eine neu entwickelte Kräutermischung.

Als Parameter bei den Pflanzenbonituren zur Bewertung der Vegetationsentwicklung wurden durch die LWG Keimverhalten, Etablierung, Deckung, Vitalität, Artenzahl und am Ende des Projektes auch die Durchwurzelung aufgenommen und bewertet.

Eine gleichmäßige Entwässerung des Oberflächenwassers von der Fahrbahn sowie auch von Schichtenwasser aus der Trag- und Frostschutzschicht ist für einen funktionierenden Erosionsschutz von besonderer Bedeutung. Die Erosionsschutzsysteme sind, wie auf dem Testfeld beobachtet, nicht geeignet Bodenerosion infolge punktuell starker Wasseraustritte bzw. -zutritte in die Böschung zu verhindern.

Ein weiterer entscheidender Faktor für die Funktionsfähigkeit der Erosionsschutzsysteme ist die Qualität der Verlegungsarbeiten. Für eine optimale Wirkung sowohl bezüglich der Vegetationsentwicklung als auch der Schutzfunktion ist auf eine entsprechende Vorbereitung der Böschungsoberfläche und auf eine fachgerechte Verlegung der Produkte zu achten.

Die ursprüngliche Annahme, dass Erosionsschutzsysteme eine allgemeine positive Auswirkung auf die Vegetation ausüben, konnte nicht bestätigt werden. Bezüglich der Vegetationsentwicklung zeigen sich signifikante systembedingte Unterschiede. Parallel zu den Feldversuchen fanden in den Laboren des SKZ und der LWG umfangreiche Untersuchungen statt. Im SKZ wurden die anwendungstechnisch relevanten Eigenschaften (physikalische, mechanische, hydraulische, hygrische, und vegetationstechnisch relevante Eigenschaften, Beständigkeit gegen mikrobiologischen Abbau, Witterungsbeständigkeit, Brandverhalten) an 50 nach Praxisrelevanz und Marktfähigkeit festgelegten repräsentativen Erosionsschutzprodukten erfasst und systematisch miteinander verglichen. An der LWG wurde die Erosionssicherheit über eine Regensimulation - Simulation erosiver Starkregenereignisse - an Böschungsmodellen untersucht.

Es konnte nur z. T. auf bestehende Prüfmethoden zurückgegriffen werden. Insbesondere hinsichtlich der Eigenschaften, die direkt Einfluss auf die Vegetation und den Boden nehmen, wie z. B. der Verdunstungsschutz und die Wasseraufnahmekapazität bei Beregnung, gab es keine übertragbaren Prüfnormen. Im Zuge des Forschungsvorhabens wurden mehrere neue bzw. angepasste Prüfmethoden erarbeitet (SKZ EC 1, SKZ EC 2, SKZ EC 3, SKZ EC 4, SKZ EC 5, SKZ EC 6, SKZ/LWG EC 7, SKZ EC 8).

Die verschiedenen Erosionsschutzprodukte weisen bedingt durch ihre Rohstoffe und Herstellungsverfahren sogar innerhalb einer Erosionsschutzsystemvariante wesentliche Unterschiede in ihren Eigenschaften auf.

Durch die Beurteilung der Relevanz der Eigenschaften bzw. Prüfungen wurde die Grundlage für eine fachgerechte und anwendungsbezogene Beschreibung der Leistungsmerkmale von Erosionsschutzprodukten für Böschungen geschaffen. Dabei muss grundsätzlich zwischen zwei Bauweisen, Erosionsschutzsysteme mit Boden überdeckt und nur auf Boden verlegt (ohne Bodenabdeckung), unterschieden werden.

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass die neu gewonnenen Erkenntnisse aus den Feld- und Laboruntersuchungen wesentlich dazu beitragen können, Erosionsschutzsysteme für die Böschungssicherung in der Zukunft standortgerecht zu planen und effizient einzusetzen.

Für die beteiligten Forschungsstellen und insgesamt gilt damit:

"Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht"

Das IGF-Vorhaben 15717 N der Forschungsvereinigung FSKZ e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung.

INHALTSVERZEICHNIS

1.	ΜΟΤΙ	ATION UND PROBLEMSTELLUNG	6
2.	GRUN	DLAGEN	8
2.1.	Bede	eutung der Bodenerosion für den Böschungsbau	8
2.2.	Stan	d der Technik	10
2.3.	Geos	synthetische Erosionsschutzsysteme	12
3.	EXPE	RIMENTELLE VORGEHENSWEISE	15
3.1.	Ziels	setzung	15
3.2.	Feld	untersuchungen an Erosionsschutzsystemen	16
3.	2.1.	Versuchsmaterialien für Feldversuche	16
3.	2.2.	Erstellung der Testparzellen	18
3.	2.3.	Untersuchungen zur Vegetationsentwicklung auf dem Testfeld durch die LV	NG 26
	3.2.3.1	Abnahme	27
	3.2.3.2	Deckung	28
	3.2.3.3	Vitalität	28
	3.2.3.4	Artenzahl	28
	3.2.3.5	Bestandsstruktur	29
	3.2.3.6	Wurzelentwicklung	29
3. 3.3.	2.4. Lab	Untersuchungen zur Erosionssicherheit auf den Testparzellen durch das SKZ	Z 29
3.	3.1.	Versuchsmaterialien für Ermittlung der Produkteigenschaften	30
3.	3.2.	Untersuchungsmethoden	38
	3.3.2.1	Dicke	40
	3.3.2.2	Flächenbezogene Masse	40
	3.3.2.3	Porosität	41
	3.3.2.4	Zugeigenschaften	41
	3.3.2.5	Biegesteifigkeit	42
	3.3.2.6	Verbundfestigkeit	43
	3.3.2.7	Druckstauchungsverhalten	45
	3.3.2.8	Rückstellverhalten	46
	3.3.2.9	Dämpfungsverhalten	46
	3.3.2.10	0 Wasserableitvermögen	47
	3.3.2.1	1 Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene	48
	3.3.2.12	2 Wasseraufnahmekapazität, Verfahren Eintauchen	49
	3.3.2.13	3 Wasseraufnahmekapazität, Verfahren Beregnen	50
	3.3.2.14	4 Dickenänderung bei Wasserlagerung (Quellverhalten)	51
	3.3.2.1	5 Öffnungsweite	51
	3.3.2.10	5 Lichtdurchlässigkeit	52
	3.3.2.1	7 Verdunstungsschutz	53
	3.3.2.18	8 Witterungsbeständigkeit	54

3.3.2.1	9 Mikrobiologische Abbaubarkeit	
3.3.2.2	0 Schwelwiderstand (Zigaretten-Test)	
3.3.2.2	1 Brandverhalten	
3.3.3.	Versuchsprogramm zu Laboruntersuchungen	
3.4. Ber	egnungstests in der LWG	
3.4.1.	Entwicklung des Prüfverfahrens	
3.4.2	Herstellung des Böschungsmodells	65
343	Beregnungsanlage	
344	Auswahl der Bodenmaterialien	69
3.4.5.	Aufbereitung und Einbau der Testböden	
4 FRGE		74
4. LINGE		
4.1. Veg	etationsentwicklung auf dem Testfeld	
4.1.1.	Witterungsverlauf	74
4.1.2.	Bewertung der Vegetationsentwicklung ohne Berücksichtigung der	
unterschi	edlichen Saatgutmischungen	
4.1.2.1	Abnahme	76
4.1.2.2	Deckung	77
4.1.2.3	Artenzahl	79
4.1.2.4	Vitalität	
4.1.2.5	Bestandsstruktur	
4.1.3.	Bewertung der Vegetationsentwicklung bezüglich der unterschiedlicher	1
Saatgutm	ischungen	
4.1.3.1	Abnahme	
4.1.3.2	Deckung	
4.1.3.3	Artenzahl	
4.1.3.4	Vitalität	
4.1.3.5	Bestandstruktur	90
4.1.3.6	Durchwurzelung	
4.1.4.	Zusammenfassende Bewertung der Vegetationsentwicklung	93
4.2. Ero	sionssicherheit auf den Testparzellen	95
43 Erg	ebnisse der Laboruntersuchungen an den Erosionsschutzprodukten	101
4.3.1.	Testergebnisse	
4.3.1.1	Erosionsschutzmatten	
4.3.1.2	Geomatten	
4.3.1.3	Geomatten in Kombination mit Bewehrungselementen	107
4.3.1.4	Geozellen	
4.3.1.5	Erosionsschutzgewebe	110
4316	Erosionsschutzvliesstoffe	110
4317	Hangfaschine	113
4.3.2	Beurteilung der Untersuchungsmethoden	
4.3.2.1	Physikalische Eigenschaften	
4322	Mechanische Eigenschaften	114
4.3.2.3	Hydraulische Eigenschaften	
4324	Hyorische Eigenschaften	115
4325	Vegetationsrelevante Eigenschaften	115
4.3.2.6	Beständigkeitsprüfungen	
	000	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·

4.3.3.	Zusammenfassende Bewertung der ermittelten Produkteigenschaften	
4.3.3.1	Physikalische Eigenschaften	
4.3.3.2	Mechanische Eigenschaften	
4.3.3.3	Hydraulische Eigenschaften	
4.3.3.4	Hygrische Eigenschaften	
4.3.3.5	Vegetationstechnische Eigenschaften	
4.3.3.6	Beständigkeitsprüfungen	
4.3.3.7	Kategorisierung der Eigenschaften der Erosionsschutzprodukte	
4.4. Ergel	onisse der Beregnungstests	
4.4.1. [•]	Vorversuche mit den Testböden	
4.4.2 I	Messungen im unbegrünten Zustand	
4.4.2.1	Bauweise "mit Boden überbedeckt"	
4.4.2.2	Bauweise "auf Boden verlegt"	
4.4.3 I	Messungen im begrünten Zustand	
4.4.2.	Kritische Bemerkungen und Folgerungen für die Praxis	
4.4.2.1	Prüfverfahren	
4.4.4.2	Begrünung	
4.4.4.3	Zusammenfassende Bewertung der Beregnungstests	
45 Down	rtung dar Dalavang van Driifungan an Fragiongsahutzavataman	146
4.5. Bewe	rtung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen	146
4.5. Bewe	rtung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen	
4.5. Bewe 5. ZUSAN	rtung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen IMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND KMU-RELEVANZ	146 148
4.5. Bewe5. ZUSAN6. VERWI	rtung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen IMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND KMU-RELEVANZ ENDUNG DER ZUWENDUNGEN	146 148 152
 4.5. Bewe 5. ZUSAM 6. VERWI 6.1. SKZ. 	rtung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen IMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND KMU-RELEVANZ ENDUNG DER ZUWENDUNGEN	146 148 152 152
 4.5. Bewe 5. ZUSAN 6. VERWI 6.1. SKZ. 	rtung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen IMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND KMU-RELEVANZ ENDUNG DER ZUWENDUNGEN	146 148 152 152
 4.5. Bewe 5. ZUSAN 6. VERWI 6.1. SKZ 6.2. LWG 	rtung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen IMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND KMU-RELEVANZ ENDUNG DER ZUWENDUNGEN	146 148 152 152 152
 4.5. Bewe 5. ZUSAN 6. VERWI 6.1. SKZ. 6.2. LWG 	rtung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen IMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND KMU-RELEVANZ ENDUNG DER ZUWENDUNGEN	146 148 152 152 152
 4.5. Bewe 5. ZUSAM 6. VERWI 6.1. SKZ 6.2. LWG 7. BEABS 	rtung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen IMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND KMU-RELEVANZ ENDUNG DER ZUWENDUNGEN SICHTIGTE UMSETZUNG DER ERZIELTEN	
 4.5. Bewe 5. ZUSAM 6. VERWI 6.1. SKZ 6.2. LWG 7. BEABS FORSCHUM 	rtung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen IMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND KMU-RELEVANZ ENDUNG DER ZUWENDUNGEN SICHTIGTE UMSETZUNG DER ERZIELTEN	146 148 152 152 152
 4.5. Bewe 5. ZUSAN 6. VERWI 6.1. SKZ 6.2. LWG 7. BEABS FORSCHUN 7.1 Plan 	rtung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen IMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND KMU-RELEVANZ ENDUNG DER ZUWENDUNGEN GICHTIGTE UMSETZUNG DER ERZIELTEN NGSERGEBNISSE	
 4.5. Bewe 5. ZUSAN 6. VERWI 6.1. SKZ 6.2. LWG 7. BEABS FORSCHUN 7.1. Plan 	rtung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen IMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND KMU-RELEVANZ ENDUNG DER ZUWENDUNGEN SICHTIGTE UMSETZUNG DER ERZIELTEN NGSERGEBNISSE	
 4.5. Bewee 5. ZUSAM 6. VERWI 6.1. SKZ 6.2. LWG 7. BEABS FORSCHUN 7.1. Plan 7.2. Anga 	rtung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen IMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND KMU-RELEVANZ ENDUNG DER ZUWENDUNGEN SICHTIGTE UMSETZUNG DER ERZIELTEN NGSERGEBNISSE zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	
 4.5. Bewe 5. ZUSAN 6. VERWI 6.1. SKZ. 6.2. LWG 7. BEABS FORSCHUN 7.1. Plan 7.2. Anga 	rtung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen IMENFASSUNG DER ERGEBNISSE UND KMU-RELEVANZ ENDUNG DER ZUWENDUNGEN SICHTIGTE UMSETZUNG DER ERZIELTEN VGSERGEBNISSE	

1. Motivation und Problemstellung

Der Forschungsantrag wurde durch Gespräche auf Normungsausschuss-Sitzungen bei CEN/TC 189 "Geosynthetics" und bei Tagungen und Messen mit Vertretern von Straßenbauämtern, Herstellern und Anwendern von Erosionsschutzmatten initiiert [1].

Erfahrungen aus der Praxis belegen immer wieder, dass besonders neu angelegte steile Böschungen durch mangelnden Bewuchs bzw. fehlenden Oberflächenschutz erosions- und rutschanfällig sind. Insbesondere angesichts des sich abzeichnenden Klimawandels mit der erwarteten Zunahme an Starkniederschlägen auf der einen und langen Trockenperioden auf der anderen Seite, kommt der Sicherung erosionsanfälliger Erdbauwerke eine noch größere Bedeutung zu.

Erosionsschutzsysteme werden eingesetzt, um Böden auf geneigten Flächen wie zum Beispiel an Straßenböschungen vor Erosion durch Wind und vor allem durch Wasser zu schützen. Die wirtschaftliche Bedeutung ist sehr hoch, weil bei Erdbaumaßnahmen insbesondere an Verkehrstrassen deutschlandweit große Flächen der Bodenerosion ausgesetzt sind und die Behebung von Schadensfällen immer auch zusätzlichen Aufwand und Kosten verursacht.

Allerdings fehlen Erkenntnisse darüber, welches System, bei welchen Untergrundverhältnissen, mit welcher Überdeckung, unter welchen Standortbedingungen und mit welcher Begrünungsvariante aus bau- und vegetationstechnischer Sicht eingesetzt werden kann. In Deutschland existieren deshalb wie auch in anderen europäischen Ländern noch keine speziellen Regelwerke oder Richtlinien, die den Erosionsschutz von Böschungsflächen mit Hilfe von zusätzlichen ingenieurtechnischen Maßnahmen, wie Einbau von geosynthetischen Erosionsschutzsystemen in notwendiger Weise behandeln. In der ATV DIN 18320 "Landschaftsbauarbeiten" mit dazugehöriger Fachnorm DIN 18918 "Ingenieurbiologische Sicherungsbauweisen" - Stand August 2002 - findet sich zwar ein Hinweis auf die Existenz dieser Bauweise (Bodenabdeckung mit Erosionsschutz); weiterführende Anforderungen an die Beschaffenheit der Bauteile und deren Verarbeitung bleiben aber ungenannt. Auch in der ATV 18310 "Sicherungsarbeiten an Gewässern, Deichen und Küstendünen" mit der zugehörigen gleichnamigen Fachnorm DIN 19657 sind keine bauweisenspezifischen Ausführungshinweise enthalten, was angesichts der schon im Jahre 1973 erfolgten Veröffentlichung dieser Fachnorm nicht sonderlich überrascht. Auch in den zuständigen Regelwerken des Straßenbaus, wie z. B. in der Richtlinie für die Anlage von Straßen (RAS), Teil Landschaftsgestaltung, Abschnitt "Lebendverbau" aus dem Jahre 1983 fehlt bei den dort angeführten "Begrünungsmatten" ein Bezug zu den geosynthetischen Erosionsschutzsystemen. In den USA, wo die Wichtigkeit der Erosionsschutzsysteme schon erkannt wurde, gibt es mittlerweile einige Prüfmethoden [2]. Eine Übertragung dieser Prüfmethoden erfordert jedoch eine Anpassung an europäische Rahmenbedingungen.

Da die Wirkungsweise dieser unterschiedlichen Systeme bisher noch nicht systematisch erprobt ist, fehlen auch die Parameter für eine anwendungsbezogene technische Beschreibung. Alle Betroffenen (Behörden, Baufirmen, Wissenschaftler und Hersteller) sind deshalb der Ansicht, dass es unbedingt notwendig ist, an konkreten Objekten produkt- und herstellerneutral systematische Untersuchungen mit unterschiedlichen, aus natürlichen und synthetischen Werkstoffen hergestellten geosynthetischen Erosionsschutzsystemen (GES) durchzuführen, um das Wissen zu vertiefen und den technischen Nutzen anwendungsbezogen beschreiben zu können.

Der hierzulande existierende unzureichende Kenntnisstand ist sehr bedauernswert, da es aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen auch in Europa sehr wichtig ist, dem Erosionsschutz bei Baumaßnahmen einen angemessenen Stellenwert einzuräumen. Das fehlende Wissen resultiert vor allem daraus, dass die dazu notwendigen experimentellen Felduntersuchungen einerseits sehr arbeits- und zeitintensiv sind und z. Z. noch keine entsprechenden Prüfmethoden für Laboruntersuchungen existieren. Andererseits erfordern die Untersuchungen ein wissenschaftlich fundiertes Fachwissen, weswegen die Arbeiten von den Unternehmen dieser überwiegend mittelständischen Branche alleine nicht geleistet werden können.

Dementsprechend sind hier wesentliche Entwicklungsschritte nur durch eine systematische, vorwettbewerbliche Gewinnung von Erkenntnissen zur Vermeidung der Bodenerosion auf Böschungen bzw. durch Erarbeitung standardisierter Laborprüfverfahren für geosynthetische Erosionsschutzsysteme zu erreichen.

Bisher wird es vielfach noch dem Bauunternehmer selbst überlassen, wie er den Erosionsschutz im Rahmen der Fertigstellungspflege und danach innerhalb der Verjährungsfrist für Mängelansprüche sicherstellt. Außerdem fehlt der Planung häufig die Kenntnis der neuen Technologien. Erschwerend hinzu kommt, dass die Eigenschaften der Produkte derzeit noch nicht anwendungsbezogen auf eine gemeinsame produktneutrale Basis für die Vergleichbarkeit beschrieben werden konnten.

Die Wirksamkeit geosynthetischer Erosionsschutzsysteme hängt in entscheidendem Maße von dem Zusammenspiel der klimatischen Einflüsse, der Untergrundverhältnisse, der Bodenparameter und der Vegetationsentwicklung ab. Dies lässt sich mit einfachen Indexversuchen nur unzureichend prüfen. Hierzu sind geeignete komplexe Systemversuche notwendig, die die Ausgangsbedingungen konstant halten und eine Kalibrierung ermöglichen. Die Prüfparameter für derartige Laborversuche sind noch zu entwickeln. Parallel dazu sind Felduntersuchungen anzulegen, die eine praxisnahe Austestung unter verschiedenen Standortbedingungen ermöglichen sollen. Entsprechend angelegte Testfelder haben z. B. die Aufgabe, den Bodenabtrag quantitativ zu erfassen, den Begrünungserfolg sowie die Durchwurzelung mit und ohne Oberbodeneinsatz zu messen und im Vergleich zu konventionellen Methoden darzustellen.

Auf der Basis der Ergebnisse von systematischen Labor- und Felduntersuchungen wäre es möglich, einzelne Parameter in komplexen Systemuntersuchungen zu testen, um Handlungsempfehlungen für die Verwendung von geosynthetischen Erosionsschutzsystemen und deren Weiterentwicklung geben zu können.

2. Grundlagen

2.1. Bedeutung der Bodenerosion für den Böschungsbau

Beim Bau von Verkehrswegen folgen die Trassen aus wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten den kürzesten Verbindungen zwischen den nächstgelegenen Zentren. Die Verkehrswege verlaufen deshalb nur bedingt der vorliegenden Morphologie durch Berge und Täler hindurch. Hohe Berge und tiefe Täler werden häufig mit Tunneln und Brücken überwunden. Die entsprechenden Baumaßnahmen sind mit erheblichen Eingriffen in die natürliche Landschaft durch z. B. Einschnitte in das Gelände und mit Errichtung künstlicher Erddämme verbunden. An diesen Böschungen kann, je nach Gestaltung und verwendetem Bodenmaterial, Bodenerosion entstehen.

Bodenerosion ist ein Begriff aus der Geomorphologie und steht für die linear wirkende Abtragung der Erdoberfläche, besonders durch fließendes Wasser, Eis und Wind. In den USA nimmt sie schon lange riesige Ausmaße an [3]. Aber auch in Deutschland und in weiteren Teilen Europas, insbesondere in den Alpenländern, ist infolge der in den letzten Zeiten immer extremer gewordenen Wetterbedingungen mit erhöhtem Risiko der Bodenerosion zu rechnen [4]. Angesichts des sich abzeichnenden Klimawandels mit der erwarteten Häufigkeit an Starkniederschlägen auf der einen, aber auch längeren Trockenperioden auf der anderen Seite, kommt der Sicherung erosionsgefährdeter Erdbauwerke in Zukunft eine noch größere Bedeutung zu.

Bei auftretender Bodenerosion kann es sowohl zu Schäden wie Rillen- bzw. Rinnenbildungen (**Abb. 2-1**), flächigen Auswaschungen und Ausbrüchen als auch zu Standsicherheitsproblemen kommen (**Abb. 2-2**).



Abbildung 2-1: Erosionsrinnen an einem Straßendamm



Abbildung 2-2: Böschungsbruch eines Straßendamms infolge von Bodenerosion durch Wasser

Im Bereich des Wasserbaus kann die dauerhaft auftretende Bodenerosion durch ständig vorbeiströmendes Wasser oder Wellenschlag sogar zu gravierenden Landverlusten führen. Jede Bodenerosion beeinträchtigt zudem die Vegetationsentwicklung und führt diese auf ein frühes Stadium der Sukzessionsentwicklung zurück. Vor allem geplante Begrünungen verlieren dadurch oft die ihnen zugedachte Funktion.

In der Bautechnik besteht die Bodenerosionsgefährdung bereits oft schon während des Bauzustands und dauert an bis zu einer Bodenfestlegung durch ausreichenden Bewuchs, möglicherweise unterstützt durch den Einsatz von Erosionsschutzsystemen, die den erosionsgefährdeten Boden zusätzlich stabilisieren.

Besonders neu angelegte, steile Böschungen aus feinkörnigem Material neigen durch den mangelnden Bewuchs oder durch den fehlenden Oberflächenschutz zur Bodenerosion. Mit zunehmender Durchwurzelung des Bodens durch den Böschungsbewuchs sinkt die Erosionsanfälligkeit erheblich. Ziel muss es also sein, im gefährdeten Bereich möglichst rasch eine geschlossene Vegetationsstruktur zu entwickeln. Durch den pflanzlichen Beitrag an der Erosionsminderung ergibt sich, dass die Erreichung des funktionsfähigen Zustands saisonal unterschiedlich ist. Bei guten Witterungsbedingungen und optimalem Pflanzenwuchs ist das Risiko für Bodenerosion geringer als bei schlechten Witterungsbedingungen, wie zum Beispiel im Spätherbst oder Winter. Zusätzlich wird die Vegetationsentwicklung entscheidend von den standörtlichen Gegebenheiten, wie z. B. Klima, Bodenverhältnissen und Exposition beeinflusst. Ob es sich hierbei z. B. um eine Maßnahme im Gebirge handelt, oder ob die Böschung in einem Trockengebiet liegt, ist von entscheidendem Einfluss für die Pflanzen-entwicklung. Durch Pflanzen kann in unseren klimatischen Gegebenheiten meist ein langfristiger Erosionsschutz gewährleistet werden. Bis dieser biologische Erosionsschutz aber wirk-

sam werden kann, müssen i. d. R. zusätzliche, die Bodenerosion minimierende ingenieurtechnische Maßnahmen, wie z. B. Einbau von geosynthetischen Erosionsschutzsystemen, ergriffen werden, die temporär den Erosionsschutz gewährleisten und gleichzeitig als Begrünungshilfe dienen (z. B. durch Reduzierung der Verdunstungsrate). Während der kritischen Anwachsphase übernehmen diese oberflächig bzw. oberflächennah eingebauten Deckbauweisen die Funktion eines sofort wirksamen Erosionsschutzes. Durch entsprechende Gestaltung ermöglichen sie dann zusammen mit dem Faktor Pflanze einen nachhaltigen Erosionsschutz der Böschung. Überall dort, wo Pflanzen nicht etabliert werden können, müssen die geosynthetischen Erosionsschutzsysteme auch dauerhaft wirksam sein.

Unter Betrachtung der erosionsauslösenden Faktoren wird zwischen nassen und trockenen Böschungen unterschieden. Nasse Böschungen sind ständig überspülte oder angespülte Bauwerke wie z. B. Deiche und Uferböschungen, die durch das horizontal vorbeiströmende Wasser und durch eventuellen Wellenschlag erodiert werden. Sie sollen in diesem Forschungsprojekt nicht behandelt werden. Trockene Böschungen hingegen werden durch Wind, Niederschlag und evtl. auftretendes Schichtwasser erodiert. Diese stellen den Gegenstand der Untersuchungen im Rahmen des beantragten Forschungsvorhabens dar.

Der Zweck der Erosionssicherung ist folgender:

- Die Standsicherheit einer Böschung muss oberflächennah und im Gesamten insbesondere bei Starkregenereignissen gewährleistet sein.
- Bodenabtrag ist zu verhindern, da der Verlust an Boden nicht nur den schützenden Pflanzen die Lebensgrundlage entzieht, sondern gleichzeitig als Sediment die Vorfluter und Flüsse hydraulisch und ökologisch negativ beeinträchtigt.

Böschungen sollen unabhängig davon, ob mit Oberboden gearbeitet wird oder nicht, ins Landschaftsbild integriert werden und die Voraussetzungen für eine dauerhafte Begrünung bieten.

Die Einflussfaktoren und die Vorgänge der Bodenerosion sind zwar in der Literatur beschrieben [5 bis 10], die auslösenden und verhindernden Einflussfaktoren bei der Verwendung von geosynthetischen Erosionsschutzsystemen auf Böschungen sind in der Bau- und Vegetationstechnik dagegen bislang wissenschaftlich noch weitestgehend unerforscht. Dies gilt insbesondere für den Wirkungsgrad unterschiedlicher Bauweisen (z. B. in Form von Erosionsschutzmatten, Erosionsschutzgewebe, Geomatten, Geozellen usw.), als auch für den Einfluss der dafür verwendeten Werkstoffe natürlicher (wie z. B. Kokos, Esparto, Stroh, Jute usw.) und synthetischer Art (wie z. B. Polyamid, Polyethylen, Polyester, Polypropylen usw.), bzw. auch für entsprechende Verbundstoffe. Von besonderer Bedeutung ist in diesem Zusammenhang auch eine fundierte Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Pflanze und Begrünungshilfe, die für einen dauerhaften Erosionsschutz Grundvoraussetzung ist.

2.2. Stand der Technik

Zur Vermeidung bzw. Minimierung der Bodenerosion auf Böschungen stehen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Einerseits können die erosionsgefährdeten Faktoren durch konstruktive bautechnische Maßnahmen bezüglich der Böschungsgeometrie reduziert werden [11]. Dies kann insbesondere durch Verminderung der Böschungshöhe, der Flächengröße und der Böschungsneigung erreicht werden. Weitere Maßnahmen sind die Optimierung des einzubauenden Bodenmaterials in Bezug auf Bodenkohäsion bzw. Gefahr des Abkollerns, Abrieselns, Abfließens und Verwehens einzelner Bodenteile, wobei die Erosion in erster Linie von der Kohäsion und dem Korndurchmesser abhängig ist.

Der Tagwasserabfluss sollte mengenmäßig so gering wie möglich gehalten werden, damit die Böschung möglichst wenig überspült wird. Des weiteren sollte die Geschwindigkeit des abfließenden Wassers soweit verringert werden, wie es die entwässerungs- und bautechnischen Belange gerade noch zulassen. Dies kann z. B. durch die Anlage von Bermen, den Bewuchs und die Verringerung der Geländeneigung erreicht werden. Der Einfluss des Windes kann durch Windschutzbauten oder Bepflanzungen verringert werden.

Einige wichtige Parameter, die zur Bodenerosion erheblich beitragen können (wie z. B. Unwetterneigung, Windhäufigkeit und Häufigkeit des Frostwechsels), lassen sich jedoch bautechnisch nicht beeinflussen. Vor allem starke Unwetter treten in Folge des sich abzeichnenden Klimawandels in neuerer Zeit immer häufiger und heftiger auf, mit zum Teil verheerenden Folgen, wie z. B. aus dem Alpenraum berichtet wurde [4].

Den o. g. bautechnischen Maßnahmen sind durch wirtschaftliche Aspekte Grenzen gesetzt. Die Veränderung der Neigung bzw. der zusätzliche Einbau von Bermen erfordert einen höheren Grunderwerb und bei einem Einschnitt einen nicht zu vernachlässigenden Mehraushub und damit signifikant höhere Baukosten. Auch Windschutzbauten und deren Unterhalt verursachen Kosten, die in Relation zum Nutzen sehr hoch sind, zumal die Bodenerosion durch Wind im Vergleich zur Bodenerosion durch Wasser in unseren Breitengraden eine eher untergeordnete Rolle spielt.

Andererseits kann die Bodenerosion auch durch eine entsprechende Oberflächengestaltung wie z. B. Bodenversiegelung verhindert werden. Dabei wird das angreifende Oberflächenwasser auf einer erosionsresistenten, wasserundurchlässigen Ebene abgeleitet und muss spätestens am Böschungsfuß mit einer entsprechenden Entwässerungsanlage abgeführt werden.

Bei einer Bodenversiegelung ist jedoch der Kostenfaktor erheblich. Die Bedeckung von großen Flächen erfordert einen hohen Aufwand, wobei die spätere Unterhaltung und Pflege der Flächen mit einzuplanen ist. Ebenfalls ist eine zusätzliche Entwässerung einzukalkulieren, die das große Oberflächenwasseraufkommen der versiegelten Böschung ableitet. Neben der negativen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt steht dieser Methode auch die nicht durchführbare Begrünung entgegen, was den Landschaftshaushalt zur eigentlichen Baumaßnahme noch zusätzlich belastet. Weiterhin erscheinen die großen, massiven Stein-, Beton- oder Asphaltflächen oder Kiesfelder meist als unästhetisch und wirken wie Fremdkörper in der Landschaft, was aus landschaftsökologischer Sicht zu einer begründeten Ablehnung dieser Bauweise führt.

Als weitere Bauweise zur Gestaltung einer erosionsresistenten Oberfläche gelten die ingenieurbiologischen Maßnahmen, bei denen Pflanzen, Pflanzenteile oder ganze Pflanzengesellschaften als Baustoff verwendet werden, oft auch in Verbindung mit sonstigen Baumaterialien, wie z. B. Kunststoffen, Beton, Holz, Stahl oder Boden [12, 13, 14]. Als Bauweisen kommen Lagenbau (z. B. Buschlage, Spreitlage), Faschinenbau (z. B. Hangfaschinen), Flechtwerkbau (z. B. Rautengeflecht, Flechtzäune) sowie Pflanzungen bzw. Steckhölzer und Ansaaten in Betracht. Diese Methoden des Lebendverbaus sind im Endergebnis rein technischen Lösungen vorzuziehen, bedingen jedoch in der Regel einen hohen Materialeinsatz und benötigen zusätzlich noch eine temporär wirksame mechanische Vorsicherung. Da überwiegend noch in Handarbeit gearbeitet wird, bleiben diese Bauweisen oft Spezialisten vorbehalten, was die Herstellung vergleichsweise teuer macht. Bedingt durch den Einsatz pflanzlicher Baustoffe ist die Ausführung in der Regel auch nur in der Vegetationsruhe angeraten, um das angestrebte Begrünungsziel nicht zu gefährden.

Die bedeutendsten Möglichkeiten zur Erosionssicherung von trockenen Böschungen bieten heutzutage aus technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Sicht neue Techniken mit begrünbaren Geokunststoffen [15]. Diese geosynthetischen Erosionsschutzsysteme gibt es in unterschiedlichsten Strukturen oder Bauformen, die sowohl aus natürlichen als auch aus synthetischen Werkstoffen hergestellt werden. Die verwendeten synthetischen Rohstoffe decken viele gängigen technischen Kunststoffe, wie z. B. PP, PE, PA und PET ab. Bei den natürlichen Werkstoffen reichen diese von Jute, über Kokos, Stroh, Flachs, Hanf, Holz, Heu bis hin zu weiteren denkbaren nachwachsenden Rohstoffen [16].

2.3. Geosynthetische Erosionsschutzsysteme

Geosynthetische Erosionsschutzsysteme wurde als Oberbegriff für Produkte aus natürlichen Werkstoffen, für Kunststoffprodukte und für gemischte Produkte (Verbundstoffe) eingeführt. Heutzutage werden diese Systeme häufig als Verbundstoffe aus natürlichen Werkstoffen und aus Kunststoff angeboten. Diese lassen sich daher nicht mehr in verrottbare und nicht verrottbare Produkte unterteilen.

Je nach Einsatzzweck, klimatischen Gegebenheiten, Untergrundverhältnissen und Bodenarten sind geeignete geosynthetische Erosionsschutzsysteme projektbezogen anzuwenden, um folgenden Einwirkungen entsprechende Widerstände leisten zu können:

Aufprall von Regentropfen auf die Böschungsoberfläche

Das Erosionsschutzsystem mit Begrünung muss dämpfend wirken, um zu verhindern, dass die Bodenteilchen aus dem Erdreich geschleudert und weggespült werden.

Abtransport von Bodenteilchen durch Wasser- und Luftströmungen

Die Strömungsgeschwindigkeiten müssen gebremst werden, die Scherfestigkeit und die Infiltration des Boden müssen erhöht werden, damit feine Bodenpartikel nicht mitgerissen werden.

Austrocknung der Bodenoberfläche

Die Austrocknung des Bodens durch Wind und Sonne müssen begrenzt werden, damit das Saatgut keimen kann und eine sichere Weiterentwicklung der Vegetation gewährleistetet ist.

Die geosynthetischen Erosionsschutzsysteme sind entweder als zwei- oder als dreidimensionale Struktur gestaltet (**Abb. 2-3**). Als zweidimensionale Struktur können Vliesstoffe [17] und Gewebe [18] betrachtet werden. Als dreidimensionale Strukturen gelten beispielsweise gesteppte Verbundstoffe, Geomatten oder Geozellen. Die Verbundstoffe können mit jeglichen natürlichen oder synthetischen Faserwerkstoffen gefüllt sein. Diese sind i. d. R. zwischen Geweben, Netzen oder Gitterstrukturen aus Kunststoff oder natürlichen Werkstoffen eingebettet und miteinander versteppt [19]. Sie können auch mit Saatgut und Dünger gefüllt sein.

Geomatten sind aus Kunststoffdrähten hergestellte dreidimensionale Strukturen (**Abb. 2-4**). Sie können mit Boden gefüllt werden und bieten den Pflanzen künstlichen Raum für die Ausbildung ihres Wurzelwerks [20].



Abbildung 2-3: Beispiele für geosynthetischen Erosionsschutzmatten aus natürlichen Werkstoffen und als Kombination aus natürlichen und synthetischen Werkstoffen



Abbildung 2-4: Beispiele für Geomatten

Geozellen sind aus 5 bis 20 cm breiten Kunststoffbändern hergestellte offene honigwabenförmige Strukturen (**Abb. 2-5**). Sie werden mit Boden aufgefüllt und halten ihn davon ab, auf der Böschung abzugleiten [21, 22, 23].



Abbildung 2-5: Beispiel für eine Geozelle

Die gegenwärtig am Markt angebotenen geosynthetischen Erosionsschutzsysteme umfassen folgende Produkttypen:

- 1. Erosionsschutzmatten (GEC-M)
- 2. Geomatten (GMA)
- 3. Geomatten in Kombination mit Bewehrungselementen (GMA-R)
- 4. Geozellen (GCE)
- 5. Hangfaschinen (GEC-F)
- 6. Erosionsschutzgewebe (GEC-W)
- 7. Erosionsschutzvliesstoffe (GEC-N)

Die verschiedenen Bauelemente können auch miteinander kombiniert werden, so dass eine beliebige Variante von unterschiedlichen geosynthetischen Erosionsschutzprodukten konstruiert werden kann.

Durch die vielfältigen Kombinationsmöglichkeiten und die Vielzahl der Anbieter auf dem Markt ist die angebotene Produktpalette höchst umfangreich. Wie Untersuchungen an der FH Bielefeld [24, 25] belegen, dominieren Erosionsschutzmatten und -gewebe aus Naturfasern den Markt.

Bei den geosynthetischen Erosionsschutzsystemen aus natürlichen Materialien haben die deutschen Hersteller zweifelsfrei eine internationale Schlüsselrolle in Sachen Vielfältigkeit und technischem Know-how.

Alle Systeme müssen so beschaffen sein, dass eine Begrünung induziert werden kann. Diese kann je nach Bauweise entweder als Systemkomponente gleichzeitig mit dem Geokunststoff in Form von Saatgut oder vorkultivierter Vegetation eingebaut oder nachträglich auf die Begrünungshilfen aufgebracht werden.

3. Experimentelle Vorgehensweise

Die experimentellen Untersuchungen an den geosynthetischen Erosionsschutzsystemen können in zwei Bereiche gegliedert werden:

- A. Felduntersuchungen
 - Untersuchungen zur Vegetationsentwicklung auf realen Testflächen (LWG)
 - Untersuchungen zur Erosionssicherheit an realen Testparzellen (SKZ)
- B. Laboruntersuchungen
 - Untersuchung der Materialeigenschaften (SKZ)
 - Untersuchung der Erosionssicherheit an großmaßstäblichen Böschungsmodellen (LWG).

3.1. Zielsetzung

Das zentrale Ziel des Forschungsprojekts basiert auf der geschilderten Problemstellung und besteht darin, die unterschiedlichen, aus natürlichen und aus synthetischen Werkstoffen hergestellten geosynthetischen Erosionsschutzsysteme in ihrer Wirkungsweise auf die Bodenerosion bei unterschiedlichen Standortbedingungen bzw. verschiedenen Bodenverhältnissen und entsprechender Begrünung wissenschaftlich zu untersuchen und quantitativ zu beschreiben. Ausgehend von den gewonnenen Erkenntnissen sollen die für die Anwendung relevanten Auswahlkriterien ermittelt und ein Bewertungssystem erarbeitet werden.

Die Forschung ist markt- und anwendungsorientiert. Die Forschungsergebnisse sollen in zukünftige Regelwerke sowie Arbeitshilfen einfließen, die die Anwendung von Erosionsschutzsystemen an steilen Böschungen im Erd- und Landschaftsbau regeln. Der angestrebte höherwertige Technologiestandard soll u. a. durch Erarbeitung entsprechender Handlungsempfehlungen in breiter Form anwendbar sein.

Für Bauherrn, Planer und Ausführungsbetriebe sollen verlässliche Grundlagen geschaffen werden, die hinsichtlich Ausschreibung, Anwendung und Haftung Risiken vermeiden hilft. Die Ergebnisse kommen aber auch den Herstellern von geosynthetischen Erosionsschutzsystemen zugute. Mit den erzielten Ergebnissen können vorhandene Produkte oder Produktlinien optimiert werden. Eine zukünftig anzustrebende Zertifizierung über ein Prüfinstitut ist vitaler Bestandteil einer Marketingstrategie und kann Marktanteile gegenüber Billigprodukten sichern helfen.

Es ist deshalb von großer Bedeutung im Rahmen dieses Forschungsvorhabens, das Verhalten unterschiedlichster geosynthetischer Erosionsschutzsysteme systematisch in Feldversuchen zu erproben und mit den parallel dazu aus Laborversuchen gewonnen Erkenntnissen zu vergleichen. Beide Ansätze sollen anschließend den Wissenstransfer in der Praxis sicherstellen.

3.2. Felduntersuchungen an Erosionsschutzsystemen

Das Testfeld befindet sich im Böschungsbereich an der Autobahn A 3, Anschlussstelle Rottendorf / Biebelried und wurde von der Autobahndirektion Nordbayern für diesen Pilotversuch freundlicherweise zur Verfügung gestellt. **Abb. 3-1** zeigt die Ausgangssituation vor Errichtung der Testparzellen.

Der Versuchsstandort liegt auf der südlichen Mainfränkischen Platte ca. 7 km südöstlich von Würzburg. Die Böschung (Böschungsneigung 1:1,5) ist nach Südwesten ausgerichtet. Die offenen, baumlosen Flächen im Umfeld und das Relief bieten nur wenig Schutz gegenüber starken Winden und Regenfällen.



Abbildung 3-1: Ausgangsituation an der Testböschung bei Biebelried (Aufnahmedatum: 06. Juli 2009)

3.2.1. Versuchsmaterialien für Feldversuche

Im Rahmen von Feldversuchen wurden acht unterschiedliche Erosionsschutzsysteme in ihrer Wirkungsweise auf die Bodenerosion und auf die Vegetationsentwicklung getestet. Neben Erosionsschutzsystemen aus natürlichen Rohstoffen wie Kokos, Stroh, Jute, Schafwolle kamen auch Kunststoffprodukte aus Polypropylen (PP), Polyester (PET) und Polyamid (PA) zur Anwendung (**Tab. 3-1**). Die natürlichen Rohstoffe verrotten nach Herstellerangaben innerhalb von 3 bis 5 Jahren. Die Erosionsschutzsysteme aus Kunststoffen können dagegen bis zu mehreren Jahrzehnten Schutz gegen Bodenerosion leisten.

Code	Erosionsschutzsystem	Beschreibung	Abbildung
Material 40	Erosionsschutzmatte (GEC-M)	Stroh/Kokos-Matte 50 % Stroh, 50 % Kokosfaser, beidseitig Jute-Netz, mit Jute-Faden vernäht	08
Material 20	Erosionsschutzmatte im Kombination mit einer Geomatte (GEC-M + GMA)	Verbund aus einer schwarzen Geomatte (GMA) aus PP (Monofilament, extrudiert) und einer Kokosmatte, oberseitig und unterseitig PP-Netz, mit PP-Faden vernäht	En al B 05
Material 21	Geomatte (GMA)	PA6, schwarz, dreidimensionale Struktur, extrudierte Monofilamente	and and
Material 7	Geomatte in Kombination mit Geogitter (GMA + GGR)	Verbund aus einer Geomatte aus PP und einem Geogitter aus PET, schwarz	I THE REAL PROPERTY IN THE REAL PROPERTY INTERNAL PROPERT
Material 24	Geozelle (GCE)	dreidimensionale Wabenstruktur aus Vliesstoffstreifen (PET/PA), vernäht	
Material 25	Hangfaschine (GEC-F)	Faschine aus ungewaschener Schafwolle, mit Jutenetz umhüllt, innenlaufende Führungsseile aus Naturgarn	
Material 15	Erosionsschutzgewebe (GEC-W)	Kokos-Gewebe, Nenn-Flächengewicht 700 g/m ²	
Material 17	Erosionsschutzgewebe (GEC-W)	Jute-Gewebe, Nenn-Flächengewicht 500 g/m ²	C 11

 Tabelle 3-1:
 Erosionsschutzsysteme auf dem Testfeld Biebelried

3.2.2. Erstellung der Testparzellen

Die acht ausgewählten Erosionsschutzsysteme wurden in Kombination mit zwei Saatgutmischungen getestet. Je Saatgutmischung und Erosionsschutzsystem wurden die Testparzellen mit dreifacher Wiederholung errichtet. Zusätzlich wurden Referenzparzellen (ohne Erosionsschutz) erstellt. So ergaben sich insgesamt 54 Testparzellen. Jede Testparzelle hat eine Breite von 2,5 m. Die Parzellenlänge beträgt 14 m. Die **Abb. 3-2** zeigt den CAD-Plan des Versuchsstandortes und **Tab. 3-2** die Zuordnung der Versuchsparzellen an der Autobahnböschung.



Abbildung 3-2: CAD-Plan vom Testfeld Biebelried Erläuterung der farbig gekennzeichneten Parzellen: s. Tab. 3-2 schraffierte Parzellenbereiche (Parzellen-Nr. 1 bis 27): mit neu entwickelter Kräuter-Saatgutmischung "KM"; ohne Schattierung (Parzellen-Nr. 28 bis 54): mit Standard Saatgut "RSM 7.1.2"

Parzellen- Nr.	Erosionsschutzsystem	Code	Bodenüber- deckung	Saatgut	Farbmarkierung in CAD-Plan (Abb. 3-2)
1	Kokosmatte+GMA im Verbund	Material 20	ja	КМ	gelb
2	Geomatte (GMA)	Material 21	_	KM	hellblau
3	GMA+GGR im Verbund	Material 7		KM	dunkelblau
4	Stroh/Kokos-Matte	Material 40		KM	violette
5	Jute-Gewebe	Material 17		KM	hellgrau
6	Kokos-Gewebe	Material 15		KM	dunkelgrau
7	Geozelle	Material 24	ja	KM	rot
8	Schafwollfaschine	Material 25	ja	КМ	orange
9	Referenzparzelle ohne Erosionsschu	tzsystem		KM	hellgrün
10	Geozelle	Material 24	ja	KM	rot
11	Schafwollfaschine	Material 25	ja	KM	orange
12	Referenzparzelle ohne Erosionsschu	tzsystem	-	КМ	hellgrün
13	Stroh/Kokos-Matte	Material 40		KM	violette
14	Jute-Gewebe	Material 17		KM	hellgrau
15	Kokos-Gewebe	Material 15		KM	dunkelgrau
16	Kokosmatte+GMA im Verbund	Material 20	ja	KM	gelb
17	Geomatte (GMA)	Material 21		KM	hellblau
18	GMA+GGR im Verbund	Material 7		KM	dunkelblau
19	Kokosmatte+GMA im Verbund	Material 20	ja	KM	gelb
20	Geomatte (GMA)	Material 21		KM	hellblau
21	GMA+GGR im Verbund	Material 7		KM	dunkelblau
22	Stroh/Kokos-Matte	Material 40		KM	violette
23	Jute-Gewebe	Material 17		KM	hellgrau
24	Kokos-Gewebe	Material 15		KM	dunkelgrau
25	Geozelle	Material 24	ja	KM	rot
26	Schafwollfaschine	Material 25	ja	KM	orange
27	Referenzparzelle ohne Erosionsschu	tzsystem		KM	hellgrün
28	Geozelle	Material 24	ja	RSM 7.1.2	rot
29	Schafwollfaschine	Material 25	ja	RSM 7.1.2	orange
30	Referenzparzelle ohne Erosionsschu	tzsystem		RSM 7.1.2	dunkelgrün
31	Kokos-Gewebe	Material 15		RSM 7.1.2	violette
32	Jute-Gewebe	Material 17		RSM 7.1.2	hellgrau
33	Stroh/Kokos-Matte	Material 40		RSM 7.1.2	dunkelgrau
34	Kokosmatte+GMA im Verbund	Material 20	ja	RSM 7.1.2	gelb
35	Geomatte (GMA)	Material 21		RSM 7.1.2	hellblau
36	GMA+GGR im Verbund	Material 7		RSM 7.1.2	dunkelblau
37	Kokosmatte+GMA im Verbund	Material 20	ja	RSM 7.1.2	gelb
38	Geomatte (GMA)	Material 21		RSM 7.1.2	hellblau
39	GMA+GGR im Verbund	Material 7		RSM 7.1.2	dunkelblau
40	Stroh/Kokos-Matte	Material 40		RSM 7.1.2	violette
41	Jute-Gewebe	Material 17		RSM 7.1.2	hellgrau
42	Kokos-Gewebe	Material 15		RSM 7.1.2	dunkelgrau
43	Geozelle	Material 24	ja	RSM 7.1.2	rot
44	Schafwollfaschine	Material 25	ja	RSM 7.1.2	orange
45	Referenzparzelle ohne Erosionsschu	tzsystem		RSM 7.1.2	dunkelgrün
46	Geozelle	Material 24	ja	RSM 7.1.2	rot
47	Schafwollfaschine	Material 25	ja	RSM 7.1.2	orange
48	Referenzparzelle ohne Erosionsschu	tzsystem		RSM 7.1.2	dunkelgrün
49	Stroh/Kokos-Matte	Material 40		RSM 7.1.2	violette

Tabelle 3-2. Zuordnung der	Testparzellen.	Erläuterungen z	um CAD-Plan ir	Abb. 3-2
Tabone o L. Zuoranang uor	rootpuizonon,	Endutorungon 2		

Fortsetzung der Tabelle 3-2

Parzellen- Nr.	Erosionsschutzsystem	Code	Bodenüber- deckung	Saatgut	Farbmarkierung in CAD-Plan (Abb. 3-2)
50	Jute-Gewebe	Material 17		RSM 7.1.2	hellgrau
51	Kokos-Gewebe	Material 15		RSM 7.1.2	dunkelgrau
52	Kokosmatte+GMA im Verbund	Material 20	ja	RSM 7.1.2	gelb
53	Geomatte (GMA)	Material 21		RSM 7.1.2	hellblau
54	GMA+GGR im Verbund	Material 7		RSM 7.1.2	dunkelblau

KM: Kräuter-Saatgutmischung

RSM 7.1.2: Landschaftsrasen - Standardsaatgutmischung

Die Böschungsprofilierung sowie die Oberbodenarbeiten wurden vom Bauunternehmen Stolz, Hammelburg durchgeführt.

Nach den vorbereitenden Oberbodenarbeiten wurde unterhalb der Böschung über die gesamte Länge des Testfelds von 135 m ein Sammelsystem installiert, das den von der Böschung abgeschwemmten Boden nach einem Niederschlagsereignis auffangen kann (**Abb. 3-3**).



Abbildung 3-3: Installation des Sammelsystems am Böschungsfuß für die Erfassung des Bodenabtrags

Bei den eingesetzten Erosionsschutzsystemen muss grundsätzlich zwischen zwei Bauweisen unterschieden werden: Erosionsschutzsysteme, die mit Boden überdeckt wurden (Material 20 (Kokosmatte/GMA-Verbund), Material 24 (GCE) und Material 25 (Schafwollfaschine)) und Erosionsschutzsysteme, die auf Boden verlegt wurden (Material 40 (Kokos/Stroh-Matte), Material 21 (GMA), Material 7 (GMA/GGR-Verbund), Material 15 (Kokos-Gewebe) und Material 17 (Jute-Gewebe)).

Die Installation der Erosionsschutzsysteme auf der Böschung wurde von den im Projekt beteiligten Lieferanten der geosynthetischen Erosionsschutzsysteme in Abstimmung mit der Autobahndirektion Nordbayern verantwortlich übernommen. Die Installationsarbeiten starteten nach den vorbereitenden Oberbodenarbeiten mit der Verlegung der Geozelle und der Schafwollfaschine (**Abb. 3-4**).

Abbildung 3-4: Installation der Geozelle (Mat. 24) (a) und der Hangfaschine (Mat. 25) (b)

Nach der Installation der Geozelle und der Schafwollfaschine wurde auf die Testparzellen ca. 15 cm bis 20 cm Oberboden aufgetragen bzw. die Geozelle und die Schafwollfaschine befüllt (**Abb. 3-5**).

Abbildung 3-5: Auftragung des Oberbodens auf die Testparzelle bzw. Befüllung der Geozelle und der Schafwollfaschine mit Oberboden

Im nächsten Schritt wurden die Erosionsschutzsysteme Material 20 (Kokosmatte/GMA-Verbund), Material 21 (GMA) und Material 7 (GMA/GGR-Verbund) auf dem Oberboden verlegt (**Abb. 3-6** und **3-7**). Die Erosionsschutzmatte Material 20 wurde nach der Verlegung mit ca. 3 bis 5 cm Oberboden abgedeckt (**Abb. 3-6 b**).

Abbildung 3-6: Verlegung der Erosionsschutzmatte Material 20 (Kokosmatte/GMA-Verbund) auf dem Oberboden (a) und Abdeckung mit Oberboden (b)

Abbildung 3-7: Verlegung der Geomatte (Material 21) (a) und des Geomatte/Geogitter-Verbundmaterials (Material 7) (b) auf dem Oberboden

Danach erfolgte die Begrünung der Testparzellen. Die Ansaat der 54 Testparzellen wurde praxisgerecht mittels Anspritzen der Saatgutmischungen durch die Fa. ATL, Bad Honnef (Saatgut + Trägermaterial aus Zellulose mit Wasser vermengt) am 16. September 2009 durchgeführt (**Abb. 3-8**).

Abbildung 3-8: Anspritzbegrünung mit einem Hydro-Seeder

Zur Aussaat kamen in einer möglichst praxisnahen Vorgehensweise der für das Bauwerk planmäßig vorgesehene Standardlandschaftsrasen RSM 7.1.2 (auf den Parzellen Nr. 1 bis 27) und eine neu entwickelte Kräutermischung (KM) mit verschiedenen Wuchstypen (auf den Parzellen Nr. 28 bis 54).

Bei der Regelsaatgutmischung RSM 7.1.2 handelt es sich um einen Landschaftsrasen -Standard mit 1,6 % Kräutern (s. **Tab. 3-3**). Er ist für alle Lagen, außer extrem trockenen, alkalischen, nassen und schattigen Standorten geeignet. Die empfohlene Saatstärke der aus 18 Arten bestehenden Mischung beträgt 20 g/m².

Die kräuterbetonte Mischung "KM" aus 36 Arten wurde nach ingenieurbiologischen Gesichtspunkten neu entwickelt (s. **Tab. 3-4**). Der Kräuteranteil beträgt 30 %. Die Auswahl der Kräuter erfolgte nach folgenden Kriterien:

- bessere Resistenz gegenüber Trockenstress,
- niederwüchsig zur Minimierung des Pflegeaufwandes (Wirtschaftlichkeit),
- Kombination von ein- und mehrjährigen Kräutern verschiedener Wurzeltypen mit Gräsern zur Gewährleistung eines schnellen und langfristigen Erosionsschutzes.

Die Mischung "KM" wurde mit einer Saatstärke von 4 g/m² ausgebracht.

RSM 7.1.2 Standard mit Kräutern	Anteil %			
Gräser				
Agrostis capillaris Highland	5,0			
Festuca duriuscula Mentor	20,0			
Festuca duriuscula Bornito	23,4			
Festuca rubra Olivia	25,0			
Festuca rubra Livision	15,0			
Festuca rubra Libano	5,0			
Poa pratensis	5,0			
Kräuter	Kräuter			
Achillea millefolium	0,2			
Centaurea jacea	0,2			
Daucus carota	0,1			
Galium verum	0,1			
Leontodon spec.	0,1			
Leucanthemum vulgare	0,3			
Pimpinella saxifraga	0,1			
Plantango lanceolata	0,1			
Sanguisorba minor	0,1			
Lotus corniculatus	0,2			
Medicago lupulina	0,1			

Tabelle 3-3: Mischungszusammensetzung der RSM 7.1.2 nach FLL 2009 [26]

Tabelle 3-4:Zusammensetzung der Kräutermischung "KM". Angaben zu den Wurzeln
nach [27] und [28]

Kräutermischung "KM"	Wurzeltyp	Anteil %
	Gräser:	•
Briza media	unterirdische Grundachse	10,0
Festuca nigrescens	k. A.	15,0
Festuca ovina	gestauchte, unterirdische Grundachse	15,0
Anthoxanthum odoratum	gestauchte, unterirdische Grundachse	15,0
Bromus hordeaceus	gestauchte, unterirdische Grundachse	5,0
Festuca rubra rubra ,Roland´	unterirdische Grundachse	10,0
	Kräuter	
Achillea millefolium	k.A.	
Agrimonia eupatoria	Sprosswurzel	0,3
Anthyllis vulneraria	Pfahlwurzel	2,0
Campanula rapunculoides	k.A.	3,0
Centaurea cyanus	Pfahlwurzel	0,1
Chrysanthemum segetum	Pfahlwurzel	1,0
Daucus carota	Pfahlwurzel	1,0
Echium vulgare	Pfahlwurzel bis 300 cm	0,2
Galium verum	Sprosswurzel, Kriechtriebe	0,5
Hippocrepis comosa	Sprosswurzel, Kriechtriebe	0,5
Hypochoeris radicata	Pfahlwurzel	1,5
Leontodon autumnalis	Sprosswurzel	0,5
Linaria vulgaris	k. A.	1,5
Medicago falcata	Pfahlwurzel	1,0
Medicago lupulina	k. A.	2,0
Onobrychis arenaria	Pfahlwurzel	1,5
Papaver rhoeas	Pfahlwurzel	2,0

Kräutermischung "KM"	Wurzeltyp	Anteil %
	Kräuter	
Pastinaca sativa	Pfahlwurzel	1,0
Plantago lanceolata	Pfahlwurzel	0,2
Plantago media	Pfahlwurzel	1,5
Prunella grandiflora	Sprosswurzel	1,5
Prunella vulgaris	Sprosswurzel	0,5
Reseda lutea	Pfahlwurzel	0,8
Rumex acetosa	Pfahlwurzel	0,1
Salvia pratensis	Pfahlwurzel	0,5
Sanguisorba minor	Pfahlwurzel	0,3
Scabiosa columbaria	Pfahlwurzel	2,2
Silene alba	Pfahlwurzel	0,3
Silene vulgaris	k. A.	0,5
Thymus pulegioides	Pfahlwurzel-Sprosswurzel	1,3

Fortsetzung der Tabelle 3-4

Bei den Erosionsschutzsystemen Material 40 (Stroh/Kokos-Matte), Material 15 (Kokos-Gewebe) und Material 17 (Jute-Gewebe) erfolgten die Verlegungsarbeiten nach der Anspritzbegrünung (**Abb. 3-9**).

Abbildung 3-9: Verlegung der Kokos/Stroh-Matte (a) und des Kokos-Gewebe (b) nach der Anspritzbegrünung

Um Überspülungen durch Niederschlagswasser von einer Testparzelle zu einer benachbarten zu verhindern, wurden die Parzellen mit Kunststoffdichtungsbahn-Streifen von einander getrennt.

Die Abb. 3-10 zeigt das Testfeld kurz nach der Fertigstellung.

Abbildung 3-10: "Testfeld Biebelried" Anfang Oktober 2009 kurz nach der Fertigstellung

Für die Erfassung der örtlichen Wetterbedingungen wurde eine Wetterstation direkt neben dem Testfeld aufgestellt (**Abb. 3-11**). Die Wetterstation zeichnete alle relevanten Klimadaten, wie Niederschlag, Temperatur, Windrichtung und -geschwindigkeit sowie UV-Strahlung im Versuchszeitraum auf.

Abbildung 3-11: Standort der Wetterstation

3.2.3. Untersuchungen zur Vegetationsentwicklung auf dem Testfeld durch die LWG

Als Parameter bei den Pflanzenbonituren zur Bewertung der Vegetationsentwicklung wurden durch die LWG Keimverhalten, Etablierung, Deckung, Vitalität, Artenzahl und am Ende des

Projektes auch die Durchwurzelung aufgenommen und bewertet. Üblicherweise werden Böschungen mit Landschaftsrasen begrünt, der wenig Trockenstress verträgt. Die neu entwickelte standortangepasste Kräuter-Saatgutmischung "KM", schnell und niederwüchsig, mit geringem Wasserbedarf, die gezielt auch ein- und zweijährige Pfahlwurzler enthält, wurde im Versuch dem Landschaftsrasen RSM 7.1.2 gegenübergestellt. Die Einflüsse der Öffnungsweite der Struktur, des Werkstoffs und der Art der Verlegung der Erosionsschutzsysteme auf beide Vegetationsmischungen wurden vergleichend untersucht.

Als Prüfkriterien wurden laut den Formulierungen der DIN 18917 "Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Rasen und Saatarbeiten" und DIN 18918 "Vegetationstechnik im Landschaftsbau - Ingenieurbiologische Sicherungsbauweisen - Sicherungen durch Ansaaten, Bepflanzungen, Bauweisen mit lebenden und nicht lebenden Stoffen und Bauteilen, kombinierte Bauweisen", die anerkannten Bewertungen im Landschaftsbau, wie Abnahmefähigkeit, Deckung und Bestandstruktur verwendet. Die Prüfkriterien wurden um den Parameter Vitalität und Artenzahl erweitert, da eine optimale Durchwurzelung der Bodenschichten nur mit gut ausgebildeten Individuen gewährleistet ist und im Sinne einer nachhaltigen Sicherungsleistung auch alle Arten einer ausgesäten Mischung auf der Fläche sich nachweisen lassen sollten (**Tab. 3-5**).

Art der Bonituren/Messungen:	Zeitpunkte:
Abnahmefähigkeit ab Zeitpunkt Saattermin	14tägig bis Abnahmefähigkeit
Deckung	April/Mai, Sept./ Okt. 2010
Vitalität	April/Mai, Sept./ Okt. 2010
Artenzahl	April/Mai, Sept./ Okt. 2010
Bestandstruktur	Juli 2011
Durchwurzelung	August 2011

 Tabelle 3-5:
 Bonituren und Messungen

3.2.3.1 Abnahme

Als wichtiges Prüfkriterium steht die Abnahmefähigkeit nach DIN 18918 für ingenieurbiologische Sicherungsbauweisen im Vordergrund, wonach "bei Ansaaten (...) die Fläche einen möglichst gleichmäßigen Bestand an geforderten Gräsern und Kräutern mit einem mittleren Deckungsgrad (projektive Bodendeckung) von mindesten 50 %" aufweisen muss.

Ab diesem Zeitpunkt ist das Bauwerk voll funktionsfähig und soll allen Anforderungen gerecht werden. Da eine 50 % Deckung bei Starkniederschlägen hinsichtlich des Erosionsschutzes nur den untersten Standard darstellt, wurde im Bonitursystem eine 50 % Deckung mit ungleichmäßiger Bestandstruktur nur als bedingt abgenommen bewertet.

Boniturskala:

- 1 = nicht abgenommen unter 50 % Deckung
- 5 = bedingt abgenommen, 50 % Deckung, inhomogener Bestand
- 9 = abgenommen, über 50 % Deckung.

3.2.3.2 Deckung

Ingenieurbiologische Sicherungssysteme sollen bei Fortschreiten der Vegetationsdauer ihre Sicherungsleistung erhöhen. Ab dem Zeitpunkt der Abnahme sollte die Deckung weiterhin zunehmen bzw. mindestens diesen Wert halten können. Die weitere Entwicklung während der Vegetationsperiode wurde daher mit der Bonitur der Deckung auf den jeweiligen Parzellen festgehalten und bewertet. Die Dokumentation der Deckungsentwicklung soll Hinweise über die Interaktion zwischen Pflanzenmischung bzw. Wuchstyp und Erosionsschutzsystem geben.

Boniturskala:

- 1 = Deckung 0 bis 19 %
- 3 = Deckung 20 bis 39 %
- 5 = Deckung 40 bis 59 %
- 7 = Deckung 60 bis 79 %
- 9 = Deckung 80 bis 100 %.

3.2.3.3 Vitalität

Die Bonitur der Vitalität bietet einen Hinweis auf mögliche negative oder positive Einwirkungen der Systeme auf die Pflanzen. Pflanzen mit mangelhafter Vitalität zeigen neben schlecht ausgebildeten Sprosssystemen, auch ein reduziertes Wurzelwachstum. Damit können sie weder über noch im Boden für ausreichenden Erosionsschutz sorgen.

Boniturskala:

- 1 = Pflanze kümmert, starke Mängel
- 3 = geringes Wachstum und Mangelerscheinungen
- 5 = normales Wachstum, leichte Mängel
- 7 = normales Wachstum, keine Mängel
- 9 = optimales Wachstum, keine Mängel.

3.2.3.4 Artenzahl

Um eine stabile Vegetationsdecke zu erhalten, die klimatische und standörtliche Schwankungen gut abpuffern kann, ist es von Vorteil artenreiche Gräser-Kräutermischungen auszusäen. Je höher die Zahl der etablierten Arten pro Mischung ist, umso besser ist deren Reaktionsfähigkeit auf die vorliegenden abiotischen Bedingungen.

Das Kriterium Artenzahl erlaubt eine Bewertung der Einflüsse seitens der Systeme auf die Etablierung der eingesäten Wuchstypen. In diesem Zusammenhang sind besonders die Öffnungsweiten der geosynthetischen Erosionsschutzsysteme zu nennen, die die Durchwuchsfähigkeit begrenzen und sich für die Kräuter nachteilig auswirken können.

Boniturskala:

- 1 = Anteil der etablierten Arten 0 bis19 %
- 3 = Anteil der etablierten Arten 20 bis 39 %
- 5 = Anteil der etablierten Arten 40 bis 59 %
- 7 = Anteil der etablierten Arten 60 bis 79 %
- 9 = Anteil der etablierten Arten 80 bis 100 %.

3.2.3.5 Bestandsstruktur

Oberflächen mit offenen Bodenstellen bieten Angriffsfläche für Wasser- und Winderosion. Gleichzeitig fehlen im Boden die Haltestrukturen der Wurzelsysteme. Der homogene Bewuchs einer Fläche mit kräftig entwickelten Individuen bietet eine gute Schutzleistung durch die Pflanzen. DIN 18917 fordert einen "möglichst gleichmäßigen Bestand in Wuchs und Verteilung", der auch unter dem Einfluss eines Erosionsschutzsystems gegeben sein muss. Die Dokumentation der Bestandstruktur ist daher ein wichtiges Kriterium zur Bewertung der Erosionsschutzleistung.

Boniturskala:

- 1 = überwiegend freie Fläche, Bestand punktuell ausgebildet
- 3 = viel freie Fläche, größere Teilbereiche bewachsen
- 5 = Bestand inhomogen, größere offene Stellen
- 7 = homogener Bestand, offene Stellen
- 9 = homogener, geschlossener Bestand.

3.2.3.6 Wurzelentwicklung

Die Durchwurzelung des Bodens ist eines der wichtigsten Funktionen der ingenieurbiologischen Sicherungsleistung. Die Kombination von Pflanzen mit unterschiedlichen Wurzeltypen und unterschiedlicher Durchwurzelungsintensität bietet eine optimale Erschließung des Bodens. Die Aufnahme der Wurzelentwicklung in das System der Prüfkriterien wäre daher von zentraler Bedeutung, konnte aber im Rahmen des Feldversuches nicht verifiziert werden. Zur Entwicklung belastbarer Aussagen über Wurzelfunktionen und Wurzelentwicklung sind Untersuchungen unter standardisierten Bedingungen nötig, die u. a. die quantitative Erfassung der Wurzelmasse pro Wuchstyp unter Einfluss des Erosionsschutzsystems zum Ziel haben.

Durch die Dokumentation der Arten und deren Vitalität können Rückschlüsse auf deren Sicherungsfunktion gezogen werden. Zur Veranschaulichung der Wurzelleistungen verschiedener Wuchstypen wurden diese exemplarisch nach Abschluss der Untersuchungen frei gegraben und fotografisch dokumentiert.

3.2.4. Untersuchungen zur Erosionssicherheit auf den Testparzellen durch das SKZ

Der Bodenabtrag auf den Testparzellen wurde über das am Böschungsfuß installierte Sammelsystem parzellenscharf ermittelt, um die Schutzwirkung der Systeme miteinander vergleichen zu können. **Abb. 3-12** zeigt ein Beispiel für die Erfassung des Bodenabtrags in einer Auffangvorrichtung.

Abbildung 3-12: Erfassung des Bodenabtrags in der Auffangvorrichtung

Der in der Auffangvorrichtung eingesetzte Sack aus einem Geotextil ist austauschbar. Nach Regenereignissen wurde das Sammelsystem kontrolliert und die Geotextilsäcke, die einen Bodenabtrag enthielten, mit einem neuen Sack ersetzt. Der erfasste noch feuchte Bodenabtrag wurde im Prüflabor getrocknet und ausgewogen. Die vor Ort installierte Wetterstation erlaubte einen Abgleich des gemessenen Bodenabtrags mit den vorherrschenden Niederschlagsbedingungen.

Die Erosionsereignisse auf den Testparzellen wurden regelmäßig fotographisch dokumentiert.

3.3. Laboruntersuchungen zur Ermittlung der Produkteigenschaften im SKZ

3.3.1. Versuchsmaterialien für Ermittlung der Produkteigenschaften

Als repräsentative Materialen für Laboruntersuchungen wurden insgesamt 50 Erosionsschutzprodukte anhand von Praxisrelevanz und Marktfähigkeit ausgewählt:

- 14 Erosionsschutzmatten (GEC-M) (Tab. 3-6)
- 14 Geomatten (GMA) (Tab. 3-7)
- 5 Geomatten in Kombination mit Bewehrungselementen (GMA-R) (Tab. 3-8)
- 8 Geozellen (GCE) (Tab. 3-9)
- 1 Hangfaschine (GEC-F) (Tab. 3-10)
- 3 Erosionsschutzgewebe (GCE-W) (Tab. 3-11)
- 5 Vliesstoffe (GCE-N) (4 Vorprodukte ohne Perforation und ein Produkt mit Perforation) (**Tab. 3-12**).

Code	Erosionsschutzsystem	Beschreibung	Abbildung
	F	Füllung: Kokosfaser	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
Material 14	Erosionsschutzmatte	Kokosmatte 100 % Kokosfaser, beidseitig mit PP-Netz, mit braunem PP-Faden vernäht	
Material 33	Erosionsschutzmatte	Kokosmatte 100 % Kokosfaser, beidseitig mit PP-Netz, mit schwarzem PP-Faden vernäht	12i
Material 18	Erosionsschutzmatte	Stroh/Kokos-Matte 50% Kokos / 50% Stroh/Heu, beidseitig mit PP-Netz, mit PP-Faden vernäht	C 122
Material 19	Erosionsschutzmatte	Stroh/Kokos-Matte 50% Kokos / 50% Stroh/Heu, beidseitig mit Jute-Netz, mit Jute-Faden vernäht	G OS
Material 40	Erosionsschutzmatte	Stroh/Kokos-Matte 50 % Stroh, 50 % Kokosfaser, beidseitig mit Jute-Netz, mit Jute-Faden vernäht	C 04
		Füllung: Stroh	
Material 16	Erosionsschutzmatte	Strohmatte (Hersteller A) beidseitig mit PP-Netz, mit schwarzem PP-Faden vernäht	- COS
Material 34	Erosionsschutzmatte	Strohmatte (Hersteller B) beidseitig mit PP-Netz, mit PP-Faden vernäht	J 03

Tabelle 3-6:	Versuchsmaterialien;	Erosionsschutzmatten	(GEC-M))
--------------	----------------------	----------------------	---------	---

Code	Erosionsschutzsystem	Beschreibung	Abbildung	
Füllung: Kokosfaser				
Material 20	Erosionsschutzmatte	Verbund aus einer schwarzen Geomatte aus PP (Monofilament, extrudiert) und einer Kokosmatte, oberseitig und unterseitig PP-Netz, mit PP-Faden vernäht	B 05	
Material 32	Erosionsschutzmatte	Verbund aus PP-Netz und Kokosmatte Aufbau (von oben nach unten): Netz aus PP (flach), Netz aus PP (gewellt), Kern aus Kokosfaser, Netz aus PP, mit PP- Faden vernäht	A LE	
		Füllstoff: Kunststoff		
Material 35	Erosionsschutzmatte	Verbund aus PP-Netz und Kunststofffasermatte Aufbau (von oben nach unten): Netz aus PP (flach), Netz aus PP (gewellt), Kern aus PP-Faser, Netz aus PP, mit PP-Faden vernäht	J 12	
		Füllung: Esparto		
Material 36	Erosionsschutzmatte	Espartomatte 100 % Esparto, beidseitig mit PP-Netz, mit PP-Faden vernäht	C 15	
		Füllung: Seegras		
Material 49	Erosionsschutzmatte	Seegrasmatte 100 % Seegras, beidseitig mit PP-Netz, mit PP-Faden vernäht	A G IS	
		Füllung: Holzwolle		
Material 47	Erosionsschutzmatte	Holzwolle-Matte 100 % Espen-Holzfasern, beidseitig mit PP-Netz, mit PP-Faden vernäht	G 13 15	

Fortsetzung der Tabelle 3-6

Code	Erosionsschutzsystem	Beschreibung	Abbildung
		Füllung: Holzwolle	
Material 48	Erosionsschutzmatte	Holzwolle-Matte 100 % Holzfasern, Holzfasern streifenförmig, beidseitig mit PP-Netz, mit PP-Faden vernäht	G 14

Tabelle 3-7: Versuchsmaterialien; Geomatten (GM	/A)
-------------------------------------------------	-----

Code	Erosionsschutzsystem	Beschreibung	Abbildung
	Ro	hstoff: Polyvinylchlorid (PVC)	
Material 28	Erosionsschutzmatte	Monofilament, extrudiert aus weichem PVC	
		Rohstoff: Polyamid (PA)	
Material 21	Geomatte	PA6, schwarz, dreidimensionale Struktur extrudierte Monofilamente	·
	R	Cohstoff: Polypropylen (PP)	
Material 1	Geomatte	PP, dreischichtig, oben und unten flaches extrudiertes Gitter, in der Mitte ein gewelltes extrudiertes Gitter, mit schwarzem PP-Faden vernäht	S I I I I I I I I I I I I I I I I I I I
Material 2	Geomatte	PP, dreischichtig, oben und unten flaches extrudiertes Gitter, in der Mitte ein gewelltes extrudiertes Gitter, mit schwarzem PP-Faden vernäht	5
Material 10	Geomatte	PP, schwarz, dreidimensionale Struktur, extrudierte Monofilamente, Nenndicke: 22 mm	H

Code	Erosionsschutzsystem	Beschreibung	Abbildung
_	Rohe	stoff: Polypropylen (PP)	
Material 11	Geomatte	PP, schwarz, dreidimensionale Struktur, extrudierte Monofilamente, Nenndicke: 17 mm	H 102
Material 12	Geomatte	PP, schwarz, dreidimensionale Struktur, extrudierte Monofilamente, Nenndicke 10 mm	Н 03
Material 13	Geomatte	PP, braun, dreidimensionale Struktur, extrudierte Monofilamente, Dicke 17 mm	
Material 26	Geomatte	PP, schwarz, dreidimensionale Struktur, extrudierte Monofilamente	Log
Material 27	Geomatte	PP, extrudiert, dreidimensionale Struktur, mit einseitig aufkaschiertem Gewebe aus PE	
	Roh	stoff: Polyethylen (PE)	
Material 8	Geomatte	PE, dreidimensionale Wellenstruktur, bestehend aus zwei Lagen thermisch verbundener extrudierter Netze	
Material 9	Geomatte	PE, schwarz, dreidimensionale Wellenstruktur, bestehend aus vier Lagen thermisch verbundener extrudierter Netze	A STATE OF

Fortsetzung der Tabelle 3-7

Fortsetzung	der	Tabelle	3-7
-------------	-----	---------	-----

Code	Erosionsschutzsystem	Beschreibung	Abbildung
	Roh	stoff: Polyethylen (PE)	
Material 50	Geomatte	PE-HD, grün, dreidimensionale textile Wabenstruktur; wird bei der Verlegung auf die erforderliche Breite gezogen	
Material 51	Geomatte	PE-HD, grün, Monofilament, textile Struktur	

Tabelle 3-8: Versuchsmaterialien; Geomatten in Kombination mit Bewehrungselementen (GMA-R)

Code	Erosionsschutzsystem	Beschreibung	Abbildung
Material 23	Geogitter	Gitterstruktur, schwarz, Zugelemente aus PET-Multifilament, geraschelt, PVC beschichtet	E 01
Material 7	Geomatte in Kombination mit Bewehrungselement	Verbund aus einer Geomatte aus PP und einem PVC beschichteten Geogitter aus PET-Multifilament, schwarz	R DE CONTRACTOR
Material 22	Geomatte in Kombination mit Bewehrungselement	Verbund aus einer Geomatte (PP, Monofilament, schwarz) und Stahl- maschendraht	
Material 29	Geomatte in Kombination mit Bewehrungselement	dreidimensionale Struktur, zweischichtig, oben ein gewelltes Netz aus PP und unter zwei Gitter aus PE-HD, thermisch verbunden	F 01
Material 30	Geomatte in Kombination mit Bewehrungselement	dreidimensionale Struktur, dreischichtig, oben ein gewelltes Netz aus PP und unten ein PVC beschichtetes Geogitter aus PET- Multifilament, thermisch verbunden	F 02
Code	Erosionsschutzsystem	Beschreibung	Abbildung
-------------	----------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------
Material 3	Geozelle	PE-HD, extrudiert, dreidimensionale Wabenstruktur, Höhe 75 mm, Wabendurchmesser ca. 200 mm	
Material 4	Geozelle	PE-HD, extrudiert, dreidimensionale Wabenstruktur, Höhe 75 mm, Wabendurchmesser ca. 300 mm	
Material 5	Geozelle	PE-HD, extrudiert, dreidimensionale Wabenstruktur, Höhe 100mm, Wabendurchmesser ca. 200mm	
Material 6	Geozelle	PE-HD, extrudiert, dreidimensionale Wabenstruktur, Höhe 100mm, Wabendurchmesser ca. 300mm	
Material 24	Geozelle	PET/PA, dreidimensionale Wabenstruktur aus Vliesstoffstreifen, vernäht	
Material 37	Geozelle	PE-HD, dreidimensionale Wabenstruktur, Höhe 50 mm, verschweißt	
Material 38	Geozelle	PE-HD, dreidimensionale Wabenstruktur, Höhe 75 mm, verschweißt	
Material 39	Geozelle	PE-HD, dreidimensionale Wabenstruktur, Höhe 100mm, verschweißt	

Tabelle 3-9:	Versuchsmaterialien;	Geozellen	(GCE)
--------------	----------------------	-----------	-------

Code	Erosionsschutzsystem	Beschreibung	Abbildung
Material 25	Hangfaschine	Faschine mit ungewaschener Schafwolle gefüllt, mit Jutenetz umhüllt, innenlaufende Führungsseile aus Naturgarn	

Tabelle 3-10. Versuchsmalenallen, manglaschline (GEC-F	Tabelle 3-10:	Versuchsmaterialien; Hangfaschine (GEC-F
--------------------------------------------------------	---------------	------------------------------------------

Tabelle 3-11: Versuchsmaterialien; Erosionsschutzgewebe (GCE-W)

Code	Erosionsschutzsystem	Beschreibung	Abbildung
Material 15	Erosionsschutzgewebe	Kokos-Gewebe, Nenn-Flächengewicht 700 g/m²	and a second
Material 17	Erosionsschutzgewebe	Jute-Gewebe, Nenn-Flächengewicht 500 g/m ²	C 11
Material 31	Erosionsschutzgewebe	Kokos-Gewebe, Nenn-Flächengewicht 700 g/m ²	A C to

Tabelle 3-12: Versuchsmaterialien; Erosionsschutzvliesstoffe (GCE-N)

Code	Erosionsschutzsystem	Beschreibung	Abbildung
Material 43	Erosionsschutzvliesstoff	Vliesstoff aus PLA (Polymilchsäure), Nenn-Flächengewicht: 500 g/m², vernadelt	851 2000
Material 44	Erosionsschutzvliesstoff	Vliesstoff aus Schafwolle, meliert, Nenn- Flächengewicht: 500 g/m², vernadelt	

Fortsetzung der Tabelle 3-12

Code	Erosionsschutzsystem	Beschreibung	Abbildung
Material 45	Erosionsschutzvliesstoff	Vliesstoff aus Schafwolle, meliert, Nenn- Flächengewicht: 470 g/m², vernadelt	See
Material 46	Erosionsschutzvliesstoff	Vliesstoff aus Schafwolle und PLA Gemisch, thermisch verfestigt, Nenn- Flächengewicht: 470 g/m ²	20 Million
Material 52	Erosionsschutzvliesstoff, perforiert	Vliesstoff aus Schafwolle, meliert, Flächengewicht: ca. 330 g/m², vernadelt, mit Perforationen versehen	

3.3.2. Untersuchungsmethoden

Um die verschiedenen Erosionsschutzsysteme entsprechend der Zielsetzung miteinander vergleichen zu können, wurden die anwendungstechnisch relevanten Eigenschaften wie folgt zusammengestellt:

- 1. Dicke
- 2. Flächenbezogene Masse
- 3. Porosität
- 4. Mechanische Widerstandsfähigkeit (Zugfestigkeit)
- 5. Biegesteifigkeit
- 6. Verbundfestigkeit
- 7. Druckstauchungsverhalten
- 8. Rückstellverhalten
- 9. Dämpfungsverhalten
- 10. Wasserableitvermögen
- 11. Wasserdurchlässigkeit
- 12. Wasseraufnahmeverhalten (Wasseraufnahmekapazität)
- 13. Quellverhalten durch Wasseraufnahme
- 14. Öffnungsweite
- 15. Lichtdurchlässigkeit
- 16. Wasserdampfdurchlässigkeit (Verdunstungsschutz)
- 17. Witterungsbeständigkeit
- 18. Mikrobiologische Abbaubarkeit beim Kontakt mit Erde
- 19. Schwelwiderstand
- 20. Brandverhalten
- 21. Beständigkeit gegen Bodenerosion
- 22. Umweltverträglichkeit

Es konnte nur teilweise auf bestehende Prüfmethoden zurückgegriffen werden. Insbesondere hinsichtlich der Eigenschaften, die direkt Einfluss auf die Vegetation und den Boden nehmen, wie z. B. der Verdunstungsschutz und die Wasseraufnahmekapazität bei Beregnung, gab es keine übertragbaren Prüfnormen. Im Zuge des Forschungsvorhabens wurden mehrere neue bzw. angepasste Prüfmethoden erarbeitet (SKZ EC 1, SKZ EC 2, SKZ EC 3, SKZ EC 4, SKZ EC 5, SKZ EC 6, SKZ/LWG EC 7, SKZ EC 8). Die Prüfverfahren, die im SKZ angewendet worden sind, sind in der **Tab. 3-13** zusammengefasst. Der Beregnungstest wird im Abschnitt 3.4 separat behandelt.

Eigenschaft		Prüfverfahren				
Physikalische Eigenschaften	Dicke	SKZ EC 1 (0,2 kPa und 2 kPa; in Anl. an DIN EN ISO 9863-1)				
	Flächenbezogene Masse *)	DIN EN ISO 9864				
	Porosität	SKZ EC 5 (in Anl. an ECTC TGM 5.8)				
Mechanische Eigenschaften	Zugfestigkeit	DIN EN ISO 10319 DIN EN ISO 527-3				
	Biegesteifigkeit	in Anl. an ASTM D 1388 (ECTC TGM 5.12)				
	Verbundfestigkeit	DIN EN ISO 13426-1 (Geozelle) DIN EN ISO 13426-2 (Geoverbundstoffe)				
	Druckstauchungsverhalten	in AnI. an DIN EN ISO 25619-2 (σ = 20 kPa)				
	Rückstellverhalten	SKZ EC 6 (Eigenentwicklung)				
	Dämpfungsverhalten	in Anl. an DIN EN 1177 (Fallhöhe = 60 mm)				
Hydraulische Eigenschaften	Wasserableitvermögen	DIN EN ISO 12958 (5 kPa, i = 0,5)				
	Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene	DIN EN ISO 11058 (Δh = 10 mm)				
Hygrische Eigenschaften	Wasseraufnahmeverhalten bei Eintauchen	SKZ EC 3-1 (Eigenentwicklung in Anl. an ECTC TGM 5.10)				
	Wasseraufnahmeverhalten bei Beregnen	SKZ EC 3-2 (Eigenentwicklung)				
	Dickenänderung bei Wasserlage- rung (Quellverhalten)	SKZ EC 4 (Eigenentwicklung in Anl. an ECTC TGM 5.11)				
Vegetationsrelevante Eigenschaften	Öffnungsweite	SKZ EC 8 (Eigenentwicklung in Anl. an DIN EN ISO 12956)				
	Lichttransmission	ASTM D 6567 (ECTC TGM 5.13)				
	Verdunstungsschutz	SKZ EC 2 (Eigenentwicklung)				
Beständigkeitsprüfungen	Witterungsbeständigkeit	DIN EN 12224 (50 MJ/m²) und Freibewitterung in Anl. an DIN EN ISO 877 (1 Jahr)				
	Mikrobiologische Abbaubarkeit	DIN EN 12225 (16 Wochen)				
	Schwelwiderstand (Zigaretten-Test)	ECTC TGM 5.14				
	Brandverhalten	Prüfung nach DIN EN ISO 11925-2, Klassifizierung nach DIN EN 13501-1				

 Tabelle 3-13:
 Pr
 üfverfahren f
 ür die Ermittlung der Eigenschaften von Erosionsschutzsystemen (SKZ)

*) Längenbezogene Masse für Hangfaschine

3.3.2.1 Dicke

Die Bestimmung der Dicke d erfolgte nach der im Laufe des Forschungsprojekts entwickelten Prüfmethode SKZ EC 1, in Anlehnung an DIN EN ISO 9863-1 "Geokunststoffe - Bestimmung der Dicke unter festgelegten Drücken - Teil 1: Einzellagen (ISO 9863-1:2005)", bei den auf die Messproben aufgebrachten Drücken von 0,2 kPa und bei 2 kPa.

Die Dicke der einzelnen Messproben eines Erosionsschutzproduktes wurde gemessen als der Abstand zwischen zwei metallischen Platten - einer Bezugsplatte, auf der die Messprobe (quadratisch, Abmessung: 200 mm x 200 mm) lag, und der Kontaktfläche einer zweiten Platte (Druckplatte, Abmessung: 205 mm x 205 mm), die auf die Messprobe vollflächig aufgebracht wird und einen festgelegten Druck auf die Fläche der Messprobe erzeugt. Die Messung der Dicke erfolgte mit einer Messuhr mittig auf der Druckplatte mit einer Genauigkeit von 0,01 mm. Der Wert wurde 30 s nach dem Aufbringen der Druckplatte abgelesen. Die Anzahl der Messproben betrug n = 5. Der Prüfstand ist auf der Abb. 3-13 dargestellt.



Abbildung 3-13: Prüfstand zur Bestimmung der Dicke bei 0,2 kPa (a) und bei 2,0 kPa (b)

3.3.2.2 Flächenbezogene Masse

Die Bestimmung der flächenbezogenen Masse der Erosionsschutzprodukte wurde nach DIN EN ISO 9864 "Geokunststoffe - Prüfverfahren zur Bestimmung der flächenbezogenen Masse von Geotextilien und geotextilverwandten Produkten (ISO 9864:2005)" an n = 5 Messproben durchgeführt. Die Abmessung der quadratischen Messproben betrug 200 mm x 200 mm. Die Messproben wurden auf eine Genauigkeit von 0,01 g gewogen.

Die flächenbezogene Masse ρ_{A} in g/m² wurde nach folgender Gleichung berechnet:

$$\rho_A = \frac{m}{A}$$

Dabei ist:

- m die Masse der Messprobe in g
- A die Fläche der Messprobe in m².

3.3.2.3 Porosität

Die Porosität wurde nach dem SKZ Prüfverfahren EC 5 (in Anlehnung an ECTC TGM 5.8) bestimmt. Aus der flächenbezogenen Masse, der Dicke der Messprobe und der Rohdichte des Probenmaterials wird die Porosität e in % wie folgt berechnet:

$$\mathbf{e} = \left(1 - \frac{\rho_A}{\rho_0 \cdot \mathbf{d} \cdot \mathbf{10}^3}\right) \cdot 100$$

Dabei ist:

- ρ_A die flächenbezogene Masse in g/m², ermittelt nach Abschnitt 3.3.2.2
- ho_0 die Rohdichte des Probenmaterials in g/cm³
- d die Dicke der Messprobe in mm, ermittelt nach Abschnitt 3.3.2.1, (0,2 kPa).

Die Rohdichte der Messprobenmaterialien wurde nach DIN EN ISO 1183-3 "Kunststoffe -Bestimmung der Dichte von nicht verschäumten Kunststoffen - Teil 3: Gas-Pyknometer-Verfahren (ISO 1183-3:1999)" mit Gas-Pyknometer-Verfahren ermittelt.

3.3.2.4 Zugeigenschaften

Die Prüfungen der Zugeigenschaften am breiten Streifen erfolgten nach DIN EN ISO 10319 "Geokunststoffe - Zugversuch am breiten Streifen (ISO 10319:2008)" an fünf Messproben in Längsrichtung (MD). Die Breite der Messproben betrug 20 cm. Die Messprobe wurde in die Einspannklemmen einer Zugprüfmaschine eingespannt und mit einer vorgegebenen Dehnungsrate von (20 ± 5) % je Minute bis zum Zerreißen der Messprobe gezogen. Die Vorspannung betrug ca. 1 % der zu erwartenden Höchstzugkraft. Für die Charakterisierung der Zugeigenschaften wurden die Höchstzugkraft und Dehnung bei Höchstzugkraft ermittelt. Ein Beispiel für die Probenvorbereitung und für die Prüfung der Zugeigenschaften ist in der **Abb. 3-14** dargestellt.



Abbildung 3-14: Vorbereitung einer Messprobe (Kokos-Gewebe) (a) und Zugprüfung an Jute-Gewebe (b)

Die Prüfung der Zugeigenschaften der Geozellenwand erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 527-3 "Kunststoffe - Bestimmung der Zugeigenschaften - Teil 3: Prüfbedingungen für Folien und Tafeln" an fünf Messproben in Längsrichtung. Bei der Prüfung der Geozellen wurden Messproben (Streifenproben) mit voller Steghöhe einer Geozelle verwendet. Bei der Prüfung der Hangfaschine wurden die Messproben von dem Gesamtprodukt mit entsprechender Länge (ca. 0,5 m) abgeschnitten und geprüft. Die Einspannlänge betrug 100 mm. Die Zugprüfung wurde mit 100 mm/min Prüfgeschwindigkeit durchgeführt. Die Vorspannung betrug ca. 1 % der zu erwartenden Höchstzugkraft. Für die Charakterisierung der Zugeigenschaften wurden die Zugfestigkeit, die Streckgrenze (bei Geozellen aus PEHD) und die Bruchdehnung ermittelt.

3.3.2.5 Biegesteifigkeit

Die Prüfung der Biegesteifigkeit erfolgte nach dem Cantilever-Verfahren in Anlehnung an ASTM D 1388 "Standard Test Method for Stiffness of Fabrics" (ECTC TGM 5.12). Die Breite der Messprobe betrug 200 mm. Jeweils drei Messproben in Längs- und Querrichtung wurden gemessen. Der Prüfstand ist in der **Abb. 3-15** dargestellt.



Abbildung 3-15: Prüfstand für die Ermittlung der Biegesteifigkeit

Bei der Durchführung der Prüfung wurde die Messprobe so zwischen den Schieber und die glatte Auflagefläche des Prüfgerätes gebracht, dass die Vorderkanten des Schiebers und der Messprobe genau über die Vorderkante der Auflagefläche lagen. Danach wurde der Schieber solange mit einer konstanter Vorschubgeschwindigkeit von 120 mm/min nach vorne bewegt, bis sich die mitgeführte Messprobe unter ihrem Eigengewicht so weit durchgebogen hat, dass ihre Vorderkante die geneigte Fläche (Neigung zur Wagerechten: 41,5 °) berührt hat. Die horizontale Verschiebung der Messprobe in mm (Überhanglänge) wurde an der Messskala abgelesen. Anschließend wurde die Prüfung am anderen Ende der Messprobe und an der umgedrehten Messprobe (Unterseite der Messprobe nach oben gerichtet) in gleicher Weise durchgeführt. Als Biegelänge c gilt: c = 0.5 x Überhanglänge.

3.3.2.6 Verbundfestigkeit

a) Bestimmung der Verbundfestigkeit an Geoverbundstoffen

Die Prüfung der Verbundfestigkeit an Geoverbundstoffen erfolgte nach DIN EN ISO 13426-2 "Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Festigkeit produktinterner Verbindungen -Teil 2: Geoverbundstoffe (ISO 13426-2:2005)" in Zug-Scherprüfung.

Nach dem Zuschneiden einer Messprobe (Abmessung 200 mm x 300 mm) wurden die Komponente über eine bestimmte Länge von einander gelöst, damit die gelösten Abschnitte, wie auf der **Abb. 3-16** dargestellt, in die Spannklemmen einer Zugprüfmaschine eingespannt werden können. Die Messprobe wurde mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min geprüft, bis ein Versagen der Verbindung unter Scherbeanspruchung oder ein Versagen eines der Geokunststoffe unter Zugbeanspruchung auftrat. Die Anzahl der Messproben betrug n = 5. Die Zugscherfestigkeit in kN/m wurde ermittelt.



Abbildung 3-16: Zug-Scherprüfung von Geoverbundstoffen nach DIN EN ISO 13426-2, schematisch

b) Bestimmung der Verbundfestigkeit an Geozellen

Die Prüfung der Verbundfestigkeit an Geozellen wurde nach DIN EN ISO 13426-1 "Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Festigkeit produktinterner Verbindungen - Teil 1: Geozellen (ISO 13426-1:2003)" durchgeführt. Die Messproben wurden nach vier verschiedenen Prüfverfahren (Verfahren A, B, C und D) geprüft, die für unterschiedliche Beanspruchungsarten repräsentativ sind. Nach allen vier Verfahren wurden die Prüfungen an x-förmigen Messproben durchgeführt, die eine Geozellenverbindung enthalten. Das Zentrum des "X" stellt die Verbindung dar. Die Anzahl der Messproben betrug je Verfahren n = 5.

Verfahren A: Zug-Scherprüfung

Die x-förmige Messprobe wurde an zwei diagonal gegenüberstehende Stellen (s. **Abb. 3-17**) in die Spannklemmen einer Zugprüfmaschine gespannt und mit einer Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min getestet. Der Höchstwert der Scherkraft in N wurde ermittelt.



Abbildung 3-17: Entnahme der Messprobe für die Zug-Scherprüfung (Verfahren A) Die Einspannung der Messprobe in die Klemmen der Zugprüfmaschine erfolgt an den mit A und B gekennzeichneten Stellen.

Verfahren B: Schälbeanspruchung

Die Einspannung der Messprobe in die Spannklemmen einer Zugprüfmaschine erfolgte in diesem Fall so, dass an die Verbindung eine Schälbeanspruchung ausgeübt wurde (s. **Abb. 3-18**). Die Prüfgeschwindigkeit betrug 100 mm/min. Der Höchstwert der Schälkraft in N wurde ermittelt.



Abbildung 3-18: Entnahme der Messprobe für die Schälfestigkeitsprüfung (Verfahren B) Die Einspannung der Messprobe in die Klemmen der Zugprüfmaschine erfolgt an den mit A und B gekennzeichneten Stellen.

Verfahren C: Haftfestigkeitsprüfung

Nach Verfahren D werden die Schenkel der x-förmigen Messprobe paarweise in speziellen Spannklemmen eingespannt (s. **Abb. 3-19**), die die Kanten der beiden Schenkel in einem festgelegten Abstand, die der Nennzellgröße entspricht, zueinander hält. Nach dem Einspannen wurden die Messproben mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min gezogen, bis die Verbindung aufgrund der Zug-Haft-Beanspruchung versagte. Der Höchstwert der Haftfestigkeit in N wurde ermittelt.



Abbildung 3-19: Entnahme der Messprobe für die Haftfestigkeitsprüfung (Verfahren C) Die Einspannung der Messprobe in die Klemmen der Zugprüfmaschine erfolgt paarweise an den mit A und C bzw. B und D gekennzeichneten Stellen.

Verfahren D: Verformung durch örtliche Überlastung (Rundstabprüfung)

Bei der Prüfung nach Verfahren D wurden die zwei oberen Schenkel (s. **Abb. 3-20**) mit festgelegtem Abstand der Kanten in einer speziellen Klemme eingebaut. Ein Rundstab aus Stahl (Ø 20 mm) wurde zur Simulation eines realen Befestigungsmittels quer über die Verbindung angebracht und mit der unteren festen Klemme der Prüfmaschine verbunden. Die Messprobe wurde mit einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min gezogen, bis ein Versagen aufgrund der Verformung der Verbindung auftrat. Die maximale Zugkraft in N wurde ermittelt.



Abbildung 3-20: Prüfung gegen örtliche Überbeanspruchung der Verbindung (Verfahren D) (a) Die Einspannung der Messprobe erfolgt an den mit A und B gekennzeichneten Stellen in die obere Klemme der Zugprüfmaschine. Der Abstand zwischen A und B betrug im Zugversuch 28 mm.

(b) An der unteren Klemme wird die Messprobe mit Hilfe eines Rundstabs festgehalten.

3.3.2.7 Druckstauchungsverhalten

Die Bestimmung des Druckstauchungsverhaltens der Erosionsschutzprodukte wurde in Anlehnung an DIN EN ISO 25619-2 "Geokunststoffe - Bestimmung des Druckverhaltens - Teil 2: Bestimmung des Kurzzeit-Druckverhaltens (ISO 25619-2:2008)" durchgeführt. Bei der Prüfung wurde in einer Druckprüfmaschine auf die Oberfläche der Messprobe eine Druckspannung von 20 kPa mit einer konstanten Verschiebegeschwindigkeit von 0,5·d₀ je Minute

 $(d_0 = Anfangsdicke der Messprobe, gemessen bei 1 kPa Vorlast) zwischen einer Grundplatte und einer Druckplatte (s.$ **Abb. 3-21**) erzeugt. Je Erosionsschutzprodukt wurden n = 5 Messproben mit Abmessung von 200 mm x 200 mm geprüft. Die Verschiebung der Druckplatte wurde gemessen und daraus die Stauchung der Messprobe in % wie folgt ermittelt:

$$\epsilon_{\sigma=20kPa} = \frac{X_{\sigma=20kPa}}{d_0} \cdot 100$$

Dabei ist:

 $\begin{array}{ll} X_{\sigma=20 \text{kPa}} & \mbox{die Verschiebung der Druckplatte bei 20 kPa Auflast in mm} \\ d_0 & \mbox{die Anfangsdicke der Messprobe in mm gemessen bei 1 kPa Vorlast.} \end{array}$



Abbildung 3-21: Prüfung des Druckstauchungsverhaltens, schematisch

3.3.2.8 Rückstellverhalten

Bei der Prüfung des Rückstellverhaltens nach dem neu entwickelten Prüfverfahren SKZ EC 6 wurden die Messproben (Abmessung 200 mm x 200 mm) mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit von 50%d₀/min bis zu einer Druckspannung von 25 kPa zwischen zwei Metallplatten zusammengedrückt und 30 s lang in dieser Position gehalten. Anschließend wurde die Druckspannung auf 1 kPa reduziert und die Dicke der Messprobe (d_{Pos.2}) nach 30 s ermittelt. Aus der gemessenen Dicke d_{Pos.2} und der Anfangsdicke d₀ (gemessen bei 1 kPa Vorlast) der Messproben wurde der Druckverformungsrest (DVR), ausgedrückt in Prozent, nach DIN EN ISO 1856 "Weich-elastische polymere Schaumstoffe - Bestimmung des Druckverformungsrestes (ISO 1856:2000+Amd. 1:2007)", Abschnitt 8.1 wie folgt berechnet:

$$\mathsf{DVR} = \frac{\mathsf{d}_0 - \mathsf{d}_{\mathsf{Pos.2}}}{\mathsf{d}_0} \cdot 100$$

Dabei ist:

d₀ die Anfangsdicke der Messprobe in mm, gemessen bei 1 kPa Vorlast

d_{Pos.2} die Dicke der Messprobe in mm unter 1 kPa Druckspannung nach 30 s nach dem Zusammendrücken und Entlasten.

3.3.2.9 Dämpfungsverhalten

Die Prüfung des Dämpfungsverhaltens wurde in Anlehnung an DIN EN 1177 "Stoßdämpfende Spielplatzböden - Bestimmung der kritischen Fallhöhe" durchgeführt. Für die Prüfung wurde ein mit einem Messsensor für die Erfassung der Beschleunigung bestückter Prüfkopf (Masse des Prüfkopfes: 4,6 kg) aus einer Fallhöhe von 60 mm auf eine auf harter Unterlage (Beton) liegende Messprobe fallengelassen (s. **Abb. 3-22**). Die durch den Aufprall freigesetzte Energie orientierte sich an der Energie, die durch den Aufprall von Hagelkörnern mit einem Durchmesser von ca. 3 cm mit einer Geschwindigkeit von ca. 21 m/s entsteht. Daraus resultierte eine kinetische Energie von ca. 2,7 J. Für die Charakterisierung des Dämpfungsverhaltens wurde die gemessene maximale Beschleunigung in g (g = Erdbeschleunigung 9,81 m/s²) des Prüfkopfes ermittelt.



Abbildung 3-22: Prüfung des Dämpfungsverhaltens

3.3.2.10 Wasserableitvermögen

Die Bestimmung des Wasserableitvermögens in der Ebene erfolgte nach DIN EN ISO 12958 "Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung des Wasserableitvermögens in der Ebene (ISO 12958:2010)". Die Prüfeinrichtung ist in der **Abb. 3-23** dargestellt.

Die Anzahl der Messproben betrug n = 3. Die Messprobe (Abmessung 400 mm x 200 mm), die vorher in einem wässrigen Netzmittelbad für mindestens 12 h eingelagert war, wurde in die Belastungsvorrichtung zwischen den metallischen Unterlage und der metallischen Lastplatte eingebaut und mit einer Normalspannung von 5 kPa belastet. Im Prüfgerät wurde ein konstanter hydraulischer Höhenunterschied von i = 0,5 mit Hilfe der Wasserspiegellage beim Einlauf eingestellt. Die Wassertemperatur wurde gemessen. Das durch die Messprobe hindurchfließende Wasser wurde während einer bestimmten Zeitdauer t im Wasserauffangbehälter aufgefangen und mit der Waage ausgewogen. Das Wasserableitvermögen $q_{5,0.5}$ wurde wie folgt berechnet:

$$q_{5,0.5} = \frac{m_{D} \cdot R_{T}}{\rho_{W} \cdot b \cdot t} \cdot 10^{3}$$

Dabei ist:

q _{5,0.5}	das Wasserableitvermögen in der Ebene je Einheitsbreite bei definiertem
	Gefälle und definierter Druckspannung, in Liter je Meter Sekunde [l/(m x s)]
m _D	die ausgewogene Masse des Wasserdurchflusses in kg
$ ho_W$	die Dichte des Wassers in kg/m ³
b	die Messprobenbreite in m
t	die Messzeit des Durchflusses in s
R_{T}	der Korrekturfaktor für eine Wassertemperatur von 20 °C.



Abbildung 3-23: Prüfeinrichtung zur Bestimmung der Wasserableitvermögen in der Ebene

3.3.2.11 Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene

Die Bestimmung des Wasserableitvermögens in der Ebene erfolgte nach DIN EN ISO 11058 "Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene, ohne Auflast (ISO 11058:2010)".

Die Anzahl der Messproben betrug n = 5. Die Messproben wurden vor dem Einbau ins Prüfgerät mindestens 12 h in einer wässrigem Netzmittelbad gelagert. Der Prüfgerät wurde mit Wasser gefüllt und eine Wasserpegeldifferenz von Δh = 10 mm zwischen Einlauf und Auslauf eingestellt und konstant gehalten. Die kreisförmige Messprobe wurde in das Prüfgerät eingebaut und mit Wasser durchströmt. Die durchströmte Oberfläche hatte einen Durchmesser von 50 mm. Das durch die Messprobe von unten nach oben durchfließende Wasser wurde während einer bestimmten Zeitdauer t im Wasserauffangbehälter aufgefangen und mit der Waage ausgewogen. Die Wassertemperatur wurde gemessen. Die Wasserdurchlässigkeit q_N wurde wie folgt berechnet:

$$q_{N} = \frac{m_{D} \cdot R_{T}}{\rho_{W} \cdot A \cdot t} \cdot 10^{3}$$

Dabei ist:

q_N die Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene bei definiertem hydraulischen Höhenunterschied, in Liter je Quadratmeter Sekunde [l/(m² x s)]

m_D die ausgewogene Masse des Wasserdurchflusses in kg

- $\rho_W \qquad \ \ die \ \, Dichte \ \, des \ \, Wassers \ in \ \, kg/m^3$
- A die durchströmte Oberfläche in m²
- t die Messzeit des Durchflusses in s
- R_T der Korrekturfaktor für eine Wassertemperatur von 20 °C.

Die Prüfeinrichtung ist in der Abb. 3-24 dargestellt.



Abbildung 3-24: Prüfeinrichtung zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene

3.3.2.12 Wasseraufnahmekapazität, Verfahren Eintauchen

Bei dem Verfahren "Eintauchen" nach SKZ EC 3-1 (technisch identisch mit ECTC TGM 5.10) wurde die Trockenmasse der Messprobe gemessen und die Messprobe anschließend für 24 h vollständig in Wasser eingetaucht (**Abb. 3-25**).

Für die Prüfung wurde entmineralisiertes Wasser verwendet. Nach dem Eintauchen erfolgte das Abtropfen der Messproben für 10 Minuten. Anschließend wurden die nassen Messproben ausgewogen und die Wasseraufnahmekapazität w in % und in I/m² wie folgt berechnet:

w (in %) =
$$\frac{m_{\mathsf{E}} - m_0}{m_0} \cdot 100$$

Dabei ist:

- $m_0 \qquad \text{die Trockenmasse der Messprobe in g}$
- m_E die Masse der Messprobe in g nach dem Eintauchen (bzw. nach dem Beregnen nach Abschnitt 3.3.2.13),

w (in l/m²) =
$$\frac{m_{E} - m_{0}}{\rho_{W} \cdot A} \cdot 10^{-3}$$

Dabei ist:

- m₀ die Trockenmasse der Messprobe in g
- m_E die Masse der Messprobe nach dem Eintauchen in g.
- ρ_W die Dichte des Wassers in g/cm³
- A die Fläche der Messprobe in m².



Abbildung 3-25: Prüfung des Wasseraufnahmevermögens (Verfahren: Eintauchen)

Je Erosionsschutzprodukt wurden n = 3 Messproben getestet. Die Abmessung der Messproben betrug 200 mm x 200 mm.

Messtechnisch ist dieses Prüfverfahren mit der Prüfung nach ECTC TMG 5.10 [2] vergleichbar.

3.3.2.13 Wasseraufnahmekapazität, Verfahren Beregnen

Bei der Prüfung der Wasseraufnahmekapazität nach dem neu entwickelten Verfahren "Beregnen" (SKZ EC 3-2) wurden die Messproben auf eine Beregnungsanlage der LWG auf einer geneigten Oberfläche (Böschungsneigung 1:1,5) platziert (s. **Abb. 3-26**) und mit einer vorgegebenen Niederschlagsintensität von 60 mm/h für eine Dauer von 30 min mit Regenwasser beregnet. Nach dem Abtropfen (Abtropfzeit 10 min) wurden die nassen Messproben ausgewogen. Aus der Differenz der Trockenmasse zur Feuchtmasse einer Messprobe wurde die Wasseraufnahmekapazität w in % und in I/m², wie im Abschnitt 3.3.2.12 beschrieben wurde, berechnet.

Die o.g. Versuchsbedingungen wurden anhand der Ergebnisse von Vorversuchen bei unterschiedlicher Regenintensität, Beregnungsdauer und Abtropfzeit festgelegt.



Abbildung 3-26: Prüfung des Wasseraufnahmevermögens (Verfahren: Beregnen)

3.3.2.14 Dickenänderung bei Wasserlagerung (Quellverhalten)

Die Bestimmung des Quellverhaltens erfolgte nach SKZ EC 4 (in Anlehnung an ECTC TMG 5.11). Das Quellverhalten wurde nach diesem Verfahren als die prozentuelle Dickenänderung einer Messprobe, die 24 h im Wasser nach Abschnitt 3.3.2.12 eingelagert war, charakterisiert. Dafür wurde die Dicke der Messprobe vor und nach dem Eintauchen nach Abschnitt 3.3.2.1 bei 0,2 kPa ermittelt und die Dickenänderung Δd_E nach Wasserlagerung in Prozent wie folgt berechnet:

$$\Delta d_{\mathsf{E}} = \frac{\mathsf{d}_{\mathsf{E}} - \mathsf{d}_{0,2\mathsf{k}\mathsf{Pa}}}{\mathsf{d}_{0,2\mathsf{k}\mathsf{Pa}}} \cdot 100$$

Dabei ist:

- d_{0,2kPa} die Dicke der Messprobe in mm bei 0,2 kPa in trockenem Zustand vor dem Eintauchen in Wasser
- d_E die Dicke der Messprobe in mm bei 0,2 kPa nach 24 h Eintauchen in Wasser.

3.3.2.15 Öffnungsweite

Die Bestimmung der Öffnungsweite wurde nach SKZ EC 8, in Anlehnung an DIN EN ISO 12956 "Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung der charakteristischen Öffnungsweite (ISO 12956:2010)" durchgeführt. Anders als in der DIN EN ISO 12956 wurde die Öffnungsweite jedoch nicht mit Sand, sondern anhand von Glaskugeln mit Durchmesser von 1 bis 20 mm Millimeter bestimmt. Die Korngrößenverteilung der Glaskugelmischung wurde definiert. Bei der Prüfung wurde eine Messprobe (Abmessung ca. 200 mm x 400 mm) auf der Öffnung eines Siebbehälters befestigt. Die Glaskugelmischung wurde auf die Oberfläche der Messprobe aufgegeben und per Hand durch Schütteln 1 min trocken gesiebt (Abb. 3-27). Anschließend wurde die Korngrößenverteilung des Siebdurchganges bestimmt. Als Öffnungsweite $O_{EC,90}$ wurde die Korngröße bei d_{90} an der Sieblinie definiert.



Abbildung 3-27: Prüfung der Öffnungsweite an einer Geomatte

3.3.2.16 Lichtdurchlässigkeit

Eine für die Vegetationsentwicklung besonders relevante Eigenschaft ist die Lichtdurchlässigkeit der Erosionsschutzsysteme. Das betrifft vor allem die Erosionsschutzprodukte, die ohne Bodenbedeckung auf dem Oberboden verlegt sind, durch die Gräser und Kräuter von unten durchwachsen müssen. In diesem Fall erreicht nur ein Teil des für das Pflanzenwachstum benötigten Sonnenlichtes die frisch gekeimten Pflanzen.

Die Prüfung der Lichtdurchlässigkeit der Erosionsschutzprodukte erfolgte nach ASTM D 6567 "Standard Test Method for Measuring the Light Penetration of a Turf Reinforcement Mat (TRM)". Bei dem Prüfstand handelt es sich um einen Kasten, bei dem zwischen einer Lichtquelle und einem Lichtsensor eine Messprobe eingespannt werden kann (**Abb. 3-28**).

Die Abstände zwischen Lichtquelle, Messprobe und Messsensor sind definiert. Zunächst wird eine Messung der Lichtintensität im geschlossenen Kasten ohne eine zu untersuchende Messprobe durchgeführt (Referenzmessung). Anschließend wird eine Messprobe eingespannt und nochmals eine Messung der Lichtintensität durchgeführt. Daraus wird die Lichttransmission L_T in % wie folgt berechnet:

$$\mathsf{L}_\mathsf{T} = \frac{\mathsf{I}_\mathsf{T}}{\mathsf{I}_\mathsf{R}} \cdot 100$$

Dabei ist:

 I_R die gemessene Beleuchtungsstärke in Ix ohne Messprobe

 I_T die gemessene Beleuchtungsstärke in Ix mit eingebauter Messprobe.

Je Erosionsschutzprodukt wurden n = 5 Messproben geprüft.



Abbildung 3-28: Prüfstand zur Bestimmung der Lichtdurchlässigkeit nach ASTM D 6567

3.3.2.17 Verdunstungsschutz

Die Prüfung des Verdunstungsschutzes wurde nach dem neu entwickelten Prüfverfahren SKZ EC 2 durchgeführt. Eine Messprobe wurde auf einem mit definiertem Wasservolumen gefüllten Kunststoff-Gefäß eingebaut (s. **Abb. 3-29**) und bei vorgegebenem Klima (relative Luftfeuchtigkeit: 50 %, Temperatur: 23 C) gelagert.



Abbildung 3-29: Prüfung des Verdunstungsschutzes

Das Gefäß mit der Messprobe wurde von Zeit zu Zeit mit einer Genauigkeit von 0,1 g ausgewogen. Als Referenz diente eine Messanordnung ohne Messprobe (Kunststoff-Gefäß mit Wasser gefüllt), welches unter den gleichen klimatischen Bedingungen gelagert und ausgewogen wurde. Die aus dem Gefäß durch die Messprobe und aus dem Gefäß ohne Messprobe (Referenzmessung) verdunstete Wassermenge wurden ermittelt und daraus der Verdunstungsschutz P_E in % wie folgt berechnet:

$$\mathsf{P}_{\mathsf{E}} = \left(1 - \frac{\mathsf{m}_{\mathsf{T}}}{\mathsf{m}_{\mathsf{R}}}\right) \cdot 100$$

Dabei ist:

- m_R die bei der Referenzmessung pro Zeiteinheit und pro Flächeneinheit verdunstete Wassermenge in g/(m² x d)
- m_T die durch die Messprobe aus dem Gefäß pro Zeiteinheit verdunstete Wassermenge in g/(m² x d).

Je Erosionsschutzprodukt wurden n = 3 Messproben geprüft.

3.3.2.18 Witterungsbeständigkeit

Die Witterungsbeständigkeit wurde mit zwei Methoden getestet: Beanspruchung der Messproben durch künstliche Bewitterung und durch Freibewitterung.

a) Künstliche Bewitterung

Die künstlichen Bewitterung erfolgte nach DIN EN 12224 "Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Bestimmung der Witterungsbeständigkeit" in einem QUV-Gerät (**Abb. 3-30**).



Abbildung 3-30: Künstliche Bewitterung der Messproben im QUV-Gerät

Das in dieser Norm festgelegte Verfahren der Bewitterung ist intensiver als die Bewitterung im Freien. Die nach der Norm erforderliche Dauer für die Bestrahlung von 50 MJ/m² bedeutete etwa 430 h Bewitterung im QUV-Gerät. Die 50 MJ/m² UV-Bestrahlung entspricht etwa 2 Sommermonate im Freien in Mittel-Europa. Die für die Bewitterung bestimmten sechs Messproben (Abmessung: 100 mm x 300 mm) wurden im QUV-Gerät mit folgenden Belastungszyklus ausgesetzt:

- 5 h Trockenperiode bei einer Schwarz-Standardtemperatur von 50 $^{\rm C}$

- 1 h Besprühung mit Wasser bei einer Schwarz-Standardtemperatur von 25 °C.

Die UV-Lampen (Leuchtstofflampen Typ I) waren während der Sprühdauer ausgeschaltet.

Für die Charakterisierung der Witterungsbeständigkeit wurden die Zugeigenschaften (Höchstzugkraft und Dehnung bei Höchstzugkraft) an unbewitterten Messproben (Anlieferungszustand) und an den bewitterten Messproben in Anlehnung an DIN EN 29073-3 "Prüfverfahren für Vliesstoffe – Bestimmung der Höchstzugkraft und der Höchstzugkraftdehnung" ermittelt und die Restfestigkeit bzw. die Restdehnung in Prozent wie folgt berechnet:

$$\text{Restfestigkeit} = \frac{\text{F}_{\text{max,Bew.}}}{\text{F}_{\text{max,ALZ}}} \cdot 100$$

Dabei ist:

F _{max,Bew.}	die Höchstzugkraft in N nach der Bewitterung
$F_{\text{max},\text{ALZ}}$	die Höchstzugkraft in N vor der Bewitterung (Anlieferungszustand),

 $\textbf{Restdehnung} = \frac{\epsilon_{\text{max,Bew.}}}{\epsilon_{\text{max,ALZ}}} \cdot 100$

Dabei ist:

€ _{max,Bew.}	die Dehnung bei Höchstzugkraft in % nach der Bewitterung
$\epsilon_{max,ALZ}$	die Dehnung bei Höchstzugkraft in % vor der Bewitterung (im Anliefe-
	rungszustand).

b) Freibewitterung

Die Freibewitterung erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 877 "Kunststoffe - Freibewitterung - Teil 2: Bewitterung und Bestrahlen hinter Fensterglas", Verfahren A. Nach diesem Verfahren werden die Messproben direkt durch die Sonnenstrahlung beansprucht. Die Proben wurden an einem nach Süden gerichteten Gestell mit einer Neigungswinkel von 50° auf einem Drahtgitter befestigt (s. **Abb. 3-31**).



Abbildung 3-31: Freibewitterung von Erosionsschutzprodukten auf dem Dach des SKZ Technologiezentrums in Würzburg

Ausgewählte Messproben wurden ca. 1 Jahr (von 15.07.2010 bis 12.07.2011) auf dem Flachdach des SKZ Technologiezentrums in Würzburg auf einem Freibewitterungsstand ausgesetzt. Die UV-Bestrahlung in dem Prüfzeitraum betrug ca. 249 MJ/m² (horizontal). Der Berechnung der UV-Dosis wurden Strahlungsdaten herangezogen, die durch den Deutschen Wetterdienst, Standort Würzburg, ermittelt wurden.

Für Charakterisierung der Witterungsbeständigkeit wurden die Restfestigkeit und die Restdehnung der Messproben, wie im Abschnitt a) beschrieben wurde, ermittelt.

3.3.2.19 Mikrobiologische Abbaubarkeit

Die mikrobiologische Beständigkeit wurde durch einen Erdeingrabversuch nach DIN EN 12225 "Geotextilien und geotextilverwandte Produkte - Prüfverfahren zur Bestimmung der mikrobiologischen Beständigkeit durch einen Erdeingrabungsversuch" ermittelt. Dafür wurden Messproben (Abmessung: 100 mm x 300 mm) in mikrobiologisch aktivierter Prüferde (Typ Einheitserde ED 73; Feuchtegehalt: 60 % des Sättigungswassergehaltes) in einem Kunststoffbehälter eingelagert und 16 Wochen bei 26 °C und ca. 95 % relativer Luftfeuchtigkeit beansprucht (**Abb. 3-32**). Die Messproben wurden ca. 10 cm tief in der Erde eingegraben. Der Wassergehalt der Erde wurde nach festgelegten zeitlichen Abständen durch Differenzwägung der Kunststoffbehälter kontrolliert und falls es erforderlich war durch Besprühung wieder erhöht. Nach der Beanspruchung wurden die Messproben aus der Erde ent-nommen und durch Abstreifen und leichtes Abklopfen gereinigt.



Abbildung 3-32: Erdeingrabversuch

Für die Charakterisierung der mikrobiologischen Beständigkeit wurden die Zugeigenschaften (Höchstzugkraft und Dehnung bei Höchstzugkraft) an Messproben im Anlieferungszustand und an den beanspruchten Messproben in Anlehnung an DIN EN 29073-3 ermittelt und die Restfestigkeit bzw. die Restdehnung, wie im Abschnitt 3.3.2.18 beschrieben, berechnet.

3.3.2.20 Schwelwiderstand (Zigaretten-Test)

Die Prüfung des Schwelwiderstandes erfolgte nach ECTC TMG 5.14. Bei dem Test wird eine Messprobe (Abmessung 305 mm x 305 mm) in eine metallische Box eingebaut und eine angezündete Zigarette (Marke: Camel, ohne Filter, Länge: 57 mm) auf die Messprobenober-fläche aufgebracht (**Abb. 3-33** und **Abb. 3-34**). Ein in der Wandung der metallischen Box eingebauter Ventilator und eine weitere Öffnung sorgen für die Luftzufuhr bzw. für den Rauchabzug. Nach dem Abbrennen der Zigarette und nach dem vollständigen Erlöschen des Glimmens in der Messprobe wurde der maximale Abstand zwischen der Zigarettenasche und der beschädigten Messprobenoberfläche (Länge der verbrannten Strecke) bestimmt. Je Erosionsschutzprodukt wurden n = 3 Messproben geprüft.



Abbildung 3-33: Messvorrichtung für die Bestimmung des Schwelwiderstandes (Zigaretten-Test)



Abbildung 3-34: Glimmen der Messprobe beim Zigaretten-Test

3.3.2.21 Brandverhalten

Die Brandprüfung wurde nach DIN EN ISO 11925-2 "Prüfungen zum Brandverhalten - Entzündbarkeit von Produkten bei direkter Flammeneinwirkung - Teil 2: Einzelflammentest (ISO 11925-2:2010)". Das Prüfverfahren legt die Prüfung zur Bestimmung der Entzündbarkeit von Materialien bei einer direkt einwirkenden Flamme in Streichholzgröße fest. Die Messprobe (Abmessung: 90 mm x 250 mm) wurde in den Probenhalter einer metallischen Brandkammer vertikal angeordnet eingeklemmt, eine gleichmäßig brennende Flamme mit einer Höhe von 20 mm wurde eingestellt und die Messprobe an der Oberfläche 40 mm oberhalb des unteren Randes für 15 s beflammt (**Abb. 3-35**). Das Brenngas war handelsübliches Propangas von mindestens 95 % Reinheit. Es wurde beobachtet, ob eine Entzündung erfolgte und ob die Flammenspitze nach 20 s ab dem ersten Aufbringen der Flamme eine Höhe von 150 mm oberhalb des Beflammungspunktes erreichte. Es wurden jeweils drei Messproben in Längs- und Querrichtung geprüft.

Die Klassifizierung der Erosionsschutzprodukte zu ihrem Brandverhalten erfolgte nach DIN EN 13501-1 "Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten". Für die Klasse E muss das Kriterium erfüllt werden, dass bei der o. g. Flächenbeflammung die vertikale Flammenausbreitung 150 mm oberhalb des Beflammungspunktes nicht überschreiten darf. Für die Klasse F werden keine Anforderungen gestellt. Klasse F trifft zu, wenn ein Produkt die Klasse E nicht erreicht hat.



Abbildung 3-35: Oberflächenbeflammung einer Messprobe

3.3.3. Versuchsprogramm zu Laboruntersuchungen

Das Untersuchungsprogramm ist in den Tab. 3-14 bis 3-20 zusammengefasst.

Tabelle 3-14: Versuchsprogramm (SKZ); Prüfungen an Erosionsschutzmatten

Eigenschaft / Prüfmethode		Versuchsmaterialien												
		Kokosfaser		Kokosfaser/Stroh		Stroh		Kokosfaser +Geomatte		Kunst- stofffaser	Es- parto	Holz	wolle	See- gras
	Mat. 14	Mat. 33	Mat. 18	Mat. 19	Mat. 40	Mat. 16	Mat. 34	Mat. 20	Mat. 32	Mat. 35	Mat. 36	Mat. 47	Mat. 48	Mat. 49
Dicke (0,2 kPa, 2 kPa) SKZ EC 1	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	x	x
Flächenbezogene Masse DIN EN ISO 9864	х	х	х	х	х	x	х	х	х	х	х	х	x	x
Porosität SKZ EC 5	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х
Zugfestigkeit DIN EN ISO 10319	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	x	х
Biegesteifigkeit in Anl. an ASTM D 1388	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х
Verbundfestigkeit DIN EN ISO 13426-2	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	x	х
Druckstauchung in Anl. an DIN EN ISO 25619-2	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	x
Rückstellverhalten SKZ EC 6	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	x
Dämpfungsverhalten in Anl. an DIN EN 1177	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х
Wasserableitvermögen DIN EN ISO 12956	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х
Wasserdurchlässigkeit DIN EN ISO 11058	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen) SKZ EC 3-1	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	x	x
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen) SKZ EC 3-2	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х
Dickenänderung bei Wasserlagerung SKZ EC 4	х	х	х	х	х	х	х	х	х		х	х	x	х
Öffnungsweite SKZ EC 8					x			х						
Lichtdurchlässigkeit ASTM D 6567	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х
Verdunstungsschutz SKZ EC 2	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х
Witterungsbeständigkeit DIN EN 12224	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	x
Mikrobiologische Abbaubarkeit DIN EN 12225	х	х	х	х	х	х	х	х	х		х	х	х	х
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	x
Brandverhalten DIN EN ISO 11925-2	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х

Tabelle 3-15: Versuchsprogramm (SKZ); Prüfungen an Geomatten

Eigenschaft / Prüfmethode	Versuchsmaterialien													
	PVC-P	PA	PA PP						PE					
	Mat. 28	Mat. 21	Mat.	Mat.	Mat.	Mat.	Mat.	Mat.	Mat.	Mat.	Mat.	Mat.	Mat.	Mat
			1	2	10	11	12	13	26	27	8	9	50	51
Dicke (0,2 kPa, 2 kPa) SKZ EC 1	х	х	х	х	х	x	х	х	х	х	х	х	х	х
Flächenbezogene Masse DIN EN ISO 9864	х	х	х	х	x	х	х	х	х	х	х	х		х
Porosität SKZ EC 5	х	х	х	х	x	х	х	х	х	х	х	х		х
Zugfestigkeit DIN EN ISO 10319	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х
Biegesteifigkeit in Anl. an ASTM D 1388	х	х	х	х	х	х	х	х	х	x	х	х		х
Verbundfestigkeit DIN EN ISO 13426-2			х	х						x	х	х		
Druckstauchung in Anl. an DIN EN ISO 25619-2	х	х	х	х	х	х	х	х	х	x	х	х		х
Rückstellverhalten SKZ EC 6	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х		х
Dämpfungsverhalten in Anl. an DIN EN 1177	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х	х		х
Wasserableitvermögen DIN EN ISO 12956	х	х	х	х	х	х	х	х	х	x	х	х		х
Wasserdurchlässigkeit DIN EN ISO 11058														
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen) SKZ EC 3-1														
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen) SKZ EC 3-2														
Dickenänderung bei Wasserlagerung SKZ EC 4														
Öffnungsweite SKZ EC 8		х												
Lichtdurchlässigkeit ASTM D 6567	х	х	х	х	х	х	х	х	х	x	х	х	х	х
Verdunstungsschutz SKZ EC 2	x	х												
Witterungsbeständigkeit DIN EN 12224	х	х	х		х			х	х	x	х		х	х
Mikrobiologische Abbaubarkeit DIN EN 12225														
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14	х	х	х	х	х			Х	х	Х	х	х		х
Brandverhalten DIN EN ISO 11925-2	x	х	х	x	х			x	х	x	х	х	x	х

Eigenschaft / Prüfmethode	Versuchsmaterialien						
		Geogitter					
	PP/PET+PVC-P	PP/Stahl	PP/PEHD	PP/PET+PVC-P	PET+PVC-P		
	Mat. 7	Mat. 22	Mat. 29	Mat. 30	Mat. 23		
Dicke (0,2 kPa, 2 kPa) SKZ EC 1	х	х	х	х	х		
Flächenbezogene Masse DIN EN ISO 9864	х	х	х	х	х		
Porosität SKZ EC 5	х		х	х	х		
Zugfestigkeit DIN EN ISO 10319	х		х	х	х		
Biegesteifigkeit in Anl. an ASTM D 1388	х		х	х	х		
Verbundfestigkeit DIN EN ISO 13426-2	х		х	х			
Druckstauchung in Anl. an DIN EN ISO 25619-2	х	х	х	х			
Rückstellverhalten SKZ EC 6	х	х	х	х			
Dämpfungsverhalten in Anl. an DIN EN 1177	х		х	х	х		
Wasserableitvermögen DIN EN ISO 12956	х	х	х	х	х		
Wasserdurchlässigkeit DIN EN ISO 11058							
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen) SKZ EC 3-1							
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen) SKZ EC 3-2							
Dickenänderung bei Wasserlagerung SKZ EC 4							
Öffnungsweite SKZ EC 8	х						
Lichtdurchlässigkeit ASTM D 6567	х	х	х	х	х		
Verdunstungsschutz SKZ EC 2	х						
Witterungsbeständigkeit DIN EN 12224	х		х		х		
Mikrobiologische Abbaubarkeit DIN EN 12225							
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14	x	x	x	x	x		
Brandverhalten DIN EN ISO 11925-2	х	х	x	х	х		

Tabelle 3-16: Versuchsprogramm (SKZ); Prüfungen an Geomatten in Kombination mit Bewehrungselementen

Tabelle 3-17: Versuchsprogramm (SKZ); Prüfungen an Geozellen

Eigenschaft / Prüfmethode	Versuchsmaterialien							
	PEHD							PET + PA
	Mat. 3	Mat. 4	Mat. 5	Mat. 6	Mat. 37	Mat. 38	Mat. 39	Mat. 24
Dicke (0,2 kPa, 2 kPa) SKZ EC 1								
Flächenbezogene Masse DIN EN ISO 9864								
Porosität SKZ EC 5								
Zugfestigkeit DIN EN ISO 527-3	х	х	х	х	x	х	х	x
Biegesteifigkeit in Anl. an ASTM D 1388								
Verbundfestigkeit DIN EN ISO 13426-1 Verfahren A, B, C und D	x	x	x	x	x	x	x	x
Druckstauchung in Anl. an DIN EN ISO 25619-2								
Rückstellverhalten SKZ EC 6								
Dämpfungsverhalten in Anl. an DIN EN 1177								
Wasserableitvermögen DIN EN ISO 12956								
Wasserdurchlässigkeit DIN EN ISO 11058								
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen) SKZ EC 3-1								
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen) SKZ EC 3-2								
Dickenänderung bei Wasserlagerung SKZ EC 4								
Öffnungsweite SKZ EC 8								
Lichtdurchlässigkeit ASTM D 6567								
Verdunstungsschutz SKZ EC 2								
Witterungsbeständigkeit DIN EN 12224	х	х			x			x
Mikrobiologische Abbaubarkeit DIN EN 12225								
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14								
Brandverhalten DIN EN ISO 11925-2	x				х			х

Tabelle 3-18: Versuchsprogramm (SKZ);Prüfungen an einer Hangfaschine

Eigenschaft / Prüfmethode	Versuchmaterial
	Schafwolle
	Mat. 25
Dicke (0,2 kPa, 2 kPa) SKZ EC 1	
Längenbezogene Masse	x
Porosität SKZ EC 5	
Zugfestigkeit in Anl. an DIN EN ISO 10319	x
Biegesteifigkeit in Anl. an ASTM D 1388	
Verbundfestigkeit DIN EN ISO 13426-2	
Druckstauchung in Anl. an DIN EN ISO 25619-2	
Rückstellverhalten SKZ EC 6	
Dämpfungsverhalten in Anl. an DIN EN 1177	
Wasserableitvermögen DIN EN ISO 12956	х
Wasserdurchlässigkeit DIN EN ISO 11058	
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen) SKZ EC 3-1	x
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen) SKZ EC 3-2	х
Dickenänderung bei Wasserlagerung SKZ EC 4	
Öffnungsweite SKZ EC 8	
Lichtdurchlässigkeit ASTM D 6567	
Verdunstungsschutz SKZ EC 2	
Witterungsbeständigkeit DIN EN 12224	х
Mikrobiologische Abbaubarkeit DIN EN 12225	х
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14	х
Brandverhalten DIN EN ISO 11925-2	x

x geprüfte Eigenschaften

Tabelle 3-19: Versuchsprogramm (SKZ);Prüfungen an Erosionsschutzgeweben

Eigenschaft / Prüfmethode	Versuchsmaterialien			
	Kol	KOS	Jute	
	Mat. 15	Mat. 31	Mat. 17	
Dicke (0,2 kPa, 2 kPa) SKZ EC 1	х	х	х	
Flächenbezogene Masse DIN EN ISO 9864	х	х	х	
Porosität SKZ EC 5				
Zugfestigkeit DIN EN ISO 10319	х	х	х	
Biegesteifigkeit in Anl. an ASTM D 1388	х	х	х	
Verbundfestigkeit DIN EN ISO 13426-2				
Druckstauchung in Anl. an DIN EN ISO 25619-2				
Rückstellverhalten SKZ EC 6				
Dämpfungsverhalten in Anl. an DIN EN 1177	х	х	х	
Wasserableitvermögen DIN EN ISO 12956				
Wasserdurchlässigkeit DIN EN ISO 11058				
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen) SKZ EC 3-1	х	х	х	
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen) SKZ EC 3-2	х	х	х	
Dickenänderung bei Wasserlagerung SKZ EC 4				
Öffnungsweite SKZ EC 8	х		х	
Lichtdurchlässigkeit ASTM D 6567	х	х	х	
Verdunstungsschutz SKZ EC 2	х		х	
Witterungsbeständigkeit DIN EN 12224	х	х	х	
Freibewitterung in Anl. an DIN EN ISO 877 (1 Jahr)	х		х	
Mikrobiologische Abbaubarkeit DIN EN 12225	х	х	х	
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14	х	х	х	
Brandverhalten DIN EN ISO 11925-2	x	х	x	

Eigenschaft / Prüfmethode	Versuchsmaterialien					
	PLA	Schafwolle		Schafwolle/PLA	Schafwolle; perforiert	
	Mat. 43	Mat. 44	Mat. 45	Mat. 46	Mat. 52	
Dicke (0,2 kPa, 2 kPa) SKZ EC 1	х	x	x	х	х	
Flächenbezogene Masse DIN EN ISO 9864	х	x	х	х	х	
Porosität SKZ EC 5	х	x	х	х		
Zugfestigkeit DIN EN ISO 10319	x	x	x	х	х	
Biegesteifigkeit in Anl. an ASTM D 1388	х	x	х	х		
Verbundfestigkeit DIN EN ISO 13426-2						
Druckstauchung in Anl. an DIN EN ISO 25619-2	x	x	x	х		
Rückstellverhalten SKZ EC 6	х	x	х	х		
Dämpfungsverhalten in Anl. an DIN EN 1177	x	x	x	х		
Wasserableitvermögen DIN EN ISO 12956	х	x	х	х		
Wasserdurchlässigkeit DIN EN ISO 11058	х	x	х	х		
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen) SKZ EC 3-1	х	x	x	х		
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen) SKZ EC 3-2	х	x	x	х		
Dickenänderung bei Wasserlagerung SKZ EC 4	x	x	x	х		
Öffnungsweite SKZ EC 8						
Lichtdurchlässigkeit ASTM D 6567	х	x	x	х		
Verdunstungsschutz SKZ EC 2	х	x	x	х		
Witterungsbeständigkeit DIN EN 12224	х		x	х		
Freibewitterung in Anl. an DIN EN ISO 877 (1 Jahr)	x		x			
Mikrobiologische Abbaubarkeit DIN EN 12225	x		x	x		
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14	x		x	x		
Brandverhalten DIN EN ISO 11925-2	x			x		

Tabelle 3-20: Versuchsprogramm (SKZ); Prüfungen an Erosionsschutzvliesstoffen

3.4. Beregnungstests in der LWG

An der LWG wurde mit Böschungsmodellen gearbeitet, die einer Testberegnung unterzogen werden. Die Verwendung von Regensimulatoren ermöglicht ein gezieltes Vorgehen bezüglich verschiedener Fragestellungen hinsichtlich der Wirkung von Regenereignissen auf Boden in Abhängigkeit der Böschungsneigung. Die Regensimulation dient hier dazu, über die Messung des Bodenabtrags die Leistungsfähigkeit von Erosionsschutzsystemen, d. h. die Schutzwirkung gegenüber Oberflächenerosion zu testen.

3.4.1. Entwicklung des Prüfverfahrens

In der deutschen und europäischen Normung ist bislang kein Verfahren zur Messung und Evaluation der Schutzwirkung von Erosionsschutzsystemen gegenüber Wassererosion etabliert. In den USA gibt es hierzu die ASTM D 6459 – 07: "Standard Test Method for Rolled Erosion Control Products (RECP) in Protecting Hillslopes from Rainfall-Induced Erosion". Aufgrund der versuchstechnischen Vorgaben kann ein Beregnungstest nach der ASTM D 6459 nur im Freiland durchgeführt werden. Für die Prüfung der Schutzwirkung von herkömmlichen sowie begrünbaren Erosionsschutzsystemen gegenüber Oberflächenerosion wurde an der LWG deshalb ein Laborprüfverfahren entwickelt, das die Vorgaben bezüglich der technischen Einrichtungen und die Testprozedur samt Auswertung beschreibt.

Für die Versuche wurden Prüfstände zum Einbau von Bodenmaterial und Erosionsschutzsystem mit den entsprechenden Messeinrichtungen gebaut. Die Böschungsmodelle sind in der Neigung verstellbar. Über eine Beregnungsanlage werden erosive Starkregen Ereignisse annähernd naturgetreu nachgebildet. Entscheidend ist, dass nicht nur die Regenmenge eines solchen Regenereignisses, sondern auch die kinetische Energie über das Tropfenspektrum die ein solcher Regen hat, erzeugt werden kann. Untersucht werden Ablauf und Wirkung einzelner Ereignisse in Bezug auf den Oberflächenabfluss und den damit verbundenen Materialtransport mit unterschiedlich erosionsanfälligen Böden.

3.4.2. Herstellung des Böschungsmodells

Modelltisch mit Auffangvorrichtung für Bodenmaterial bzw. der Boden/Wasser-Suspension (Abb. 3-36):

Neigung (**Abb. 3-36 a** und **Abb. 3-36 b**): veränderbar von 0° bis mind. 33,7° (Neigung von Regelböschungen an Straßendämmen und Einschnitten 1:1,5)

Herstellung einer stabilen Wanne (z.B. aus Betoplanplatten)

Tiefe zur Aufnahme des Erosionsschutzsystems mit Bodenaufbau: bis zu 20cm, [Anmerkung: Dicke des Bodenauftrags zur Herstellung einer Vegetationstragschicht im Böschungsbereich beträgt in der Regel 10 cm \pm 2 cm]

Länge in Fließrichtung: 2,35 m mit einer Breite von 1,10 m;

Abstand zwischen Kapillarhimmel und Unterkante des Böschungsmodells: 5,5 m.

Als Unterlage wird zusätzlich eine vlieskaschierte Geomatte eingebaut (**Abb. 3-36 c**). Die Geomatte stabilisiert den Bodenaufbau. Damit wird gleichzeitig auch die Oberflächenrauhigkeit einer Rohböschung simuliert. Überlauf mit Auffangvorrichtung: Das Oberflächenwasser wird über einen Überlauf aus dem Böschungsmodell abgeführt und fließt in eine Auffangvorrichtung (**Abb. 3-36 b**), so dass die Boden-Wasser-Suspension vollständig aufgefangen werden kann. Abhängig von der Wasserdurchlässigkeit des eingesetzten Bodenmaterials wird der Testaufbau im Verlauf der Testberegnung auch vertikal durchsickert. An der Unterseite der Bodenschicht entsteht ein sog. ,Interflow', der über eine ausreichend dimensionierte Öffnung am Fuß des Böschungsmodells ebenfalls abgeleitet wird. Die Geomatte an der Unterseite verhindert hier unkontrollierte Konsolidierungsvorgänge des Bodens entlang in Fallrichtung, das unkontrollierte Ausschwemmen von Bodenteilchen an der Unterseite der Bodenschicht sowie die Ausbildung einer ,Schmierschicht' bzw. einer Gleitfläche.



Abbildung 3-36: Gesamtansicht Böschungsmodell (a), Auffangvorrichtung für den Bodenabtrag (b) und Böschungsmodell mit Geomatte als Unterlage für den Testaufbau (c)

Einbau des Böschungsmodells:

Vorbemerkung:

Oberbodenmaterial, das auf der Baustelle bei Erdarbeiten anfällt und zur Herstellung von Vegetationstragschichten im Bereich der Baumaßnahme wieder eingesetzt werden kann, in der Regel baustellennah zu Bodenmieten für eine spätere Verwertung aufgeschüttet. Eine ausreichende Qualitätssicherung bei den Oberbodenarbeiten (Abschieben des Bodens, Lagerung in Mieten sowie der Wiedereinbau zur Herstellung einer Vegetationstragschicht) ist oft aus Gründen des zeitlichen Projektablaufes, aber auch aus Unkenntnis, meist nicht gegeben. Je nach Bodentyp bzw. Bodenmaterial reagiert dieser/s unterschiedlich empfindlich auf Veränderungen hinsichtlich der Eigenschaften als Standort für Pflanzen.

Einbau des Bodens:

Der Einbau der Bodenschicht(en) sollte in diesem Projekt annähernd ,baustellentypisch' sein. Eine völlige Zerkleinerung grober Bodenaggregate bei bindigen Bodenmaterialien ist daher nicht vorgesehen, da dies auf der Baustelle bei der Herstellung einer Vegetationstragschicht mit konventionellen Methoden auch nicht üblich ist. Der Verdichtungsgrad D_{Pr} der frisch eingebauten Vegetationstragschicht lag in der Regel zwischen 80 % und 85 %.

Die notwendigen bodenphysikalischen Parameter bezüglich Kornverteilung, Konsistenzgrenzen, Wassergehalt bei Feldkapazität, ggf. Wasserdurchlässigkeitsbeiwert und die Proctordichte waren aus Voruntersuchungen bekannt.

Einbau des Erosionsschutzsystems:

Die zu testenden Aufbauten wurden praxisgerecht in das Böschungsmodell eingebaut. Die Nägel bzw. Bügel zur Befestigung der Erosionsschutzsysteme wurden durch eine Unterkonstruktion mit Hilfe von Gewindestangen, die an der Wanne fixiert waren, simuliert. Die Anzahl pro m² orientierte sich an den Empfehlungen der Hersteller.

3.4.3. Beregnungsanlage

Vorbemerkung:

Die Charakteristik von natürlichen Niederschlägen hinsichtlich Intensität, Tropfenverteilung und Tropfengröße schwankt innerhalb einer großen Spanne. Über eine Beregnungsanlage sollen erosive Regenereignisse annähernd naturgetreu nachgebildet werden (**Abb. 3-37 a**). Ziel ist es, dass nicht nur die Regenmenge eines solchen Starkregenereignisses, sondern auch die kinetische Energie über das Tropfenspektrum, die ein solcher Regen hat, erzeugt werden soll. Daher muss auch die Fallhöhe der Wassertropfen als Kriterium mit betrachtet werden. Im Bedarfsfall kann über die Erfassung des Tropfenspektrums eine näherungsweise Berechnung der kinetischen Energie erfolgen. Die angewandte Methodik zur Erfassung des Tropfenspektrums über "Wator-Indikatorpapiere" ist sehr aufwändig und bei großen Regenintensitäten (> 20 mm/h) nicht hinreichend genau (siehe auch [30] und [31]).

Ausführung:

Die Untersuchungen finden unter wetterunabhängigen und kontrollierten Bedingungen im überdachten Labor der LWG statt. Für diesen Einsatz eignen sich besonders Einzeltropfenbildner als Regensimulatoren. Einzeltropfenbildner bilden mit Hilfe von Kapillaren zunächst Tropfen von einheitlicher Größe (**Abb. 3-37 b**). Lässt man diese Tropfen auf ein Verteilersieb fallen, werden die einheitlichen Tropfen erst zu einem Tropfenspektrum aufgefächert. Ein weiteres Kriterium ist eine ausreichende Fallhöhe, da die Fallgeschwindigkeit, die ein Tropfen erreichen kann, von seiner Größe abhängt. Die Fallhöhe beträgt hier 5,5 m bezogen auf die Unterkante des Böschungsmodells.

Anmerkung:

Die maximale Tropfengröße, die bei einem Regenereignis erreicht werden kann, liegt zwischen 5mm und 6mm im Durchmesser. Größere Tropfen zerplatzen im Verlaufe des Fallweges zum Erdboden. Der größte Teil der Tropfen liegt in einem Bereich von 0 mm bis 4 mm. Größere Tropfen als 4 mm im Durchmesser treten nach vorliegenden Erkenntnissen nur zu einem geringen Prozentsatz am Tropfenspektrum auf. Ein gleichbleibend annähernd kugelförmiger ,Tropfen' (c_w-Wert zwischen 0,4 und 0,45) von 5,5 mm im Durchmesser erreicht theoretisch erst bei mehr als 20 m Fallhöhe seine maximale Geschwindigkeit. Mit zunehmender Größe und Fallgeschwindigkeit verändert sich jedoch die Form des Wassertropfens von annähernd rund zu einem konkav-plattigen Gebilde bis hin zu einem fast fallschirmartigen Gebilde, so dass der c_w -Wert mit zunehmender Falldauer rasch zunimmt (c_w -Wert ca. 1,3 bis 1,6) und damit die maximal erreichbare Fallgeschwindigkeit abnimmt. Nur Tropfen bis 1 mm im Durchmesser behalten auch ihre annähernd kugelförmige Form während des Fallens [30], [31].



Abbildung 3-37: Gesamtansicht der Beregnungsanlage (a) und Detailbild - Einzeltropfer (b)

Technische Anforderungen an die Beregnungsanlage:

- 250 Kapillare pro m²; Innendurchmesser der Kapillare 0,55 mm
- Verteilersieb: Maschendraht, Drahtdicke 0,4 mm, Maschenweite: 3,07 mm
- Abstand zwischen Kapillarhimmel / Verteilersieb: 1,83 m

Wasserversorgung:

- Einspeisung zentral; Verteilung über ein sich verengendes Leitungssystem, um eine gleichmäßige Wasser- und Druckverteilung zu gewährleisten
- Vorschaltung eines Druckreglers zum Ausgleich von Druckschwankungen im Hausleitungsnetz vor der Einspeisung
- Vorschaltung eines Mikrofeinfilters zur Minimierung von Schwebstoffen, die sich in der Anlage absetzen bzw. dies u. U. auch zu setzen können.

Kalibrierung:

Bei mehreren Beregnungsstufen ist für jede Stufe jeweils eine Kalibrierung notwendig. Die quantitative Erfassung der Wassermengen und die Gleichförmigkeit der Verteilung hat sektorenweise zu erfolgen (mindestens 4 Sektoren). Die Kalibrierung sollte auch ohne augenscheinliche Auffälligkeiten regelmäßig überprüft werden.

Kritische Anmerkung:

Ein Problem einer Beregnungsanlage ist das Algenwachstum durch Restfeuchtigkeit in der Beregnungsanlage und Ablagerungen von Schwebstoffen in den engen Kapillaren, die zu einer Beeinträchtigung der Funktion führen kann. Die Vorschaltung eines Feinfilters löst nur die Schwebstoffproblematik, jedoch nicht das Algenwachstum. Eine Trockenlegung nach Versuchsende ist deshalb zwingend notwendig.

3.4.4. Auswahl der Bodenmaterialien

Im Teil des Untersuchungsvorhabens werden acht unterschiedliche Erosionsschutzsysteme mit drei unterschiedlichen Böden ohne Begrünung bei drei Beregnungsstufen getestet. Die Bodenarten sind dabei so gewählt, dass hinsichtlich der Erodierbarkeit eine Spannbreite in Stufen von gering über mittel bis hoch untersucht wird. Kriterium war zunächst auch, dass es sich um natürliche Materialien handeln sollte und nicht um ein technisches Substrat. Die Bodenmaterialien konnten aus der näheren Umgebung beschafft bzw. angeliefert werden. Die Anwendung der Einstufung der Erodierbarkeit gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 5. Aufl. (KA 5) ist für bindige Bodenarten so nicht anwendbar.

Drei Testböden wurden ausgewählt:

- A) Schwach lehmiger Sand (Testboden A) (Vorkommen im Maintal bei Würzburg) Sand, schwach schluffig Bodenart DIN 14688-1: mS, gs, ū, fs' Bodenart KA5: Su2 "schwach kohäsiv"
- B) Lösslehm (Testboden B) (Vorkommen auf der Gäufläche, Umgebung Würzburg): Schluff, schwach sandig Bodenart DIN 14688-1: U, fs, ms' Bodenart KA5: Uls "kohäsives Bodenmaterial/Lockergestein"
- C) Ton mit schluffigen Zwischenlagen (Testboden C) (Ziegelwerk mit Tongrube bei Hanau, "Seligenstädter Senke"):

Schluff, tonig bis mittelplastischer Ton Bodenart DIN 14688-1: U, t, s' bis T/U Bodenart KA5: Ut4/Tu2 "stark kohäsives Bodenmaterial/Lockergestein".

3.4.5. Aufbereitung und Einbau der Testböden

Die Beregnungstests wurden an den acht Erosionsschutzsystemen durchgeführt, die auf dem Testfeld Biebelried verlegt worden sind (s. Abschnitt 3.2.2, **Tab. 3-1**).

Die Lagerung der Böden auf einer Bodenmiete sowie auch auf dem Hallenboden der LWG findet unter optimalen Bedingungen statt. Die Bodenmaterialien werden vor Einbau mit einem "Erdwolf" homogenisiert (**Abb. 3-38**). Die Bodenaufbereitung und die Einhaltung der günstigen Einbauwassergehalte gelingen im Laborversuch noch gut, erfordern jedoch ständige Kontrollen. Der Einbau geschieht hier aus versuchstechnischen Gründen boden- und materialschonend per Hand.



Abbildung 3-38: Homogenisierung mit dem "Erdwolf"

a) Bodenparameter:

"Sand, schwach schluffig" (Testboden A):

Einbau der Testböden mit D_{Pr} 80 bis 85 %

D_{Pr} 80 %: 1,58 g/cm³

D_{Pr} 85 %: 1,68 g/cm³

Einbau auf dem "trockenen Ast der Proctorkurve", Einbauhöhe 10 cm

"Lehm" (Testboden B):

Einbau der Testböden mit D_{Pr} 80 bis 85 %

D_{Pr} 80 %: 1,40 g/cm³

D_{Pr} 85 %: 1,49 g/cm³

Einbau auf dem "trockenen Ast der Proctorkurve", Einbauhöhe 10 cm

"Ton" (Testboden C):

Einbau der Testböden mit DPr 80 bis 85 %

D_{Pr} 80 %: 1,40 g/cm³

D_{Pr} 85 %: 1,49 g/cm³

Einbau auf dem "trockenen Ast der Proctorkurve", Einbauhöhe 10 cm

Anmerkung:

Bindige Bodenmaterialien sollten vor Einbau zwecks Verarbeitbarkeit mindestens eine steife Konsistenz aufweisen.

b) Bemerkungen zum Einbau der Bodenmaterialien:

Sandiger Oberboden (Testboden A – Einzelkorngefüge, wenig wasserempfindlich: Die Böschungsmodelle ließen sich gleichmäßig und homogen befüllen und nach dem Einbau auch gut verdichten. Die Oberfläche ist danach glatt und eben (**Abb. 3-39**).



Abbildung 3-39: Oberfläche des sandigen Bodenmaterials nach Fertigstellung

Lehmiger Oberboden (Lösslehm) (Testboden B – bröckelig mit vielen Aggregaten, wasserempfindlich:

Die Bodenaggregate nach Homogenisierung im "Erdwolf" hatten bis zu 2 cm Durchmesser. (**Abb. 3-40**).



Abbildung 3-40: Oberfläche des lehmigen Bodens (Testboden B) nach Fertigstellung
Toniger Oberboden (Testboden C – grobe, klebrig-schmierige Bodenaggregate:

Auch bei Beachtung der Bearbeitungsgrenzen gestaltete sich der Einbau sehr schwierig. Das tonige Bodenmaterial ist sehr grobbrockig. Die Oberfläche ist dadurch insgesamt sehr ungleichmäßig (**Abb. 3-41** und **3-42**).



Abbildung 3-41: Oberfläche des Testbodens C mit grobbrockigen Bodenaggregaten (Im Bild: Einbau in die Geozellen)



Abbildung 3-42: Oberfläche des tonigen Bodens (Testboden C) nach Fertigstellung des Böschungsmodells

c) Beregnung und Messung:

Die Bodenmaterialien sollen vor Beginn der Beregnung einen bodenspezifischen Wassergehalt entsprechend ihrer Feldkapazität aufweisen (Kontrollmessung über eine kalibrierte FDR-Sonde vor Beginn der Messung).

Der Vorlauf der Beregnungsanlage ohne das Böschungsmodell betrug mindestens 15 Minuten (nur vollständige Füllung des Zuleitungssystems gewährleistet auch zuverlässigen Betrieb). Dieser dient auch zur augenscheinlichen Funktionsüberprüfung der Anlage. Für jede Intensitätsstufe ist jeweils ein Vorlauf notwendig.

erste Beregnungsstufe: Regenintensität 10 mm/h mit Dauer D = 30 Minuten Abtropfzeit zwischen den Messzyklen: 60 Minuten Zweite Beregnungsstufe: Regenintensität 20 mm/h mit D = 30 Minuten Abtropfzeit zwischen den Messzyklen: 60 Minuten Beregnungsstufe: Regenintensität 60 mm//h mit D = 30 Minuten Abtropfzeit nach Beendigung der letzten Beregnungsstufe: 60 Minuten

d) Bestimmung des Bodenabtrags:

Die Suspension aus Wasser und Feststoff wird für jede Stufe getrennt erfasst, die Masse der Feststoffe wird jeweils quantitativ nach Ofentrocknung bei maximal 105°C bestimmt.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1. Vegetationsentwicklung auf dem Testfeld

4.1.1. Witterungsverlauf

Zur Charakterisierung der Witterung im Untersuchsuchungszeitraum September 2009 bis Mai 2011 sind in der **Abb. 4-1** die Niederschlagswerte und der Temperaturverlauf der Wetterstation im Standort "Testfeld Biebelried" dargestellt. Daraus wird deutlich, dass während der Vegetationsperiode 2010 im April und Juni mehrwöchige Trockenperioden auftraten und in der Vegetationsperiode 2011 von März bis Ende Mai nur 32,6 mm Niederschläge zur Verfügung standen bei gleichzeitig überdurchschnittlich hohen mittleren Monatstemperaturen.



Abbildung 4-1: Witterungsverlauf während der Versuchsdurchführung von September 2009 bis Juni 2011

Die Werte der Wetterstation auf dem Testfeld des Jahres 2010 betragen für die Jahresmitteltemperatur 8,7 °C und 778 mm für den Jahresniederschlag.

Die Mittelwerte der Wetterstation Gerbrunn mit vergleichbaren klimatischen Verhältnissen ca. 3,8 km WNW des Versuchsstandortes der Jahre 2004 bis 2009 betragen für die Jahresmitteltemperatur 9,9 $^{\circ}$ und 600 mm für den Jahresniederschlag.

Ein Starkregen ereignete sich am 23. Juli 2010. Innerhalb von 3 Stunden gingen etwa 78,6 l/m² Niederschlag auf der Böschung des Testfeldes nieder, mit einem Spitzenwert von 29,2 l/m² innerhalb von 15 Minuten (**Abb. 4-2**). Ein Niederschlag von 78,6 l/m² in 3 Stunden bzw. 29,2 l/m² in 15 Minuten entspricht einem Starkregen mit einer statistischen Wiederkehrzeit T von > 100 Jahren bezogen auf die Daten der Wetterstation Würzburg West.



Abbildung 4-2: Starkregenereignis am 23. Juli 2010

4.1.2. Bewertung der Vegetationsentwicklung ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Saatgutmischungen

In den Allgemeinen Technischen Vertragsbedingungen (ATV) für Landschaftsbauarbeiten bezieht sich die DIN 18917 bei Landschaftsrasen in erster Linie auf die RSM 7, die nur einen geringen Anteil an mehrjährigen Kräutern beinhaltet. Die Empfehlung des Saatzeitpunkts von Mai bis September ist bei den gräserreichen RSM gerechtfertigt. Ganz anders sieht es bei Mischungen aus, die einjährige und zweijährige Kräuter enthalten. Deren optimaler Saatzeitpunkt liegt im Zeitraum von April bis Juli, da deren Wuchsverhalten auf eine Blüte im Jahr der Keimung ausgelegt ist, bzw. bei zweijährigen Arten auf eine Rosettenbildung vor der Überwinterung. Dazu benötigen diese Pflanzen, neben den entsprechenden Temperaturen, vor allem Zeit.

Bedingt durch den vom Bauablauf vorgegebenen späten Saatzeitpunkt war daher die Keimrate der ein- bis mehrjährigen Kräuter sehr spärlich. Es ist davon auszugehen, dass während des Winterhalbjahrs ein Großteil der Arten während der Keimphase unter der Schneedecke abgestorben ist. Aus diesem Grund konnte die gewünschte Sicherungsleistung dieser Wuchstypen nur ansatzweise gezeigt werden.

DIN 18917 vermerkt, bezogen auf Saattermine vor April und nach September, "bei Früh- und Spätsaaten können sich unerwünschte Verschiebungen in der Rasenzusammensetzung zu Gunsten von Gräserarten mit geringerer Keimtemperatur ergeben." Für gestaffelte Kräutermischungen gilt diese Aussage bereits für den Saattermin im September.

Nachfolgende Ergebnisse zeigen eine vergleichende Bewertung der Erosionsschutzsysteme ohne Berücksichtigung der unterschiedlichen Mischungen.

Folgende Kürzel wurden in den Diagrammen für die Erosionsschutzsysteme verwendet:

Material 7 = Geomatte + Geogitter im Verbund (GMA/GGR)

Material 15 = Kokos-Gewebe (GEC-W Kokos)

Material 17 = Jute-Gewebe (GEC-W Jute)

Material 20 = Kokosmatte + Geomatte im Verbund (Kokos/GMA) Material 21 = Geomatte (GMA) Material 24 = Geozelle (GCE) Material 25 = Schafwollfaschine (GEC-F) Material 40 = Stroh/Kokos-Matte (GEC-M Stroh/Kokos) 0 = Referenzparzelle ohne Erosionsschutzsystem (0-Parzelle) Für die Mischungen wurden folgende Kürzel eingesetzt: KM: Kräutermischung

RSM: Regelsaatgutmischung.

4.1.2.1 Abnahme

Die erste Abnahmebonitur erfolgte nach 12 Wochen am 7.12.2009. Bereits zu diesem Zeitpunkt zeigten sich großen Unterschiede im Bewuchs der verschiedenen Systeme. Die **Abb. 4-3** zeigt den prozentualen Anteil der Boniturnoten pro System. Es geht daraus hervor, dass das Kokos-Gewebe (Mat. 15) und die Stroh/Kokos-Matte (Mat. 40) als mangelhaft eingestuft werden. Danach können bedingt abgenommen werden, vor allem wegen inhomogener Bestandsausbildung, die Geomatte (Mat. 21), der Geomatte/Geogitter-Verbund (Mat. 7) und das Jute-Gewebe (Mat. 17). Abgenommen werden können die Systeme Schafwollfaschine (Mat. 25), Geozelle (Mat. 24) und Kokosmatte/Geomatte-Verbund (Mat. 20).



Abbildung 4-3: Anteil der Boniturnoten während der Abnahme; Zeitpunkt Dezember 2009 (Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle) Boniturskala: 1: nicht abgenommen, 5: bedingt abgenommen, 9: abgenommen

Eine nochmalige Bonitur der Abnahme nach der Überwinterung im März 2010 (**Abb. 4-4**) zeigt, dass die Systeme Stroh/Kokos-Matte und das Kokos-Gewebe weiterhin nicht abgenommen werden konnten. Der Geomatte/Geogitter-Verbund und das Jute-Gewebe konnten bis März ihre Abnahmewerte verbessern, erreichten aber nicht die vollständige Abnahmefähigkeit. Geozelle, Schafwollfaschine und Kokosmatte/Geomatte-Verbund zeigen weiterhin ihre stabilen Werte.



Abbildung 4-4: Anteil der Boniturnoten während der Abnahme; Zeitpunkt März 2010 (Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle) Boniturskala: 1: nicht abgenommen, 5: bedingt abgenommen, 9: abgenommen

Fazit:

Das Prüfkriterium Abnahmefähigkeit zeigt bereits zum praxisüblichen Zeitpunkt (nach 12 Wochen) die ersten Hinweise auf mögliche Schwächen der Systeme. Deutlich sind die freien Flächen und inhomogene Bestandstrukturen mancher Systeme zu erkennen (**Abb. 4-5**). Ein späterer Abnahmezeitpunkt ergab keine signifikante Veränderung der gewonnenen Erkenntnisse.



Abbildung 4-5: Die erste Abnahmebonitur erfolgte 12 Wochen nach Aussaat (Dezember 2010)

4.1.2.2 Deckung

Nachfolgend wird die Entwicklung der Deckung über den Zeitraum April 2010 bis Mai 2011 beschrieben.

Die projektive Deckung der Aprilbonitur in 2010 (**Abb. 4-6**) bestätigt die bereits durch die Abnahmebonitur (März 2010) verdeutlichte klare Selektion der Stroh/Kokos-Matte und des Kokos-Gewebes als ungeeignete Systeme. Die Werte liegen auch unter Einfluss von ausgeglichenen Klimabilanzen des Winterhalbjahres in der Gesamtbewertung für Stroh/Kokos-Matte bei 40 % und bei dem Kokos-Gewebe bei 20 %. Alle anderen Systeme bauten ihre

Deckungswerte gegenüber der Märzabnahme (im Jahr 2010) weiter zufriedenstellend aus. Im Vergleich zur Referenzparzelle haben die Geozelle, das Kokosmatte/Geomatte-Verbundsystem und die Schafwollfaschine bessere Deckungswerte erzielt. Auffällig ist der überaus hohe Deckungswert von nahezu 90 % bei der Schafwollfaschine. Während des Sommerhalbjahres kam es hier zu einem heftigen Einbruch auf einen Deckungswert von ca. 10 %, der sich bis in das Jahr 2011 weiter verschlechterte. Ursache des Bestandszusammenbruchs war eine Hitzeperiode von ca. 4 Wochen im Juni/Juli 2010. Der weitere Zusammenbruch erfolgt während der Trockenperiode März bis Mai 2011.



Abbildung 4-6: Projektive Bedeckung der Pflanzen (Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle)

Die erste Hitzewelle im Jahr 2010 führte auch zu Einbrüchen bei den Systemen Jute-Gewebe und Kokos-Gewebe, während bei allen anderen Parzellen die Deckungswerte gehalten bzw. verbessert wurden.

Erst in der langen Trockenphase im Frühjahr 2011 sind die Bestände aller Systeme auf Werte unter 30 % zusammengebrochen.

Der erste Stresstest während der Vegetationsperiode 2010 zeigte für das Kriterium Deckung die Schwächen des Schafwollsystems. Unter dem Einfluss von Düngergaben aus der Rohwolle haben sich überaus mastige Bestände entwickelt, die unter Hitze- und Trockenstress zusammengebrochen sind. Eine ähnliche Beobachtung machte *Stolle* [29] in einem Versuch über Stresstoleranz von Pflanzenbeständen auf unterschiedlichem Substrat. Die Überversorgung mit Nährstoffen führte unter Wassermangel zu zusätzlichen Nährsalzstress.

Die schlechten Wuchsbedingungen durch den Einfluss des Kokos-Gewebes führten zu weiteren Einbrüchen in den Deckungswerten. In dieser Hinsicht zeigen sich auch Auffälligkeiten durch den Einfluss des Jute-Gewebes. Da hier die Abgabe von Nährsalzen nicht in Betracht kommt, scheinen andere Wechselwirkungen das Wachstum der Pflanzen zu beinträchtigen. Fazit:

Die Bonitur der Deckung ist als Prüfkriterium unverzichtbar, da es bereits in seiner Funktion der Abnahme eine erste eindeutige Bewertung ermöglicht. Die weitere Entwicklung der Deckung veranschaulicht klar die Unverträglichkeiten zwischen System und Pflanze.

4.1.2.3 Artenzahl

Abb. 4-7 zeigt den prozentualen Anteil der Arten je Erosionsschutzsystem. Auch hier lassen die Zahlenwerte von Stroh/Kokos-Matte (Mat. 40), Kokos-Gewebe (Mat. 15) und Schafwollfaschine (Mat. 25) auf Schwächen der Systeme schließen. Besonders auffällig und signifikant ist die Artenarmut unter Einfluss der Schafwollfaschine. Hier etablierten sich nur 17 % der eingesäten Arten. Bei der Stroh/Kokos-Matte und dem Kokos-Gewebe konnten ca. 35 % der Arten auf den Parzellen nachgewiesen werden, während bei allen anderen Systemen Werte um 40 % und darüber erzielt wurden. Mit 37 % der Arten liegt die Referenzparzelle unter den Werten von Kokosmatte/Geomatte-Verbund, Geomatte, Geomatte/Geogitter-Verbund, Jute-Gewebe und Geozelle, was vermuten lässt, dass die genannten Systeme eine gewisse Etablierungshilfe darstellen.



Abbildung 4-7: Anteil der insgesamt etablierten Arten zum Zeitpunkt Mai 2011 (Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle)

Fazit:

Das Kriterium der Artenzahl ist ein wichtiger Hinweis auf die Verwendbarkeit der Systeme, vor allem unter dem Aspekt der nachhaltigen Begrünung, die in unmittelbarem Zusammenhang mit einer hohen Artenvielfalt steht. Allerdings ist eine klare Aussage unter den gegebenen Versuchsbedingungen, (später Saattermin) nur im Fall der Schafwollfaschine möglich. Für alle anderen Systeme sind nur Tendenzen wahrnehmbar. Um das Prüfkriterium Artenzahl einsetzen zu können, müssen die Pflanzen entsprechend ihren Bedürfnissen an den Vegetationsrhythmus eingesetzt werden.

4.1.2.4 Vitalität

Die Darstellung der Vitalitätswerte über den Zeitraum von einem Jahr (**Abb. 4-8**) spiegelt vorrangig den Einfluss der Klimabedingungen in diesem Zeitabschnitt wider. Eine Einflussnahme seitens der Systeme lässt sich in der Gesamtbetrachtung nicht ableiten. Die Werte zeigen im Mittel normales Wachstum mit leichten Mängeln an. Eine Ausnahme bildet die Schafwollfaschine, deren anfangs mastige Werte sich im Verlauf des Jahres auf normale Werte einpendeln. In der **Abb. 4-9** sind die mastigen Bestände unter Einfluss der Schafwollfaschine deutlich zu erkennen.





(Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle)



Abbildung 4-9: Überdüngter Bestand mit Schafwollfaschinen im Juni 2010

Fazit:

Die Vitalitätswerte sind die Werte der etablierten und damit "übrig gebliebenen" Pflanzen, die einmal eingewurzelt, mit den vorherrschenden Bedingungen je Parzelle zurecht kommen. Die Werte zeigen in erster Linie den Einfluss der klimatischen Standortfaktoren. Die Vitalitätswerte sind entgegen der ursprünglichen Annahme nicht aussagekräftig.

4.1.2.5 Bestandsstruktur

In der Gesamtbetrachtung (**Abb. 4-10**) wurde ein homogen geschlossener Bestand nur ansatzweise im Zusammenspiel mit dem Geomatte/Geogitter-Verbundsystem vorgefunden.

Kokos-Gewebe und Schafwollfaschine wurden klar als ungeeignet herausgefiltert. Hier sind große Bereiche nicht bewachsen.

Mit den Systemen Geomatte, Geomatte/Geogitter-Verbund, Stroh/Kokos-Matte und Jute-Gewebe konnten sich mehrheitlich keine homogenen Bestände entwickeln. Hier fallen vor allem ungenügende Öffnungsweiten und Hohlräume zwischen Bodenoberfläche und Auflage ins Gewicht.

Unter dem Einfluss der Geozelle entwickeln sich Bestände, die in der Bewertung zwischen "homogener offener Bestand" und "nur Teilbereiche bewachsen" schwanken.



Die Bewertung der Referenzparzellen erlaubt ebenfalls keine eindeutige Zuordnung.

Abbildung 4-10: Vergleich der Bestandstruktur, die sich unter dem Einfluss der jeweiligen Systeme zeigte

(Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle) Boniturskala: 1: überwiegend freie Fläche, Bestand punktuell ausgebildet, 3: viele freie Fläche, größere Teilbereiche bewachsen, 5: Bestand inhomogen, größere offene Stellen, 7: homogener Bestand, offene Stellen, 9: homogener geschlossener Bestand

Fazit:

In der Gesamtschau ist die Bestandstruktur ein wichtiger Zeiger für gravierende Schwächen der einzelnen Systeme.

4.1.3. Bewertung der Vegetationsentwicklung bezüglich der unterschiedlichen Saatgutmischungen

4.1.3.1 Abnahme

Betrachtet man die Abnahmewerte getrennt nach den jeweiligen Mischungen (**Abb. 4-11**) fallen bei der RSM (Regelsaatgutmischung) und der KM (Kräutermischung) die Systeme Stroh/Kokos-Matte und Kokos-Gewebe in der Prüfung durch, wenngleich die Stroh/Kokos-Matte im Zusammenhang mit der Kräutermischung etwas bessere Werte erzielte. Bestanden haben nach wie vor für beide Mischungen die Systeme Kokosmatte/Geomatte-Verbund, Geozelle und Schafwollfaschine. Leichte Unterschiede sind bei den Systemen Geomatte, Geomatte/Geogitter-Verbund und Jute-Gewebe zu beobachten.



Abbildung 4-11: Abnahmebonitur der Regelsaatgutmischung (a) und der Kräutermischung (b) zum Zeitpunkt Dezember 2009

(Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle) Boniturskala: 1: nicht abgenommen, 5: bedingt abgenommen, 9: abgenommen

Während die RSM mit ihren hohen Saatstärken teilweise die volle Abnahmefähigkeit bei den Systemen Geomatte und Geomatte/Geogitter-Verbund erreichte, konnte dies für die KM nur bedingt gelten. Diese zeigte zusammen mit dem Jute-Gewebe ansatzweise die volle Abnahmefähigkeit zum Zeitpunkt Dezember 2009.

Der Einfluss des Winters wurde mit einer weiteren Abnahmebonitur im März 2010 dokumentiert (**Abb. 4-12**).

Grundsätzlich verbesserten beide Saatgutmischungen während des Winters ihre Werte mit Ausnahme des System Kokos-Gewebe. Dieses System scheint für diesen Einsatzbereich ungeeignet zu sein.

Interessanterweise erreichte im März die Kombination KM mit der Stroh/Kokos-Matte fast die vollständige Abnahmefähigkeit, während die RSM unter Einfluss der Stroh/Kokos-Matte nicht abgenommen werden konnten. Die Gründe hierfür könnten in der hohen Saatstärke der RSM liegen, da bedingt durch eine hohe Individuenzahl nur schwache Einzelpflanzen ausgebildet werden, die in Konkurrenz um Licht, sich gegenseitig im Durchwuchs durch die Matte behindern.



Abbildung 4-12: Ergebnis der Wiederholung der Abnahmebonitur der Regelsaatgutmischung (a) und der Kräutermischung (b) zum Zeitpunkt März 2010 (Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte,

Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle) Boniturskala: 1: nicht abgenommen, 5: bedingt abgenommen, 9: abgenommen

Die volle Abnahmefähigkeit erreichten für beide Saatgutmischungen die Systeme Kokosmatte/Geomatte-Verbund, Geozelle und Schafwollfaschine. Gemeinsam mit der Kräutermischung konnte das Jute-Gewebe abgenommen werden. Weiterhin verbessert aber trotzdem nur bedingt abgenommen, wegen inhomogener Bestandsbildung, bleiben die Geomatte, der Geomatte/Geogitter-Verbund sowie die Kombination RSM mit dem Jute-Gewebe.

Fazit:

Die differenzierte Betrachtung der Abnahmefähigkeit in Abhängigkeit von den eingesetzten Mischungen bestätigt die grundsätzlich klare Trennlinie zwischen sicher abgenommenen Erosionsschutzsystemen und den durchgefallenen Systemen. Bei den bedingt abgenommenen Systemen gibt die differenzierte Betrachtung Hinweise auf spezifische Unverträglichkeiten wie z. B. zu hohe Saatstärken.

4.1.3.2 Deckung

Die Gegenüberstellung der Deckungswerte für beide Mischungen (Abb. 4-13) zeigt besonders hohe Deckungsanteile für die RSM in der Aprilbonitur 2010. Als besonders erfolgreich sind hier die Erosionsschutzsysteme mit der Schafwollfaschine (über 90 % Deckung) und mit dem Kokosmatte/Geomatte-Verbund (knapp unter 90 % Deckung) zu nennen. Gute Ergebnisse erzielten noch die Geozelle, die Geomatte und das Jute-Gewebe. Als besonders vegetationsarm erweisen sich die Stroh/Kokos-Matte und das Kokos-Gewebe (s. Abb. 4-14).

Unter Einsatz der Kräutermischung erzielte die Schafwollfaschine vergleichbar hohe Werte wie unter Einsatz der RSM. Bei allen anderen Erosionsschutzsystemen wurde die 60 % Marke nur bei der Geozelle knapp überschritten. Die Stroh/Kokos-Matte, das Jute-Gewebe und das Kokos-Gewebe zeigen deutliche Lücken. Die schwarze Geomatte und der Geomatte/Geogitter-Verbund zeigen ein ähnliches Bild wie bei der RSM (**Abb. 4-15**).



Abbildung 4-13: Bonitur der Deckungsentwicklung der Regelsaatgutmischung (a) und der Kräutermischung (b)

(Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle)



Abbildung 4-14: Erosionsschutzsysteme mit der RSM im April 2010

Der Einbruch während der Vegetationsperiode 2010 ist besonders für die Schafwollfaschine bei beiden Saatgutmischungen in gleich hohen Werten augenfällig. Bei allen anderen Systemen findet der Einbruch nicht in derart hohen Zahlenwerten statt. Vor allem lassen sich Unterschiede zwischen RSM und KM erkennen. Während unter Einsatz der KM stabile Deckungswerte während der ersten Trockenphase bei allen außer bei Jute-Gewebe, Kokos-Gewebe und Schafwollfaschine beibehalten werden konnten, waren bei der RSM relativ hohe Einbrüche bei Kokosmatte/Geomatte-Verbund, Geomatte und Jute-Gewebe zu erkennen. Interessanterweise verbesserten sich die Werte bei der RSM unter dem Einfluss von Stroh/Kokos-Matte um das Doppelte. Der Geomatte/Geogitter-Verbund zeigte für beide Saatgutmischungen einen stabilisierenden Einfluss bei befriedigenden Deckungswerten.



Abbildung 4-15: Erosionsschutzsysteme mit der Saatmischung KM im April 2010

Während der Trockenperiode April-Mai 2011 brachen bei allen Erosionsschutzsystemen die Deckungswerte ein und pendelten sich bei der RSM bei Deckungswerten um 20 % ein, bei der KM um 30 % (**Abb. 4-16** und **Abb. 4-17**). Die Systeme Kokos-Gewebe und Schafwollfaschine erzielten die schlechtesten Ergebnisse.



Abbildung 4-16: Die RSM im Trockenstress im April 2011



Abbildung 4-17: Die Saatgutmischung KM im Trockenstress im April 2011

Fazit:

Die Ergebnisse sind durch mehrere Faktoren beeinflusst:

Zum einen steht bei der RSM die hohe Saatstärke im Vordergrund, wodurch in der Anfangsphase schnell hohe Deckungswerte über die vorwüchsigen Gräser erzielt werden konnten, zum Nachteil der Einzelpflanze, die sich aus Konkurrenzgründen nur schwach entwickelte. Diese dichte Saatstärke scheint bei der RSM die hohen Einbrüche bei der ersten Trockenphase im Juli 2010 unabhängig von System verursacht zu haben, da schwache Einzelpflanzen unter Trockenstress schneller aufgeben als gut entwickelte Individuen mit funktionierendem Wurzelsystem. Bei der KM fand dieser Einbruch nicht statt.

Der zweite Einbruch fand während der Trockenperiode März-Mai 2011 für beide Mischungen in allen Systemen statt. Die Werte stehen ausschließlich für den Verlust der Deckungsanteile der Gräser, da die gesamten Deckungswerte in erster Linie von diesen getragen wurden. Die Wurzeln der Gräser blieben im nährstoffreichen Oberboden und drangen nicht ausreichend tief in den Rohboden ein.

Die auffällige Zunahme der RSM bei der Stroh/Kokos-Matte scheint auf die Pufferkapazität der beiden Fasern hinzuweisen, die gemeinsam die Auswirkungen von kurzen Trockenperioden bei starker Hitze mildern konnten, wodurch die überlebenden Einzelpflanzen sich zu stärkeren Individuen entwickelten.

Die Entwicklung der projektiven Deckung ist ein wesentliches Prüfkriterium, das eindeutig die Mängel und Vorteile der Systeme offen legt.

4.1.3.3 Artenzahl

Abb. 4-18 zeigt den Anteil der Arten getrennt nach den eingesetzten Saatgutmischungen.



Abbildung 4-18: Anteil der etablierten Arten je Saatgutmischung und Erosionsschutzsystem (Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle)

Grundsätzlich etablierten sich bei der KM weniger Arten. Hierfür verantwortlich sind, unabhängig vom Einfluss der Erosionsschutzsysteme, die schlechten Keimbedingungen für Kräuter in der Anfangsphase. Der negative Einfluss auf die Artenzahl im Vergleich der Systeme ist bei beiden Saatgutmischungen für Stroh/Kokos-Matte und Kokos-Gewebe nachvollziehbar und bei der Schafwollfaschine signifikant. Auffällig ist der schlechte Etablierungswert der KM bei der 0-Variante (Referenzparzelle). Mit einziger Ausnahme zeigt der Geomatte/Geogitter-Verbund höhere Werte für die KM an.

Fazit:

Die Referenzparzelle spiegelt die schlechten Startbedingungen wider. Dies ist besonders für die KM mit nur 28 % der eingesetzten Arten äußerst mangelhaft. Unter Einfluss der Erosionsschutzsysteme, außer der Schafwollfaschine, scheinen die schlechten Keimbedingungen, unabhängig von der weiteren Entwicklung, gerade für Kräuter etwas abgemildert worden zu sein. Trotzdem wurde bei keiner Versuchsvariante die 50 % Marke überschritten. Eine stichhaltige Aussage über den Einfluss auf die Etablierung von Arten ist daher unter den gegebenen Versuchsbedingungen nicht möglich. In dieser Hinsicht wäre eine nochmalige Überprüfung mit einem korrekten Saatzeitpunkt im Zeitraum von Anfang April bis Mitte Juli wünschenswert.

4.1.3.4 Vitalität

Die differenzierte Betrachtung getrennt nach Gräsern und Kräutern in den jeweiligen Saatgutmischungen zeigt gemittelt über alle Boniturzeitpunkte (**Abb. 4-19**) bzw. den Stand der letzten Bonitur (**Abb. 4-20**) im Mai 2011, grundsätzlich höhere Vitalitätswerte für die Kräuter in beiden Mischungen. Während die Gräser mit kümmerlichem Wachstum und Mangelerscheinungen zu kämpfen haben, zeigen die Kräuter, unabhängig von den Saatgutmischungen, ein normales Wachstum mit leichten Mängeln an.



Abbildung 4-19: Mittlerer Vitalitätswert der Gräser "Gr" und Kräuter "Kr" von RSM und KM gemittelt über alle Boniturzeitpunkte

(Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle) Boniturskala: 1: Pflanze kümmert, starke Mängel, 3: geringes Wachstum und Mangelerscheinungen, 5: normales Wachstum, leichte Mängel, 7: normales Wachstum, keine Mängel, 9: optimales Wachstum, keine Mängel



Abbildung 4-20: Mittlerer Vitalitätswert zum Boniturzeitpunkt 20.05.2011 von Gräsern "Gr" und Kräutern "Kr" der jeweiligen Mischung

(Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle) Boniturskala: 1: Pflanze kümmert, starke Mängel, 3: geringes Wachstum und Mangelerscheinungen, 5: normales Wachstum, leichte Mängel, 7: normales Wachstum, keine Mängel, 9: optimales Wachstum, keine Mängel

Die vergleichende Betrachtung der unterschiedlichen Erosionsschutzsysteme ergibt keine signifikanten Unterschiede, mit Ausnahme des kümmerlichen Wachstums der RSM-Kräuter

mit der Stroh/Kokos-Matte und den paradoxerweise für beide Gruppen guten Werten bei den Systemen Kokos-Gewebe und Schafwollfaschine.

Diese haben bisher in den Bewertungen der anderen Kategorien schlecht abgeschnitten und erreichen besonders zum letzten Boniturzeitpunkt der Vitalität Werte, die nahezu uneingeschränktes Normalwachstum anzeigen. Es liegt daher der Schluss nahe, dass die ursprünglichen Wuchsbeeinträchtigungen (s. Abschnitt 4.1.2.2) die für schlechte Bewertung in den anderen Kategorien sorgten, nach einem Jahr nicht mehr vorhanden sind. Da die strukturelle Integrität beider Systeme noch vorhanden ist, kann man davon ausgehen, dass die Einflussnahme über Inhaltsstoffe aus den jeweiligen Fasern stammt. Für die Schafwollfaschine kann man von einer Düngerfracht ausgehen. Hinsichtlich der Kokosfaser ist eine Ursachensuche angebracht.

Zur Veranschaulichung wird der Stand der Vitalitätswerte je Mischung zu den jeweiligen Bonturzeitpunkten in **Abb. 4-21** und **Abb. 4-22** dargestellt. Sie zeigen u. a. noch einmal wie wenig hilfreich die Vitalität zur Bewertung der Systeme ist.

Die vergleichende Betrachtung zwischen den Systemen ergibt keinen wesentlichen Unterschied in der Bewertung. Die einzigen, signifikant guten Boniturwerte, gerade im ersten Vegetationsjahr, stehen für die Schafwollfaschine, deren Eignung im Sinne eines nachhaltigen Erosionsschutzes aus Sicht der weiteren Prüfkriterien als mangelhaft einzustufen ist.





(Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle) Boniturskala: 1: Pflanze kümmert, starke Mängel, 3: geringes Wachstum und Mangelerscheinungen, 5: normales Wachstum, leichte Mängel, 7: normales Wachstum, keine Mängel, 9: optimales Wachstum, keine Mängel

Fazit:

Das Kriterium Vitalität ist entgegen der ursprünglichen Hypothese, auch in der differenzierten Betrachtung der unterschiedlichen Mischungen als Bewertungshilfe für die Erosionsschutzsysteme ungeeignet. Eindeutig belegt werden konnte ausschließlich die Reaktion von Gräsern und Kräutern auf klimatische Einflüsse. Dabei wurde ersichtlich, dass die eingesetzten Kräuter unter Einfluss der aufgetretenen Trocken- und Hitzeperiode eine höhere Resistenz besitzen.

Als Schwäche des Prüfkriteriums Vitalität zeigte sich, dass nur Pflanzen bewertet werden konnten, die den unterschiedlichsten Selektionseinflüssen widerstanden und überlebt haben und damit zwangsläufig einigermaßen zufriedenstellende Vitalitätswerte aufweisen. Einzig im Umkehrschluss lässt sich feststellen: Bestände mit der Vitalitätsnote "mastig" sind in der Erosionssicherung kontraindiziert.





4.1.3.5 Bestandstruktur

Aus dem Diagramm **Abb. 4-23** wird ersichtlich, dass die KM gemeinsam mit dem Kokosmatte/Geomatte-Verbundsystem die besten Ergebnisse in der Bestandstruktur mit teilweise homogenen, geschlossenen Beständen entwickelte. Zufriedenstellend waren die Geozelle, die Stroh/Kokos-Matte, das Jute-Gewebe und die 0-Variante (Referenzparzelle). Durchgefallen wegen inhomogener Bestandsbildung bzw. nur teilweise ausgebildeter Bewuchs sind das Kokos-Gewebe, die Schafwollfaschine und die Geomatte.

Die Bewertungen der Erosionsschutzsysteme im Zusammenspiel mit der RSM (**Abb. 4-24**) zeigen grundsätzlich schlechtere Ergebnisse im Vergleich zu den Ergebnissen der KM. Diese können im Zusammenhang mit der hohen Saatstärke stehen, wo es in Folge schwacher Individuen bei Stresssituationen zu Ausfällen kam bzw. ein Durchwuchs durch die Matten nicht geleistet werden konnte.

Gemeinsam mit der KM sind die schlechten Werte für das Kokos-Gewebe und die Schafwollfaschine. Gemeinsamkeiten sind auch bei dem Jute-Gewebe, mit zufriedenstellenden Werten zu verzeichnen.

Deutlich schlechter schneidet die RSM bei dem Kokosmatte/Geomatte-Verbundsystem, der Stroh-Kokos-Matte, der Geozelle und der 0-Variante ab.



Abbildung 4-23: Ergebnis der Ausbildung der Bestandsstruktur bei der Saatmischung KM (Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle) Boniturskala: 1: überwiegend freie Fläche, Bestand punktuell ausgebildet, 3: viele freie Fläche, größere Teilbereiche bewachsen, 5: Bestand inhomogen, größere offene Stellen, 7: homogener Bestand, offene Stellen, 9: homogener geschlossener Bestand



Abbildung 4-24: Boniturergebnisse der entwickelten Bestandstruktur durch die RSM (Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle) Boniturskala: 1: überwiegend freie Fläche, Bestand punktuell ausgebildet, 3: viele freie Fläche, größere Teilbereiche bewachsen, 5: Bestand inhomogen, größere offene Stellen, 7: homogener Bestand, offene Stellen, 9: homogener geschlossener Bestand

Mit einer einzigen Ausnahme wurden bei der Geomatte und dem Geomatte/Geogitter-Verbund schlechtere Werte bei der KM erzielt. Verantwortlich sind hierfür geringe Öffnungsweiten und die ungenügende Bodenauflage der Produkte, die durch einen deutlich lückigen Bewuchs geprägt waren. Hier entwickelten die Kräuter entweder unterhalb der Erosionsschutzprodukten kräftige Pflanzenkörper oder sie verfingen sich in den Maschen (**Abb. 4-25**).



Abbildung 4-25: Geringe Maschenweiten behindern krautige Pflanzen beim Durchwuchs

Fazit:

Die Bestandstruktur erweist sich als sensibles Prüfkriterium, das spezifische Unverträglichkeiten mit den einzelnen Wuchstypen innerhalb der eingesetzten Saatmischungen klar zum Ausdruck bringt und gibt eindeutige Hinweise auf die Schwächen der jeweiligen Systeme.

Die Bewertung der Bestandstruktur gibt aber auch Hinweise auf ein weiteres noch zu prüfendes Kriterium, nämlich die Sprossdurchlässigkeit des Systems. Diese entscheidet nachhaltig über den Etablierungserfolg der eingesetzten Pflanzen.

4.1.3.6 Durchwurzelung

Die **Abb. 4-26** zeigt die Durchwurzelungsleistung der Pfahlwurzelarten Echium vulgare (gewöhnlicher Natternkopf); Medicago falcata (Sichelklee) und Silene alba (Weiße Lichtnelke).

Die Wurzeln durchdringen die ca. 20 cm starke Oberbodenauflage und wachsen in den darunter liegenden Kalkschotter ein. Damit sorgen sie für eine Verzahnung zwischen Oberbodenauflage und Rohboden. Bei einer gleichmäßigen Bestandsentwicklung auf der Fläche mit der dazugehörigen Durchwurzelungsintensität im Boden, ist die Sicherungsleistung nachvollziehbar.

Im **Abb. 4-26 a** ist die gestauchte Grundachse und das Feinwurzelsystem von Festuca ovina (Rot-Schwingel) zu erkennen. Ausreichende Haltefunktionen können hier nicht aufgebaut werden.



Abbildung 4-26: Durchwurzelungsleistung der Pfahlwurzelarten (a) Echium vulgare, (b) Medicago falcata, (c) Silene alba

4.1.4. Zusammenfassende Bewertung der Vegetationsentwicklung

Die Umrechnung der Boniturwerte in ein Punktesystem soll die Möglichkeit geben, per Rechenwert die Eignung der verschiedenen Erosionsschutzsysteme in Bezug auf die Pflanze zu ermitteln. Folgendes 10-stufige Punktesystem wurde erarbeitet:

Abnahme:

0 = nicht abgenommen, 5 = bedingt abgenommen, 10 = abgenommen Deckung:

1 = 0-10 %, 2 = 11-20 %, 3 = 21-30 %, 4 = 31-40 %, 5 = 41-50 %, 6 = 51-60 %, 7 = 61-70 %, 8 = 71-80 %, 9 = 81-90 %, 10 = 91-100 %

<u>Vitalität:</u>

0 = tot, 2 = Pflanze kümmert, starke Mängel, 4 = geringes Wachstum und Mangelerscheinungen, 6 = normales Wachstum, leichte Mängel, 8 = normales Wachstum, keine Mängel, 10 = optimales Wachstum, keine Mängel

Artenzahl in % Anteilen pro Mischung:

1 = 0-10 %, 2 = 11-20 %, 3 = 21-30 %, 4 = 31-40 %, 5 = 41-50 %, 6 = 51-60 %, 7 = 61-70 %, 8 = 71-80 %, 9 = 81-90 %, 10 = 91-100 %.

Bestandstruktur:

- 0 = kein Bewuchs
- 2 = überwiegend freie Fläche, Bestand punktuell ausgebildet
- 4 = viel freie Fläche, größere Teilbereiche bewachsen
- 6 = Bestand inhomogen, größere offene Stellen
- 8 = homogener Bestand, offene Stellen
- 10 = homogener, geschlossener Bestand.

Tab. 4-1 zeigt die errechneten Mittelwerte des 10-stufigen Punktesystems. Bei Erreichen der Punktzahl 5, gemittelt über alle Punktergebnisse der angegebenen Prüfkriterien, gilt die Prüfung als bestanden.

Erosionsschutzsystem	Abnah	ahme Deckung		Vitalitä	it	Bestar struktu	nds- Ir	Artenz	ahl	Gesan bewer	nt- tung	
	RSM	KM	RSM	KM	RSM	KM	RSM	KM	RSM	KM	RSM	KM
Material 20: Kokosmatte/GMA- Verbund	10	10	2	4	6,3	5,6	6,7	8,7	5	4	6,0	6,5
Material 21: Geomatte	6,7	5	2	3	6,0	5,8	6,0	5,3	5	4	5,1	<u>4,6</u>
Material 7: Geomatte/Geogitter- Verbund	6,7	5	3	3	6,1	5,5	7,3	6,0	5	5	5,6	<u>4,9</u>
Material 40: Stroh/Kokos-Matte	0	3,3	3	3	5,9	5,5	6,0	6,7	4	4	<u>2,4</u>	<u>4,5</u>
Material 17: Jute-Gewebe	5	6,7	3	2	5,4	5,7	6,7	6,7	5	4	5,0	5,0
Material 15: Kokos-Gewebe	0	0	1	2	7,2	6,8	2,7	2,7	4	4	<u>3,0</u>	<u>3,1</u>
Material 24: Geozelle	10	10	3	4	6,4	5,9	6,0	7,3	5	4	6,1	6,2
Material 25: Schafwollfaschine	10	10	0	0	6,0	6,8	2,0	2,0	3	2	<u>4,2</u>	<u>4,2</u>
Referenzparzelle	10	10	3	3	7,1	5,4	6,7	7,3	5	3	6,4	5,7

Tabelle 4-1: Bewertungsmatrix

KM = Kräutermischung

RSM = Regelsaatgutmischung 7.1.2 Landschaftsrasen



Abbildung 4-27: Ergebnisse der zusammenfassenden Bewertung mit Hilfe eines 10-stufigen Punktesystems

(Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle)

Die **Abb. 4-27** veranschaulicht die Ergebnisse der Bewertungsmatrix (**Tab. 4-1**), die sich wie folgt darstellen:

- Man sieht, dass die RSM mit erheblich mehr Erosionsschutzsystemen ein positives Ergebnis erzielt als die Kräutermischung.
- Bei beiden Saatgutmischungen haben das Kokosmatte/Geomatte-Verbundsystem und die Geozelle eindeutig bestanden.
- Bestanden haben auch die Geomatten und der Geomatte/Geogitter-Verbund zusammen mit der RSM.
- Im Verbund mit der KM verfehlen sie nur knapp die Ziellinie. Bestandstruktur und Deckung führten hier zur Abwertung, da vor allem die geringen Öffnungsweiten zusammen mit der

Hohlraumbildung zwischen den Erosionsschutzprodukten und der Bodenoberfläche das Wachstum der krautigen Arten erschwerten.

- Das Jute-Gewebe hat in der Pr
 üfung zwar bestanden, wenngleich die Werte der Abnahme und die Vitalit
 ät der Pflanzen f
 ür beide Saatgutmischungen nicht
 überzeugen. Es ist nicht erkl
 ärbar, warum die Abnahmewerte relativ schlecht sind. Diese weisen durch das verz
 ögerte Wachstum in den ersten Monaten auf schlechte Wuchsbedingungen hin. Diese schlechten Wuchsbedingungen sind nicht auf eine mechanische Behinderung zur
 ückzuf
 ühren, da das Gewebe besonders großz
 ügige Maschenweiten besitzt. Eine Behinderung der Pflanzen durch geringe Maschenweiten konnte nicht beobachtet werden, wie sie bei den Systemen Geomatte und Geomatte/Geogitter-Verbund vorlagen.
- Das Kokos-Gewebe erzielte besonders schlechte Werte in den Kriterien Abnahme, Deckung und Bestandstruktur. Dies führte in der Prüfung zur Abwertung. Damit ist das System durchgefallen. Eine mechanische Behinderung ist auch hier auszuschließen, da die Maschenweiten ausreichend groß waren. Krüppelwuchs konnte nicht beobachtet werden, was sich auch in den Werten für die Vitalität widerspiegelt.
- Das Kokosmatte/Geomatte-Verbundsystem und die Geozelle sind aus vegetationstechnischer Sicht für beide Mischungen empfehlenswert. Beide erreichen überdurchschnittliche Punktzahlen.
- Die Vitalitätswerte der Pflanzen der Referenzparzellen sind nicht überzeugend.
- Der aufgetragene Lösslehm erscheint als eher vegetationsfeindliches Substrat. Augenscheinlich stammt die aufgetragene Bodenschicht aus den unteren, unbelebten Lösslagen.

Abschließend lässt sich feststellen:

- Erosionsschutzmatten mit enger Öffnungsweite behindern den Durchwuchs der Kräuter, so dass selektiv nur Gräser durchwachsen können.
- Eine Behinderung des Durchwuchses ergibt sich auch, wenn die Matten nicht absolut plan auf die Bodenoberfläche aufgelegt wurden. In den entstandenen Hohlräumen können sich zwar die krautigen Arten entwickeln, können aber mit ihren entfalteten Blättern nicht mehr durch die Öffnungen durchbrechen, selbst wenn deren Durchmesser 1-2 cm beträgt. Effekt: Statt des Durchwuchses werden die Matten angehoben.
- In Zusammenhang mit Oberboden sind Systeme, die über eine Düngefracht verfügen, kontraproduktiv. Überdüngte Pflanzenbestände sind in Stresssituationen nicht belastbar.
- Es besteht der Verdacht auf vegetationsfeindliche Rückstände oder Zusatzstoffe in den verwendeten Materialien. Gerade unter Hitze- und Trockenstress kann die Abgabe von wachstumsfeindlichen Substanzen, selbst in geringem Umfang, limitierend sein.

4.2. Erosionssicherheit auf den Testparzellen

Der Bodenabtrag von den Testparzellen wurde regelmäßig nach einem Niederschlagsereignis mittels am Böschungsfuß installierten Auffangbehältern kontrolliert und erfasst (**Tab. 4-2**).

Bodenabtra	ag in kg													
Parzellen-	Datum	der En	tnahme											
Nr.	2009- 11-12	2009- 11-26	2009- 12-02	2009- 12-09	2009- 12-15	2009- 12-28	2010- 01-05	2010- 02-24	2010- 03-01	2010- 03-23	2010- 04-08	2010- 04-15	2010- 05-11	2010- 05-18
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,8	0	0	0	0	0,6	2,8	0	0	0	0	0	0	1,2
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
/	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9 10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	19	0	0	0	01	68	0	21	0	0	0	0	0	0
12	>100	2.1	3.0	0	16.0	>100	>100	>100	>100	0	>100	>100	21.1	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	1,7	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,8	0	1,5	0
33	7,2	1,5	0,8	0,8	7,4	18,0	9,0	12,0	12,6	2,1	2,1	12,1	4,7	30,5
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	2.1	0	0.7	0	7.0	28.8	33.6	17.3	9.6	0	13.4	20.0	19.2	20.2
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0
4/	0	0	0	0	0	0	0	0	1,2	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabelle 4-2: Ergebnisse der Bodenabtragserfassung auf dem Testfeld Biebelried

Fortsetzung der Tabelle 4-2

Bodenabtra	ag in kg											
Parzellen-	Datum	der En	tnahme									
Nr.	2010- 05-25	2010- 05-28	2010- 06-04	2010- 06-10	2010- 06-22	2010- 07-13	2010- 08-05	2010- 08-10	2010- 08-18	2010- 08-25	2010- 08-26	2010- 09-02
1	0	6,2	0,8	0	0	0	33,9	0,4	0,6	0	0	2,7
2	0	0	0	0	0	0	7,3	0	0	0	0	0,7
3	0	0	0	0	0	0	1,0	0	0	0	0	0,4
5	0	1,8	0	0	0	0	5,2	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	1,7	0	0	0	0	0
9 10	0	0	0	0	0	0	2,6	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	5.1	0	0	0	0	1.9
12	4,7	>100	>100	6,2	2,1	0	50	12,7	9,0	0,98	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0,4	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	27	0,5	0	0	0	3, I 6 8	0	0	0	0	0,5
18	0	0	0	0	0	0	7.2	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	1,0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	2,2	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0,7	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0,5	11,2	0	0	0	1,4
28	0	0	0	0	0	0	54,2	0	0	0	0	3,0
29	0	0	0	0	0	0	- 13,7	94	0	0	0	1,0
31	0	0	0	0	0	0	-	10,4	0	0	0	1.0
32	0	10,6	0	0	0	0	-	29,6	0	0	0	2,0
33	0	9,9	0,4	0	0	0	-	6,6	0,7	0	0,1	3,6
34	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	-	5,9	0	0	0	0,7
37	0	0	0	0	0	0	-	9,0 0	0	0	0	0
38	0,8	18,8	4,4	3,2	0,2	10,3	-	17,5	2,1	0	0,8	7,2
39	0	0	0	0	0	0	-	16,2	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	-	6,4	0	0	0	1,1
41	0	0	0	0	0	0	-	6,4	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0		-	26	0	0	0	0
44	0	0	0	0	0	0	-	0.7	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	-	2,5	0,2	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	-	0	0,5	0	0	0
47	0	0	0	0	0	0	-	3,0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	-	2,4	0	0	0	0
49 50	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	-	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	-	1,4	0	0	0	1,2

In der ersten Vegetationsperiode nach der Fertigstellung des Testfeldes ereignete sich keine ausreichende Niederschlagsintensität bzw. -menge, die eine Differenzierung unter den verlegten Erosionsschutzsystemen ohne Vegetation bezüglich Bodenabtrag ermöglicht hätte. Damit konnte die ursprüngliche Absicht, die Schutzwirksamkeit der eingesetzten Erosionsschutzsystemen gegenüber Bodenabtrag zu beurteilen, bis die Vegetation die Schutzfunktion teilweise oder vollständig übernimmt, witterungsbedingt nicht realisiert werden.

Schwierigkeiten bereitet bei der Auswertung der aufgenommenen Daten die ungleichmäßige Entwässerung des Oberflächenwassers von der Fahrbahn und Austritten von Schichtenwasser unterhalb der Frostschutzschicht in die Böschung. In den Testparzellen Nr. 33 und 38 kam es bereits direkt nach der Fertigstellung der Testparzellen zu massiven punktuell aufgetretenen Wassereinbrüchen aus der Frostschutzschicht im Bereich des Böschungskopfes, die so auch nicht vorhersehbar waren. Diese führten unter dem verlegten Erosionsschutzsystem zu erheblichen Abspülungen von Bodenmaterial mit tiefen Rinnen und Runsen in der aufgetragenen Bodenschicht. **Abb. 4-28** zeigt beispielhaft die auf der Parzelle Nr. 38 ausgebildete Erosionsrille infolge von punktueller Schichtwasseraustritt im Bereich des Böschungskopfs.



Abbildung 4-28: Bodenerosion infolge punktuellen starken Wasseraustritts aus der Frostschutzschicht im Bereich des Böschungskopfs (= Quellerosion)

Probleme bereitete auch die mangelnde Verbindung der aufgetragenen Oberbodenschicht mit der Rohböschung. **Abb. 4-29** zeigt das Abrutschen des Oberbodens auf der Testparzelle Nr. 11 mit Schafwollfaschine und auf der angrenzenden Referenzparzelle Nr. 12 (ohne Erosionsschutzsystem) nach einem Regenereignis ca. 5 Wochen nach der Fertigstellung des Testfeldes. Die Oberfläche der Rohböschung im Bereich der Erosionsfront ist deutlich erkennbar. Auf der Referenzparzelle arbeitete sich die Erosionsfront mit der Zeit bis zum Böschungskopf nach oben. Die Schafwollfaschine konnte dagegen trotz zusätzlich auf die

Testparzelle eintretendes Schichtwasser die Fortschreitung der Erosion erfolgreich verhindern (**Abb. 4-30**).



Abbildung 4-29: Bodenerosion auf den Parzellen Nr. 11 (mit Schafwollfaschine) und Nr. 12 (Referenzparzelle) (Datum der Aufnahme: 2009-10-28)



Abbildung 4-30: Fortschreitung der Bodenerosion auf der Parzelle Nr. 12 (Referenzparzelle) (Datum der Aufnahme: 2009-11-12)

Die Testparzelle Nr. 40 mit dem Erosionsschutzsystem Stroh/Kokos-Matte ist nach dem Starkregen am 23. Juli 2010 (s. Abschnitt 4.1.1) ca. 4 m oberhalb des Böschungsfußes abgerutscht. Die auf der Oberfläche ohne Bodenabdeckung verlegte Erosionsschutzmatte hat nach fast einem dreiviertel Jahr Bewitterung der Zugbelastung durch die abgleitende Bodenschicht nicht mehr standgehalten und ist auf der gesamten Parzellenbreite durchgerissen (**Abb. 4-31**).



Abbildung 4-31: Versagen des Erosionsschutzsystems Stroh/Kokos-Matte durch Abrutschen des Oberbodens (Parzelle Nr. 40)

Der Starkregenereignis am 23. Juli 2010 verursachte bei jedem Erosionsschutzsystem signifikante Bodenabspülungen. Der ermittelte Bodenabtrag (Datum der Entnahmen: 2010-08-05 und 2010-08-10, s. **Tab. 4-2**) ist in der **Tab. 4-3** zusammengefasst. Die Auswertung ergab, dass von den Referenzparzellen (ohne Erosionsschutzsystem) durchschnittlich wesentlich mehr Boden abgespült wurde als von den Parzellen mit Erosionsschutzsystem. Der geringe Bodenabtrag von den Parzellen mit Stroh/Kokos-Matte kann mit der oberflächendeckenden Struktur und mit der Bauweise "ohne Bodenabdeckung" erklärt werden. Eine weitere Differenzierung zwischen den einzelnen getesteten Erosionsschutzsystemen ist mit Unsicherheiten verbunden, da der Bodenabtrag für das gleiche System von Parzelle zu Parzelle erhebliche Streuungen aufweist. Da sich der Starkregen nach Ende der zweiten Vegetationsperiode ereignete, ist die Schutzwirkung der Systeme gegenüber Bodenabtrag als eine Gesamtleistung des Erosionsschutzprodukts zusammen mit der vorhandenen Vegetation zu bewerten.

Erosionsschutzsystem auf der Testparzelle	mittlerer Bodenabtrag in kg/Parzelle
ohne (Referenzparzelle)	15,2
Kokosmatte/Geomatte-Verbund (Material 20) *)	6,4
Schafwollfaschine (Material 25) *)	4,2
Geozelle (Material 24) * ⁾	9,5
Geomatte (Material 21)	6,3
Geomatte/Geogitter-Verbund (Material 7)	5,9
Jute-Gewebe (Material 17)	6,9
Kokos-Gewebe (Material 15)	4,0
Stroh/Kokos-Matte (Material 40)	2,5

Tabelle 4-3 [.]	Bodenabtrag	nach dem	Starkregen	am 23.	Juli 2010
	Douonabilag	nuon uom	otuntiogon	um 20.	0011 2010

*) Diese Erosionsschutzsysteme sind mit der Bauweise "mit Boden überdeckt" verlegt worden.

4.3. Ergebnisse der Laboruntersuchungen an den Erosionsschutzprodukten

4.3.1. Testergebnisse

4.3.1.1 Erosionsschutzmatten

Die Prüfergebnisse sind in den Tab. 4-4 und 4-5 zusammengefasst.

Eigenschaft / Prüfmethode		Einheit	Ergebn	isse												
				Koko	sfaser				Kokosfa	ser/Strol	า			St	roh	
			Mat	. 14	Mat	. 33	Mat	t. 40	Mat	. 18	Mat	. 19	Mat	. 16	Mat	. 34
			x	v	x	V	x	V	x	v	x	v	x	v	x	v
Dicke, SKZ EC 1																
0,2 kPa	a	mm	6,5	11%	7,0	7%	7,4	15%	9,2	16%	8,4	4%	8,2	8%	8,7	10%
2 kPa	a	mm	4,6	11%	4,7	10%	5,3	12%	6,9	14%	5,8	5%	6,1	7%	5,6	11%
Flächenbezogene Masse, DIN EN	I ISO 9864	g/m²	303	9%	320	10%	379	8%	466	19%	410	8%	279	10%	270	23%
Porosität, SKZ EC 5		%	97,5		97,4		97,1		96,0		97,4		97,9		97,8	
Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319																
MD		kN/m	1,37	25%	2,42	26%	2,10	49%	0,90	36%	2,10	20%	2,42	24%	1,03	14%
CMD		kN/m	1,04	14%	2,15	8%	0,80	63%	0,65	23%	2,60	28%	2,56	19%	1,71	13%
Dehnung bei Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319																
MD		%	22,3	16%	19,8	16%	5,8	85%	27,2	31%	4,5	27%	2,6	93%	24,8	34%
CMD		%	11,3	6%	14,4	6%	15,4	43%	26,1	46%	5,6	12%	6,2	95%	15,5	5%
Biegsamkeit, in Anl. an ASTM D 1	388															
Biegungslänge c	MD	mm	64	12%	75	11%	77	12%	82	14%	76	19%	90	20%	96	27%
	CMD	mm	64	8%	72	9%	70	6%	64	17%	70	11%	83	21%	79	19%
Verbundfestigkeit, DIN EN ISO 13	426-2															
T _{scher} in MD		kN/m	0,13	47%	0,15	40%	0,26	59%	0,28	70%	0,10	75%	0,07	80%	0,24	40%
Druckstauchung, in Anl. an DIN E	N ISO 25619-2															
(σ = 20 kPa)		%	35,4	11%	39,3	8%	40,5	6%	35,6	6%	38,7	6%	41,7	5%	43,6	5%
Rückstellverhalten, SKZ EC 6																
DVR		%	22,4	8%	20,6	8%	22,0	4%	20,4	11%	20,5	14%	30,9	9%	29,1	14%
Dämpfungsverhalten, in Anl. an D	IN EN 1177															
max. Beschleunigung in	g (9,81 m/s²)	g	173	28%	172	18%	188	31%	164	35%	195	19%	203	29%	191	25%

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert; v = Variationskoeffizient; MD = in Produktionsrichtung; CMD = quer zur Produktionsrichtung

Fortsetzung der Tabelle 4-4

Eigenschaft / Prüfmethode	Einheit	inheit Ergebnisse													
			Koko	sfaser				Kokosfa	ser/Strol	า			St	roh	
		Mat.	14	Mat.	33	Mat	. 40	Mat	. 18	Mat	. 19	Mat	16	Mat	. 34
		x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v
Wasserableitvermögen, DIN EN ISO 12956 (5 kPa, i = 0,5, MD)	l/(m·s)	0,34		0,73		0,29		0,27		0,17		0,32		0,24	
Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene, DIN EN ISO 11058 ($\Delta h = 10 \text{ mm}$)	l/(m²s)	131,8	8%	131,6	13%	113,4	7%	43,0	19%	55,9	11%	n.	a.	n.	a.
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen),	%	1481	6%	1324	7%	1273	5%	742	17%	706	8%	713	5%	731	10%
SKZ EC 3-1	l/m²	4,3	5%	4,0	5%	4,9	2%	3,9	12%	3,0	10%	1,9	12%	2,1	16%
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen),	%	306	9%	249	10%	328	6%	343	12%	357	5%	442	7%	500	8%
SKZ EC 3-2	l/m²	0,8	16%	0,9	12%	1,0	14%	1,3	5%	1,3	11%	1,0	14%	1,5	2%
Dickenänderung bei Wasserlagerung, SKZ EC 4	%	18,9	24%	10,5	17%	12,6	6%	32,3	17%	42,0	16%	30,2	44%	55,1	17%
Öffnungsweite, SKZ EC 8	mm		-		-	3,3	21%						-		
Lichtdurchlässigkeit, ASTM D 6567	%	8,6	71%	7,1	25%	5,3	42%	0,7	29%	1,7	35%	10,2	23%	3,5	23%
Verdunstungsschutz, SKZ EC 2	%	56		55		58		62		59		49		53	
Witterungsbeständigkeit, DIN EN 12224 (50 MJ/m ²)		(nur PP	-Netz)	(nur PF	P-Netz)	(nurJut	e-Netz)	(nur PF	P-Netz)	(nurJut	e-Netz)	(nur PP	-Netz)	(nur PF	'-Netz)
Restfestigkeit, MD	%	100,0		>100		14,8		10,5		38,1		>100		>100	
Restdehnung, MD	%	98,3		68,8		>100		54,5		>100		>100		87,0	
Mikrobiologische Abbaubarkeit, DIN EN 12225															
Restfestigkeit, MD	%	91,9)	>100		1,4		62,9		0 **)		95,2		>100	
Restdehnung, MD	%	>100		>100		>100		87,7		0 **)		96,7		91,7	
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14															
Länge der verbrannten Strecke	mm	18	34%	11	40%	135	0%	17	18%	3	58%	12	5%	28	9%
Brandverhalten, DIN EN ISO 11925-2,															
Klassifizierung nach DIN EN 13501-1	-	Klass	se F	Klass	se F	Klas	se F	Klas	se F	Klas	se F	Klas	se F	Klas	se F

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert, v = Variationskoeffizient

MD = in Produktionsrichtung

CMD = quer zur Produktionsrichtung

**) Die Messproben wurden während der Einlagerung vollständig zerstört.

n. a. = Prüfmethode nicht anwendbar

Tabelle 4-5: Ergebnisse; Erosionsschutzmatten (GEC-M)

Eigenschaft / Prüfmethode		Einheit	Ergebn	isse												
			Koł	kosfaser	+ Geom	atte	Kunsts	tofffaser	Esp	oarto		Holz	wolle		See	gras
			Mat	. 20	Mat	t. 32	Ma	t. 35	Ma	t. 36	Ма	t. 47	Mat	t. 48	Mat	t. 49
			\overline{x}	v	\overline{x}	V	\overline{x}	v	x	v	x	v	\overline{x}	v	\overline{x}	v
Dicke, SKZ EC 1																
0,2 kPa	a	mm	15,3	5%	14,0	5%	17,4	9%	4,7	13%	13,0	4%	6,8	9%	11,0	13%
2 kPa	à	mm	13,0	5%	12,3	8%	13,6	7%	2,9	12%	9,5	4%	4,6	9%	8,6	16%
Flächenbezogene Masse, DIN EN	I ISO 9864	g/m²	1042	7%	479	7%	716	13%	239	17%	517	4%	305	13%	776	25%
Porosität, SKZ EC 5		%	94,5	;	97,3	5	95,5	5	97,0)	97,7	7	97,5	5	96,4	Ļ
Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319																
MD		kN/m	10,9	13%	7,80	12%	14,2	23%	1,67	18%	1,55	12%	2,70	18%	3,15	12%
CMD		kN/m	20,4	4%	12,3	7%	16,7	13%	1,33	4%	1,05	13%	1,15	10%	0,60	7%
Dehnung bei Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319																
MD		%	5,4	14%	27,9	12%	29,9	24%	27,3	8%	30,8	20%	24,3	14%	33,4	9%
CMD		%	5,8	6%	18,0	5%	16,9	12%	32,6	5%	27,0	34%	23,8	11%	46,1	27%
Biegsamkeit, in Anl. an ASTM D 1	388															
Biegungslänge c	MD	mm	166	4%	156	4%	>17	5	81	15%	86	11%	95	31%	63	9%
	CMD	mm	127	11%	>17	5	>17	5	61	10%	73	10%	81	14%	61	16%
Verbundfestigkeit, DIN EN ISO 13	426-2															
T _{scher} in MD		kN/m	0,06	34%	0,65	37%	0,24	113%	0,09	63%	0,11	135%	0,15	37%	0,46	31%
Druckstauchung, in Anl. an DIN El	N ISO 25619-2															
(σ = 20 kPa)		%	35,6	5%	31,8	16%	61,6	8%	47,6	5%	38,4	8%	46,1	2%	43,7	5%
Rückstellverhalten, SKZ EC 6																
DVR		%	14,2	4%	38,1	8%	35,4	16%	24,9	17%	25,1	13%	27,7	5%	24,0	6%
Dämpfungsverhalten, in Anl. an D	IN EN 1177															
max. Beschleunigung in g	g (9,81 m/s²)	g	59	14%	119	10%	96	20%	295	3%	118	35%	243	10%	208	16%

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert, v = Variationskoeffizient

MD = in Produktionsrichtung

CMD = quer zur Produktionsrichtung

Fortsetzung der Tabelle 4-5

Eigenschaft / Prüfmethode	Einheit	Einheit Ergebnisse													
		Ko	kosfaser	+ Geoma	atte	Kunsts	tofffaser	Esp	arto		Holz	wolle		See	gras
		Ма	t. 20	Mat	. 32	Ma	t. 35	Mat	. 36	Ma	t. 47	Mat	. 48	Ma	t. 49
		x	v	\overline{x}	v	x	v	x	v	\overline{x}	v	\overline{x}	v	x	v
Wasserableitvermögen, DIN EN ISO 12956 (5 kPa, i = 0,5, MD)	l/(m·s)	1,79	9	3,33		3,39)	0,07		0,91		0,24		0,04	ļ
Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene, DIN EN ISO 11058 (Δh = 10 mm)	l/(m² s)	93,6	10%	141,4	7%	163,7	6%	102,4	10%	153,1	10%	n.	a.	35,1	9%
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen), SKZ EC 3-1	% I/m²	278 3,0	23% 21%	568 2,8	18% 19%	68 0,5	10% 14%	957 2,2	6% 9%	287 1,5	7% 10%	384 1,2	7% 15%	811 7,4	6% 11%
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen), SKZ EC 3-2	% I/m²	149 1,5	11% 11%	208 1,0	10% 11%	154 1,2	6% 4%	362 0,8	11% 29%	228 1,1	9% 10%	364 1,0	11% 8%	366 1,9	12% 10%
Dickenänderung bei Wasserlagerung, SKZ EC 4	%	17,1	14%	9,1	4%	-		6,2	68%	47,5	13%	110,9	17%	60,2	3%
Öffnungsweite, SKZ EC 8	mm	< 1,0			-	-			-	-			-	-	
Lichtdurchlässigkeit, ASTM D 6567	%	2,7	52%	8,0	35%	10,7	36%	6,5	37%	8,0	34%	2,8	32%	0,0	0%
Verdunstungsschutz, SKZ EC 2	%	60		53		35		53		43		31		57	
Witterungsbeständigkeit, DIN EN 12224 (50 MJ/m ²) Restfestigkeit, MD Restdehnung, MD	% %	>10 >10	0 0	(nur PF 98,8 84,7	P-Netz)	>10 >10	0 0	(nur PF 94,9 80,3	P-Netz)	(nur P 9,4 28,1	P-Netz) I	(nur PF 0,0 * 0,0 *	P-Netz) ∗) *)	13,1 18,	2
Mikrobiologische Abbaubarkeit, DIN EN 12225 Restfestigkeit, MD Restdehnung, MD	% %	>100 >100 72,8		>100 44,9				67,5 87,7		>100 94,4		>100 >100		>100 >100	
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14 Länge der verbrannten Strecke	mm	51	110%	8	49%	5	39%	4	25%	9	85%	8	25%	4	16%
Brandverhalten, DIN EN ISO 11925-2, Klassifizierung nach DIN EN 13501-1	-	Klas	sse F	Klas	se F	Klas	sse F	Klas	se F	Klas	sse F	Klas	se F	Klas	se F

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert, v = Variationskoeffizient

MD = in Produktionsrichtung CMD = quer zur Produktionsrichtung **⁾ Die Messproben wurden durch die Bewitterung zerstört. n. a. = Prüfmethode nicht anwendbar

4.3.1.2 Geomatten

Die Prüfergebnisse sind in den Tab. 4-6 und 4-7 zusammengefasst.

Tabelle 4-6: Ergebnisse; Geomatten (GMA)

Eigenschaft / Prüfmethode	Einheit	nheit Ergebnisse															
									P	P							
		Ма	t. 1	Ма	at. 2	Mat	. 10	Mat	. 11	Mat	t. 12	Mat	. 13	Mat	. 26	Mat	. 27
		x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	\overline{x}	v	\overline{x}	v
Dicke, SKZ EC 1																	
0,2 kPa	mm	7,4	7%	20,0	4%	18,1	1%	22,8	1%	8,7	3%	17,1	1%	11,2	2%	24,0	3%
2 kPa	mm	5,8	8%	13,8	7%	16,3	1%	20,9	2%	7,4	3%	15,4	2%	9,9	4%	19,4	8%
Flächenbezogene Masse, DIN EN ISO 9864	g/m²	184	4%	279	5%	493	2%	552	2%	304	2%	528	3%	525	3%	636	8%
Porosität, SKZ EC 5	%	97,2		98,4	ļ	97,0		97,3		96,2	2	96,6		94,7		97,1	
Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319																	
MD	kN/m	3,64	5%	12,6	21%	2,15	3%	2,83	5%	2,26	6%	2,78	4%	1,42	28%	2,45	10%
CMD	kN/m	9,66	11%	27,5	4%	0,80	8%	0,60	10%	0,42	19%	0,77	15%	0,66	11%	0,80	18%
Dehnung bei Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319																	
MD	%	14,1	4%	26,2	4%	77,0	15%	130,1	7%	83,5	25%	91,1	8%	117,0	52%	34,0	4%
CMD	%	10,5	16%	17,4	4%	73,8	11%	88,1	17%	51,6	19%	65,1	18%	28,1	16%	30,6	20%
Biegsamkeit, in Anl. an ASTM D 1388																	
Biegungslänge c MD	mm	123	11%	>17	5	158	7%	160 bis	s >175	110 bi	s >175	151	12%	>175	5	>175	5
CMD	mm	167 bi	s >175	>17	5	118	5%	109	6%	103	15%	122	7%	>175	5	>175	5
Verbundfestigkeit, DIN EN ISO 13426-2																	
T _{scher} in MD	kN/m	0,51	18%	0,97	62%				-	-					-	0,34	29%
Druckstauchung, in Anl. an DIN EN ISO																	
25619-2 (σ = 20 kPa)	%	56,5	4%	71,9	4%	44,3	4%	63,6	4%	49,0	15%	25,4	4%	38,0	7%	62,7	5%
Rückstellverhalten, SKZ EC 6																	
DVR	%	33,8	5%	46,5	10%	20,9	6%	32,0	4%	17,8	8%	12,6	7%	13,8	5%	35,5	15%
Dämpfungsverhalten, in Anl. an DIN EN 1177																	
max. Beschleunigung in g (9,81 m/s ²)	g	183	4%	110	20%	70	7%	68	7%	164	9%	60	20%	74	16%	56	28%

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert, v = Variationskoeffizient, MD = in Produktionsrichtung, CMD = quer zur Produktionsrichtung

Fortsetzung der Tabelle 4-6

Eigenschaft / Prüfmethode	Einheit	Ergeb	nisse														
									F	P							
		Ma	t. 1	Ma	t. 2	Mat.	10	Mat.	11	Mat.	12	Mat	13	Mat	. 26	Mat.	27
		x	v	\overline{x}	v	\overline{x}	v	\overline{x}	v	x	v	x	V	\overline{x}	V	\overline{x}	V
Wasserableitvermögen, DIN EN ISO 12956																	
(5 kPa, i = 0,5, MD)	l/(m ⋅ s)	1,21		7,74		5,89		9,91		2,29		5,52		2,71		5,40	
Lichtdurchlässigkeit, ASTM D 6567	%	48,7	6%	51,0	5%	39,8	9%	37,5	8%	46,7	6%	36,0	6%	54,1	13%	28,4	15%
Witterungsbeständigkeit, DIN EN 12224 (430h) Restfestigkeit, MD Restdehnung, MD	% %	95,1 77,4		-		98,0 96,7						91,4 87,2		90,9 97,3		>100 99,3	
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14 Länge der verbrannten Strecke	mm	5	35%	4	27%	0	0%					4	43%	2	35%	2	0%
Brandverhalten, DIN EN ISO 11925-2, Klassifizierung nach DIN EN 13501-1	-	Klasse F Klasse F		se F	Klass	se F		-			Klas	se F	Klas	se F	Klass	se F	

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert, v = Variationskoeffizient, MD = in Produktionsrichtung, CMD = quer zur Produktionsrichtung

Tabelle 4-7: Ergebnisse; Geomatten (GMA)

Eigenschaft / Prüfmethode	Einheit	Ergebnisse											
		P/	٩	PE								PVC-P	
		Mat. 21		Mat. 8		Mat. 9		Mat. 50		Mat. 51		Mat. 28	
		\overline{x}	v	x	v	\overline{x}	v	x	v	\overline{x}	v	\overline{x}	v
Dicke, SKZ EC 1													
0,2 kPa	mm	18,3	1%	9,8	9%	12,8	6%	14,3 * ⁾	4%	9,2	7%	5,0	2%
2 kPa	mm	14,9	2%	5,5	11%	9,2	7%	12,7 * ⁾	4%	5,0	5%	4,6	2%
Flächenbezogene Masse, DIN EN ISO 9864	g/m²	289	4%	205	4%	421	2%			312	4%	1120	5%
Porosität, SKZ EC 5	%	98,6		97,8		96,6				93,5		n. a.	
Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319													
MD	kN/m	1,92	3%	1,95	8%	4,35	8%	15,5 ** ⁾	11%	8,70	3%	1,40	13%
CMD	kN/m	1,04	7%	1,05	10%	3,10	8%			3,70	5%	0,36	72%

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert, v = Variationskoeffizient, MD = in Produktionsrichtung, CMD = quer zur Produktionsrichtung *) Die Messprobe wurde für die Prüfung auf 80 Stränge/m breit gezogen. Dies entspricht der angedachten Einbausituation des Produkts.

**) bezogen auf 80 Stränge/m

Fortsetzung der Tabelle 4-7

Eigenschaft / Prüfmethode	Einheit	it Ergebnisse										
		PA			PE						PVC-P	
		Mat. 21		Mat. 8		Mat. 9		Mat. 50	Mat. 51		Mat. 28	
		\overline{x}	v	\overline{x}	v	x	v	x v	x	v	x	v
Dehnung bei Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319												
MD	%	101,3	5%	41,6	14%	41,5	7%	68,2 ** ⁾ 2%	66,7	8%	49,5	5%
CMD	%	103,3	9%	57,7	5%	63,4	6%		126,3	9%	44,1	18%
Biegsamkeit, in Anl. an ASTM D 1388												
Biegungslänge c MD	mm	110 bis >175		141	4%	142 bis >175			67	46%	59	12%
CMD	mm	116	13%	104	11%	110	19%		64	23%	39	9%
Verbundfestigkeit, DIN EN ISO 13426-2												
T _{scher} in MD	kN/m			0,28	41%	0,53	33%					
Druckstauchung, in Anl. an DIN EN ISO 25619-2												
(σ = 20 kPa)	%	73,7	4%	75,1	2%	70,9	2%		53,9	5%	20,9	10%
Rückstellverhalten, SKZ EC 6												
DVR	%	31,7	9%	61,7	4%	40,0	12%		39,3	8%	8,1	13%
Dämpfungsverhalten, in Anl. an DIN EN 1177												
max. Beschleunigung in g (9,81 m/s ²)	g	186	8%	228	4%	186 4%			180	5%	78	2%
Wasserableitvermögen, DIN EN ISO 12956												
(5 kPa, i = 0,5, MD)	l/(m·s)	3,40		0,86		2,20			0,80		0,48	
Öffnungsweite, SKZ EC 8	mm	7,2	2%									
Lichtdurchlässigkeit, ASTM D 6567	%	59,2	3%	58,6	3%	39,4	9%	51,8 * ⁾ 3%	50,2	6%	44,4	13%
Verdunstungsschutz, SKZ EC 2	%	12									29	
Witterungsbeständigkeit, DIN EN 12224 (50 MJ/m ²)												
Restfestigkeit, MD	%	95,8	5,8 >100)			>100	97,7		>100	
Restdehnung, MD	%	95,4		91,7				>100	98,6		>100	
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14												
Länge der verbrannten Strecke	mm	4	0%	1	0%	3	58%		4	16%	0	0%
Brandverhalten, DIN EN ISO 11925-2,												
Klassifizierung nach DIN EN 13501-1	-	Klasse F		Klasse F		Klasse F		Klasse F	Klasse F		Klasse F	

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert, v = Variationskoeffizient, MD = in Produktionsrichtung, CMD = quer zur Produktionsrichtung, n. a. = Prüfmethode nicht anwendbar *) Die Messprobe wurde für die Prüfung auf 80 Stränge/m breit gezogen. Dies entspricht der angedachten Einbausituation des Produkts., **) bezogen auf 80 Stränge/m

4.3.1.3 Geomatten in Kombination mit Bewehrungselementen

Die Prüfergebnisse sind in der Tab. 4-8 zusammengefasst.
Eigenschaft / Prüfmethode	Einheit	Ergebr	nisse								-	
		Geo	gitter		Ge	eomatte	mit Ge	ogitter ir	n Verbu	und		
		Mat	. 23	Ma	at. 7	Mat	. 22	Mat	. 29	Mat	. 30	
		x	v	\overline{x}	v	x	v	x	v	x	v	
Dicke, SKZ EC 1												
0,2 kPa	mm	9,7	2%	13,0	4%	22,6	4%	24,4	5%	23,3	3%	
2 kPa	mm	5,5	3%	10,6	3%	16,3	4%	6,4 **	15%	6,5 **	13%	
Flächenbezogene Masse, DIN EN ISO 9864	g/m²	380	1%	650	3%	1805	2%	363	3%	493	2%	
Porosität, SKZ EC 5	%	97,1		95,3	3			98,5		98,1		
Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319												
MD	kN/m	54,9	2%	45,0	2%			3,32	9%	33,8	4%	
CMD	kN/m	21,8	2%	40,9	5%			3,27	8%	28,4	2%	
Dehnung bei Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319												
MD	%	9,2	2%	11,5	1%			24,2	9%	10,9	15%	
CMD	%	16,9	11%	12,1	5%			23,6	8%	10,0	8%	
Biegsamkeit, in Anl. an ASTM D 1388												
Biegungslänge c MD	mm	83	4%	149	12%	>17	5	130	20%	124	12%	
CMD	mm	142	10%	102	6%	>17	5	>17	5	>175	5	
Verbundfestigkeit, DIN EN ISO 13426-2												
T _{scher} in MD	kN/m	-		0,84	18%		-	0,53	63%	0,57	59%	
Druckstauchung, in Anl. an DIN EN ISO 25619-2												
(σ = 20 kPa)	%			50,4	2%	45,7	5%	86,1	2%	84,7	1%	
Rückstellverhalten, SKZ EC 6												
DVR	%	-		26,9	2%	22,3	11%	78,6	4%	78,6	2%	
Dämpfungsverhalten, in Anl. an DIN EN 1177												
max. Beschleunigung in g (9,81 m/s ²)	g	195	5%	125	4%		-	189	10%	151	17%	
Wasserableitvermögen, DIN EN ISO 12956												
(5 kPa, i = 0,5, MD)	l/(m·s)	0,72		2,35	5	5,62		1,22		0,93		
Öffnungsweite, SKZ EC 8	mm			5,9	4%			-				
Lichtdurchlässigkeit, ASTM D 6567	%	68,2	1%	31,0	18%	56,1	13%	49,9	5%	52,5	6%	
Verdunstungsschutz, SKZ EC 2	%			16	6							
Witterungsbeständigkeit, DIN EN 12224 (50 MJ/m ²)												
Restfestigkeit, MD	%	86,6	5	86,1		>100		C				
Restdehnung, MD	%	90,3	5	98,3	3				97,6			

Tabelle 4-8: Ergebnisse; Geomatten in Kombination mit Bewehrungselementen (GMA-R)

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert, v = Variationskoeffizient, MD = in Produktionsrichtung, CMD = quer zur Produktionsrichtung ^{**)} Strukturversagen unter 2 kPa Auflast

Fortsetzung der Tabelle 4-8

Eigenschaft / Prüfmethode	Einheit	Ergeb	nisse								
		Geo	Geogitter Ge		eomatte mit Geogitter im Verbund						
		Mat	Mat. 23		Mat. 7		Mat. 22		Mat. 29		it. 30
		x	v	x	v	x	v	x	v	x	v
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14											
Länge der verbrannten Strecke	mm	1	87%	1	87%	1	87%	3	17%	5	0%
Brandverhalten, DIN EN ISO 11925-2,											
Klassifizierung nach DIN EN 13501-1	-	Klas	se F	Kla	asse F	Kla	sse F	Kla	sse F	Kla	sse F

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert, v = Variationskoeffizient

4.3.1.4 Geozellen

Die Prüfergebnisse sind in der Tab. 4-9 zusammengefasst.

Tabelle 4-9: Ergebnisse; Geozellen (GCE)

Eigenschaft / Prüfmethode	Einheit	Ergeb	rgebnisse														
								PE	HD							PET	Г/РА
		Mat	Mat. 3		Mat. 4		Mat. 5		Mat. 6		. 37	Mat. 38		Mat. 39		Mat. 24	
		x	v	x	v	\overline{x}	v	\overline{x}	v	x	v	\overline{x}	v	x	v	x	v
Zugfestigkeit des Wandstreifens,																	
DIN EN ISO 527-3, MD	kN/m	17,4	4%	17,9	11%	12,9	10%	16,2	14%	17,3	10%	16,6	9%	16,7	4%	20,2	18%
Streckgrenze des Wandstreifens,																	
DIN EN ISO 527-3, MD	kN/m	16,7	3%	15,6	3%	12,2	5%	14,4	9%	13,4	4%	14,2	7%	16,0	2%		
Bruchdehnung des Wandstreifens,																	
DIN EN ISO 527-3, MD	%	817	3%	582	24%	483	26%	551	22%	775	4%	778	3%	715	9%	36,4	28%
Verbundfestigkeit, DIN EN ISO 13426-1																	
Verfahren A (Zug-Scherprüfung)	N	1094	3%	1101	8%	792	8%	1071	2%	861	6%	1188	4%	1590	3%	849	7%
Verfahren B (Schälbeanspruchung)	N	726	21%	500	9%	502	20%	948	11%	807	5%	1030	8%	1457	5%	604	16%
Verfahren C (Haftfestigkeitsprüfung)	Ν	1352	12%	856	9%	920	4%	1771	12%	1296	14%	2130	11%	2471	3%	832	11%
Verfahren D (Rundstabprüfung)	Ν	2259	9%	1813	13%	1666	4%	1778	9%	1686	9%	2393	2%	2780	1%	1164	23%
Witterungsbeständigkeit, DIN EN 12224 (50 MJ/m ²)																	
Restfestigkeit, MD	%	95,7		91,8		-		-		100						60,2	2
Restdehnung, MD	%	93,8		86,4						82,8						54,7	,
Brandverhalten, DIN EN ISO 11925-2,																	
Klassifizierung nach DIN EN 13501-1	-	Klass	se F		-		-		-	Klas	se F		-		-	Klas	se F

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert, v = Variationskoeffizient, MD = in Produktionsrichtung

Erosionsschutzgewebe 4.3.1.5

Die Prüfergebnisse sind in der Tab. 4-10 zusammengefasst.

Eigenschaft / Prüfmethode	Einheit	Ergebnis	sse				
			Kokos	sfaser		Ju	ite
		Mat	. 15	Mat	. 31	Mat	. 17
		\overline{x}	v	\overline{x}	v	x	v
Dicke, SKZ EC 1							
0,2 kPa	mm	6,9	7%	10,1	4%	4,4	16%
2 kPa	mm	5,6	6%	8,9	3%	3,4	16%
Flächenbezogene Masse, DIN EN ISO 9864	g/m²	582	12%	587	4%	384	12%
Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319							
MD	kN/m	10,2	9%	13,9	11%	10,9	32%
Dehnung bei Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319							
MD	%	14,4	43%	18,7	22%	4,6	238%
Biegsamkeit, in Anl. an ASTM D 1388							
Biegungslänge c MD	mm	86	21%	116	24%	47	28%
CMD	mm	83	8%	102	6%	17	27%
Dämpfungsverhalten, in Anl. an DIN EN 1177							
max. Beschleunigung in g (9,81 m/s ²)	g	101	11%	57	8%	187	7%
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen),	%	444	17%	251	5%	783	13%
SKZ EC 3-1	l/m²	2,5	17%	1,5	3%	3,1	18%
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen),	%	199	2%	145	4%	322	6%
SKZ EC 3-2	l/m²	1,2	4%	1,2	6%	1,5	6%
Öffnungsweite, SKZ EC 8	mm	7,4	9%			18,8 bis	>19,0
Lichtdurchlässigkeit, ASTM D 6567	%	16,2	34%	58,6	13%	44,5	18%
Verdunstungsschutz, SKZ EC 2	%	37				21	
Witterungsbeständigkeit, DIN EN 12224 (430h)							
Restfestigkeit, MD	%	58,6		66,0		66,7	
Restdehnung, MD	%	88,4		88,1		>100	
Witterungsbeständigkeit, 1 Jahr Freibewitterung							
Restfestigkeit, MD	%	22,8				32,8	
Restdehnung, MD	%	29,6				>100)
Mikrobiologische Abbaubarkeit, DIN EN 12225							
Restfestigkeit, MD	%	88,1		75,4		0 **)	
Restdehnung, MD	%	>100)	80,8		0 **)	
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14							
Länge der verbrannten Strecke	mm	178	4%	15	70%	2	25%
Brandverhalten, DIN EN ISO 11925-2,							
Klassifizierung nach DIN EN 13501-1	-	Klas	se F	Klas	se F	Klas	se F

Tabelle 4-10: Ergebnisse; Erosionsschutzgewebe (GEC-W)

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert, v = Variationskoeffizient

MD = in Produktionsrichtung CMD = quer zur Produktionsrichtung **⁾ Die Messproben wurden während der Erdeinlagerung vollständig zerstört.

4.3.1.6 Erosionsschutzvliesstoffe

Die Prüfergebnisse sind in der Tab. 4-11 zusammengefasst.

 Tabelle 4-11:
 Ergebnisse;
 Erosionsschutzvliesstoffe (GEC-N)

Eigenschaft / Prüfmethode	Einheit	Ergebnis	se								
		PL	A		Scha	fwolle		PLA/Scl	nafwolle	Schaf	wolle;
										perforiert	
		Mat	. 43	Mat. 44		Mat. 45		Mat. 46		Mat. 52	
		x	v	x	v	\overline{x}	v	x	v	x	v
Dicke, SKZ EC 1											
0,2 kPa	mm	16,0	1%	13,8	4%	5,4	2%	6,3	3%	4,8	3%
2 kPa	mm	10,0	2%	7,8	2%	4,5	2%	5,5	3%	3,8	3%
Flächenbezogene Masse, DIN EN ISO 9864	g/m²	555	2%	496	2%	465	1%	498	2%	329	4%
Porosität, SKZ EC 5	%	97,3		97,8		94,7	,	94,8			
Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319											
MD	kN/m	0,22	19%	0,22	11%	2,49	3%	3,25	5%	0,67	3%
CMD	kN/m	0,63	8%	0,57	9%	3,45	13%	5,21	1%	1,07	9%
Dehnung bei Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319											
MD	%	134	22%	150	8%	136	7%	53	10%	110	5%
CMD	%	67	7%	74	5%	87	7%	65	10%	76	6%
Biegsamkeit, in Anl. an ASTM D 1388											
Biegungslänge c MD	mm	76	5%	66	10%	50	8%	61	14%		-
CMD	mm	102	3%	78	4%	57	4%	104	4%		
Druckstauchung,											
in Anl. an DIN EN ISO 25619-2 (σ = 20 kPa)	%	61,6	1%	63,8	1%	29,5	1%	24,0	2%		-
Rückstellverhalten, SKZ EC 6	0/	00.0	00/	07.7	00/	44.0	00/	0.5	00/		
	%	32,6	2%	27,7	2%	11,2	2%	9,5	3%		-
Dampfungsverhalten, in Anl. an DIN EN 1177		400	00/	040	00/	000	50/	100	00/		
max. Beschleunigung in g (9,81 m/s²)	g	188	3%	218	2%	228	5%	190	6%		-
Wasserableitvermögen, DIN EN ISO 12956											
(5 KPa, I = 0,5, MD)	I/(m·s)	0,08		0,01		0,01		0,01			-
Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene, DIN EN ISO 11058 (∆h = 10 mm)	l/(m² s)	15,9	10%	12,3	4%	10,5	10%	9,8	9%		-

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert, v = Variationskoeffizient MD = in Produktionsrichtung CMD = quer zur Produktionsrichtung

Fortsetzung der Tabelle 4-11

Eigenschaft / Prüfmethode	Einheit	Ergebnis	se									
		PL	A		Scha	fwolle		PLA/Sc	hafwolle	Schaf	volle;	
										perforiert		
		Mat.	Mat. 43		Mat. 44		Mat. 45		Mat. 46		Mat. 52	
		x	v	x	v	x	v	x	v	x	v	
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen),	%	2478	1%	2660	2%	1147	4%	970	5%		-	
SKZ EC 3-1	l/m²	13,8	3%	13,3	1%	5,4	4%	4,8	6%			
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen),	%	341	1%	305	2%	463	4%	431	5%		-	
SKZ EC 3-2	l/m²	2,0	3%	1,6	1%	2,1	4%	2,2	6%			
Dickenänderung bei Wasserlagerung, SKZ EC 4	%	-5,7	6%	-23,7	5%	0,9	32%	-4,0	20%		-	
Lichtdurchlässigkeit, ASTM D 6567	%	1,9	5%	0,0	0%	0,0	0%	0,0	0%		-	
Verdunstungsschutz, SKZ EC 2	%	62	62			56		56			-	
Witterungsbeständigkeit, DIN EN 12224 (50 MJ/m ²)												
Restfestigkeit, MD	%	>>100	(169)		-	81,4		85,9			-	
Restdehnung, MD	%	>100				85,5		81,4				
Witterungsbeständigkeit, 1 Jahr Freibewitterung												
Restfestigkeit, MD	%	>>100	(484)		-	69,0)	-			-	
Restdehnung, MD	%	>100				95,3						
Mikrobiologische Abbaubarkeit, DIN EN 12225												
Restfestigkeit, MD	%	>>100	(210)		-	24,4		49,2	2		-	
Restdehnung, MD	%	>100				54,5		>10	0			
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14												
Länge der verbrannten Strecke	mm	10	51%		-	3	22%	6	9%		-	
Brandverhalten, DIN EN ISO 11925-2,												
Klassifizierung nach DIN EN 13501-1	-	Klass	se F		-			Klasse F			-	

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert, v = Variationskoeffizient

MD = in Produktionsrichtung CMD = quer zur Produktionsrichtung

4.3.1.7 Hangfaschine

Die Prüfergebnisse sind in der Tab. 4-12 zusammengefasst.

Eigenschaft / Prüfmethode	Einheit	Ergebnis	se
		Mat.	25
		x	v
Längenbezogene Masse	g/m	407	10%
Zugfestigkeit eines Stranges,			
in Anl. an DIN EN ISO 10319			
MD	kN	1,0	27%
Dehnung bei Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319			
MD	%	39,2	36%
Wasserableitvermögen eines Stranges,			
DIN EN ISO 12956			
(5 kPa, i = 0,5, MD) ¹⁾	l/s	0,015	
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen),	%	406	5%
SKZ EC 3-1	l/m²	33,6 * ⁾	7%
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen),	%	75	5%
SKZ EC 3-2	l/m²	6,1 ** ⁾	9%
Witterungsbeständigkeit, DIN EN 12224 (50 MJ/m ²)		(nur Jute	Netz)
Restfestigkeit, MD	%	32,8	
Restdehnung, MD	%	>100	
Mikrobiologische Abbaubarkeit, DIN EN 12225			
Restfestigkeit, MD	%	44,4	
Restdehnung, MD	%	76,2	
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14			
Länge der verbrannten Strecke	mm	4	42%
Brandverhalten, DIN EN ISO 11925-2,			
Klassifizierung nach DIN EN 13501-1	-	Klass	e F

 Tabelle 4-12:
 Ergebnisse;
 Hangfaschine (GEC-F)

 \overline{x} = arithmetischer Mittelwert, v = Variationskoeffizient

MD = in Produktionsrichtung

*) entspricht 6,7 l/m² bezogen auf das verlegte Produkt

**) entspricht 1,2 l/m² bezogen auf das verlegte Produkt

¹⁾ Bei dieser Prüfung wurden zwei Stränge nebeneinander in der Prüfmaschine getestet.

4.3.2. Beurteilung der Untersuchungsmethoden

In diesem Abschnitt werden die bei den Untersuchungen aufgetretenen methodisch bedingten bzw. produktbedingten Probleme zusammengefasst.

4.3.2.1 Physikalische Eigenschaften

<u>Dicke</u>

Problematisch war die Prüfung der Dicke unter 2 kPa Auflast bei den Materialien 29 und 30. Es kam nach Aufbringung der Druckplatte zum Strukturversagen dieser Produkte. Der aufgebrachte Druck von 2 kPa entspricht dem Erddruck von ca. 10 cm Oberboden. Für die restlichen Erosionsschutzprodukte konnte die in Anlehnung an DIN EN ISO 9863-1 entwickelte neue Prüfmethode SKZ EC 1 bei beiden Auflasten (0,2 kPa und 2 kPa) anwenden.

Porosität

Die Bestimmung der Porosität konnte an den Erosionsschutzprodukten aus natürlichen Rohstoffen (wie z.B. Stroh, Kokos) nur nach einer vorherigen Trocknung im Ofen durchgeführt werden. Das Gas-Pyknometer-Verfahren für die Bestimmung der Dichte lieferte erst nach der Trocknungsphase stabile Werte.

Bei dem Material 28 (Erosionsschutzmatte aus PVC-Monofilament) konnte das Gas-Pyknometer-Verfahren für die Bestimmung der Rohdichte nicht angewendet werden. Es stellte sich auch bei längeren Wartezeiten kein konstanter Wert für das Gasvolumen ein. Es wird vermutet, dass das Prüfmaterial eine geschlossene Porenstruktur besitzt, wodurch die Diffusionsvorgänge das Erreichen eines konstanten Messwertes zeitlich erheblich hinauszögern.

4.3.2.2 Mechanische Eigenschaften

Zugversuch am breiten Streifen

Bei der Prüfung an der Erosionsschutzgewebe aus Jute (Material 17) gestaltete sich die Dehnungsmessung beim Zugversuch am breiten Streifen als problematisch. Die Erosionsschutzgewebe wurden in der Zug-Prüfmaschine mittels Capstan-Klemmen eingespannt, die sich für diese Materialien als geeignet erwies. Die Dehnungsmessung erfolgte mittels Videoextensometer, die beim Jute-Gewebe mit erheblicher Streuung der Dehnung (Varianz = 32%) und mit einem nicht glatten Verlauf der Zugspannungs-Dehnungs-Kurve verbunden war.

Zugversuch an der Wandung der Geozellen

Bei einigen Produkten zeigte sich die maximale Zugspannung (Zugfestigkeit) an der Zugkraft-Dehnungs-Kurve bei sehr unterschiedlichen Dehnungen. Dies hängt mit den Rohstoffeigenschaften zusammen. Eine Auswertung der Dehnung bei Zugfestigkeit war damit nicht sinnvoll. Für ein Vergleich der Zugeigenschaften der Wandung der verschiedenen Geozellen erwies sich die Bruchdehnung neben der Zugfestigkeit und der Streckgrenze (für Geozellen aus PEHD) als geeignet.

Biegesteifigkeit

Die von ECTC vorgeschriebene Prüfmethode für die Ermittlung der Biegesteifigkeit war an Erosionsschutzprodukten aus natürlichen Rohstoffen gut anwendbar. Die Ergebnisse sind jedoch bei mehreren Geomatten (Kunststoffprodukte) mit erheblicher Streuung verbunden. Grund dafür sind die stark abweichenden Messwerte zwischen den Prüfungen "Oberseite der Messprobe nach oben gerichtet" und "Oberseite der Messprobe nach unten gerichtet". Die abweichenden Werte hängen damit zusammen, dass die Geomatten nach der Herstellung aufgerollt werden. Bei dem Abrollen behalten die Produkte z.T. die auf der Rolle aufgenommene leicht gebogene Form, die die Ergebnisse der Prüfungen der von der Rolle entnommen Messproben wesentlich beeinflussen kann.

Verbundfestigkeit der Geoverbundstoffe

Die in der Zug-Scherprüfung ermittelten Verbundfestigkeiten der Verbundstoffe sind sowohl bei den Erosionsschutzmatten als aus bei den Geomatten mit erheblichen Streuungen verbunden. Die starke Streuung kann z.T. damit erklärt werden, dass für die Probenvorbereitung laut Norm eine verbundene Strecke von nur 100 mm geprüft wird, die bedingt durch die Probenvorbereitung ggf. vorbelastet wurde. Eine etwas längere verbundene Strecke der Messprobe könnte eventuell die Streuung herabsetzen. Weitere Prüfungen wären hierfür notwendig.

4.3.2.3 Hydraulische Eigenschaften

Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene

Die Prüfmethode nach DIN EN ISO 11058 für die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene war nicht an jedem Produkt anwendbar. Eine Holzwoll-Matte (Material 48) und die Strohmatten (Materialien 16 und 34) zerfielen bei der Probenvorbereitung bzw. beim dem Einbau der Messproben in die Einspannvorrichtung des Messgeräts dermaßen, dass eine Prüfung nicht möglich war.

4.3.2.4 Hygrische Eigenschaften

Die neu entwickelten Prüfverfahren zur Bestimmung des Wasseraufnahmeverhaltens (Methode Eintauchen und Beregnen) und der Dickenänderung nach Wasserlagerung konnten wie angedacht für die Erosionsschutzprodukte angewendet werden.

Es wäre noch vom Interesse eine neue Prüfmethode zu entwickeln, die über die Wasserabgabefähigkeit der Produkte quantitative Ergebnisse liefern kann. Angedacht ist dabei eine Prüfung, wo das Produkt nach einer Wassersättigung auf einem sandigen Boden gelagert wird und die Wasserabgabe über die Zeit durch Auswiegen des Produktes ermittelt wird.

4.3.2.5 Vegetationsrelevante Eigenschaften

<u>Öffnungsweite</u>

Die neu entwickelte Testmethode mit Glaskugeln hat sich für die Ermittlung der Öffnungsweite der bisher geprüften Produkten insgesamt als geeignet erwiesen. Problematisch kann allerdings die Prüfung von Produkten sein, die keine ausreichend feste Struktur besitzen, wie z.B. das Jute-Gewebe. Bei der Prüfung des Jute-Gewebes wurde beobachtet, dass insbesondere die größeren Kugeln (Durchmesser 20 mm) die Stränge des Gewebes bei dem Siebvorgang auf die Seite drücken und durch das Produkt fallen. Bei diesen "zweidimensionalen Produkten" ist jedoch eine optische Vermessung ausreichend.

Lichttransmission

Die Prüfmethode ist für Ermittlung der Lichtdurchlässigkeit von Produkten am besten geeignet, die im Vergleich zur Abmessung der Öffnung des Prüfgerätes zum Lichtdurchgang relativ kleine Öffnungen zum Lichtdurchgang haben. Bei Produkten mit größeren Öffnungsweiten bzw. Perforationen kann eine repräsentative Prüffläche schwierig bis gar nicht erfasst werden.

Verdunstungsschutz

Mit der neu entwickelten Prüfmethode konnte unter den Erosionsschutzprodukten bezüglich des Verdunstungsschutzes deutlich differenziert werden. Eine Steigerung der Genauigkeit der Prüfmethode könnte evtl. durch eine kontrollierte Luftbewegung, z.B. durch einen oberhalb der Behälteröffnung installierten Ventilator erreicht werden, um eine gleichmäßige Abfuhr der Wasserdämpfe zu gewährleisten.

4.3.2.6 Beständigkeitsprüfungen

Witterungsbeständigkeit

Die verwendete Methode zur Bestimmung der Witterungsbeständigkeit nach DIN EN 12224 ist bereits eine bewährte Prüfung für Geokunststoffe. Die nachgewiesene Bewitterungsbe-

ständigkeit ist auf zwei Sommermonate in Mittel-Europa beschränkt. Es wäre von Interesse, die Witterungsbeständigkeit auf die gesamte angedachte Lebensdauer eines Produktes nachzuweisen. Die Beanspruchungsdauer für den Nachweis von einem Jahr Witterungsbeständigkeit im Freien würde im QUV-Gerät ca. 3000 h betragen.

Mikrobiologische Abbaubarkeit

Momentan liegen noch keine Vergleichswerte darüber vor, welcher Dauer vor Ort die Einlagerungsdauer von 16 Wochen nach DIN EN 12225 entspricht. In der ersten Näherung wird davon ausgegangen, dass mit dieser Erdeingrabungsdauer ca. 1 Jahr Lebensdauer gegenüber mikrobiologischen Abbau nachgewiesen werden kann.

Es wäre auch bei der Prüfung der mikrobiologischen Beständigkeit vom Interesse, die gesamte angedachte Lebensdauer nachzuweisen.

Als Kriterium für die Beurteilung der o.g. Beständigkeitsprüfungen kann z.B. die Rest-Zugfestigkeit von 50 % herangezogen werden.

4.3.3. Zusammenfassende Bewertung der ermittelten Produkteigenschaften

Die verschiedenen Erosionsschutzprodukte weisen bedingt durch ihre Rohstoffe und Herstellungsverfahren sogar innerhalb einer Erosionsschutzsystemvariante wesentliche Unterschiede in ihren Eigenschaften auf.

4.3.3.1 Physikalische Eigenschaften

Die ermittelten Werte für Dicke, flächenbezogene Masse und Porosität sind produktspezifische Eigenschaften und können für die Produktidentifikation genutzt werden.

4.3.3.2 Mechanische Eigenschaften

Zugfestigkeit

Die Zugfestigkeit der Produkte unterscheidet sich je nach Erosionsschutzsystem und nach Rohstoff (**Tab. 4-13**). Erosionsschutzgewebe aus Jute und Kokos haben im Vergleich zu den Erosionsschutzmatten aus natürlichen Rohstoffen wesentlich höhere Zugfestigkeit und können damit für die Böschungsstabilisierung in höherem Maß beitragen. Die höchste Zugfestigkeit besitzen die Produkte mit hochfestem Geogitter, die auch für eine Bewehrungsfunktion angedacht sind.

Zugfestigkeit (MD) nach DIN EN ISO 10319	Ergebnis
Erosionsschutzmatten	
- Kokos, Stroh/Kokos, Stroh, Esparto, Seegras, Holzwolle	1 bis 3 kN/m
- Kunststofffaser	14 kN/m
Geomatten (auch in Kombination mit Geogitter)	1 bis 55 kN/m
Erosionsschutzgewebe (Jute, Kokos)	10 bis 14 kN/m
Erosionsschutzvliesstoffe	0,2 bis 3 kN/m

Tab. 4	4-13 :	Zugfestigke	it der ge	eprüften	Erosionsso	chutzprodukte
	-					

Biegsamkeit

Die Biegsamkeit variiert sich ebenfalls je nach Erosionsschutzsystem und nach Rohstoff der Produkte (**Tab. 4-14**). Die Erosionsschutzvliesstoffe, die Erosionsschutzgewebe und die Erosionsschutzmatten aus natürlichen Rohstoffen sind im Durchschnitt mehr biegsam als die

Kunststoffprodukte und können damit die Unebenheiten der Bodenoberfläche besser abbilden. Dies ist dann von besonderer Bedeutung, wenn das Produkt auf dem Oberboden ohne Bodenabdeckung verlegt wird und die Vegetation durch das Erosionsschutzprodukt durchwachsen muss. Die Ergebnisse auf dem Testfeld Biebelried haben gezeigt, dass Hohlräume zwischen Erosionsschutzprodukt und Oberboden die Vegetationsentwicklung nachteilig beeinflussen können (s. Abschnitt 4.1.4).

Tabelle 4-14: Biegsamkeit

Biegsamkeit in Anl. an ASTM D 1388	Biegungslänge c in mm
Erosionsschutzmatten	
- Kokos, Stroh/Kokos, Stroh, Esparto, Seegras, Holzwolle	64 bis 96
- Kunststofffaser	>175
Geomatten (auch in Kombination mit Geogitter)	59 bis >175
Erosionsschutzgewebe (Jute, Kokos)	17 bis 116
Erosionsschutzvliesstoffe (ohne Perforation)	50 bis 104

Verbundfestigkeit

Die Werte für die Verbundfestigkeit der Erosionsschutzmatten aus natürlichen Rohstoffen liegen zum Teil unterhalb von 0,1 kN/m, die als äußerst niedrig anzusehen sind. Die Werte sind bei mehreren Produkten mit enormer Streuung der Einzelmesswerte verbunden. Es wäre für die Qualitätssicherung der Produkte vom Vorteil, das Zusammenhalten der betroffenen Produkte stärker und gleichmäßiger zu gestalten.

Druckstauchungsverhalten, Rückstellverhalten, Dämpfungsverhalten

Das Druckstauchungsverhalten zeigt auch innerhalb einer Erosionsschutzvariante signifikante Unterschiede auf (**Tab. 4-15**), das von dem Rohstoff des Produktes und von der Produktgestaltung abhängig ist. Diese Aussage gilt auch für das Rückstellverhalten (**Tab. 4-16**) und das Dämpfungsverhalten der Produkte (**Tab. 4-17**).

Tabelle 4-15: Druckstauchungsverhalten

Druckstauchungsverhalten in Anl. an DIN EN ISO 25619-2	Druckstauchung in % bei σ = 20 kPa
Erosionsschutzmatten	
- Kokos, Stroh/Kokos, Stroh, Esparto, Seegras, Holzwolle	32 bis 48
- Kunststofffaser	62
Geomatten (auch in Kombination mit Geogitter)	21 bis 86
Erosionsschutzvliesstoffe (PLA, Schafwolle, PLA/Schafwolle-Gemisch) *)	30 bis 64

*) ohne Perforation

Tabelle 4-16: Rückstellverhalten

Rückstellverhalten nach SKZ EC 6	Druckverformungsrest (DVR) in %
Erosionsschutzmatten	
- Kokos, Stroh/Kokos, Stroh, Esparto, Seegras, Holzwolle	20 bis 31
- Kunststofffaser	35
Geomatten (auch in Kombination mit Geogitter)	8 bis 62
Erosionsschutzvliesstoffe (PLA, Schafwolle, PLA/Schafwolle-Gemisch) *)	10 bis 33

*) ohne Perforation

Dämpfungsverhalten in Anl. an DIN EN 1177 (Fallhöhe = 60 mm)	max. Beschleunigung in g (1 g = 9,81 m/s ²)
Erosionsschutzmatten	
- Kokos, Stroh/Kokos, Stroh, Esparto, Seegras, Holzwolle	118 bis 295
- Kunststofffaser	96
Geomatten (auch in Kombination mit Geogitter)	60 bis 228
Erosionsschutzgewebe (Jute, Kokos)	57 bis 187
Erosionsschutzvliesstoffe (PLA, Schafwolle, PLA/Schafwolle-Gemisch) $^{\ast)}$	188 bis 228

Tabelle 4-17: Dämpfungsverhalten

*) ohne Perforation

4.3.3.3 Hydraulische Eigenschaften

Die Erosionsschutzprodukte aus Kunststoffen können bedingt ihrer Strukturgestaltungsmöglichkeiten ggf. wesentlich mehr Wasser in ihrer Ebene ableiten oder normal zur Ebene durchlassen als die Produkte aus natürlichen Rohstoffen (**Tab. 4-17** und **Tab. 4-19**).

Tabelle 4-18: Wasserableitvermögen

Wasserableitvermögen nach DIN EN ISO 12958 (MD, 5 kPa, i = 0,5)	Wasserableitvermögen in l/(m⋅s)
Erosionsschutzmatten	
- Kokos, Stroh/Kokos, Stroh, Esparto, Seegras, Holzwolle	0,04 bis 0,91
- Kunststofffaser	3,39
Geomatten (auch in Kombination mit Geogitter)	0,48 bis 5,62
Erosionsschutzvliesstoffe (PLA, Schafwolle, PLA/Schafwolle-Gemisch) *)	0,01 bis 0,08
*) ohne Perforation	

Tabelle 4-19: Wasserdurchlässigkeit

Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene nach DIN EN ISO 11058 ($\Delta h = 10 \text{ mm}$)	Wasserdurchlässigkeit in l/(m²⋅s)
Erosionsschutzmatten	
- Kokos, Stroh/Kokos, Stroh, Esparto, Seegras, Holzwolle	35 bis 153
- Kunststofffaser	164
Erosionsschutzvliesstoffe (PLA, Schafwolle, PLA/Schafwolle-Gemisch) *)	10 bis 16

*) ohne Perforation

4.3.3.4 Hygrische Eigenschaften

Wasseraufnahmekapazität

Die ermittelte Wasseraufnahmekapazität der Erosionsschutzprodukte hängt stark von ihren Rohstoffen und von der verwendeten Prüfverfahren ab (**Tab. 4-20** und **Tab. 4-21**).

Bei dem Verfahren Eintauchen für 24 h können die Messproben bis zur vollständigen Sättigung Wasser aufnehmen und weisen damit bei den Produkten aus natürlichen Rohstoffen wesentlich höhere Werte für die Wasseraufnahmekapazität auf als die mit dem Verfahren Beregnen ermittelten. Sehr hohe Wasserspeicherkapazität besitzen die Produkte aus den Rohstoffen Schafwolle (bis zu 2660 % (Verfahren Eintauchen)) und PLA (2478 % (Verfahren Eintauchen)).

Wasseraufnahmekapazität nach SKZ EC 3-1, Verfahren: Eintauchen in Wasser für 24 h		
Erosionsschutzmatten		
Kokos	1324 bis 1481 %	4,0 bis 4,3 l/m²
Kokos/Stroh	706 bis 1273 %	3,0 bis 4,9 l/m²
Stroh	713 bis 731 %	1,9 bis 2,1 l/m²
Esparto	957 %	2,2 l/m²
Seegras	811 %	7,4 l/m²
Holzwolle	287 bis 384 %	1,2 bis 1,5 l/m²
Kunststofffaser	68 %	0,5 l/m²
Hangfaschine		
Schafwolle (unbehandelt)	406 %	33,6 * ⁾ l/m²
Erosionsschutzvliesstoffe		
Schafwolle	1147 bis 2660 %	5,4 bis 13,3 l/m²
PLA (aus Maisstärke)	2478 %	13,8 l/m²
PLA/Schafwolle-Gemisch	970 %	4,8 l/m²

Tabelle 4-20: Wasseraufnahmekapazität, Verfa	ahren: Eintauchen
----------------------------------------------	-------------------

*) entspricht 6,7 l/m² bezogen auf das verlegte Produkt

Tabelle 4-21: Wasseraufnahmekapazität, Verfahren: Bereg	nen

Wasseraufnahmekapazität nach Sk	KZ EC 3-2, Verfahren: Be	regnen: 30 min, 60 mm/h
Erosionsschutzmatten		
Kokos	249 bis 306 %	0,8 bis 0,9 l/m²
Kokos/Stroh	328 bis 257 %	1,0 bis 1,3 l/m²
Stroh	442 bis 500 %	1,0 bis 1,5 l/m²
Esparto	362 %	0,8 l/m²
Seegras	366 %	1,9 l/m²
Holzwolle	228 bis 364 %	1,0 bis 1,1 l/m²
Kunststofffaser	154 %	1,2 l/m²
Hangfaschine		
Schafwolle (unbehandelt)	75 %	6,1 * ⁾ l/m²
Erosionsschutzvliesstoffe		
Schafwolle	305 bis 463 %	1,6 bis 2,1 l/m²
PLA (aus Maisstärke)	341 %	2,0 l/m²
PLA/Schafwolle-Gemisch	431 %	2,2 l/m²

*) entspricht 1,2 I/m² bezogen auf das verlegte Produkt

<u>Quellverhalten</u>

Die ermittelten Messwerte für das Quellverhalten nach Wasserlagerung sind stark produktabhängig und unterscheiden sich sogar innerhalb einer Erosionsschutzsystemvariante bei gleichem Rohstoff (**Tab. 4-22**). Das Quellverhalten könnte für die Produktidentifikation verwendet werden.

Tabelle 4-22: Quellverhalten

Dickenänderung nach Wasserlagerung (24 h) nach SKZ EC 4		
Erosionsschutzmatten		
Kokos	11 bis 19 %	
Kokos/Stroh	13 bis 42 %	
Stroh	30 bis 55 %	
Esparto	6 %	
Seegras	60 %	
Holzwolle	48 bis 111 %	
Erosionsschutzvliesstoffe		
Schafwolle	-24 ¹⁾ bis 1 %	
PLA (aus Maisstärke)	-6 % ¹⁾	
PLA/Schafwolle-Gemisch	-4 % ¹⁾	

¹⁾ Die Dicke nahm nach der Wasserlagerung ab.

4.3.3.5 Vegetationstechnische Eigenschaften

Auch mit der Prüfung der vegetationstechnisch relevanten Eigenschaften konnten deutliche Unterschiede der Erosionsschutzprodukten nachgewiesen werden (**Tab. 4-23** bis **4-25**). Die breite Bandbreite der Öffnungsweite, die im ersten Schritt an fünf auf dem Testfeld Biebelried verlegten Erosionsschutzprodukten ermittelt wurden, deutet darauf hin, das die Erosionsschutzprodukten durch ihre verschiedenen Öffnungen in sehr unterschiedlichem Maß auf die Vegetationsentwicklung auswirken können. Die Lichtdurchlässigkeit insbesondere bei den nicht perforierten Erosionsschutzvliesstoffen und bei den Erosionsschutzmatten aus natürlichen Rohstoffen sehr gering (unter 10 %). Die Geomatten weisen dagegen deutlich höhere Lichtdurchlässigkeiten bis zu 68 % auf. Die Geomatten können allerdings die Feuchtigkeit wesentlich weniger im Boden zurückhalten (Verdunstungsschutz <20 %) als die Erosionsschutzgewebe (Verdunstungsschutz bis zu 59 %).

Tabelle 4-23: Öffnungsweite

Öffnungsweite nach SKZ EC 8		
Erosionsschutzprodukt	Öffnungsweite in mm	
Stroh/Kokos-Matte (Material 40)	3,3	
Kokosmatte/Geomatte-Verbund (Material 20)	<1	
Geomatte (Material 21)	7,2	
Kokos-Gewebe (Material 15)	7,4	
Jute-Gewebe (Material 17)	18,8 bis >19	

Tabelle 4-24: Lichtdurchlässigkeit

Lichtdurchlässigkeit nach ASTM D 6567	Ergebnis
Erosionsschutzmatten	
- Kokos, Stroh/Kokos, Stroh, Esparto, Seegras, Holzwolle	< 10 %
- Kunststofffaser	11 %
Geomatten (auch in Kombination mit Geogitter)	28 bis 68 %
Erosionsschutzgewebe (Jute, Kokos)	16 bis 45 %
Erosionsschutzvliesstoffe (PLA, Schafwolle, PLA/Schafwolle-Gemisch) *)	< 2 %
*) alwas Daufaustian	1

*) ohne Perforation

Tabelle 4-25: Verdunstungsschutz

Verdunstungsschutz nach SKZ EC 2	Ergebnis
Erosionsschutzmatten	
 Kokos, Stroh/Kokos, Stroh, Esparto, Seegras 	53 bis 59 %
- Holzwolle	31 bis 43 %
- Kunststofffaser	35 %
Geomatten (auch in Kombination mit Geogitter)	< 30 %
Geogewebe (Jute, Kokos)	31 bis 43 %
Erosionsschutzvliesstoffe (PLA, Schafwolle, PLA/Schafwolle-Gemisch) $^{*)}$	56 bis 62 %
*) ohne Perforation	

4.3.3.6 Beständigkeitsprüfungen

Witterungsbeständigkeit

Die Restfestigkeit der die Erosionsschutzprodukte zusammenhaltenden PP-Netze deckt die gesamte Breite von 0 % (völlige Zerstörung der Messproben während der Bewitterung) bis

zu keiner Abnahme der Zugfestigkeit im Vergleich zum Ausgangszustand ab (**Tab. 4-26**). Das bedeutet, dass die Produkte deren PP-Netze nach 430 h Bewitterung im QUV-Gerät keine ausreichende Restfestigkeit besitzen, könnten innerhalb von zwei Monaten im Freien (in Mittel-Europa) durch die UV-Strahlung ihre strukturelle Integrität verlieren und damit ihre Funktion als Erosionsschutz nicht mehr erfüllen.

Die ermittelten sehr unterschiedlichen Restfestigkeiten von den PP-Netzen hängen mit den unterschiedlichen Stabilisierungen des Rohstoffes PP gegenüber UV-Strahlung zusammen.

Die Restfestigkeiten der bewitterten Jute-Netze der Erosionsschutzmatten liegen im Bereich 15 bis 38 %, die ebenfalls als niedrig zu beurteilen sind.

Die Restfestigkeiten der Geomatten und der Geomatte/Geogitter-Verbundstoffe liegen alle im Bereich > 86 %, was im allgemeinen auf eine höhere Stabilisierung der Produkte gegenüber UV-Strahlung hindeutet.

Witterungsbeständigkeit nach DIN EN 12224 (50 MJ/m²)	Restfestigkeit in %
Erosionsschutzmatten	
- nur PP-Netz	0 bis >100
- nur Jute-Netz	15 bis 38
Geomatten (auch in Kombination mit Geogitter)	86 bis >100
Erosionsschutzgewebe	
- Jute	67
- Kokos	59 bis 66
Erosionsschutzvliesstoffe	
- PLA	>>100 (210)
- Schafwolle	24
- PLA/Schafwolle-Gemisch	49
Witterungsbeständigkeit in Anl. an DIN EN ISO 877 (1 Jahr im Freien)	Restfestigkeit in % nach 1 Jahr Freibewitterung
Erosionsschutzgewebe	
- Jute	23
- Kokos	30
Erosionsschutzvliesstoffe	
- PLA	>>100 (484)

Tabelle 4-26: Witterungsbeständigkeit

Bei dem Erosionsschutzvliesstoff aus PLA stieg die Restfestigkeit bei der Bewitterung im QUV-Gerät auf einen Wert von 169 % und auf einem Wert von erheblichen 484 % bei der 1järigen Freibewitterung.

Mikrobiologische Beständigkeit

Interessante Ergebnisse lieferten die Untersuchungen zur mikrobiologischen Beständigkeit (**Tab. 4-27**). Geprüft wurden die Produkte aus reinen natürlichen Rohstoffen bzw. die Erosionsschutzmatten aus natürlichen Rostoffen jedoch mit PP-Netz zusammengehalten.

Das Jute-Gewebe bzw. die Produkte mit Jute-Netz zusammengehalten wurden während der Erdeingrabung von 16 Wochen vollständig zerstört. Das Kokos-Gewebe besaß dagegen noch erhebliche 75 bis 88 % Restfestigkeit. Die Restfestigkeit des Erosionsschutzvliesstoffes

aus PLA (Biokunststoff aus Maisstärke) ist enorm angestiegen und hat einen Wert von 210 % erreicht.

Um eine ausreichende Qualität und Funktionsfähigkeit der Produkte abzusichern, sollte bezüglich der Witterungsbeständigkeit und der mikrobiologischen Beständigkeit die angedachte Lebensdauer nachgewiesen werden.

Tahelle	4-27·	Mikrobiologische	Reständiakeit
Ianelle	4-21.	INIT ODIOIOGISCHE	Destanulykeit

Mikrobiologische Beständigkeit nach DIN EN 12225	Restfestigkeit in % nach 16 Wochen Erdeingrabung
Erosionsschutzmatten	
- mit PP-Netz verbunden	63 bis >100
- mit Jute-Netz verbunden	0 bis 1
Erosionsschutzgewebe	
- Jute	0
- Kokos	75 bis 88
Erosionsschutzvliesstoffe	
- PLA	>>100 (210)
- Schafwolle	24
- PLA/Schafwolle-Gemisch	49

Schwelwiderstand

Der Schwelwiderstand der Erosionsschutzprodukte hängt einerseits von dem Rohstoff des Produktes andererseits von der Produktstruktur ab (s. **Tab. 4-28**). Produkte aus natürlichen Rohstoffen haben im Durchschnitt wesentlich geringeren Schwelwiderstand als die aus synthetischen Materialien hergestellten Produkte. Öffnungen im Produkt wie z. B. bei Jute-Gewebe können die Ausbreitung des Glühens einschränken.

Tabelle 4-28 : Schweiwiderstand (Zigaretten-Tes	Tabelle 4-28	: Schwelwiderstand	(Zigaretten-Test)
--------------------------------------------------------	--------------	--------------------	-------------------

Schwelwiderstand nach ECTC TMG 5.14	Länge der verbrannten Strecke in mm	
Erosionsschutzmatten		
- Kokos	11 bis 18	
- Stroh/Kokos	3 bis 135	
- Stroh	12 bis 28	
- Esparto, Seegras	4	
- Holzwolle	8 bis 9	
- Kunststofffaser	5	
Geomatten (auch in Kombination mit Geogitter)	0 bis 4	
Erosionsschutzgewebe		
- Jute	2	
- Kokos	15 bis 178	
Erosionsschutzvliesstoffe		
- PLA, Schafwolle, PLA/Schafwolle-Gemisch	3 bis 10	

<u>Brandverhalten</u>

Alle geprüften Erosionsschutzprodukte wurden der Klasse F nach DIN EN 13501-1 zugeordnet. Das bedeutet, dass die Produkte leicht entflammbar sind.

4.3.3.7 Kategorisierung der Eigenschaften der Erosionsschutzprodukte

Um eine Einschätzung der Eigenschaften bzw. um die Auswahl eines standortgerechten Produktes zu erleichtern, wurden die Eigenschaften in drei Kategorien eingeteilt (**Tab. 4-29**).

Die Grenzen zwischen den einzelnen Kategorien (niedrig, mittel und hoch) wurden unter Berücksichtigung der ermittelten Messwerte der im Rahmen der Laboruntersuchungen geprüften Erosionsschutzprodukten festgelegt.

Eigenschaft / Prüfmethode	Einheit	niedrig	mittel	hoch
Zugfestigkeit DIN EN ISO 10319	kN/m	< 5	5 bis 20	> 20
Biegesteifigkeit in Anl. an ASTM D 1388 Biegungslänge c	mm	<100	100 bis 175	>175
Verbundfestigkeit von Geozellen DIN EN ISO 13426-2				
Verfahren A (Zug-Scherprüfung)	Ν	<1000	1000 bis 1500	>1500
Verfahren B (Schälbeanspruchung)	Ν	<500	500 bis 1000	>1000
Verfahren C (Haftfestigkeitsprüfung)	Ν	<1000	1000 bis 2000	>2000
Verfahren D (Rundstabprüfung)	Ν	<1500	1500 bis 2500	>2500
Verbundfestigkeit von Geoverbundstoffe DIN EN ISO 13426-2	kN/m	<0,2	0,2 bis 0,5	>0,5
Druckstauchung in Anl. an DIN EN ISO 25619-2	%	<30	30 bis 50	>50
(σ = 20 kPa)				
Rückstellverhalten SKZ EC 6				
Druckverformungsrest (DVR)	%	<20	20 bis 40	>40
Dämpfungsverhalten in Anl. an DIN EN 1177				
max. Beschleunigung in g (1 g = 9,81 m/s ²)	g	<100	100 bis 200	>200
Wasserableitvermögen DIN EN ISO 12956 (5 kPa, i = 0,5)	l/(m⋅s)	<0,5	0,5 bis 2	>2
Wasserdurchlässigkeit DIN EN ISO 11058 (Δ h = 10 mm)	l/(m²⋅s)	<50	50 bis 150	>150
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen) SKZ EC 3-1	%	<500	500 bis 1000	>1000
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen) SKZ EC 3-2	%	<200	200 bis 400	>400
Öffnungsweite SKZ EC 8	mm	<5	5 bis 15	>15
Lichtdurchlässigkeit ASTM D 6567	%	<10	10 bis 30	>30
Verdunstungsschutz SKZ EC 2	%	<20	20 bis 50	>50
Witterungsbeständigkeit DIN EN 12224 (50 MJ/m ²) Restfestigkeit	%	<70	70 bis 90	>90
Witterungsbeständigkeit, Freibewitterung in Anl. an DIN EN ISO 877 (1 Jahr)				
Restfestigkeit	%	<50	50 bis 80	>80
Mikrobiologische Abbaubarkeit DIN EN 12225 Restfestigkeit	%	<50	50 bis 80	>80
Schwelwiderstand ECTC TGM 5.14 Länge der verbrannten Strecke	mm	>10	5 bis 10	<5

 Tabelle 4-29:
 Einteilung der Erosionsschutzprodukte bezüglich ihrer Eigenschaften

4.4. Ergebnisse der Beregnungstests

4.4.1. Vorversuche mit den Testböden

Vor Beginn der eigentlichen Untersuchungen wurden drei ausgewählte Bodenmaterialien (Testboden A, B und C) jeweils in ein Böschungsmodell eingebaut und ohne Erosionsschutzsystem einer intensiven Testberegnung unterzogen (**Abb. 4-32** bis **4-34**):

Beregnungsdauer:420 MinutenRegenintensität:60 mm/h

Neigung des Böschungsmodells: 1:1,5 (= Regelböschung)

Randbedingungen: Wassergehalt zu Beginn der Beregnung liegt bei der jeweiligen bodenartspezifischen Feldkapazität.



Abbildung 4-32: Dauerberegnung, "Sand" (Testboden A) - die Wassererosion hat sehr deutliche Spuren im sandigen Substrat hinterlassen



Abbildung 4-33: Dauerberegnung, "Lehm" (Testboden B)



Abbildung 4-34: Dauerberegnung, "Ton" (Testboden C)

Die Messungen des Bodenabtrages ergaben folgendes Ergebnis:

Sand (Testboden A): 16,9 kg

Lehm (Testboden B): 4,8 kg

Ton (Testboden C): 4,6 kg *)

*) jedoch mit schluffigen und sandigen Einlagerungen, daher der hohe Wert für den Bodenabtrag

Die Voruntersuchungen ergaben, dass der schwach schluffige Sand die größte Erosionsgefährdung aufweist. Dies steht nicht im Einklang mit den Abschätzungen bezüglich der Erosionsgefährdung nach der Bodenkundlichen Kartieranleitung für die im Versuch verwendeten Bodenarten, die sich allerdings auf "natürlich" gelagerte Böden bezieht. Der Grund liegt hier in den massiven Veränderungen der Böden bzw. Bodenmaterialien durch die Erdarbeiten -*Aushub des Bodens – Lagerung in Mieten – erneuter Aushub der Miete – Einbau in das Böschungsmodell*^{**)}.

**⁾ Auf Baustellenverhältnisse bezogen bedeutet der letzte Schritt den Einbau als Vegetationstragschicht auf der Böschung.

4.4.2 Messungen im unbegrünten Zustand

Bei den im Test eingesetzten Erosionsschutzsystemen kann zwischen zwei hauptsächlichen Bauweisen unterschieden werden:

<u>Bauweise "mit Boden überdeckt":</u> Geozelle (Material 24), Schafwollfaschine (Material 25), Kokosmatte/GMA-Verbund (Material 20)

<u>Bauweise "auf Boden verlegt":</u> Geomatte (Material 21), Geomatte (Material 7), Stroh-Kokosmatte (Material 40), Jute-Gewebe (Material 17), Kokos-Gewebe (Material 15).

Die Messungen haben gezeigt, dass die Leistungsfähigkeit hauptsächlich von der Bauweise abhängt. Die nachfolgenden Grafiken (**Abb. 4-35** bis **4-37**) zeigen alle Ergebnisse als Mittelwerte aus drei Systemen ("mit Boden überdeckt") bzw. fünf Systemen ("auf Boden verlegt") für die eingesetzten Bodenarten bezogen auf die o. g. Bauweisen.



Abbildung 4-35: Mittelwerte des Bodenabtrags von unterschiedlichen Bauweisen bei Regelböschung (1:1,5): Bodenart "Sand" (Testboden A) für drei Regenintensitäten







Abbildung 4-37: Mittelwerte des Bodenabtrags von unterschiedlichen Bauweisen bei Regelböschung (1:1,5): Bodenart "Ton" (Testboden C) für drei Regenintensitäten

Die Messungen zeigen deutliche Unterschiede zwischen den beiden Bauweisen. Lediglich die "auf Boden verlegten" Systeme bieten im herkömmlichen Sinne einen klassischen Erosionsschutz. Der Bodenabtrag wird im Mittel bodenartspezifisch um 75 % bis 95 % vermindert. Die anderen Systeme hingegen, wo der Boden "offen" bleibt, zeigen keinerlei erosionsmindernde Wirkung gegenüber der Nullvariante ohne Erosionsschutzsystem.

Der Grund liegt darin, dass Geozellen und Faschinen gemäß Einbauvorschrift mit einer dünnen Bodenschicht übererdet werden. Das Bodenmaterial in den Kammern/Zellen ist gegen Abtragung geschützt, während die darüber liegende Bodenschicht bei Regen erodieren kann. Die Erosionsschutzmatte Kokosmatte/GMA-Verbund (Material 20) ist ebenfalls "im Boden verlegt", d. h. mit einer dünnen Schicht Oberboden übererdet.

Beide Bauweisen sind in ihrer Wirkungsweise nicht mit einander vergleichbar. Daher wird nachfolgend bei der differenzierten Betrachtung zwischen beiden Bauweisen unterschieden.

4.4.2.1 Bauweise "mit Boden überbedeckt"

Eine erosionsmindernde Wirkung der drei untersuchten Systeme im Beregnungsversuch ist nicht nachweisbar (**Abb. 4-38** bis **4-40**).

Die Wirkungsweise der Systeme ist auch eine ganz andere:

Geozellen und Faschinen sind im eigentlichen Sinne mehr als eine Bewehrung des Oberbodenauftrags auf der Rohböschung zu verstehen. Diese bieten eine Stabilisierung des Bodenaufbaues gegen hangabwärts gerichtete Kriech- und Gleitbewegungen auf der (potentiellen) Gleitfläche zwischen Rohböschung und aufgetragener Oberbodenschicht.



Abbildung 4-38: Mittelwerte des Bodenabtrags der Erosionsschutzsysteme "mit Boden überdeckt", Bodenart "Sand" (Testboden A) für drei Regenintensitäten (Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle)



Abbildung 4-39: Mittelwerte des Bodenabtrags der Erosionsschutzsysteme "mit Boden überdeckt", Bodenart "Lehm" (Testboden B) für drei Regenintensitäten (Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle)



Abbildung 4-40: Mittelwerte des Bodenabtrags der Erosionsschutzsysteme "mit Boden überdeckt", Bodenart "Ton" (Testboden C) für drei Regenintensitäten (Mat. 20: Kokosmatte/GMA-Verbund, Mat. 24: Geozelle, Mat. 25: Schafwollfaschine, 0: Ref.-Parzelle)

Das in die Zellen/Waben eingefüllte Material soll in den Zellen/Waben auf der Böschung festgehalten und gegen Ausspülung geschützt werden. Geozellen und Faschinen würden ihre Wirkung vor allem bei katastrophalen punktuellen Wasserzutritten in einer Böschung beweisen können. Punktuelle Wasserzutritte in eine Böschung, wie beispielsweise auf dem Testfeld Biebelried vorhanden, waren jedoch nicht Ziel dieser Versuchsanordnung. Sofern keine weiteren Schutzmaßnahmen für den Oberboden vorgesehen sind, ist daher weiterhin mit oberflächiger Bodenerosion bei Starkregenereignissen zu rechnen, solange bis die Vegetation den Erosionsschutz wirksam übernimmt.

Der Kokosmatte/GMA-Verbund (Material 20) entfaltet ihre erosionsmindernde Wirkung auch nur gegenüber der Bodenschicht unter der Matte. Die darüber liegende Schicht mit dem aufgebrachten Saatgut kann bei einem entsprechenden Starkregen immer noch abgespült werden. Ausspülungen unter der Matte (z. B. Quellerosion verursacht durch Wasserzutritte/einbrüche aus dem Fahrbahnoberbau in die Böschung hinein) können auch nicht verhindert werden.

4.4.2.2 Bauweise "auf Boden verlegt"

Die Erosionsschutzsysteme, die auf dem Boden verlegt sind (Beispiel s. **Abb. 4-41**), schützen den Oberboden sehr wirksam gegen Erosion durch Wasser (Ergebnisse s. **Abb. 4-42** bis **4-44**).



Abbildung 4-41: Erosionsmessung - Bauweise "auf Boden verlegt" am Beispiel des Material 15 (Kokos-Gewebe), ohne Begrünung



Abbildung 4-42: Mittelwerte des Bodenabtrags der Erosionsschutzsysteme "auf Boden verlegt", Bodenart "Sand" (Testboden A), mit Darstellung der Messwerte für die Referenzvariante ohne Erosionsschutzsystem für drei Regenintensitäten

(Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, 0: Ref.-Parzelle)



Abbildung 4-43: Mittelwerte des Bodenabtrags der Erosionsschutzsysteme "auf Boden verlegt", Bodenart "Lehm" (Testboden B), mit Darstellung der Messwerte für die Referenzvariante ohne Erosionsschutzsystem für drei Regenintensitäten



(Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, 0: Ref.-Parzelle)

Abbildung 4-44: Mittelwerte des Bodenabtrags der Erosionsschutzsysteme "auf Boden verlegt", Bodenart "Ton" (Testboden C), mit Darstellung der Messwerte für die Referenzvariante ohne Erosionsschutzsystem für drei Regenintensitäten

(Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe, 0: Ref.-Parzelle)

In der Leistungsfähigkeit der einzelnen Systeme gibt es jedoch Unterschiede, die in den nachfolgenden Grafiken differenziert für die Beregnungsstufen 20 mm/h und 60 mm/h herausgearbeitet sind (**Abb. 4-45** bis **4-47**).



Abbildung 4-45: Mittelwerte des Bodenabtrags der Erosionsschutzsysteme "auf Boden verlegt", Bodenart "Sand" (Testboden A) für zwei Regenintensitäten (Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe)



Abbildung 4-46: Mittelwerte des Bodenabtrags der Erosionsschutzsysteme "auf Boden verlegt", Bodenart "Lehm" (Testboden B) für zwei Regenintensitäten (Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe)





Material 21 (GMA) und Material 17 (Jute-Gewebe) weisen bei allen Bodenarten den höchsten Bodenabtrag auf. Als Ursache wird hier die im Vergleich zu den anderen Matten und Geweben größere Öffnungsweite und die offene Struktur gesehen (s. auch **Tab. 3-1**).

Aus den Messdaten für alle drei Bodenarten konnte so hinsichtlich der Schutzwirkung der "auf Bodenverlegten Erosionsschutzsysteme" eineinheitlicher Trend herausgearbeitet werden. Es gibt drei gleichwertige Systeme: GMA/GGR-Verbund (Material 7), Stroh/Kokos-Matte (Material 40) und Kokos-Gewebe (Material 15). Dem gegenüber fallen das Jute-Gewebe (Material 17) und die Geomate (Material 21) in der Schutzwirkung einer unbegrünten Böschung etwas zurück.

4.4.3 Messungen im begrünten Zustand

Als Referenzmessung und um den Einfluss der Vegetation auf jedes einzelne Produkt zu testen, wurden auch Messungen im begrünten Zustand durchgeführt. Die Systeme müssen nicht nur im Feldversuch auf der Böschung, sondern auch am Böschungsmodell ihre Begrünbarkeit zeigen (**Abb. 4-48**). Witterungsbedingungen spielen hierbei jedoch keine Rolle, sondern es wird nur die Begrünbarkeit unter optimalen Bedingungen getestet, wie sie allerdings unter realen Bedingungen in der Regel nicht gegeben ist. Die ungünstigen Voraussetzungen für die Begrünung, wie sie auf der Baustelle für den Feldversuch bestanden, sollten jedoch nicht nach empfunden werden.



Abbildung 4-48: Böschungsmodelle im begrünten Zustand vor Beginn der Referenzmessungen mit ≥ 60 % projektiver Deckung der Vegetation (= abnahmefähiger Zustand) am Beispiel der Erosionsschutzsysteme Kokosmatte/GMA-Verbund (Material 20), Geomatte (Material 21), GMA/GGR-Verbund (Material 7)

Ein Begrünungserfolg ist gegeben, sobald die projektive Deckung der Vegetation mindestens 60 % erreicht hat. Fremdarten, die nicht mit der Saatgutmischung ausgebracht worden sind, zählen nicht dazu. Abnahmekriterium ist auch eine gleichmäßige Bestandsentwicklung.

Die Erosionsschutzsysteme mit Bodenaufbau wurden in die Böschungsmodelle eingebaut. Als Bodenart für die Versuchsvariante mit Begrünung wurde die Bodenart "Lehm" (Testboden B) gewählt, wie sie auch auf den Testfeldern an der Autobahnböschung bei Biebelried als Vegetationstragschicht aufgebracht worden ist. Als Saatgutmischung wurde die RSM 7.2.1 ausgebracht.

Die Erosionsmessungen wurden einmal bei einer projektiven Deckung der Vegetation von ca. 30 % sowie nach Erreichen der Abnahmefähigkeit bei ca. 60 % durchgeführt. Die Testprozedur für die Beregnung mit Messung des Bodenabtrags entspricht der im Abschnitt 3.4.5 beschriebenen Vorgehensweise. Die Ergebnisse der Messungen zeigen die **Abb. 4-49** bis **4-54**.

















Abbildung 4-52: Bodenabtrag der Erosionsschutzsysteme "auf Boden verlegt", Bodenart "Lehm" (Testboden B) im begrünten Zustand, 30 % projektive Deckung (Begrünung: RSM 7.2.1) für drei Regenintensitäten Bodenabtrag ohne Erosionsschutz siehe Abb. 4-49 (Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe),







Abbildung 4-54: Bodenabtrag der Erosionsschutzsysteme "auf Boden verlegt", Bodenart "Lehm" (Testboden B) im begrünten Zustand, 60 % projektive Deckung (Begrünung: RSM 7.2.1) Bodenabtrag ohne Erosionsschutz siehe Abb. 4-50

(Mat. 21: GMA, Mat. 7: GMA/GGR-Verbund, Mat. 40: Stroh/Kokos-Matte, Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 15: Kokos-Gewebe)

Messungen des Bodenabtrags bei 30 % projektiver Deckung der Vegetation (Abb. 4-49, Abb. 4-51 und Abb. 4-52):

Eine Korrelation der Messwerte des Bodenabtrags zwischen der unbegrünten zur begrünten Variante ist aufgrund der wechselhaften Bodeneigenschaften problematisch. Der Lösslehm für den Bau der begrünten Varianten war durch geringeren Tonanteil deutlich erosionsanfälliger als bei den Beregnungsversuchen ohne Begrünung. Es zeichnet sich aber folgender Trend ab:

Systeme "mit Boden bedeckt/befüllt":

 Auch bei relativ geringer projektiver Deckung der Vegetation mindert die Vegetation den Bodenabtrag unter der Voraussetzung, dass die Vegetation gleichmäßige Deckung aufweist - negatives Beispiel: Böschungsmodell mit Colbond Geozellen: projektive Deckung insgesamt ca. 30 %, jedoch mit wechselnd dichten und "vegetationsarmen" Bereichen (s. Abb. 4-51).

Systeme "auf Boden verlegt":

- Die Vegetation mindert den Bodenabtrag beim Beregnungstest.
- Leistungsunterschiede zwischen den einzelnen Systemen werden geringer.

Messungen des Bodenabtrags bei 60 % projektiver Deckung der Vegetation (Abb. 4-50, Abb. 4-53 und Abb. 4-54):

Mit Ausnahme des Systems "Kokosmatte/GMA-Verbund (Material 20)" findet praktisch kein Bodenabtrag mehr statt. Die Ursache für den Bodenabtrag im Beregnungsversuch liegt in der ungleichmäßigen Bestandsentwicklung der Vegetation (s. **Abb. 4-55**) und hat nichts mit dem System an sich zu tun.



Abbildung 4-55: Erosionsschutzsystem Material 20 – lückige und ungleichmäßige Entwicklung der Vegetation

Die Messungen zeigen, dass bei 60 % projektiver Deckung und gleichmäßiger Bestandsentwicklung die Vegetation den Erosionsschutz übernimmt.

4.4.2. Kritische Bemerkungen und Folgerungen für die Praxis

4.4.2.1 Prüfverfahren

Ziel ist die Entwicklung eines standardisierten Prüfverfahrens. Daher müssen die Versuchsergebnisse und Beobachtungen auch kritisch beleuchtet werden. Als Prüfmittel wurden unterschiedlich erosionsanfällige Bodenmaterialien gewählt. Ein ähnliches Vorgehen ist auch in der ASTM D 6459 – 07 beschrieben.

Eignung von Bodenmaterialien für ein Prüfverfahren

Für die Verwendung von Bodenmaterialien für ein standardisiertes Prüfverfahren wurde ein Kriterienkatalog erarbeitet:

- Verfügbarkeit, ggf. Herstellung eines Korngemisches
- Verarbeitung: Lagerung, Aufbereitung, homogener Einbau (Bodenaggregate!)
- Vorbereitung der Testberegnung: herstellen des optimalen Feuchtezustandes
- Qualität der Ergebnisse, Möglichkeit der Klassenbildung

Nach den vorgenannten Kriterien wurden die im Versuch verwendeten Bodenarten bewertet.

Bodenart Ton (Testboden C):

Bodengefüge (s. Abb. 4-56):

- grobbrockiges Gefüge mit vielen Aggregaten
- hoher Anteil an Gröbst- und Grobporen (Makroporenfluss)
- sehr ungleichmäßige Porenraumverteilung
- <u>Problem:</u> natürliche Ablagerungsbedingungen in der Tonlagerstätte: mittelplastische Tone, wechsellagernd mit schluffig-sandigen Zwischenlagen; im Haufwerk finden sich daher ungleichmäßig verteilt grobbrockige Tonklumpen aus "mageren" Tonen.



Abbildung 4-56: Bodenart Ton (Testboden C) – Stechzylinderprobe, Seitenansicht

Bodenart Lehm (Testboden B):

Bodengefüge (s. Abb. 4-57 und Abb. 4-58):

- bröckeliges Gefüge mit vielen Aggregaten
- Hoher Anteil an Gröbst- und Grobporen (Makroporenfluss) mit sehr ungleichmäßiger Porenraumverteilung
- Hohe Infiltrationsrate bei Beregnung
- Verfestigungsgrad des Monolithe lose bis mittel ($D_{Pr} = 80 85 \%$)
- <u>Problem:</u> im Haufwerk ungleichmäßig verteilt tonige Unterbodenanteile (vom Lieferanten ist keine Trennung in Ober- und Unterboden erfolgt).



Abbildung 4-57: Bodenart Lehm (Testboden B), Seitenansicht des Monolithen



Abbildung 4-58: Bodenart Lehm (Testboden B), Oberfläche des Bodenmonolithen

Bodenart schwach schluffiger Sand (Testboden A):

Bodengefüge (s. Abb. 4-59 und Abb. 4-60):

- Einzelkorngefüge
- Anteil der Grobporen weitaus geringer
- Bodenoberfläche "glatt"
- Verfestigungsgrad des Monolithen lose bis sehr lose.



Abbildung 4-59: Bodenart schwach schluffiger Sand (Testboden A), Bodenmonolith Seitenansicht



Abbildung 4-60: Bodenart schwach schluffiger Sand (Testboden A), Oberfläche der Bodenprobe

Verfügbarkeit, ggf. Herstellen und Verbessern eines Korngemisches:

Für den Versuch wurden ausschließlich technisch nicht veränderte natürliche Bodenmaterialien bzw. Lockergesteine beschafft. Für ein standardisiertes Prüfverfahren ist es wichtig, dass die Beschaffenheit und die Eigenschaften der verwendeten Prüfboden nicht oder nur in engen Grenzen variieren.

Für Festlegungen im Rahmen eines Standard-Prüfverfahrens müssen die Beschaffenheit und technischen Eigenschaften eines Prüfboden zwecks Vergleichbarkeit von Untersuchungsergebnissen feststehen und eingehalten werden. Die örtliche bzw. regionale Verfügbarkeit darf dabei keine Rolle spielen.

Lockergesteine und Böden bzw. Bodenmaterialien werden in Sand,- Kies- und Tongruben abgebaut oder fallen als Aushub bei Erdarbeiten an. Durch die Ablagerungsverhältnisse, den Gewinnungsprozess, etc. ist eine einheitliche gleichbleibende Qualität hinsichtlich Korngrößenverteilung, Kornformen nicht gewährleistet, so dass eine Hauptforderung an ein standardisiertes Prüfmittel nicht eingehalten ist. Diese "Rohstoffe" müssten vor dem Einsatz erst untersucht und ggf. noch technisch aufbereitet werden. Als Standard-Prüfboden bietet sich daher ein qualitätskontrollierter Sand an.

Verarbeitung der Bodenmaterialien:

Vor Einbau in die Böschungsmodelle wurden die Bodenmaterialien im "Erdwolf" wie im Abschnitt 3.4.5 erwähnt aus versuchstechnischen Gründen zunächst homogenisiert und ggf. zerkleinert (s. **Abb. 3-38**).

Der Verwendung und vor allem der Einbau der bindigen Bodenarten bereitete im Versuch viele Probleme. Lehm und Ton wurden unter kontrollierten Bedingungen über mehrere Tage verteilt aufwändig für den Einbau vorbereitet. Völlig unproblematisch in der Bodenbehandlung und beim Einbau verhielt sich dagegen der sandige Oberboden.

Vorbereitung der Testberegnung – Herstellen des optimalen Feuchtezustandes

Bevor die Testberegnung mit den Erosionsmessungen beginnen kann, wird das im Böschungsmodell eingebaute Bodenmaterial auf einen Wassergehalt entsprechend der jeweiligen Feldkapazität gebracht (siehe auch Abschnitt 3.4.5 Testprozedur). Dieses Einstellen eines gleichmäßigen Wassergehaltes in der Bodenschicht war bei den verwendeten bindigen Bodenarten deutlich zeitaufwändiger als bei dem sandigen Bodenmaterial. Für die Messungen des Wassergehaltes wurde eine FDR-Sonde (= Einstichsonde, Messbereich: 6 cm) eingesetzt. Eine zuverlässige Messung ist nur gewährleistet, wenn die Sonde auch guten und gleichmäßigen Kontakt mit dem Umgebungsmedium hat. Die Messungen im sandigen Bodensubstrat waren – so der offensichtliche Eindruck – aufgrund der Gefügemerkmale wesentlich weniger störanfällig.

Qualität der Messergebnisse

Betrachtet werden hier nur die Erosionsmessungen im unbegrünten Zustand, da diese ausschlaggebend für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Erosionsschutzsystemen sind.

Die Qualität der Messdaten ist in diesem Beregnungsversuch abhängig vom einwandfreien technischen Zustand der Beregnungsanlage sowie von der Qualität des Prüfbodens. Die

Beregnungsanlage kann leicht kontrolliert und neu kalibriert und werden. Die Qualität der Messergebnisse hängt daher entscheidend von der Wahl des "richtigen" Prüfbodens als Standard-Substrat ab. Im Versuch wurde ausschließlich mit natürlichen, technisch nicht aufbereiteten Bodenmaterialien gearbeitet (siehe oben).



Abbildung 4-61: Bodenart "Sand" (Testboden A) – Spanne des ermittelten Bodenabtrags an zwei Beispielen; (Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 24: Geozelle)



Abbildung 4-62: Bodenart "Lehm" (Testboden B) - Spanne des ermittelten Bodenabtrags an zwei Beispielen; (Mat. 17: Jute-Gewebe, Mat. 24: Geozelle)
Der Standard-Prüfboden für diesen Beregnungstest sollte neben einer gleichbleibenden Beschaffenheit eine möglichst hohe Erosionsanfälligkeit besitzen. Mögliche Messunsicherheiten (Reproduzierbarkeit!) lassen sich dadurch relativieren. Diese Voraussetzungen sind vorzugsweise bei dem sandigen Bodenmaterial (Testboden A) erfüllt (**Abb. 4-61** bis **Abb. 4-63**).





Weiterhin liegen nicht quantifizierbare Messunsicherheiten vor, die vor allem auf die Beschaffenheit der im Versuch verwendeten "komplexen Prüfböden", eingeschlossen auch den Einbau in die Böschungsmodelle, zurückzuführen ist (**Abb. 4-63**).

Fazit:

Bindige Bodenarten/ Bodenmaterialien eignen sich weniger gut als standardisierte Prüfböden für einen "genormten" Beregnungstest.

Natürliche, nicht aufbereitete Bodenmaterialien und Lockergesteine unterliegen immer Schwankungen hinsichtlich ihrer Beschaffenheit - für einen Standard-Prüfboden ein "No-Go".

Vorzugsweise geeignet für die Bestimmung der Schutzwirkung von Erosionsschutzsystemen ist ein potentiell hoch erosionsanfälliges Sandgemisch.

Empfehlung:

Natürlichen Böden sind komplexe Prüfböden. Sie unterliegen am Ort der Entnahme (Bodenmiete, Aushub aus einer Fläche) in ihrer Beschaffenheit u. U. einer kleinräumigen Variabilität. Quantifizierbare Angaben zu Messunsicherheiten, die auf Veränderungen in der Beschaffenheit des Prüfbodens beruhen können, sind daher unmöglich. Hier liegen die

größten Unwägbarkeiten hinsichtlich der Zuverlässigkeit, Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit von Messergebnissen. Da solche Messunsicherheiten rechnerisch nicht abgeschätzt werden können, sollte künftig anstatt eines natürlichen (Ober–)Bodenmaterials ein in seiner Korngrößenverteilung genormter Sand mit hoher potentieller Erosionsanfälligkeit, als Standard-Substrat für den Beregnungstest verwendet werden.

4.4.4.2 Begrünung

Bei optimalem Einbau der Erosionsschutzsysteme, wie im Versuch, sind alle Systeme problemlos begrünbar. Hier wachsen sogar die Kräuter durch enge Maschen hindurch. Lediglich in einem Fall - Mat. 20 (Kokosmatte/GMA-Verbund) - war die Bestandsentwicklung nicht gleichmäßig. Das Saatgut wurde auch nach Angaben des Herstellers auf der dünnen Bodenschicht über der Matte ausgebracht. Der Grund für die ungleichmäßige Bestandsentwicklung ist unbekannt. Er ist sicherlich nicht im Einbau begründet.

4.4.4.3 Zusammenfassende Bewertung der Beregnungstests

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein Verfahren zur Messung der Bodenerosion im Labor konzipiert. Damit kann die Schutzwirkung verschiedener Erosionsschutzsysteme untersucht werden. Die Bauweisen der Erosionsschutzsysteme können in zwei Oberkategorien unterteilt werden – "auf Boden verlegt" und "mit Boden überdeckt". Im Laborversuch wurden acht verschiedene Systeme auf ihre Schutzwirkung vergleichend untersucht. Die Messungen wurden mit unterschiedlich erosionsanfälligen natürlichen Bodenmaterialien durchgeführt. Die Messungen wurden sowohl im unbegrünten als auch im begrünten Zustand durchgeführt. Entscheidend hinsichtlich der Schutzwirkung ist der Zeitraum, in dem die Vegetation nicht ausreichend etabliert ist, um den Bodenabtrag zu mindern bzw. zu verhindern. Ausschlaggebend für eine Bewertung sind daher die Messungen im unbegrünten Zustand. Die Messungen im begrünten Zustand dienten als Referenz und um den Einfluss der Vegetation abschätzen zu können.

Die Messungen dienten auch dazu, dass neu konzipierte Untersuchungsverfahren zu verifizieren und ggf. auch Änderungen vorzuschlagen. Der neu konzipierte Beregnungstest hat sich insgesamt bewährt. Als Standard-Prüfboden sollte jedoch anstelle von natürlichen Bodenmaterialien ein genormter Sand verwendet werden.

Aus dem Keim- und Wuchsverhalten der Gräser-Kräutermischung (RSM 7.2.1) konnten leider keine gesicherten Schlüsse zur Begrünbarkeit der Systeme gezogen werden. Aus den Messungen hat sich ergeben, dass die Bodenerosion in erster Linie von der Bauweise abhängt. Die Bauweise, bei der der Boden nicht durch ein Erosionsschutzsystem von oben gegen Regenereignisse geschützt ist, hat im unbegrünten Zustand einen Bodenabtrag vergleichbar mit dem Referenz-Böschungsmodell ohne Schutzsystem geliefert. Die Systeme, die auf dem Boden verlegt wurden, haben im Beregnungstest den Boden dagegen wirksam gegen Bodenabtrag geschützt. Dennoch hat es auch hier Unterschiede gegeben, die auf technische Eigenschaftender geprüften Systeme zurückzuführen sind. Es hat sich gezeigt, dass die Systeme mit den größten Öffnungs- bzw. Maschenweiten gegenüber den anderen Systemen einen signifikant höheren Bodenabtrag im Beregnungsversuch aufwiesen.

4.5. Bewertung der Relevanz von Prüfungen an Erosionsschutzsystemen

Bei den eingesetzten Erosionsschutzsystemen wird zwischen zwei Bauweisen unterschieden: Erosionsschutzsysteme mit Boden überdeckt und Erosionsschutzsysteme auf Boden verlegt. Die im Rahmen der Laboruntersuchungen ermittelten Eigenschaften von Erosionsschutzsystemen sind je nach Relevanz für die Anwendung mit Boden überdeckt in der Tab. 4-30 und für Anwendungen auf Boden verlegt in der Tab. 4-31 angegeben.

	Erosio	nsschutz	system i	mit Bode	nabdeck	kung
Eigenschaft / Prüfverfahren	GEC-M	GMA (-R)	GCE	GEC-F	GEC-W	GEC-N
Dicke, SKZ EC 1	I	I			I	I
Flächenbezogene Masse, DIN EN ISO 9864	I	I		l ¹⁾	I	I
Porosität, SKZ EC 5	I	Ι				Ι
Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319	Р	Р		Р	Р	Р
Biegesteifigkeit, in Anl. an ASTM D 1388	А	А			А	А
Verbundfestigkeit von Geozellen, DIN EN ISO 13426-1			Р			
Verbundfestigkeit von Verbundstoffen, DIN EN ISO 13426-2	S					
Druckstauchungsverhalten, in Anl. an DIN EN ISO 25619-2	S	S				S
Rückstellverhalten, SKZ EC 6						
Dämpfungsverhalten, in Anl. an DIN EN 1177						
Wasserableitvermögen, DIN EN ISO 12958	А			А		А
Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene, DIN EN ISO 11058	А	Α			А	Α
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen), SKZ EC 3-1	А	А		А	А	А
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen), SKZ EC 3-2	Α	Α		Α	Α	Α
Quellverhalten, SKZ EC 4	I					Ι
Öffnungsweite, SKZ EC 8						
Lichttransmission, ASTM D 6567						
Verdunstungsschutz, SKZ EC 2						
Witterungsbeständigkeit, DIN EN 12224 (50 MJ/m ²)	Р	Р	Р	Р	Р	Р
Mikrobiologische Abbaubarkeit, DIN EN 12225 *)	Р	Р	Р	Р	Р	Р
Schwelwiderstand, ECTC TGM 5.14	Α	Α			Α	Α
Brandverhalten, DIN EN ISO 11925-2						
Beregnungstest, SKZ/LWG EC 7	Р	Р	Р	Р	Р	Р
Umweltunbedenklichkeit nach M Geok E	Α	Α	А	А	Α	Α
*) dia vargasahana Lahanadayar musa nachgawiasan wardan						

Tabelle 4-30: Relevanz von Prüfungen; Erosionsschutzsysteme mit Boden überdeckt

die vorgesehene Lebensdauer muss nachgewiesen werden

¹⁾ längenbezogene Masse

²⁾ 350 MJ/m² im QUV-Gerät (3000 h) ist äquivalent mit 1 Jahr Freibewitterung Relevanz:

I: Identifikationstest

- P: Performancetest
- A: für alle Anwendungsbedingungen relevant
- S: für besondere Anwendungsbedingungen relevant
- für die Anwendung nicht relevant --:

Tabelle 4-31:	Relevanz	von	Prüfungen;	Erosionsschutzsysteme	auf	Boden	verlegt	(ohne
	Bodenabd	ecku	ing)					

	Erosions	schutzsys	tem ohne	Bodenabo	deckung
Eigenschaft /	GEC	GMA	GEC	GEC	GEC
	Ę	(-R)	ή	×	ż
Dicke, SKZ EC 1	I	I		I	I
Flächenbezogene Masse, DIN EN ISO 9864	I	I	¹⁾	I	I
Porosität, SKZ EC 5	I	I			I
Zugfestigkeit, DIN EN ISO 10319	Р	Р	Р	Р	Р
Biegesteifigkeit, in Anl. an ASTM D 1388	Р	Р		Р	Р
Verbundfestigkeit von Verbundstoffen, DIN EN ISO 13426-2	S				
Druckstauchungsverhalten, in Anl. an DIN EN ISO 25619-2	S	S			S
Rückstellverhalten, SKZ EC 6	S	S			S
Dämpfungsverhalten, in Anl. an DIN EN 1177	S	S		S	S
Wasserableitvermögen, DIN EN ISO 12958	А	А	А	A	A
Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene, DIN EN ISO 11058	А	А		Α	Α
Wasseraufnahmekapazität (Eintauchen), SKZ EC 3-1	А	А	А	Α	A
Wasseraufnahmekapazität (Beregnen), SKZ EC 3-2	А	А	А	A	A
Quellverhalten, SKZ EC 4	I				I
Öffnungsweite, SKZ EC 8	S	А		A	S
Lichttransmission, ASTM D 6567	Р	Р		Р	Р
Verdunstungsschutz, SKZ EC 2	Р	Р		Р	Р
Witterungsbeständigkeit, DIN EN 12224 (50 MJ/m ²)	Р	Р	Р	Р	Р
Mikrobiologische Abbaubarkeit, DIN EN 12225 *)	Р	Р	Р	Р	Р
Schwelwiderstand, ECTC TGM 5.14	Р	Р	Р	Р	Р
Brandverhalten, DIN EN ISO 11925-2	S	S	S	S	S
Beregnungstest, SKZ/LWG EC 7	Р	Р	Р	Р	Р
Umweltunbedenklichkeit nach M Geok E	А	Α	Α	Α	А
*) die vorgesehene Lebensdauer muss nachgewiesen werden					
¹ / längenbezogene Masse					
Relevanz.					

P: Performancetest

A: für alle Anwendungsbedingungen relevant

S: für besondere Anwendungsbedingungen relevant

--: für die Anwendung nicht relevant

5. Zusammenfassung der Ergebnisse und KMU-Relevanz

Ein Hauptziel der hier dargestellten Arbeiten war die unterschiedlichen geosynthetischen Erosionsschutzsysteme und ihre Wirkungsweise auf die Bodenerosion bei unterschiedlichen Standortbedingungen bzw. verschiedenen Bodenverhältnissen und entsprechender Begrünung wissenschaftlich zu untersuchen und quantitativ zu beschreiben. Dafür wurden umfangreiche Tests in den Prüflaboren des SKZ und der LWG und auf dem Testfeld bei Biebelried durchgeführt.

Die Ergebnisse kommen aufgrund der technischen und wirtschaftlichen Bedeutung der geosynthetische Erosionsschutzsysteme herstellenden Industrie, die überwiegend mittelständisch strukturiert ist (KMU), direkt zugute und können hauptsächlich von diesen Unternehmen genutzt werden, so dass diese ihre Produkte optimieren und damit Marktanteile hinzugewinnen können. Durch das Vorhandensein von erarbeiteten Vorschlägen und von den Prüfmethoden, die auf deutschen und internationalen Standards ausgerichtet sind, können gerade die deutschen KMU aus dieser Branche ihre innovativen Produkte viel besser bei Anwendern, Bauherren und Planern anbringen. Dies führt auf dem gesamten Markt der geosynthetischen Erosionsschutzsysteme zur Fortentwicklung und zur Ausbreitung dieser Anwendung.

Anhand der erzielten Erkenntnisse wurden konkrete Vorschläge und Hinweise für die Anwendung von Erosionsschutzsystemen für Böschungen ausgearbeitet.

Felduntersuchungen

Im Rahmen von Feldversuchen wurden acht unterschiedliche Erosionsschutzsysteme in ihrer Wirkungsweise auf die Bodenerosion und auf die Vegetationsentwicklung getestet. Die Erosionsschutzsysteme wurden in Kombination mit zwei Saatgutmischungen geprüft. Zur Aussaat kamen in einer praxisnahen Vorgehensweise, der für das Bauwerk ursprünglich vorgesehene Standardlandschaftsrasen und eine neu entwickelte Kräutermischung.

Als Parameter bei den Pflanzenbonituren zur Bewertung der Vegetationsentwicklung wurden durch die LWG Keimverhalten, Etablierung, Deckung, Vitalität, Artenzahl und am Ende des Projektes auch die Durchwurzelung bewertet. Es wurde deutlich, dass die Erosionsschutzmatten mit enger Öffnungsweite den Durchwuchs der Kräuter behindern, so dass selektiv nur Gräser durchwachsen können. Eine Behinderung des Durchwuchses ergab sich auch, wenn die Matten nicht absolut plan auf die Bodenoberfläche aufgelegt wurden. In den entstandenen Hohlräumen können sich zwar die krautigen Arten entwickeln, konnten aber mit ihren entfalteten Blättern nicht mehr durch die Öffnungen durchbrechen, selbst wenn deren Durchmesser 1-2 cm betrug. Statt des Durchwuchses werden die Matten angehoben. Deswegen ist die Qualität der Verlegungsarbeiten für die Funktionsfähigkeit der Erosionsschutzsysteme ein entscheidender Faktor. Für eine optimale Wirkung sowohl bezüglich der Vegetationsentwicklung als auch der Schutzfunktion ist auf eine entsprechende Vorbereitung der Böschungsoberfläche und auf eine fachgerechte Verlegung der Produkte zu achten. Es wird empfohlen, den Oberboden vor der Verlegung gründlich plan zu bearbeiten und die Erosionsschutzmatten ohne Hohlräume unter der Matte zu verlegen. Welche Produkte die Oberflächenunebenheiten des Oberbodens bei der Verlegung besser folgen können, kann mit dem Vergleich der Biegsamkeit abgeschätzt werden.

Es besteht anhand der Ergebnisse zur Vegetationsentwicklung der Verdacht auf vegetationsfeindliche Rückstände oder Zusatzstoffe in einigen verwendeten Erosionsschutzprodukten, insbesondere bei den Produkten aus natürlichen Rohstoffen. Gerade unter Hitze- und Trockenstress kann die Abgabe von wachstumsfeindlichen Substanzen, selbst in geringem Umfang, limitierend sein. Deswegen wird umgehend empfohlen, die Produkte im Rahmen einer Umweltunbedenklichkeitsprüfung nach BBodSchV, wie sie für Geokunststoffe üblich ist, zu testen.

Die ursprüngliche Annahme, dass Erosionsschutzsysteme eine allgemeine positive Auswirkung auf die Vegetation ausüben, konnte nicht bestätigt werden. Bezüglich der Vegetationsentwicklung zeigten sich signifikante systembedingte Unterschiede.

Die erstellte Umrechnung der Boniturwerte in ein Punktesystem gibt die Möglichkeit, per Rechenwert die Eignung der verschiedenen Erosionsschutzsysteme in Bezug auf die Pflanze zu ermitteln.

Auf einigen Testparzellen kam es zu massiven punktuell aufgetretenen Wassereinbrüchen aus der Frostschutzschicht im Bereich des Böschungskopfes. Diese führten unter dem verlegten Erosionsschutzsystem zu erheblichen Abspülungen von Bodenmaterial mit tiefen Rinnen und Runsen in der aufgetragenen Bodenschicht. Die Erosionsschutzsysteme sind, wie auf dem Testfeld beobachtet, nicht in der Lage Bodenerosion infolge punktuell starker Wasseraustritte bzw. -zutritte in die Böschung zu verhindern. Deswegen wäre es für einen funktionierenden Erosionsschutz von besonderer Bedeutung, eine gleichmäßige Entwässerung des Oberflächenwassers von der Fahrbahn sowie auch von Schichtenwasser aus der Trag- und Frostschutzschicht zu gewährleisten.

Die Ergebnisse der Felduntersuchungen haben gezeigt, dass wegen mangelnder Verbindung die Kontaktfuge zwischen Oberboden und Rohböschung nach einer Durchfeuchtung des Bodenmaterials durch Regenwasser versagen kann und es zum Abrutschen des Oberbodens kommt. Die Absicherung einer ausreichenden Verbindung zwischen Oberboden und Rohböschung ist für einen nachhaltigen Erosionsschutz unerlässlich. Dies kann durch Scherversuche im Prüflabor nachgewiesen werden. Ist der Oberboden nachweislich rutschgefährdet, kann die Böschungsstabilität z. B. mittels Erosionsschutzsysteme mit hochfestem Geogitter verbessert werden. Eine minimale Zugfestigkeit der Erosionsschutzsysteme von ca. 5 kN/m wird empfohlen.

Kenntnisse über die vegetationstechnisch relevanten Eigenschaften eines Produktes (Öffnungsweite, Lichtdurchlässigkeit und Verdunstungsschutz) können für die Entscheidung der für den Standort am besten geeigneten Saatgutmischung wesentlich beitragen. Die Öffnungsweite eines Produktes sollte mit der angedachten Vegetation abgestimmt werden, damit die Pflanzen (Kräuter und Gräser) durch das Erosionsschutzprodukt durchwachsen können. Die Austrocknung des Oberbodens durch Wind und Sonne kann mit der Auswahl von Produkten mit unterschiedlicher Lichtdurchlässigkeit und unterschiedlichem Verdunstungsschutz beeinflusst werden. Bei Erosionsschutzprodukten die ohne Bodenabdeckung auf dem Oberboden verlegt werden, ist eine ausreichende Lichtdurchlässigkeit für die Keimung und für das Pflanzenwachstum von entscheidender Bedeutung.

Das Starkregenereignis ca. 9 Monate nach der Fertigstellung des Testfeldes zeigt, dass durch die Verwendung von Erosionsschutzsystemen die Bodenerosion wesentlich verringert werden kann. Ein 100 %iger Schutz gegen Bodenabtrag konnte allerdings mit keinem der verwendeten Systeme erreicht werden.

Laboruntersuchungen

Parallel zu den Feldversuchen fanden in den Laboren des SKZ und der LWG umfangreiche Untersuchungen statt. Im SKZ wurden die anwendungstechnisch relevanten Eigenschaften (mechanische, hydraulische und physikalische Eigenschaften, Beständigkeit gegen mikrobiologische Abbaubarkeit, Witterungsbeständigkeit, Brandverhalten, Erosionsstabilität) an 50 nach Praxisrelevanz und Marktfähigkeit festgelegten repräsentativen Erosionsschutzprodukten erfasst und systematisch miteinander verglichen.

Es konnte nur z. T. auf bestehende Prüfmethoden zurückgegriffen werden. Insbesondere hinsichtlich der Eigenschaften, die direkt Einfluss auf die Vegetation und den Boden nehmen, wie z. B. der Verdunstungsschutz und die Wasseraufnahmekapazität bei Beregnung, gab es keine übertragbaren Prüfnormen. Im Zuge des Forschungsvorhabens wurden mehrere neue bzw. angepasste Prüfmethoden erarbeitet (SKZ EC 1, SKZ EC 2, SKZ EC 3, SKZ EC 4, SKZ EC 5, SKZ EC 6, SKZ/LWG EC 7, SKZ EC 8). Die verwendeten Prüfmethoden haben sich für die Charakterisierung der Erosionsschutzmatten und für den Vergleich der Eigenschaften als geeignet erwiesen.

Die verschiedenen Erosionsschutzprodukte weisen - bedingt durch ihre Rohstoffe und Herstellungsverfahren - sogar innerhalb einer Erosionsschutzsystemvariante wesentliche Unterschiede in ihren Eigenschaften auf. Die erstelle Kategorisierung der Eigenschaften kann bei der Einschätzung und bei der Auswahl standortgerechter Erosionsschutzprodukte behilflich sein.

Mit den Ergebnissen zur Prüfungen der Witterungsbeständigkeit an den die Erosionsschutzmatten zusammenhaltenden Kunststoff-Netzen konnte nachgewiesen werden, dass einige Netze bereits nach relativ kurzer Zeit im Freien (1 bis 2 Monate) u.U. dermaßen beschädigt werden können, dass sie ihre Funktion nicht mehr erfüllen. Das bedeutet gleichzeitig das Versagen des Erosionsschutzproduktes. Für eine Qualitätssicherung und Gewährleistung der Funktion sollte die Witterungsbeständigkeit abhängig von der Bauweise entweder für die gesamte angedachte Lebensdauer (Erosionsschutzprodukte auf den Boden ohne Bodenabdeckung verlegt) oder für die Dauer bis zur Bodenabdeckung (Erosionsschutzsysteme mit Boden überdeckt) nachgewiesen werden.

An der LWG wurde die Erosionssicherheit über eine Regensimulation - Simulation erosiver Starkregenereignisse - an Böschungsmodellen untersucht. Mit der neu konzipierten Beregnungsanlage wurde die Schutzwirksamkeit der Erosionsschutzsysteme im Labor untersucht. Die Messungen wurden mit unterschiedlich erosionsanfälligen natürlichen Bodenmaterialien durchgeführt. Die Erosionsschutzsysteme wurden sowohl im unbegrünten als auch im begrünten Zustand getestet. Entscheidend hinsichtlich der Schutzwirkung ist der Zeitraum, wo die Vegetation nicht ausreichend etabliert ist, um den Bodenabtrag zu mindern bzw. zu verhindern. Ausschlaggebend für eine Bewertung sind daher die Messungen im unbegrünten Zustand. Die Messungen im begrünten Zustand dienten als Referenz und um den Einfluss der Vegetation abschätzen zu können.

Aus dem Keim- und Wuchsverhalten des Standardlandschaftsrasens (RSM 7.2.1) konnten leider keine gesicherten Schlüsse zur Begrünbarkeit der Systeme gezogen werden. Aus den Messungen hat sich ergeben, dass die Bodenerosion in erster Linie von der Bauweise abhängt. Die Bauweise, wo der Boden nicht durch eine Matte oder Gewebe von oben gegen Regenereignisse geschützt ist, hat im unbegrünten Zustand einen Bodenabtrag vergleichbar mit dem Referenz-Böschungsmodell ohne Schutzsystem geliefert. Die Systeme, die auf dem Boden verlegt wurden, haben im Beregnungstest den Boden dagegen wirksam gegen Bodenabtrag geschützt. Dennoch hat es auch hier Unterschiede gegeben, die auf technische Eigenschaften der geprüften Systeme zurückzuführen sind. Es hat sich gezeigt, dass die Systeme mit den größten Öffnungs- bzw. Maschenweiten gegenüber den anderen Systeme einen signifikant höheren Bodenabtrag im Beregnungsversuch aufwiesen.

Durch die Beurteilung der Relevanz der Eigenschaften wurde die Grundlage für eine fachgerechte und anwendungsbezogene Beschreibung der Leistungsmerkmale von Erosionsschutzprodukten für Böschungen geschaffen. Dabei muss zwischen zwei Bauweisen, Erosionsschutzsysteme mit Boden überdeckt oder nur auf Boden verlegt (ohne Bodenabdeckung), unterschieden werden. Damit die Planer und Anwender ein standortgerechtes System auswählen können, sollte für jedes Erosionsschutzprodukt ein Technisches Datenblatt mit Angaben zu den im Abschnitt 4.5 aufgelisteten relevanten Eigenschaften erstellt werden.

Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass die neu gewonnenen Erkenntnisse aus den Feld- und Laboruntersuchungen wesentlich dazu beitragen können, Erosionsschutzsysteme für die Böschungssicherung in der Zukunft standortgerecht zu planen und effizient einzusetzen.

6. Verwendung der Zuwendungen

6.1. SKZ

Die Personalzuwendungen wurden eingesetzt, um die wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiter sowie die Hilfswissenschaftler, die für die Versuchsplanung, Durchführung und Ergebnisauswertung zuständig waren, zu finanzieren. Die erzielten Ergebnisse stehen im Einklang mit der It. Antrag vorgesehenen Arbeiten und den Mittelabrufen und waren zur Erreichung der Ziele angemessen und erforderlich.

Die Ausgaben für die Gerätebeschaffung wurden wie geplant getätigt.

Für die Erstellung der Testparzellen und für die Laboruntersuchungen wurden die Versuchsmaterialien von Unternehmen als vAW beigestellt.

6.2. LWG

Die Personalzuwendungen wurden eingesetzt, um die wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiter, die für die Versuchsplanung, Durchführung und Ergebnisauswertung zuständig waren, zu finanzieren. Die erzielten Ergebnisse stehen im Einklang mit der It. Antrag vorgesehenen Arbeiten und den Mittelabrufen und waren zur Erreichung der Ziele angemessen und erforderlich.

Die Ausgaben für die Gerätebeschaffung wurden wie geplant getätigt.

7. Beabsichtigte Umsetzung der erzielten Forschungsergebnisse

7.1. Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Tabellarische Übersicht zu den während der Projektlaufzeit (03/2009 – 08/2011) durchgeführten spezifischen Transfermaßnahmen:

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Projektbegleitender Ausschuss PA	Das Projekt und die Ergebnisse sollen den Mitgliedern des PA	1. Treffen: Vorstellung des Projekts und Diskussion der Vorgehensweise	06. Juli 2009
	aufgezeigt werden.	ADatum Zeitraudie n den Projekts und Diskussion der Vorgehensweise an.1. Treffen: Vorstellung des Projekts und Diskussion der Vorgehensweise an.06. Juli 2 06. Juli 2an. 2. Treffen: Vorstellung von Zwischenergebnissen und Diskussion der weiteren Vorgehensweise 3. Treffen: Vorstellung der Ergebnisse und Diskussion27. Juli 2 2g des kts, begleitender Ausstellung 	27. Juli 2010
		3. Treffen: Vorstellung der Ergebnisse und Diskussion	06. Mai 2011
Ansprache potenziell interessierter Unternehmen	Bekanntmachung des Forschungsprojekts, Verbreitung der	Fachtagung "Begrünbarer Erosionsschutz" mit begleitender Ausstellung	05. Mai 2011
außerhalb des projektbegleitenden Ausschusses	Forschungsergebnisse an interessierte Unternehmen	Kunden des SKZ und der LWG aus dem Bereich Erosionsschutzsysteme	fortlaufend
Tagespresse / Publikationen in der Fachpresse	Bekanntmachung des Forschungsprojekts und Transfer erster	Zeitungsartikel in der <i>Mainpost</i> "Bunte Böschung als Pilotprojekt"	02. Dez. 2009
	Ergebnisse an interessierte Unternehmen	Zeitungsartikel in der <i>Kitzinger Zeitung</i> "Forschungsprojekt direkt an der A3"	18. Juni 2010
		Artikel in der Zeitschrift <i>Straße und Autobahn</i> "Test von Erosionsschutzmatten an Böschungen bei Biebelried"	August 2010
		Mitteilung auf der Homepage der LWG /Garten- und Landschaftsbau	2. Quartal 2010

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Tagespresse / Publikationen in der Fachpresse	Bekanntmachung des Forschungsprojekts und Transfer erster Ergebnisse an interessierte Unternehmen	Publikation in der Zeitschrift Straße und Autobahn "Wenn Wasser zur Gefahr wird - SKZ und LWG erproben begrünbare Erosionsschutzsysteme an der Autobahnböschung bei Biebelried - Teil 1" [32]	Oktober 2010
		Mitteilungen auf der Homepage (SKZ-News) und der Firmenzeitschrift (SKZ-Aktuell)	2010 – 2011
		Landschaftsbau Bayern, Verbandsmitteilungen ,Verband für Garten-, Landschafts- und Sportplatzbau Bayern e.V.'	23. Okt. 2010
		Jahresbericht der LWG für 2009	2. Quartal 2010
		Jahresbericht der LWG für 2010	2. Quartal 2011
		Publikation in der Zeitschrift Straße und Autobahn "Wenn Wasser zur Gefahr wird - SKZ und LWG erproben begrünbare Erosionsschutzsysteme an der Autobahnböschung bei Biebelried - Teil 2" [33]	Mai 2011
		Publikation in der Zeitschrift <i>Geotechnik</i> Sonderheft 2011 "Geosynthetische Erosions- schutzsysteme auf der Auto- bahnböschung A3 Feld- und Laboruntersuchungen" [34]	März 2011
Vorstellung der Ergebnisse bei	Verbreitung der Forschungsergebnisse	Fachbeirat Landespflege	18. Sept. 2010
Tagungen oder Seminaren, in Arbeitskreisen etc.		Vortrag an der 12. Informations- und Vortragstagung über Kunst- stoffe in der Geotechnik, FS- KGEO 2011, TU München	03. März 2011
		Fachtagung "Begrünbarer Erosionsschutz" des SKZ und der LWG; LWG, Veitshöchheim	05. Mai 2011

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Einbringung der Ergebnisse in die Normungsarbeit	Verbesserung der Normentwürfe; Ver- breitung der Forschungsergebnisse	Im Rahmen der Normungs- arbeiten wurden auf der Normungsausschuss-Sitzung des CEN/TC 189 "Geosynthetics" in London, in dem das SKZ aktiv vertreten ist, das Forschungsprojekt und die Prüfverfahren vorgestellt.	Nov. 2010
		FGSV-Arbeitskreis 5.4.1 "Erosionsschutz und Begrünungshilfen" (SKZ und LWG sind durch persönliche Mitglieder im Arbeitskreis vertreten)	laufend
Informationstafel	Bekanntmachung des Forschungsprojekts in der breiten Öffentlichkeit	Aufstellung einer Informationstafel an den Testfeldern (Böschungsbereich an der Autobahn A 3, AS Rottendorf / Biebelried)	Februar 2010

Tabellarische Übersicht zu den nach der Projektlaufzeit geplanten spezifischen Transfermaßnahmen:

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Weitergabe von ausführlichen Forschungsberichten an alle Interessenten	Verbreitung der Forschungsergebnisse	Bestellbar über die Homepage des SKZ (www.skz.de)	4. Quartal 2011
Publikation der Ergebnisse im Internet und in einschlägigen Fachzeitschriften	Verbreitung der Forschungsergebnisse	Homepage des SKZ (www.skz.de) Homepage der LWG/Garten- und Landschaftsbau (www.lwg.bayern.de/landespfle ge) www.plasticker.de Publikation in Fachzeitschrift <i>Straße und Autobahn</i>	4. Quartal 2011 / 1. Quartal 2012

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Publikation der Ergebnisse im Internet und in einschlägigen Fachzeitschriften	Verbreitung der Forschungsergebnisse	Publikation in Fachzeitschriften des Garten- und Landschafts- baues, z.B. DeGa, Neue Landschaft, BI GaLabau, Taspo, GaLaBau, Rasen Turf Gazon, GaLaBau Journal (Österreich), G plus (Schweiz)	1. Quartal 2012
Vorstellung der Ergebnisse bei Tagungen oder Seminaren, in Arbeitskreisen etc.	Verbreitung der Forschungsergebnisse	Fachtagungen, Seminare und Lehrgänge des SKZ, z.B. internationales Seminar "Lebensdauer von Geokunststoffen"	2012 / 2013
		Fachtagung der Abteilung Landespflege der LWG: ,Landespflegetage'	Februar 2012
		International Symposium on Sustainable Geosynthetics and Green Technology for Climate Change (SGCC2011), Bangkok, Thailand [35]	Juni. 2012
		"euroGEO5" 5th European Geosynthetics Congress, Valencia, Spain	Sept. 2012
		"Tief.Bau.Tex" Schweizer Fachtagung für Bauen mit GeoKunststoffen, HTW Chur, Schweiz	Jan. 2012
SKZ-Expertenkreise	Verbreitung der Forschungsergebnisse	SKZ-Expertenkreis "Bauteilprüfung"	ab 2012
Einbringung der Ergebnisse in die Normungsarbeit	Verbesserung der Normentwürfe; Ver- breitung der	Normenausschuss zur Prüfung von Geotextilien (SKZ ist Mitglied in diesem Ausschuss)	ab 2011
	Forschungsergebnisse	FGSV-Arbeitskreis 5.4.1 "Erosionsschutz und Begrünungshilfen" (SKZ und LWG sind durch persönliche Mitglieder im Arbeitskreis vertreten)	laufend

7.2. Angaben zur Finanzierbarkeit der industriellen Umsetzung

Die Ergebnisse kommen aufgrund der technischen und wirtschaftlichen Bedeutung der geosynthetischen Erosionsschutzsystemen herstellenden Industrie, die überwiegend mittelständisch strukturiert sind, direkt zugute und können von den Unternehmen ohne Zeitverzögerung genutzt werden, um ihre Produkte zu optimieren und damit Marktanteile hinzuzugewinnen.

Die Forschungsergebnisse werden auch dafür genutzt, dass die Verwendung von geosynthetischen Erosionsschutzsystemen auf steilen Böschungen im Erd- und Landschaftsbau geregelt wird. Die Ergebnisse werden direkt in die deutschen bzw. in europäischen Regelwerke und in die Normungsarbeiten einfließen. Durch die Verbreitung von Regelwerken kann die Anwendung ausgeweitet werden und dies alles im Sinne von Wirtschaftlichkeit, Kostensenkung u.a. auch für die Hersteller.

Durch die erarbeiteten Prüfmethoden und Empfehlungen, die auf deutschen und internationalen Standards ausgerichtet sind, können die Hersteller der geosynthetischen Erosionsschutzsysteme ihre innovativen Produkte viel besser bei Anwendern, Bauherren und Planern anbringen. Für die Umsetzung sind keine hohe Investitionen notwendig. Die Unternehmen können die erforderlichen Produktprüfungen extern z. B. an das SKZ oder die LWG vergeben.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Arbeitskreis 5.15.2 "Geokunststoffe für Erosionsschutz und als Begrünungshilfe": Merkblatt über die Anwendung von Erosionsschutz- und Begrünungshilfen aus natürlichen und synthetischen Werkstoffen im Erd- und Landschaftsbau des Straßenbaus (FGSV Arbeitspapier, Stand März 2005)
- [2] ECTC Erosion Control Technology Council: Terminology and Index Testing Procedures for Rolled Erosion Control Products. www.ectc.org
- [3] Internet: www.nrcs.usda.gov, Homepage of the United States Department of Agriculture, National Resources Conservation Service (NRCS), 29. Juli 2005
- [4] Gremiger, P. (2003): Unwetterereignisse im Alpenraum. Bericht der vom Ständigen Ausschuss der Alpenkonferenz eingesetzten Arbeitsgruppe Lawinen, Überschwemmungen, Muren und Erdrutsche, in Ergänzung zum Bericht Lawinenwinter 1999 der *Alpenkonferenz* vom 30./31. Oktober 2000 in Luzern. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern
- [5] Morgan, R. P. C. (1999): Bodenerosion und Bodenerhaltung. Spectrum Akademischer Verlag
- [6] Lang, R. (1997): Modellierung von Erosion und Nitrataustrag in Agrarlandschaften. Shaker Verlag
- [7] Erdmann, K. H. (1998): Untersuchungen zur Bodenerosion im südlichen Nordrhein-Westfalen. Bundesamt für Naturschutz (Herausgeber), Deutsche UNESCO-Komission e.V.
- [8] Richter, G. (2001): Bodenerosion. Analyse und Bilanz eines Umweltproblems. Wissenschaftliche Buchgesellschaft
- [9] Paul, G. (1998): Numerische Simulation der Bodenerosion durch Oberflächenabfluß von Wasser auf einem komplexen Relief. Shaker Verlag
- [10] Schwertmann, U. (1997): Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer Verlag
- [11] Ingold, T.S. und J.C. Thomson (1990): A design approach for preformed erosion control systems. *Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, The Hague, Netherlands
- [12] Florineth, F. (2002): Pflanzen statt Beton. Patzer Verlag, Berlin
- [13] Schlüter, U. (1996): Pflanze als Bausstoff Patzer Verlag, Berlin
- [14] Schiechtl, H. M. (1973): Sicherungsarbeiten im Landschaftsbau Callwey Verlag, München

[15]	Ingold, T.S. und J.C. Thomson (1990): A design approach for preformed ero- sion control systems. <i>Proceedings of the 4th International Conference on Geo-</i> <i>textiles, Geomembranes and Related Products</i> , The Hague, Netherlands
[16]	Comitée Francais Géosynthétiques: Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans la lutte contre l'erosion (Édition de janvier 2003)
[17]	Loke, K.H. und Z.A. Roslan (2002): Large-scale studies on soil erosion control of slopes in Asian weathering conditions using geosynthetics. <i>Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics</i> , Nice, France
[18]	Lekha, K.R. (2004): Field instrumentation and monitoring of soil erosion in coir geotextile stabilised slopes – A case study. Geotextiles and Geomembranes 22, Elsevier
[19]	Caroll Jr., R.G. und M.S. Theisen (1990): Turf reinforcement for soft armor ero- sion protection. <i>Proceedings of the 4th International Conference on Geotextiles,</i> <i>Geomembranes and Related Products</i> , The Hague, Netherlands
[20]	van Herpen, J.A. (1996): Three dimensional synthetic mats in dike and bank protection. <i>Proceedings of the 1st European Conference on Geosynthetics</i> , Maastricht, Netherlands
[21]	Cancelli, A., R. Monti und P. Rimoldi (1990): Comparative study of geosynthet- ics for erosion control. <i>Proceedings of the 4th International Conference on</i> <i>Geotextiles, Geomembranes and Related Products</i> , The Hague, Netherlands
[22]	Phillips, P., P. Hackney, S. Shrestha und A. Panikkar (2002): The use of celluar confinement systems for erosion control in sandy soils. <i>Proceedings of the 7th International Conference on Geosynthetics</i> , Nice, France
[23]	Rosen, A. (2000): Slopes stabilization of loess and marl soils at semiarid areas by using geocells – Case studies. Proceedings of the Second European Geosynthetics Conference, Bologna, Italy
[24]	Bormann, F. (2002): Erosionsschutzsysteme – Neue Landschaft 11/2002, S. 41-48.
[25]	Bormann, F. (2003): Modellversuch zur Wirkung einer Erosionsschutzmatte – Neue Landschaft 9/2003, S. 50-53.
[26]	Regel-Saatgut-Mischungen Rasen (2009): Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau (FLL) 2009.
[27]	Kutschera, L. und E. Lichtenegger (1982): Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen Bd.1. Gustav Fischer Verlag
[28]	Kutschera, L. und E. Lichtenegger (1992): Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen Bd.2. Gustav Fischer Verlag

- [29] Stolle, M. (2000): Wildpflanzenansaaten auf Rohbodenböschungen in: Ingenieurbiologie - Sicherungen an Verkehrswegeböschungen, Jahrbuch 9 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie 2000.
- [30] Schmidt, S. (2005): Bestimmung der Tropfengrößeverteilung und Fallgeschwindigkeiten der Tropfen in Abhängigkeit der Niederschlagsintensität des am Kieler Regensimulators. – Bachelorarbeit, Fachabteilung der Hydrologie und Wasserwirtschaft, Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät, Christian-Albrecht-Universität zu Kiel
- [31] Schmidt, R.-G. (1983): Ein Regensimulator für Feldversuche. Verlag Paul Parey
- [32] Böker, J., Németh, E., Marzini, K., Zanzinger, H. und J. Eppel (2010): Wenn Wasser zur Gefahr wird - SKZ und LWG erproben begrünbare Erosionsschutzsysteme an der Autobahnböschung bei Biebelried - Teil 1. Straße und Autobahn, 61(2010)Nr.10, S. 746 - 749.
- [33] Németh, E., Zanzinger, H., Böker, J., Marzini, K. und J. Eppel (2011): Wenn Wasser zur Gefahr wird - SKZ und LWG erproben begrünbare Erosionsschutzsysteme an der Autobahnböschung bei Biebelried - Teil 2. *Straße und Autobahn*, 62(2011)Nr.5, S. 326 - 329.
- [34] Németh, E., Zanzinger, H., Böker, J., Marzini, K. und J. Eppel (2011): Geosynthetische Erosionsschutzsysteme auf der Autobahnböschung A3 - Feld- und Laboruntersuchungen. *Geotechnik*, Sonderheft 2011 zur 12. Informations- und Vortragstagung über "Kunststoffe in der Geotechnik", S. 61 - 69.
- [35] Németh, E., Böker, J., Zanzinger, H., Marzini, K. und J. Eppel (2011): Evaluation of erosion control products on steep slopes by using performance and index tests. *International Symposium on Sustainable Geosynthetics and Green Technology for Climate Change (SGCC2011)*, Bangkok, Thailand; Manuskript wurde eingereicht und akzeptiert