

Geotechnische und Ingenieurbiologische Maßnahmen zum Erosionsschutz von Rekultivierungsschichten

1 Einführung

Bodenerosion und Maßnahmen zur Sicherstellung der Funktion und Qualität des Oberbodens waren schon immer zentrales Thema der Urbanisierung und der nachhaltigen Landnutzung. In geologischen Zeiträumen betrachtet waren Erosionsprozesse mit ursächlichen für die Morphologie und das Bild unserer heutigen Landschaft und nicht selten war dies mit Naturkatastrophen verbunden (*Bell, 2003*). In der heutigen dichten Besiedelung der Erde zeigen Erosionsprozesse ihre primären schädlichen Folgen als Verlust der Landnutzung, der Bodenqualität, der Kultivierbarkeit und Fruchtbarkeit am Ort der Entstehung. Sekundäre Schäden entstehen im Abstrom mit dem Transport und der Sedimentation des erodierten Bodens. Die Funktion von Flüssen, Entwässerungseinrichtungen und Regulierungssystemen wird eingeschränkt. Die daraus entstehenden Schäden erstrecken sich vom Verlust der Wasserqualität bis zur Begünstigung von Überschwemmungen. Bodenerosion leistet so einen großen Beitrag zur globalen Umweltbeeinträchtigung und hat insbesondere in ariden und semi-ariden Zonen der Erde eine starke volkswirtschaftliche Bedeutung.

Bricht man diese Phänomene und Prozesse auf einen kleineren Maßstab herunter, so findet man sie in der gleichen Weisen auch auf rekultivierten Deponien, insbesondere in der Aufwuchsphase der Vegetation, in der es auf den großen und relativ steil geneigten Böschungsf lächen temporär zu einem Oberflächenabfluss und damit zu Bodenabtrag kommen kann. Auch zeigten sich die gleichen schädlichen Folgen sowohl am Ort der Entstehung, als auch im Abstrom. Auf der Oberfläche von Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten werden organische Massen und humoser Boden abgetragen, was die Wachstumsbedingungen für eine schützende Vegetationsdecke mindert. Bei einer starken Niederschlagseinwirkung kann ein flächiger oder rinnenartiger Abfluss auftreten, der eine Bodenerosion auslöst, erodierten Boden transportiert und auf diese Weise die Rekultivierungsschicht partiell oder gar flächig zerstört. Und es folgen die gleichen sekundären Effekte, wie sie großmaßstäblich aus der Natur bekannt sind, wenn die Funktion von Entwässerungseinrichtungen und Rückhaltesystemen durch sedimentierten Boden in Mitleidenschaft gezogen wird, was dann rasch zu flächig auf den Böschungen abfließendem Wasser und zu Überschwemmungen des angrenzenden Geländes führen kann.

Unter den in Deutschland aktuell vorherrschenden humiden Klimabedingungen mit relativ günstig verteilten Jahresniederschlägen von 500 bis 1000 mm gilt auf einer intakten rekultivierten Deponieoberfläche eine jährliche Erosionsrate ca. 0,5 t/ha als normal und akzeptabel. In der Auswuchsphase der Vegetationsdecke oder erst recht in der kurzen Phase der unbedeckten Oberfläche, ist jedoch mit weitaus größeren Raten zu rechnen, die den 100-fachen Wert übersteigen und zur Zerstörung der Oberfläche beitragen können. Bei Schadensfällen, bei denen es infolge von Extremniederschlägen auf eine noch nackte Oberfläche zu Rinnenerosion gekommen ist, wurden Abtragsraten von weit über 1000 t/ha beobachtet. Der anfänglich geringen Widerstandsfähigkeit, respektive großen Verletzbarkeit, muss daher konstruktiv durch geeignete Oberböden, durch die zeitliche Abfolge der Baumaßnahmen und durch gesonderte Erosionsschutzmaßnahmen begegnet werden. Die grundlegenden physikalischen Zusammenhänge der durch Wasser initiierten Oberflächenerosion, die sich daraus

ergebenden spezifischen Anforderungen an die Planung und Ausführung von Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten sowie geeignete Maßnahmen zur Erhöhung des temporären Erosionsschutzes werden nachfolgend behandelt. Durch Wind ausgelöste Erosion zeigt vergleichbare Phänomene und hat auch ähnliche Gesetzmäßigkeiten. Für Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten sind diese Einwirkung jedoch nur von untergeordneter Bedeutung.

2 Mechanik der durch Wasser verursachten Oberflächenerosion

2.1 Grundlegende Prozesse

Die durch Wasser ausgelöste Oberflächenerosion von Böden ist durch drei voneinander unabhängige Phänomene charakterisiert

- das Lösen von einzelnen Partikeln oder Aggregaten aus der Textur des Bodens
- den Transport von Boden mit dem auf der Oberfläche abfließenden Wasser
- die Deposition und Sedimentation von Boden an einem anderen Ort.

Hauptursache der erosionsbedingten Schädigung von Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten sind Niederschlagsereignisse, die im Jahreszyklus mit unterschiedlicher Intensität und Dauer stochastisch verteilt auftreten. Die Fallgeschwindigkeit von Regentropfen wächst mit der Tropfengröße fast linear an, so dass die kinetische Energie eines Regenereignisses überlinear mit dessen Intensität ansteigt. Hagelereignisse stellen die intensivste Einwirkung dar, die Dauer ist jedoch relativ kurz und die Einwirkung ist auch nicht direkt mit einem starken Abfluss verbunden. Der auf den nackten oder nur mäßig bewachsenen Oberboden auftreffende Regen oder Hagel löst bei dieser Tropfenerosion Bodenpartikel oder Aggregate aus der Struktur und erzeugt so Bodenbewegungen im Zentimeterbereich (splash erosion). Dieses Phänomen setzt sich im Detail aus Kompression, Konsolidation und einem Bruchmechanismus von Aggregaten zusammen. Bei gleichzeitigem Wind und auf Böschungen, wenn die Tropfen schräg auftreffen, verstärkt sich die erosive Einwirkung des Niederschlags. Ein weiterer ungünstiger Effekt des initialen Herauslösen und Verteilens von Boden besteht darin, dass sich nach den Regenereignissen eine sehr dünne Feinteilkruste auf der Oberfläche bildet, welche die Infiltrationskapazität signifikant herabsetzt. So kommt es nachfolgend quasi als Sekundäreffekt bereits bei Niederschlagsereignissen mit relativ geringer Intensität zu einem Oberflächenabfluss. Bereits beim Benetzen mit Wasser kommt es zu Aufweichen und Quellen der unbelasteten bindigen Anteile des Oberbodens. Dies mindert die Scherwiderstände und begünstigt so das Ablösen infolge Scherspannung bei einem Abfluss.

Die Erosionsempfindlichkeit oder Erodibilität eines Bodens hängt von einer Vielzahl von bodenphysikalischen und mineralogischen Parametern ab. Die Partikelgröße, der Gehalt an Feinteilen, deren Mineralogie, die Lagerungsdichte und damit die Porenstruktur sind die wesentlichen Einflussfaktoren des Widerstandes. Hinzu kommen aber Effekte wie Sättigungszustand, Trocknung, Mikrorisse und Rauigkeit der Oberfläche. Das initiale Lösen von Partikeln und Aggregaten durch die Energie der auftreffenden und wegspritzenden Regentropfen stellt an sich, abgesehen von der Verstopfung der Makroporen und der Krustenbildung, keine Gefährdung dar. Dieses grundlegende Phänomen bietet jedoch die Grundlage für den eigentlich schädigenden Oberflächenabfluss. Erst wenn sich nach Erschöpfung der Wasseraufnahme und der Wasserspeicherung in der rauen Struktur der Oberfläche ein fingerförmig-

ger oder gar flächiger Wasserfluss einstellt, der in der Lage ist, die gelösten Partikel und Aggregate über größere Distanzen zu transportieren, kann sich die Erosion schädlich und progressiv entwickeln. Eine Konzentration der Überströmung in Rillen verursacht dabei zusätzlich einen sukzessiven Bodenabtrag durch Scherversagen oder Verflüssigen von dünnen Schichten an der Oberfläche, was zur Rinnenbildung und schließlich zu einer grabenförmigen Vertiefung führt. Dieser Prozess setzt sich dann als Grabenerosion progressiv bis zur völligen Zerstörung der Rekultivierungsschicht fort. Erst wenn die Transportgeschwindigkeit nachlässt, kann sich das gelöste Material flächig oder in Form von Schütffächern ablagern.

Bei einem effektiven Erosionsschutz von rekultivierten Deponieoberflächen und -böschungen kann es daher nur darum gehen, die durch Tropfen auftreffende Energie zu mindern und einen schädlichen Oberflächenabfluss auf der anfänglich noch gering bewachsenen Oberfläche zu vermeiden. Bei der Planung und Ausführung von Rekultivierungs- und Wasserhaltungsschichten sind daher die Widerstandsfähigkeit des Bodenmaterials (Erodibilität) und die schädliche Einwirkung von Niederschlagsereignissen (Erosivität) in den unterschiedlichen Stadien des Lebenszyklus zu vergleichen. Die größte Verletzbarkeit (Vulnerabilität) liegt dabei immer im Anfangsstadium, unmittelbar nach der Herstellung vor.

2.2 Erodibilität von Rekultivierungsböden

Die Erodibilität von Böden bezeichnet deren Grad an Empfindlichkeit und Verletzbarkeit hinsichtlich Lösen und Transport. Die bodenphysikalischen und bodenchemischen Einflussfaktoren sind

- Textur, Korn- und Aggregatsgröße
- Porenvolumen, Infiltrationskapazität und präferentielle Fließwege
- Sättigungsgrad und Wasseraufnahme zu Beginn der Einwirkung
- Neigung zur Oberflächenverdichtung und Verschlammung
- Gehalt an Schluff (Partikel der Fraktion $2\mu\text{m}$ - $63\mu\text{m}$) in Relation zur Sand- und Tonfraktion
- Gehalt an Organik und an Calciumcarbonat
- Mineralogie der Tonfraktion

Als standortspezifische Faktoren sind die Exposition zu der Hauptangriffsrichtung von Wind und Regen, die Böschungsneigung und die Böschungslänge aufzuführen, da sie die Transportenergie eines Oberflächenabflusses maßgebend mitbestimmen.

Der Einfluss der Korn- und Aggregatsgröße (Teilchengröße) auf die Lösbarkeit, die Transport- und Sedimentationsbedingungen lässt sich mit dem empirischen Diagramm nach *Hjulström 1935* veranschaulichen (Bild 1). Weitere Erfahrungswerte zur Lösbarkeit von unterschiedlichen Böden finden sich in den Tabellen und Diagramme *DIN 19661-2*.

Die obere Kurve in Bild 1, die als Band anzusehen ist, zeigt die Grenzgeschwindigkeit an, bei der sich Partikel aufgrund der Scherspannung aus dem Bodengefüge lösen und im fließenden Wasser in Schwebelage gehalten werden. Die untere Grenzlinie stellt den nahezu linearen Zusammenhang zwischen Fließgeschwindigkeit und Sedimentation dar. Das Hjulström-Diagramm zeigt, dass feine Partikel der Ton und Schluff-Fraktion, wenn sie z. B. durch Tropfenerosion oder durch einen kurzen, hohen Spitzenabfluss erst einmal gelöst sind, selbst bei sehr geringen Wasserbewegungen in der Schwebelage gehalten und leicht auf der Oberfläche transportiert werden. Körner der Grobsand- und Kiesfraktion werden dagegen erst bei hohen

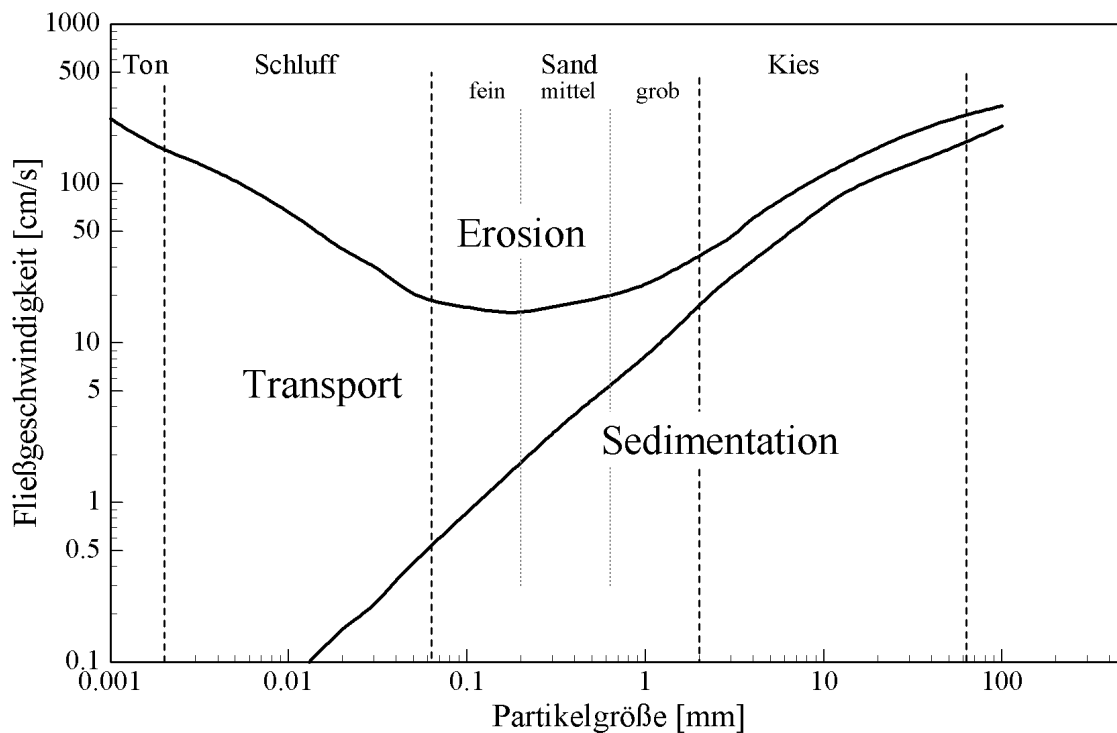


Bild 1: Erosions-, Transport- und Sedimentationsbedingungen von Bodenteilchen, *Hjulström* 1935

Geschwindigkeiten des Wassers gelöst und werden nur in einem geringen Spektrum an Transportenergie in Schwebelage gehalten. Sie sedimentieren, sobald die Fließgeschwindigkeit etwas abnimmt. In Hinblick auf den aktiven Schutz von Rekultivierungs- und Wasserhaushaltsschichten ist daraus zu entnehmen, dass ingenieurbioökologische Maßnahmen, die als Bremszonen wirken, für diese Kornfraktionen sehr effektiv sind. Abflussmindernd sind auch Querrillen auf den Böschungen, wie sie bei der Herstellung durch Radspuren erzeugt werden.

Die größte Lösbarkeit liegt bei enggestuften Mittelsanden vor. Betrachtet man Mobilisierung und Transport zusammen, besitzen reine Schluffe und Feinsande die größte Erodibilität. Kritisch sind diesbezüglich Böden, die 40% und mehr dieser hoch erodiblen Fraktionen enthalten. Die granulometrischen Parameter und die Dichte beeinflussen auch die Wasserdurchlässigkeit. Mit abnehmender Wasserdurchlässigkeit erhöht sich die Erodierbarkeit, ebenso mit abnehmendem Humusgehalt. Empirische Untersuchungen belegen, dass Böden mit einem organischen Kohlenstoffgehalt von $C_{org} < 2\%$ (bzw. $< 3,5\%$ Organik) als sehr erodibel gelten. Bis zu einem Organik-Gehalt von ca. 12% nimmt die Widerstandsfähigkeit nahezu linear zu (*Morgan 2005*). Böden mit einem nicht quellfähigen Mineralbestand gelten gegenüber smektitischen Böden generell als stabiler, da sie bei einer Benetzung an der Oberfläche nicht so rasch bis zur Fließgrenze aufweichen und dabei die Kohäsion verlieren.

In der Empfehlung der DGGT *GDA E 2-31* werden Rekultivierungsböden auch hinsichtlich der Erodibilität beurteilt. In Abschnitt 3 (Auswahl geeigneter Böden) wird hierzu aufgeführt, dass unter dem Aspekt der Erodibilität und Verschlammungsneigung reine Schluffe, schluffige Sande und schluffige Lehme nicht als oberste Lage der Rekultivierungsschicht eingebaut werden sollen. Lehmige Sande, Böden mit Kies- und Steinanteilen eignen sich besser, ein hoher Gehalt an organischer Substanz begünstigt die Gefügestabilität.

Die obigen Ausführungen zur Erodibilität gelten jeweils für eine unbedeckte, bzw. stark verletzte oder partiell nackte Oberfläche. Der Bodenabtrag nimmt unter sonst gleichen Bedingungen mit dem Grad einer Bedeckung stark ab.

Bild 2 zeigt den relativen Bodenabtrag eines Standortes in Abhängigkeit von dem Bedeckungsgrad einer Mulchauflage. Als Regel kann hieraus abgeleitet werden, dass ein Bedeckungsgrad von < 30 % nur einen geringen Effekt hat, während ab einer Bedeckung von 70 % der Fläche eine wirkungsvolle Verbesserung des Schutzes erreicht wird.

Bei Rekultivierungsschichten von Deponien liegen meist lange und mit 1:n = 1:3 relativ steil geneigte Böschungen vor. Unabhängig von dem Leistungsvermögen einer Randentwässerung zeigen die Erfahrungen, dass der Bodenabtrag unterproportional mit der Böschungslänge ansteigt (Halbe Länge ergibt ca. 30% Reduktion), während sich die Hangneigung auf den Löse- und Transportprozess überproportional auswirkt. Dies betrifft allerdings jeweils eine flächige Erosion. Findet infolge der hydraulischen Überbelastung erst einmal eine Rinnenerosion auf der Oberfläche statt, führt dies nach und nach zur progressiven Zerstörung der Rekultivierungsschicht, soweit keine weiteren Schutzmaßnahmen ergriffen werden.

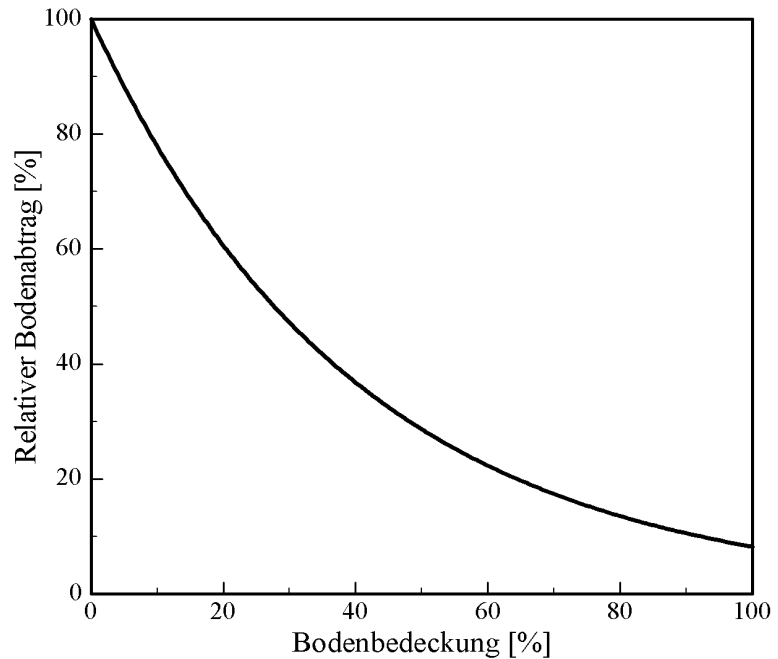


Bild 2: Einfluss der Bodenbedeckung mit Mulch auf den relativen Bodenabtrag nach Morgan, 2001

2.3 Erosivität von Niederschlagsereignissen

Der Erosionsprozess an der Oberfläche einer Rekultivierungsschicht hängt einerseits von der vom Regen eingetragenen Energie, andererseits von den Wasserflüssen ab. Soweit die Oberfläche bewachsen ist wird ein Teil des Niederschlags durch die Interzeption und Evaporation zunächst vom Boden ferngehalten. Das auf die Oberfläche des Bodens auftreffenden Wassers wird zum Teil direkt versickern. Der Überschuss wird in den Vertiefungen der Rauigkeit auf der Oberfläche zurückgehalten. Erst wenn dieser Speicher aufgefüllt ist, findet ein Oberflächenabfluss statt. Auf den Böschungen ist diese Speichermöglichkeit jedoch gering und schnell erschöpft. Das in den Boden infiltrierte Wasser sickert i. A. entlang präferenzialer Fließwege vertikal nach unten oder lateral als Schichtwasser ab. Diese Infiltration wird durch die Schwerkraft ($i=1$) oder durch eine Saugspannungsgefälle (Matrixpotential) kontrolliert. Der Boden sättigt sich dabei auf, so dass die Infiltrationsrate ausgehend von einer Teilsättigung bis hin zu einem Darcy'schen Grenzwert abnimmt. Da mit Erreichen der Wassersättigung die Saugspannung verschwindet, wird dann theoretisch der untere Grenzwert der Infiltrationsrate erreicht, der wegen $i=1$ gerade der gesättigten Wasserdurchlässigkeit k_f der Rekultivierungsschicht entspricht. Tatsächlich ist die Infiltrationsrate aber stets geringer, da immer Lufteinschlüsse in der Rekultivierungsschicht verbleiben. Eine vollständige Sättigung würde darüber hinaus eine Verflüssigung verursachen oder zumindest zu sonstigen Standsicherheitsproblemen führen. In erster

cherheitsproblemen führen. In erster Näherung kann davon ausgegangen werden, dass grobkörnige und gemischtkörnige Böden eine Infiltrationskapazität haben, die im Mittel geringer ist, als die gesättigte Wasserdurchlässigkeit, während bindige Böden wegen Mikrorissen und präferenzierter Fließwege i. A. eine höhere Infiltrationsrate aufweisen, als die unter Laborbedingungen ermittelte Wasserdurchlässigkeit. Verdichtung und Verschlammung der Oberfläche verschlechtern die Situation.

Unter Vernachlässigung der Evaporation setzt ein Oberflächenabfluss dann ein, wenn die aktuelle Regenintensität die Infiltrationskapazität übersteigt. Wegen der abnehmenden Infiltrationsrate ist neben der Intensität ist auch die Dauer von Interesse. Da Oberböden, wie sie derzeit für Rekultivierungsschichten verwendet werden, eine Wasserdurchlässigkeit in der Größenordnung $k = 10^{-5}$ bis 10^{-4} m/s aufweisen, müssten Regenintensitäten von etwa $I_{60} = 50$ mm/h (toniger Boden) bis zu 200 mm/h (sandig steiniger Boden) verträglich sein. Derart starke Dauerregen treten in Deutschland derzeit nicht auf, selbst bei einem 10-jährlichen Regenereignis liegt die Regenspende unter 35 mm/h. Zur Initiierung eines Oberflächenabflusses muss allerdings nicht die gesamte Rekultivierungsschicht gesättigt sein. Ein Rückstau und damit ein Oberflächenabfluss findet bereits statt, wenn sich nahe der Deckschicht eine wassergesättigte Sperrschicht gebildet hat. Insofern sind bei der Auswahl der Rekultivierungsböden, bei der Bemessung der Entwässerungseinrichtungen und bei der Planung von Schutzmaßnahmen kürzere Regenereignisse hoher Intensität zu betrachten.

In der Bodenkunde und der Geomorphologie wird zur Bewertung der Erosivität von Niederschlägen häufig das Produkt aus der kinetischen Energie E [MJ/ha/mm] des Regenereignisses und dem Maximum der Intensität I_{30} [mm/30min] als Maß der Erosivität herangezogen. Hierzu liegen empirische Korrelation zum Abtrag von unbedecktem Boden vor. Eigene Erfahrungen mit erodierten Rekultivierungsschichten wie auch die Auswertung verschiedener Literaturquellen lassen erkennen, dass zum einen Kurzeitereignisse, etwa die Intensität über 5 Minuten für das Lösen und andererseits die Dauer der Regenereignisse und damit die Summenkurve des Niederschlags hinsichtlich Transport und Entwässerung ein sinnvollerer Kriterium sein kann.

Über den Lebenszyklus einer rekultivierten Deponieoberfläche betrachtet liegt eine stochastisch verteilte Einwirkung (Erosivität) mit periodischen Spitzen in den Monaten Mai bis August vor, der ein Bodenwiderstand (Erodibilität) gegenübersteht, der anfangs sehr gering und schutzbedürftig ist, über einen Zeitraum von ca. 3 Jahren an Robustheit gewinnt und langfristig ohne Nachsorge und Pflege verschiedenen Schwächungen durch Mensch und Tier und Bewuchs ausgesetzt ist. Zur Bemessung von Entwässerungseinrichtungen wie Randgräben, Rinnen und Durchlässen ist es üblich, ein Regenereignis mit 15 minütiger Dauer und einem Wiederkehrintervall von 5 Jahren $r_{15;n=0,2}$ zugrunde zu legen, das je nach Standort in der Größenordnung von 150 bis 220 l/s/ha ($I_{15;r=0,2} = 14-20$ mm/15 min) beträgt. Auf einer dicht bewachsenen, robusten Deponieoberfläche führt eine solche Erosivität erfahrungsgemäß nicht zu Schäden. Eine unbedeckte Oberfläche jedoch, wie sie anfangs unmittelbar nach der Fertigstellung flächig vorliegt, kann einem solchen Niederschlagsereignis nicht schadfrei standhalten. Erosionsschäden würden sich je nach Erodibilität des Bodens von einem geringen Flächenabtrag bei unempfindlichen Böden bis hin zu einer Grabenerosion bei empfindlichen Böden einstellen. Hier sind zum einen Schutzmaßnahmen erforderlich, wie sie nachfolgend zusammengestellt und ausführlich in *Gray u. Sotir 1996* wie auch in *Schiechl 2001* beschrieben sind. Zum andern bedarf dieser sensible Punkt einer klaren bauvertraglichen Regelung, bis zu welcher Regenintensität und Regendauer der Unternehmer für den Schutz der fertigen, noch nicht abgenommen Bauteile selbst verantwortlich ist und ab wann das Risiko der Bodenerosion in den Verantwortungsbereich des Bauherrn übergeht.

3 Erosionsphänomene und Vegetationsstrukturen zur Vermeidung und Minderung der Erosion

In Deutschland wird die Erosion von Rekultivierungsschichten auf Deponien und Altablagungen durch folgende Einflüsse verursacht bzw. gefördert

- Tropfenschlag, Hagelschlag
- Oberflächenabfluss
- Starkwind
- Schneeschurf
- Menschliche Einwirkungen wie Rodeln, Mountainbiken, Motorcross
- Weidevieh, Wild

Jede Einwirkung löst typische Erosionsphänomene - auf Deponien Schadbilder – aus, die im folgendem beschrieben werden. Vegetationsstrukturen, die gute Erosionswiderstände bilden, werden genannt.

3.1 Tropfenschlag, Hagelschlag

Bodenteilchen wurden aus dem Gefüge gelöst und können dann oberflächlich abgeschwemmt werden. Eine geschlossene Gras-/Krautschicht ggf. in Kombination mit einer lichtdurchlässigen Strauchsicht schützt den Boden vor dieser Einwirkung.

3.2 Oberflächenabfluss

Der Oberflächenabfluss auf hängigem Gelände entsteht bei Starkregen. Die gelösten Bodenpartikel werden in der Falllinie abgeschwemmt. Je nach Länge und Neigung des Hanges, sowie Bodenverhältnissen entstehen daraus durch Abflusskonzentrationen Erosionsrillen bis 10 cm Tiefe und auf längeren Hängen oder sehr erosionsanfälligem Boden Erosionsrinnen (10-40 cm tief). Bei stärkeren Abflusskonzentrationen z.B. in Geländemulden oder durch Hangwege entstehen auch tiefere Erosionsgräben.

Die Flächen- und Rillenerosion wird i.d.R. schon durch eine geschlossene Gras-/ Krautschicht unterbunden. Rinnen und kleine Gräben können durch speziell angepasste Süßgräser, Seggen und Sträucher stabilisiert werden. Dabei müssen die oberirdischen Pflanzentriebe hydraulisch rau wirken, um die Strömung zu bremsen. Die Wurzeln müssen die Rinnensohle unterwurzeln und Erosion, Überschüttung und damit verbundene Verletzungen vertragen.

Stärkere Grabenerosion wird durch eine Kombination von Natursteinen und geeigneten Pflanzen stabilisiert. Dabei übernehmen die Pflanzen die oben genannten Eigenschaften und bilden zusätzlich mit ihrem feinfaserigen Wurzelwerk einen lebenden Filter zwischen Stein- bzw. Schotterschicht und Boden.

3.3 Starkwind

Starkwind führt auf vegetationsfreiem Sand- und gelockerten Schluffböden vor allem auf der Luvseite und auf Kuppen zu Erosion. Flächenhafte Gras-/Krautvegetation ggf. mit Gehölzen

schützt vor Bodenverwehungen. In Ackerbaugebieten haben sich halbdurchlässige hohe Hecken zur Bremsung bodennaher Windströmungen bewährt.

Starkwindeinwirkungen auf Bäume führen bei feuchten bindigen Böden zu Auflockerungen und Aufweichungen. Der Windwurf eines Baumes auf einer Böschung kann Erosionen auslösen. Bäume auf oberflächennahen Dichtungen sind stark kipppgefährdet und können durch Bodenbewegungen zu Schäden an den Dichtungen führen. Die Höhe von Bäumen sollte in Abhängigkeit von der Stärke der Rekultivierungsschicht festgesetzt werden.

3.4 Schneeschurf

Auf Steilhängen in höheren Gebirgslagen kommt es durch Schneeschurf zu Bodenerosionen. Auf Almen wurde beobachtet, dass hohe Gras- und Staudenbestände im Schnee festfrieren und z.T. mit Wurzelwerk und Boden mit dem Schnee abrutschen. Günstiger sind niedrige Grasfluren oder tief verwurzelte Gehölze.

3.5 Menschliche Einwirkungen

In Ballungsgebieten führen intensive Freizeitaktivitäten, wie Rodeln, Mountainbiking oder Motocrossfahrten zu Schäden in der Vegetation und im Boden. Erosionsschäden durch Wind oder Wasser kommen hinzu. Derartige Freizeitaktivitäten können durch Hecken aus robusten Sträuchern unterbunden werden. In dicht besiedelten Gebieten sollten Alternativen für die Freizeitgestaltung angeboten werden, um Verbote auf den Deponieflächen leichter durchsetzen zu können.

3.6 Weidenvieh und Wild

Sowohl intensive Weidenviehhaltung als auch zu große ggf. angefütterte Wildtierpopulationen können zur Zerstörung der Schutzvegetation durch Verbiss und Tritt und zu Erosionen als Folge von Tritt- und Wühltiereinwirkungen führen. Magere Weiden können zur Schafbeweidung genutzt werden.

3.7 Hinweise zur Pflanzenauswahl

Langfristig erosionsstabile Pflanzenbestände werden erzielt, wenn die Pflanzen standortgerecht, d. h. mit dem Naturraum und mit den Besonderheiten des speziellen Standorts auf der Deponie zurechtkommen. Naturschutzfachlich erwünscht und häufig im Genehmigungsverfahren festgesetzt, ist die Verwendung von Pflanzen des jeweiligen Naturraumes (heimische Vegetation). Dies führt auch aus ingenieurbio-logischer Sicht in der Regel zu langfristig stabilen Pflanzenbeständen. Aus diesem Sortiment der standortgerechten heimischen Pflanzen kann nun die Artenauswahl unter ingenieurbio-logischen Kriterien optimiert werden. So kann z. B. in Rinnen oder Raubettmulden derbe, horstig wachsende Gräser oder niedrige Sträucher die hydraulische Rauheit erhöhen. Bei Gefahr von Flächen- und Rinnenerosion können ausläuferbildende Gräser und Kräuter kleinere Erosionsstellen schnell wieder schließen. Feineres Faserwurzelwerk von Gräsern und Weiden erhöht die Filterwirkung von Schotterlagen unter Steinpackungen. Betont tiefwurzelnde Gehölze wie Schwarzerle und Waldkiefer oder starkwüchsige Bäume sollten über Abdichtungen mit geringer Überdeckung nicht toleriert werden. Hinweise zur Entwicklung der Wurzeln finden sich bei *Kutschera u. Lichtenegger* 1982 und 2002.

4 Vermeidung und Minderung von Erosion

Für die in Abschnitt 3 beschriebenen Ursachen und Phänomene wird eine Auswahl von Maßnahmen zur Minderung und Vermeidung von Erosion beschrieben.

- Flächenhafter Schutz und Begrünung – Schutz vor Tropfenschlag, Wind, Flächen- und Rillenerosion
- Schutz- und Sanierungsmaßnahmen bei Rinnen- und Grabenerosion
- Schutz vor Bodenfließen
- Windschutz für benachbarte, zeitweise vegetationsfreie Flächen
- Schutz vor Schneeschurf
- Schutz vor menschlichen Einwirkungen
- Schutz vor Vieh und Wild

Langfristig erosionsstabile Pflanzenbestände werden erzielt, wenn die Pflanzen standortgerecht, d. h. mit dem Naturraum und mit den Besonderheiten des speziellen Standorts auf der Deponie zurechtkommen. Naturschutzfachliche, erwünscht und häufig im Genehmigungsverfahren festgesetzt, ist die Verwendung von Pflanzen des jeweiligen Naturraumes (heimische Vegetation). Dies führt auch aus ingenieurbioologischer Sicht in der Regel zu langfristig stabilen Pflanzenbeständen. Aus diesem Sortiment der standortgerechten heimischen Pflanzen kann nur die Artenauswahl unter ingenieurbioologischen Kriterien optimiert werden. So können z. B. in Rinnen oder Raubettmulden derbe, horstig wachsende Gräser oder niedrige Stauden die hydraulische Rauheit erhöhen. Bei Gefahr von Flächen- und Rinnenerosion können ausläuferbildende Gräser und Kräuter kleinere Erosionsstellen schnell wieder schließen. Feineres Faserwurzelwerk von Gräsern und Weiden erhöht die Filterwirkung von Schotterlagen unter Steinpackungen. Betont tiefwurzeln Gehölze wie Schwarzerle und Waldkiefer sollten über Abdichtungen mit geringer Überdeckung nicht toleriert werden.

4.1 Flächenhafter Schutz und Begrünung

Die flächenhafte Begrünung wirkt sofort nach der Vegetationsentwicklung sehr günstig im Gebietswasserhaushalt und reduziert sehr stark die flächenhafte Erosion durch Wind und Wasser. Zur Initialbegrünung haben sich folgende Vorgehensweisen bewährt:

- Ansaat von Hand täglich auf der fertig gestellten Deponieoberfläche führt in der Vegetationszeit Mai bis September zur schnellstmöglichen Begrünung mit geringem Risiko. Angesät wird geeignetes Saatgut von Gräsern, Kräutern unter Zugabe von Dünger, Bodenverbesserungsstoffen und Mulch (DIN 18918). Bei stärkerer Erosionsgefahr sind hier Netzüberspannungen sinnvoll.
- Andeckung von Grünschnitt nach *Kirmer und Tischev* 2006 aus fruchtenden Wiesen eines vergleichbaren Standortes ggf. in Kombination mit der oben genannten Ansaat. Möglich in den Monaten Juni bis August.

- Hydrosaaten gemäß DIN 18918, *Gesellschaft für Ingenieurbiologie* 2000 u. *Schiechtl* 2001) mit auf den Standort abgestimmtem Saatgut und Begrünungshilfsstoffen wie Dünger, Bodenverbesserungsmittel, Mulch und Kleber.
- Maschinelle Andeckung von samenreichem Heumulch bzw. Heudrusch® von ähnlichen Standorten zusammen mit geeigneten Begrünungshilfsstoffen (FLL 1999, *Kirmer und Tischev* 2006).
- Flächenhafte Anpflanzungen von Sträuchern und kleinwüchsigen Bäumen, die sich für den Standort und die Stärke der Vegetationstragschicht eignen, erfolgen mit optimierten Pflanzverfahren (Loch-, Spalt-, Winkel-, Tiefloch-, Riefenpflanzung) ggf. unter Zugabe von Begrünungshilfsstoffen (*Schiechtl* 2001, *Verein für Ingenieurbiologie Schweiz* 2007). Im Bereich flächenhafter Gehölzanpflanzungen kann der vorübergehende Erosionsschutz durch Mulchmatten erfolgen.
- Auf kleineren stark erosionsgefährdeten Flächen haben sich Rasensoden und Fertigrasenandeckungen bewährt.

4.2 Schutz- u. Sanierungsmaßnahmen bei Rinnen- und Grabenerosion

Die durch geringe Abflusskonzentrationen entstehenden Rillen werden i.d.R. durch die flächenhaft aufgebrachte Vegetation saniert.

An langen Hängen oder kleinen Geländemulden kommt es im Unterhang zu Erosionsrinnen. Zur Vermeidung und Sanierung von Erosionsrinnen haben sich Lebendbauweisen bewährt, die dazu führen, dass der Abfluss gebremst, wieder flächig verteilt und die Erosionsrinnensohle stark durchwurzelt wird.

Eingesetzt werden Buschlagen aus bewurzelungsfähigen standortangepassten Strauchweidenarten, die in geneigten Gräben verlegt werden (FGSV 1983, *Schiechtl* 2001).

Bereits vorhandene Erosionsrinnen können auch mit Strauchweidenfaschinen aufgefüllt und mit Weidensteckhölzern bepflanzt werden. Größere Erosionsprofile werden durch eine geeignete Kombination von Stein- und Schotterbauweisen und Lebendverbau saniert (FGSV 1983, *Verein für Ingenieurbiologie Schweiz* 2007).

Bei starken Regenwasserabflüssen, wie sie durch in ausgeprägten Geländemulden und durch Abflusskonzentrationen aus dem Wegebau erfolgen, haben sich Raubettmulden in der Muldenlage bzw. Falllinie bewährt (FGSV 2005). Die Mulde wird durch eine Steinpackung auf einem Schotterfilter aufgebaut. Zusätzliche Rauheiten entstehen durch eingebrachte Horstgräser bzw. Stauden. Durch geeignetes feinfaseriges flächenhaftes Wurzelwerk z.B. von Seggen oder Salweiden entsteht eine Filtermatte zwischen Steinen und Boden und eine Einfassung der einlagig verlegten Steine.

4.3 Schutz vor Bodenfließen

Am Unterhang kommt es in wasserdurchlässigen Schichten über wasserundurchlässige Schichten zu starken Sickerwasseraustritten mit der Gefahr von Bodenfließen an steilen Hangfüßen. Diese Bereiche können durch begrünte Auflastfilter stabilisiert werden. Hierzu werden auf einem Schotterfilter, Steinschüttungen oder Gabionen angelegt. Begrünt werden die Bauweisen durch Gräser, Kräuter oder Sträuchern für wechselfeuchte Standorte, die durch ihren Wurzelfilz die Filterwirkung des Kies bzw. Schotterfilters erhöhen. Weidenfaschinen haben sich bei der Entwässerung von Schichtgrenzen bewährt.

4.4 Windschutz für benachbarte zeitweise vegetationsfreie Flächen

Traditionell wird in den Sand- und Lößgebieten Windschutz durch geeignete Heckensysteme geboten. Günstige Wirkungen zeigen hohe halb durchlässige Hecken, so dass starke Turbulenzen auf der Leeseite vermieden werden.

Hohe Bäume sollten auf oberflächennahen Dichtungsschichten grundsätzlich vermieden werden, weil es im Wurzelbereich bei Sturm zu Bewegungen und ggf. auch zu Schädigung der Dichtung kommen kann.

4.5 Schutz vor Schneeschurf

Zum Schutz vor Schneeschurf auf Böschungen und Hängen in den deutschen Mittelgebirgen genügen i.d.R. Strauch- und niedrige Baumbestände; in alpinen Lawineneinhängen werden Schutzwälder aufgebaut. Bei der Initiierung derartiger Schutzgehölze werden Methoden verwendet, die verhindern, dass die jungen Gehölze mit dem tauenden abrutschenden Schnee aus dem Boden gezogen werden. Sinnvoll sind Heckenbuschlagen, Buschlagen mit Zwischenpflanzungen oder Tieflochpflanzungen mit starken Pflanzenrückschnitten. Bei stark geneigten Böschungen mit oberflächennahen Dichtungen im Gebirge sollte die Belastung durch Schnee bei der geotechnischen Betrachtung mit berücksichtigt werden.

4.6 Schutz vor menschlichen Einwirkungen

Unerwünschte Nutzungen von Deponieoberflächen können durch die Anlage von Dornenhecken aus Schlehe, Weißdorn und Rose stark eingeschränkt und unterbunden werden. Die Anwuchsphase sollte durch Zäune unterstützt werden. Um die Schutzmaßnahmen in dicht besiedelten Gebieten besser durchsetzen zu können, sollten für die Freizeitnutzungen Alternativen angeboten werden.

4.7 Schutz vor Vieh und Wild

Auf Deichoberflächen führt die Schafbeweidung zu einer gleichmäßigen dichten wiesenartigen Vegetation. Pferde und Rinder zerstören die Grasnarbe sehr stark und sollten nicht auf derartigen Flächen gehalten werden. Ebenso schädlich ist eine dichte Schafbeweidung durch Ferchung.

Sowohl Weidetiere als auch Wildtiere verbeißen sehr stark die zu ingenieurbioologischen Sicherungen häufig eingesetzten Strauchweiden aber auch andere Laubgehölze. Zum Schutz sind Umzäunungen unbedingt erforderlich

Von den Wildtieren können Wildschweine und Kaninchen zu starken Schäden an Erdbauwerken führen. Zum Schutz sind tief eingegrabene Zäune sowie Bejagungen sinnvoll. Die Anwendung der in Deutschland vorhandenen jagdgesetzlichen Bestimmungen reicht meistens aus um die Probleme zu lösen. Ansonsten kann die zuständige Jagdbehörde (i.d.R. die untere) erforderliche Regelungen erlassen.

5 Folgerung für die Planung von zukünftigen Erosionsschutzmaßnahmen auf Deponien bzw. Altablagerungen

Bei der Planung von zukünftigen Erosionsschutzmaßnahmen auf Deponien bzw. Altablagerungen sollten folgende Aspekte einfließen:

5.1 Zukünftige Vegetation und Nutzung

Wenn auf den Hochebenen bzw. flachen Kuppen von Deponien landwirtschaftliche oder energiewirtschaftliche Nutzungen geplant sind, sollte die Vegetation im Kuppenbereich hierauf abgestimmt werden. Für die steileren Hänge sollte eine dem Standort - Klima, Boden und Exposition - entsprechende Vegetation ausgewählt werden, welche die Anforderungen an den Erosionsschutz und die Erhaltung der Dichtung erfüllt, Aspekte des Naturschutzes und Landschaftsbildes werden gemäß Plangenehmigung berücksichtigt, einen geringen Pflegeaufwand verursacht sowie ggf. auch eine Nebennutzung ermöglicht. Sinnvoll sind Hecken, Gebüsche, Staudenfluren und Wiesen trockener bis frischer bzw. feuchter Standorte.

5.2 Wege und Entwässerung

Entwässerungsgräben, Mulden und der damit verbundene Erosionsschutz ist abhängig von der geplanten Nutzung und Nachsorge der Deponie sowie der dafür erforderlichen Wegeführung. Für die hydrotechnische Planung eignen sich hydrologische Betrachtungen, die sowohl den Anfangszustand ohne Vegetation als auch den geplanten Endzustand mit den stark abflussreduzierten Wirkungen untersuchen und Bemessungsereignisse festlegen. Hierauf baut die Planung der Abflussprofile und der ingenieurbioologischen Sicherungen auf. Soweit eine gewisser Bodenabtrag nach Fertigstellung akzeptiert wird, müssen auch diesbezügliche Einschränkungen der Abflusskapazitäten der Gerinne berücksichtigt werden. Wege und Entwässerungseinrichtungen müssen so regelmäßig überwacht und gereinigt werden.

5.3 Geotechnische Beratung

Zu den umfangreichen geotechnischen Untersuchungen, die im Zusammenhang mit der Herstellung von Deponieoberflächen durchgeführt werden, sollten Bodenuntersuchungen im Hinblick auf Oberflächenerosion durch Wasser und Wind, sowie Bodenfließen hinzukommen. Die mögliche Aufsättigung oder gar eine Tendenz zur Verflüssigung müssen in den Standsicherheitsnachweisen betrachtet werden. Hinweise zum Baubetrieb, Erosionsschutz und Filterbau sollten gegeben werden.

5.4 Planung ingenieurbioologischer Sicherungen

Auf der Grundlage der vorgenannten Ingenieurleistungen können die ingenieurbioologischen Erosionsschutzmaßnahmen ausführungsfähig geplant werden. Hierzu werden Pflanzenarten ausgewählt, die auf den Rohbodenstandorten mit seinen klimatischen Extremen siedeln können, schnell Bestände entwickeln, die vor Erosion schützen und leicht in die geplante Zielvegetation überführt werden können. Zur Einleitung und Unterstützung dieses Prozesses dienen spezielle kombinierte Begrünungs- und Sicherungsverfahren – ingenieurbioologische Bauweisen – einschließlich abgestimmter Maßnahmen zur Bodenverbesserung und Düngung sowie mehrjährige Arbeiten zum Schutz und zur Pflege des Anwuchses. Nach dieser Anwachspflege wird die Vegetation durch eine Entwicklungspflege innerhalb mehrerer Jahre hin zur Zielvegetation entwickelt. Zur Erhaltung der Zielvegetation ist eine hierauf abgestimmte Unterhaltung erforderlich, die u.a. einer schädlichen Entwicklung wie einer spontanen Ansiedlung von Bäumen auf flachgründigen Rekultivierungsschichten entgegenwirkt. Sowohl die Zielvegetation mit der erforderlichen Unterhaltung als auch die Maßnahmen für den Erosionsschutz und die Bestandsgründung sollten bei zukünftigen Planungen für Deponieabdeckungen und Rekultivierungen berücksichtigt werden.

6 Literatur

- Bell, F. G. 2003: Geological Hazards Their Assessment, Avoidance and Mitigation. *Spon-Press Taylor&Francis Group London and New York, 2003*
- DIN 18918: Vegetationstechnik im Landschaftsbau Ingenieurbiologische Sicherungsbauweisen
- DIN 19661-2, September 2000. Richtlinien für Wasserbauwerke - Sohlenbauwerke - Teil 2: Abstürze, Absturztreppe, Sohlenrampen, Sohlengleiten, Stützschwelle, Grundschwelle, Sohlenschwelle
- FGSV 1983 (Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen): Richtlinien für die Anlage von Straßen Teil Landschaftsgestaltung Abschnitt Lebendverbau RAS - LG 3.
- FGSV 2003 (Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen): Richtlinien für die Anlage von Straßen Teil Entwässerung RAS - EW.
- FLL 1999 (Forschungsgesellschaft für Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau. Empfehlungen für besondere Begrünungsverfahren. *Selbstverlag Bonn*
- GDA 2-31 Rekultivierungsschichten. In Witt, K. J. u. Ramke, H.-G., 2006: Empfehlungen des Arbeitskreises 6.1 "Geotechnik der Deponiebauwerke" der DGGT, *Bautechnik 83, Heft 9, S. 585-596. Siehe auch: <http://gdaonline.de/>*
- Gesellschaft für Ingenieurbiologie 2000: Ingenieurbiologie - Sicherung von Verkehrswegeböschungen. *Selbstverlag Aachen*
- Gray, D. H., Sotir, R. B. 1996: Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide for Erosion Control. *Wiley, 1996*
- Hjulström, F. 1935: Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by River Fyriers. *Bulletin of the Geological Institute, University of Uppsala 25, pp. 221-527;* In Louis, H. u. Fischer, K.: Allgemeine Geomorphologie. *De Gruyter, 1979*
- Kirmer, A. u. Tischev, S. 2006: Handbuch naturnahe Begrünung von Rohböden. *Teubner Verlag.*
- Kutschera, L. u. Lichtenegger, E. 1982: Wurzelatlas mitteleuropäischer Grünlandpflanzen. *Gustav Fischer Verlag Stuttgart*
- Kutschera, L. u. Lichtenegger, E. 2002: Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. *Leopold Stocker Verlag Graz - Stuttgart*
- Morgan, R. P. C. 2003: Soil Erosion and Conservation. *Blackwell Publishing Ltd, 3rd ed., 2003*
- Schiechtl, H. M. 2001: Böschungssicherung mit ingenieurbiologischen Bauweisen. In: *Smolczyk, U (Hrsg.) Grundbautaschenbuch Teil 2. Verlag Ernst u. Sohn, S. 747-846*
- Verein für Ingenieurbiologie Schweiz 2007: Ingenieurbiologie Handbuch Bautypen. *Selbstverlag Wädenswil.*

Anschrift der Autoren

Univ. Prof. Dr.-Ing. Karl Josef Witt
Professur Grundbau
Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystr. 11 C

99421 Weimar

Tel.: +49 (0)3643 58 4560
kj.witt@bauing.uni-weimar.de

Prof. Dipl.-Ing. Rolf Johannsen
Fachhochschule Erfurt
FB Landschaftsarchitektur, Gartenbau und Forst
Lehrgebiet Ingenieurbiologie
Trichtergasse 4

99085 Erfurt

Tel: +49 (0) 36203 52279
johannsen@fh-erfurt.de