

Dr.-Ing. Wolfgang Eden

Dipl.-Ing. Harald Kurkowski



**Rezyklierte Gesteinskörnungen aus Kalksandstein für vegetationstechnische
Bodenverbesserungsmaßnahmen im Erd- und Straßenbau**

Forschungsbericht Nr. 132, Mai 2021



**Forschungsvereinigung
Kalk-Sand e. V.**

Impressum

Forschungsbericht Nr. 132
Rezyklierte Gesteinskörnungen aus Kalksandstein für vegetationstechnische
Bodenverbesserungsmaßnahmen im Erd- und Straßenbau
Ausgabe Mai 2021

Herausgeber:
Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover

Berichtersteller:
Dr.-Ing. Wolfgang Eden, Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.
Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Harald Kurkowski, Bimolab gGmbH

Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V.

Rezyklierte Gesteinskörnungen aus Kalksandstein für vegetations- technische Bodenverbesserungsmaßnahmen im Erd- und Straßenbau

Berichtersteller:

Dr.-Ing. Wolfgang Eden

Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Hannover

Dipl.-Ing., Dipl.-Wirtsch.-Ing. Harald Kurkowski

Bimolab gGmbH, Soest

Unter Mitarbeit von:

Jörg Lobmeier, BAUTECHNIK LOBMEIER E.K., Edermünde

Dirk Röth, BAUREKA BAUSTOFF-RECYCLING GMBH, Kassel

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Dieses IGF-Vorhaben 18240-N der Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite	
1	ZUSAMMENFASSUNG	5
2	EINLEITUNG	8
2.1	Allgemeines	8
2.2	Stand der Forschung und Entwicklung	11
3	UNTERSUCHUNGSPROGRAMM	19
3.1	UA1: Beschaffung, Aufbereitung und Voruntersuchung der ausgewählten Böden und Referenzmaterialien	19
3.2	UA2: Packungsdichteberechnungen für Kombinationen aus Böden und KS-RC-Materialien für unterschiedliche Verwendungsgebiete (FV Kalksandstein)	20
3.3	UA3: Eignungsuntersuchungen an verschiedenen Bodengemischen	20
3.4	UA4: Praxisversuche an einem Dammbauwerk	21
4	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	22
4.1	UA1: Beschaffung, Aufbereitung und Voruntersuchung der ausgewählten Böden und Referenzmaterialien	22
4.1.1	Beschaffte Ausgangsstoffe	22
4.1.2	Ergebnisse der allgemeinen bodenphysikalischen Untersuchungen	24
4.1.3	Kornfestigkeit, Kornform und Frost-Tau-Widerstand	25
4.1.4	Charakterisierung der KS-Mauerwerks-Ausgangsstoffe	26
4.1.5	Korngrößenverteilung	27
4.1.6	Ergebnisse der bodenchemischen Untersuchungen	31
4.2	UA2: Packungsdichteberechnungen für Kombinationen aus Böden und KS-RC-Materialien für unterschiedliche Verwendungsgebiete	33
4.3	UA3: Eignungsuntersuchungen an verschiedenen Bodengemischen	35
4.3.1	Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen	36
4.3.2	Ergebnisse der bodenchemischen Untersuchungen	48
4.4	UA4: Praxisversuche an einem Dammbauwerk	51
4.4.1	Bau und Aufbau der Versuchsfelder	51
4.4.2	Verwendete Samenmischungen für die Versuchsfelder	53
4.4.3	Wetterdaten für die Versuchsfelder	55
4.4.4	Entwicklung und Etablierung der Vegetation nach 1 und 2 Vegetationsperioden	56
4.4.5	Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen zum Projektende	59
4.4.6	Ergebnisse der bodenchemischen Untersuchungen zum Projektende	59
4.4.7	Beobachtungen bei Aufbereitung und Einbau und Erosionsgefahr	59
4.4.8	Bilder der Versuchsböschungen nach Abschluss des Projektes	66
5.	LITERATURVERZEICHNIS	68
6	ANHANG	70
6.1	Angewandte vegetationstechnische Untersuchungsmethodik	70
6.2	Fotodokumentation	71

1. Zusammenfassung

Mit der vorliegenden Arbeit wurde der Nachweis erbracht, dass rezyklierte Gesteinskörnungen aus Kalksandstein für die Verbesserung von Böden geeignet sind. Die Hauptidee ist in der folgenden Übersicht zusammengestellt. Im Wesentlichen stellte sich heraus, dass:

1. die bodenphysikalischen und die bodenchemischen Eigenschaften der Bodenverbesserungsmaßnahme durch die Zugabe von Kalksandstein-Recycling-Material beeinflusst werden und bei einer Bodenverbesserungsmaßnahme beachtet werden müssen
2. schon relativ geringe Zugabemengen an Kalksandstein-Recycling-Material in Höhe von 20 M.-% die Eigenschaften des Bodens dauerhaft verbessern können
3. die Zugabe gemischtkörnigen Kalksandstein-Recycling-Materials, z.B. 0/16 mm, die Packungsdichte (ohne Berücksichtigung der Eigenporen der KS-Körnung) weniger erhöhen als grobe Gesteinskörnungen und daher bevorzugt verwendet werden sollten. In diesem Fall ergibt sich ein geringerer Aufbereitungsaufwand, da Sortierungsschritte vermieden werden können
4. insbesondere einkörnige, sandige Böden und tonig-schluffige Böden verbessert werden können
5. vegetationstechnisch unbrauchbare oder bedingt brauchbare Böden durch Zugabe von Kalksandstein-Recycling-Material so verbessern lassen, dass sie für die Vegetationstechnik geeignet sind. Die Korngrößenverteilung verschiebt sich dabei in einen stetigeren Bereich, so dass beispielsweise unerwünschte Setzungen und entsprechend geringere Porositäten vermieden werden können
6. der erhoffte Bodenverbesserungseffekt auch bei höheren Verdichtungsgraden insbesondere durch einen höheren Luftgehalt und eine höhere Wasserdurchlässigkeit erreicht wird, während das Gesamtporenvolumen und die maximale Wasserkapazität sich beim Bodenluft- und Bodenwasserhaushalt lediglich geringfügig verändern. Eine Abmilderung von Trockenstresserscheinungen ist zwar deshalb bei den untersuchten Bodenarten nicht zu erwarten, wohl aber eine Sicherstellung des ebenso wichtigen Bodenluftgehaltes
7. durch die Zugabe von Kalksandstein-Recycling-Material das Bodenmaterial dauerhaft in den basischen Bereich verschoben wird und die vermutete Pufferwirkung des pH-Wertes damit bestätigt wurde
8. basisch „liebende“ (tolerierende) Ansaaten wie z.B. Gräser oder Gräser- und Wildblumenmischungen besser für eine Begrünung geeignet sind als sauer liebende Blumenansaaten
9. eine Bodenverbesserung mit Kalksandstein-Recycling-Material besonders geeignet erscheint für die vegetationstechnische Verbesserung von Böden für nichtüberbaubare Baumpflanzungen, Schotterrasen, Rasensubstrate und Grünbrückensubstrate
10. eine Bodenverbesserung im Bauwesen zum Ressourcen schonenderen Umgang mit Böden beitragen sowie natürliche Ressourcen wie Lava ersetzen kann.

Bei der Durchführung des Forschungsprojektes wurden folgende Randbedingungen besonders berücksichtigt:

- a. Die strengen Anforderungen an die Bodenverdichtung im Erd- und Straßenbau sind aus Sicht der Vegetationstechnik zu hoch. Die bautechnisch geforderte Bodenverdichtung im Erd- und Straßenbau führt bei vielen Böden zu einer Undurchwurzelbarkeit für Pflanzen und begrenzt den durchwurzelbaren Bodenraum (Blumentopfeffekt) des Straßenbegleitgrüns bei Erd- und Straßenbauvorhaben und im Garten- und Landschaftsbau. Es gilt den Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt für die Begrünung durch geeignete Maßnahmen vegetationstechnisch zu verbessern.
- b. Eine einfache mechanische Bodenverbesserungsmaßnahme ist die Zugabe von Kalksandstein-Recycling-Material zum Bodenmaterial, um diese für Vegetationstragschichten bei Dämmen und Wällen für Baumpflanzungen, Rasen-, Schotterrasen- und Wildblumensubstrate als Vegetationstragschichten für Grünbrücken oder auch Wasserhaushaltsschichten für den Deponiebau besser nutzbar zu machen.

- c. Vegetationstechnische Bodenverbesserungsmaßnahmen können damit überall dort angewendet werden, wo natürliche Böden aufgrund ihrer stofftechnischen Eigenschaften nur beschränkt oder in ihrer natürlich vorkommenden Form ungeeignet sind.
- d. Für den Nachweis, dass sich Kalksandstein-Recycling-Material für Bodenverbesserungsmaßnahmen eignen, wurden verschiedene repräsentative Stoffproben von unterschiedlichen Böden (tonig, sandig, gemischtkörnig) aus Deutschland aus der Praxis beschafft (12 verschiedene Böden der Körnung bis max. 0/45 mm). Das ausgewählte, aufzubereitende Kalksandsteinmaterial wurde großtechnisch in die Körnung 0/32 mm aufbereitet und Anteile davon im Labor in die Fraktionen 0/2, 2/8, 8/16, 16/32, 0/16 und 2/16 mm abgeseibt, um daran festgelegte Eigenschaften der Böden und der KS-Materialien bestimmen zu können.
- e. Für verschiedene Ausgangsmaterialien/Körnungen wurden im Anschluss daran an verschiedenen Mischungen numerische Packungsdichteberechnungen durchgeführt, um die Wirkung der Bodenverbesserungsmaßnahme auf die Änderung der Porosität ableiten zu können. Aufbauend auf diesen Voruntersuchungen wurden exemplarische Eignungsuntersuchungen mit Hilfe ausgewählter Böden und Kalksandstein-Recycling-Gemische durchgeführt. Dabei waren die unterschiedlichen Verdichtungsgrade der verschiedenen Verwendungsgebiete zu beachten, z.B. für Rasensubstrat für die Dammbegrünung oder Grünbrückensubstrat 90 M.-% oder für Baumsubstrate 85 und 95 M.-%. Damit ergaben sich neben der 100 %-Verdichtung nach Proctor insgesamt 4 unterschiedliche Verdichtungsgrade für die Untersuchung der Bodenluft- und Bodenwasserhaushaltes.

Es folgten Praxisversuche an Dammbauwerken bei den Fa. BAUREKA, Aufbereitungsstandort Igelsburg in Habichtswald bei Kassel und zusätzlich bei der Fa. LOBMEIER in Edermünde mit der Errichtung von Versuchsfeldern mit variierender Zugabemenge von Kalksandstein in der Korngröße von 0/16 mm. Die angelegten Versuchsfelder wurden bis zum Versuchsende getestet. Als Referenz dienten immer die Böden, die mit 20 oder 40 M.-% Kalksandstein-Recycling-Material verbessert werden sollten. Als Ansaat wurde eine Gräser-, eine Blumen- oder Gräser-/Wildblumenmischung auf den Versuchsfeldern variiert und über eine oder zwei Vegetationsperioden beobachtet.

Die für eine angestrebte Bodenverbesserung durch die Zugabe von stetig abgestuften Gesteinskörnungen aus Kalksandstein ausgelegten Versuchsmaterialien, wiesen nach der Mischung eine sandig, krümelige Struktur auf und ließen sich mittels einfacher Mischtechnik aufbereiten. Das bindige Verhalten der Böden für die Versuchsfelder wurde damit, insbesondere bei den tonig-schluffigen Böden, teilweise aufgehoben bzw. stark reduziert und damit die Einbaubarkeit verbessert.

Bei allen Versuchsfeldern in Habichtswald waren bis zu einer steilen Böschungsneigung von 1:1 keine Erosionsrinnen zu beobachten. Lediglich in einem Fall (Feld E1, dem bindigen Referenzboden in Edermünde) bildeten sich deutliche Erosionsrinnen aus, die bei einer Bodenverbesserungsmaßnahme mit aufbereiteten Kalksandsteinen nicht mehr auftrat. Somit konnten die bautechnischen Eigenschaften des behandelten Bodens durch das Kalksandstein-Recycling-Material verbessert werden.

Bei den bodenphysikalischen Eigenschaften zeigte sich, dass eine praxisgemäße Zugabemenge von bis zu 50 M.-% an Kalksandstein-Recycling-Material die maximale Wasserkapazität nicht wesentlich veränderte. Jedoch wurden die Wasserdurchlässigkeit und der Bodenluftgehalt in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad deutlich verbessert.

Bei den bodenchemischen Eigenschaften fiel auf, dass der pH-Wert durch die Zugabe des Kalksandstein-Recycling-Materials im Bodengemisch erwartungsgemäß anstieg und für die angestrebte Vegetation beachtet werden muss. Dieser Effekt wurde ebenfalls bei den Feldversuchen über zwei Vegetationsperioden beobachtet.

Bei den Feldversuchen mit unterschiedlicher Ansaat konnte festgestellt werden, dass alle Versuchsfelder begrünt. Es zeigte sich, dass der unbehandelte Boden die besten Wuchs- und Blüheigenschaften für die Blumenmischung aufwies. Bei der Gräseransaat zeigten die Felder mit 20 M.-% Kalksandstein 0/16 mm die besten Vegetationserfolge. Eine deutlich höhere Zugabemenge von 40 M.-% Kalksandstein 0/16 mm hat sich beim Feldversuch mit bindigen Bodenvarianten nicht bewährt, da ab dieser Größenordnung bei den Pflanze eine geringere Vitalität vorlag. Besonders schnell begrünete ein Versuchsfeld mit einer speziell ausgelegten Gräser- und Wildblumenansaatmischung, die für die Begrünung von Böschungen entwickelt wurde.

Ausblick: Höher beanspruchte Anwendungsbereiche von Böden wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht untersucht. Hierzu gehören beispielsweise Feuerwehruzufahrten oder Messeparkplätze mit Schotterrassen, die besondere bautechnische Anforderungen für eine solche Maßnahme stellen. Auch Sportanlagen wie Golfplätze, die eine pflegeleichte, dauerhafte belastbare und beispielbare Gräservegetation aufgrund der besonderen Nutzungsbedingungen benötigen, erscheinen für eine weitere Untersuchung besonders interessant. Ein weiteres Anwendungsfeld kann die möglichst setzungsfreie Baugrubenverfüllung von Bauwerken sein. Hier steht u.a. das Setzungsverhalten solch behandelter Böden für die Verfüllung von Baugruben im Mittelpunkt der Untersuchungen und sollte daher einer Fortführung des Forschungsvorhabens vorbehalten sein.

Das Forschungsziel wurde erreicht.

2. Einleitung

2.1 Allgemeines

Die strengen Anforderungen an die Bodenverdichtung im Erd- und Straßenbau sind aus Sicht der Vegetationstechnik zu hoch. Die bautechnisch geforderte Bodenverdichtung im Erd- und Straßenbau führt bei vielen Böden zu einer Undurchwurzelbarkeit für Pflanzen und begrenzt den durchwurzelbaren Bodenraum (Blumentopfeffekt) des Straßenbegleitgrüns bei Erd- und Straßenbauvorhaben und im Garten- und Landschaftsbau. Die Folge ist ein tristes ungesundes Bild des Begleitgrüns an Verkehrsflächen oder ein ständiger, unerwünschter hoher Pflegeaufwand, z.B. in Form von Bewässerungsmaßnahmen mit den entsprechenden Kosten. Der Klimawandel wird diesen Zustand in Form der Verstärkung des sogenannten „Trockenstress“ noch weiter verschärfen.

Durch eine zu hohe Verdichtung sind die bodenphysikalischen Eigenschaften für ein vitales Wachstum der Pflanzen im Bereich des Straßenbegleitgrün gestört. Es gilt, den Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt für die Begrünung vegetationstechnisch zu verbessern. Nun kann der Wasserhaushalt von Böden, durch den Einsatz von wasserspeichernden porösen Gesteinskörnungen, deutlich verbessert werden, um diesen Mangel zu beseitigen.

Unter vegetationstechnischen Verbesserungsmaßnahmen für Böden werden Anwendungen verstanden, wie z.B.:

- Vegetationstragschichten bei Dämmen und Wällen,
- Baumpflanzungen,
- Rasen-, Schotterrasen- und Wildblumensubstrate für das Straßenbegleitgrün,
- Vegetationstragschichten für Grünbrücken,
- Wasserhaushaltsschichten für den Deponiebau.

Vegetationstechnische Verbesserungsmaßnahmen werden im Garten- und Landschaftsbau, wie für das Straßenbegleitgrün im Erd- und Straßenbau, angewendet.

Dabei fordert die DIN 18915 [1] unter Abschnitt 7.3: *„Ungeeigneter Boden ist auszutauschen, wenn die Eignung durch Bodenverbesserungsmaßnahmen nicht erreicht werden kann.“* Bodenverbesserungsmaßnahmen haben daher klar den Vorrang vor einem Bodenaustausch, der im Erd- und Straßenbau im Regelfall deutlich kostenintensiver ist.

Rezyklierte Gesteinskörnungen aus Kalksandstein können als Bestandteil von Vegetationssubstraten hochwertig im Rahmen der gesetzlich geforderten Kreislaufwirtschaft verwertet werden und tragen damit zur Ressourcenschonung und Ressourceneffektivität bei. Im Rahmen der Durchführung des AIF-Projektes, Nr. 17319-N *„Vegetationssubstrate aus rezyklierten Gesteinskörnungen aus Mauerwerk“* wurde an unterschiedlichen Gehölzen die Eignung von rezyklierten Gesteinskörnungen aus Kalksandstein nachgewiesen [2]. Eingesetzt wurden hier rezyklierte Gesteinskörnungen, die aus Fehlchargen der Kalksandsteinproduktion (sortenrein) oder aus abgebrochenem Kalksandsteinmauerwerk unterschiedlicher Sortenreinheit selektiv aufbereitet wurden. Aufgrund dieser Ergebnisse ist zu erwarten, dass rezyklierter Gesteinskörnungen aus Kalksandstein sich ebenfalls für den Einsatz zur vegetationstechnischen Bodenverbesserung eignen. Dabei ist insbesondere das vergleichsweise hohe Wasserhaltevermögen zur Steigerung der maximalen Wasserspeicherkapazität (12 bis 20 M.-%) oder bei sauren Böden die Pufferung des pH-Wertes vielversprechend [2]. Der Nachweis stand noch aus und wurde mit den Untersuchungen erbracht.

Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse für KMU

Mithilfe dieses Forschungsvorhabens soll nachgewiesen werden, dass sich rezyklierte Kalksandstein-Gesteinskörnungen bautechnisch für vegetationstechnische Bodenverbesserungsmaßnahmen gut eignen und in der Lage sind, den Wassermangel („Trockenstress“) für Pflanzen im Erd- und Straßenbau abzumildern. Die rezyklierten KS-Gesteinskörnungen sollen für diese Aufgabenstellung natürliche poröse Gesteinskörnungen ersetzen, wie beispielsweise Lava und Bims, die in Deutschland regional nur in der Eifel vorkommen und daher oftmals ökologisch unerwünschte hohe Transportentfernungen bedingen oder auch künstliche Gesteinskörnungen, wie Ziegel, Blähton oder Blähschiefer, bei deren Produktion z.B. hohe Energieaufwendungen nachteilig sind.

Von der Erzeugung der rezyklierten Kalksandstein-Gesteinskörnung bis zur fertigen Bodenverbesserung sind verschiedene Branchen beteiligt, die bis auf wenige Ausnahmen KMU sind. Die Kalksandsteinindustrie profitiert von einem sicheren Absatzgebiet ihrer Fehlchargen und Schnittreste aus konfektionierten Bausystemen in sortenreiner Form an die Recycling-Industrie. Außerdem ergibt sich für die Kalksandsteinindustrie eine sichere Wiederverwendung für Kalksandsteinmauerwerksmassen aus dem Rückbau/Abriss und kann diesen hochwertigen „grünen“ Stoffkreislauf werbewirksam darstellen und nutzen.

Die KS-Materialien für die Bodenverbesserung werden vornehmlich von der Recycling-Industrie aufbereitet, die überwiegend aus klein- und mittelständischen Aufbereitern und Vermarktern besteht. Für diese ergibt sich im Besonderen ein hochwertiges mengenintensives und hochpreisiges Absatzgebiet für KS-Rezyklate, die aus Kalksandsteinmauerwerk aus dem Rückbau/Abriss sortenrein aufbereitet werden. Von der Substratindustrie können diese qualitativ hochwertigen KS-Gesteinskörnungen direkt mit aufbereitetem Boden als verbessertes Substrat für verschiedene Zwecke im Markt als Fertigs substrat vertrieben werden.

Die KS-Gesteinskörnungen können aber auch direkt an Straßen- und Tiefbauunternehmen oder GaLaBau-Unternehmen vertrieben werden. Diese können in situ zu vegetationstechnischen Bodenverbesserungsstoffen aufbereitet und beispielsweise als Vegetationstragschicht im Bereich von Dämmen und Wällen mit vorhandenen Böden genutzt werden. Hierdurch werden Transportwege minimiert. Ähnlich wäre auch die Vorgehensweise bei dem Bau von Grünbrücken. Im direkten Vergleich zum 100-prozentigen-Austausch ungeeigneter Böden und den Ersatz durch ein Vegetationssubstrat in situ könnte die vegetationstechnische Bodenverbesserungsmaßnahme immer kostengünstiger hergestellt werden.

Das durchgeführte Forschungsvorhaben berührt somit übergreifend die Interessen der unterschiedlichen beteiligten KMU-geprägten Branchen. Aber auch die öffentliche Hand als wichtiger Auftraggeber profitiert von vegetationstechnischen Bodenverbesserungen mit einem geringeren Pflegeaufwand für ihr Straßenbegleitgrün.

Der direkte Bedarf an vegetationstechnischen Bodenverbesserungsmaßnahmen ist nur schwer exakt abschätzbar und soll anhand des folgenden Beispiels aufgezeigt werden. Der Kreislaufwirtschaft-Mengenstatistik¹⁾ kann man entnehmen, dass im Jahr 2012 insgesamt 109,8 Mio. t Boden und Steine angefallen sind. Geht man davon aus, dass sich nur ca. 10 % (entspricht ca. 11 Mio. t) für den Einsatz als vegetationstechnische Bodenverbesserungsmaßnahme eignen, würde die max. verfügbare jährliche KS-Recycling-Gesteinskörnung von ca. 5 bis 7 Mio. t reichen, um daraus 16 bis 18 Mio. t vegetationstechnische Bodenverbesserung herzustellen. Das entspricht einem Anteil an KS-Material in der Bodenverbesserung von ca. 31 bis 39 %.

Geht man weiter davon aus, dass die KS-Recycling-Gesteinskörnung konservativ geschätzt zu Preisen von mind. 10,- €/t (vergleichbare Ziegel-Recycling-Gesteinskörnungen erzielen heute einen Preis ab Werk von 12,- bis 15,- €/t) im Markt abgesetzt werden könnte, ergibt sich ein volkswirtschaftliches Gewinnpotenzial von 50 bis 70 Mio. € zur Stärkung der beteiligten KMU. Zusätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die Aufbereitungskosten für das KS-RC-Material aus dem Rückbau/Abriss über die Annahmekosten der Recycling-Anlage in etwa gleicher Größenordnung gedeckt würden. Das volkswirtschaftliche Umsatzpotenzial würde sich entsprechend zu 100 bis 140 Mio. € jährlich ergeben. Würden ca. 200 Aufbereitungsunternehmen das KS- Recycling-Material aufbereiten (rd. 25.000 bis 35.000 Tonnen jährlich) ergäbe sich ein zusätzlicher Gewinn pro Aufbereitungsunternehmen von zusätzlich 250.000 bis 350.000 € jährlich.

1) Mineralische Bauabfälle Monitoring 2012 Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2012, Kreislaufwirtschaft Bau.

Der Bedarf an Vegetationsbaustoffen wird künftig steigen, siehe Bild 1.

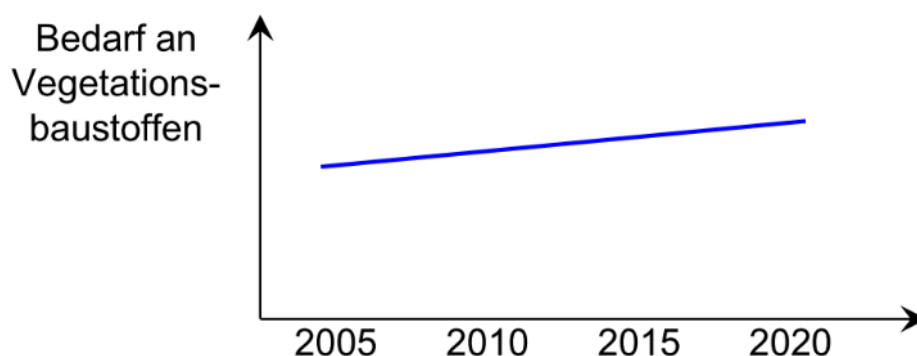


Bild 1: Voraussichtlicher Bedarf an Vegetationsbaustoffen (qualitativ)

2.2 Stand der Forschung und Entwicklung

Bodenphysikalische Grundlagen

Die Vegetationstechnik ist im Vergleich zur Erd- und Straßenbautechnik oder Bodenkunde noch eine vergleichsweise junge Wissenschaft, die sich aber spätestens seit Entwicklung spezieller Dachbegrünungsbauweisen für den Garten- und Landschaftsbau (Bauweisen ohne Bodenanschluss) sowie spezieller hochstrapazierfähiger mit Rasen begrünter Sportplatzbaustoffe etabliert hat. Das betrifft weiterhin auch Baustoffe und Bauweisen, die im Bereich des Straßenbegleitgrüns von Straßen und Verkehrsflächen eingesetzt werden (z.B. Straßenbaumpflanzungen, Straßenbankette, Begrünung von Damm- und Wallbauwerken usw.).

Vegetationstechnische Bodenverbesserungsmaßnahmen können überall dort angewendet werden, wo natürliche Böden aufgrund ihrer stofftechnischen Eigenschaften nur beschränkt oder in ihrer natürlich vorkommenden Form ungeeignet sind. Mit Hilfe vegetationstechnischer Bodenverbesserungsmaßnahmen können bodenphysikalische, bodenchemische und bodenbiologische Eigenschaften von Böden für die jeweilige Begrünung verbessert werden. Dabei müssen ebenfalls bautechnische Anforderungen erfüllt werden. Diese Maßnahmen betreffen bezüglich der Bodenphysik z.B. die Verbesserung des Wasserhaltevermögens, der Wasserdurchlässigkeit und des Luftgehaltes und betreffen daher immer den Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt. In der Bodenchemie steht u.a. die Veränderung der pH-Werte oder des organischen Gehaltes für das jeweilige Begrünungsziel im Fokus der Bodenverbesserung.

Bautechnische Anforderungen betreffen für erd- und straßenbautechnische Anwendungen z.B. den erforderlichen Verdichtungsgrad oder die Kornfestigkeit der Mineralstoffe. In der hier anzuwendenden DIN 18915, *Vegetationstechnik im Landschaftsbau, Bodenarbeiten* [1] sind keine genauen Prüfverfahren und Anforderungen für Bodenverbesserungsmaßnahmen aufgeführt. Es wird lediglich eine generelle Eignung gefordert. Hinsichtlich eines differenzierten Anforderungsprofils muss daher für die jeweilige Aufgabenstellungen auf weiterführende Regelwerke, wie beispielsweise der *Empfehlungen für Baumpflanzungen* [3, 4] zurückgegriffen werden, um den Verbesserungseffekt konkret untersuchen und beurteilen zu können.

Die allgemein anerkannte *bodenkundliche Kartieranleitung* [5] definiert allgemein den Begriff „Substrat“ als das Material, aus dem erstens die Festsubstanz des Bodens besteht. Der Begriff Substrat gibt daher im Bereich der Bodenkunde und der Bodenbeschreibung in erster Linie Hinweise zur Bodenentstehung. Er charakterisiert die bodenbildenden Ausgangsgesteine sowie deren Verwitterungs-, Umlagerungs- und Verlagerungszustand und unterscheidet weiterhin in anthropogene und natürliche Substrate. Substrate für den Garten- und Landschaftsbau werden allgemein definiert als Bodenersatz aus miteinander vermischten Stoffen oder aus aufbereiteten Böden.

Zweiter wesentlicher Bestandteil im Boden- oder Substratgefüge sind die Poren. Im Porensystem von Böden vollziehen sich der Lufthaushalt und die Wasserbewegung - verbunden mit Transport- und Akkumulationsvorgängen. Dabei wird davon ausgegangen, dass das Bodenwasser in den weiten Grobporen des Bodens frei beweglich ist und als Sickerwasser entsprechend der Gravitation dem Grundwasser zustrebt. Das pflanzenverfügbare Haftwasser befindet sich in den Mittelporen des Bodens. Nicht pflanzenverfügbares Haftwasser, hier auch Totwasser genannt, befindet sich in den Feinporen. Die Summe aus Luftkapazität plus Feldkapazität ergibt in der Bodenkunde das Gesamtporenvolumen des Bodens – siehe **Bild 2**. [5 bis 10].

Um die vegetationstechnischen Eigenschaften von Böden - bezüglich des so wichtigen resultierenden Bodenluft- und Bodenwasserhaushaltes bei vorgegebenen bautechnischen Verdichtungsgrad - zu verbessern, ist es erforderlich, den Grob- und Mittelporenbereich über die Veränderung der Korngrößenverteilung zu erreichen.

Ebenfalls sind in **Bild 2** typische Korngrößenverteilungen für verschiedenen Böden (Ton-, Schluff- und Sandboden) aufgeführt. Dabei ist erkennbar, dass Sandböden zwar eine hohe Luftkapazität besitzen, jedoch nur eine geringe Wasserspeicherkapazität. Ein Pflanzenwachstum ist hier im Regelfall kaum möglich. Tonböden besitzen zwar eine hohe Luft- und Wasserspeicherkapazität, diese ist jedoch aufgrund der geringen Porengröße nicht pflanzenverfügbar. Auch hier ist ein vitales Pflanzenwachstum im Regelfall unmöglich. So weisen allgemein gemischtkörnige Böden bau- und vegetationstechnisch die besten vegetationstechnischen Eigenschaften auf. Daher müssen im Regelfall auch Schluffböden verbessert werden, da diese für Bauzwecke unzureichende Standfestigkeitseigenschaften aufweisen. In der Landwirtschaft erreichen diese aber im direkten Vergleich die größten Erträge und damit Bodenfruchtbarkeiten [11, 12].

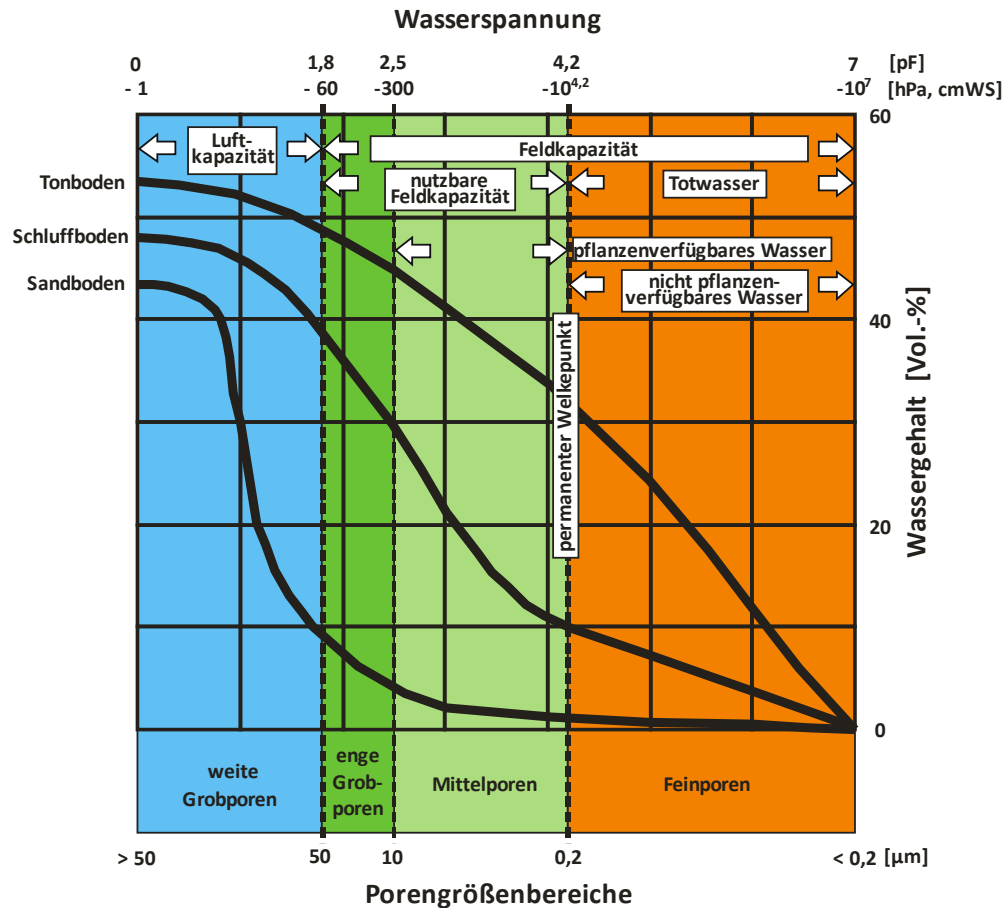


Bild 2: Beziehung zwischen der Porengröße und dem Wassergehalt von typischen Böden [6]

Es ist bekannt, dass im Erd- und Straßenbau durch den Einsatz immer schwererer Baumaschinen (oft aufgrund steigender Schaufelgröße) und steigendem wirtschaftlichem Druck viele Böden aufgrund der Baustellengegebenheiten anschließend vegetationstechnisch unbrauchbar werden. Sie können aufgrund fehlender Grob- und Mittelporen nicht mehr durchwurzelt werden und bilden „Dichtungsschichten“, z.B. im Bereich der Transportwege/Fahrspuren, der vegetationstechnisch zum unerwünschten „Blumentopfeffekt“ führt. Später kann nur noch mit kostenintensiven Pflegemaßnahmen korrigiert werden.

Die DIN 18915 [1] gliedert die Bodengruppen für den Garten- und Landschaftsbau nach Ihrer „*Bearbeitbarkeit*“, siehe Tabelle 1. Die hier interessanten Bodenarten mit einem bau- und vegetationsstechnischen Verbesserungspotenzial bzgl. des Einsatzes von KS-Mauerwerks-RC-Material sind hellblau markiert (= Zielbereich).

Bodengruppen für vegetationstechnische Zwecke nach DIN 18915							
Spalte	1	2	3	4	5	6	7
Zeile	Boden- gruppe	Benennung	Boden aus z.B.	Bearbeitbarkeit ohne Gefüge- schädigung	Körnung Massenanteile in %		Größt- korn- durch- messer d mm
					d < 0,02 mm	d > 20 mm	
1	1	organischer Boden	Hoch- und - Niedermoor	gefügestabil	-	-	-
2	2	nichtbindiger Boden	Sand	keine Einschränkunge	≤ 10	≤ 10	50
3	3	nichtbindiger steiniger Boden	Kies, Schotter	keine Einschränkunge	≤ 10	über 10 bis 30	200
4	4	schwach- bindiger Boden	anlehmigem Sand, Sandlöss, Löss	erst nach oberflächiger Abtrocknung bei mindestens	über 10 bis 20	≤ 10	50
5	5	schwachbindiger steiniger Boden	lehmigem Kies und Schotter	steifer Konsistenz (I _c ≥ 0,75)	über 10 bis 20	über 10 bis 30	200
6	6	bindiger Boden	lehmigem Sand, sandigem Lehm	erst nach Abtrocknung bei mindestens halfester Konsistenz (I _c ≥ 1,00)	über 20 bis 40	≤ 10	50
7	7	bindiger steiniger Boden	lehmigem Kies und Schotter		über 20 bis 40	über 10 bis 30	200
8	8	stark bindiger Boden	leicht plastischem bis ausgeprägt plastischem Schuff und Ton, Lösslehm		> 40	≤ 10	50
9	9	stark bindiger, steiniger Boden	Bodengruppe 8 mit Kies- und Schotter- anteilen		> 40	über 10 bis 30	200
10	10	stark steiniger Boden	leichtem Fels	-	-	> 30	-

Tabelle 1: Bodengruppen nach DIN 18915 [1] (Der Zielbereich ist hellblau markiert)

Im Gegensatz dazu gliedert die DIN 18196 [13] für den Erd- und Grundbau die Bodenarten ausschließlich nach der Korngrößenverteilung bzw. Korngröße. Für den Erd- und Straßenbau ist diese Norm die Voraussetzung, um in weiteren Regelwerken, wie z. B. den *Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau – ZTV E-StB* [14] bautechnische Anforderungen für die verschiedenen Verwendungen und Nutzungen zu definieren. Die ZTV E-StB definiert für die verschiedenen Bodenarten die „chemische (Bodenstabilisierung) oder mechanische Bodenverbesserung. Für eine vegetationstechnische Bodenverbesserung enthalten die ZTV E – StB zwar keine konkreten Hinweise. Es ist jedoch bekannt, dass der Einsatz von RC-Baustoffen im Gemisch mit den meisten Böden eine bodenphysikalische Verbesserung bewirkt. [15]

Es gibt jedoch bereits heute Praxisanwendungen, bei denen eine vegetationstechnische Bodenverbesserung im großen Maßstab genutzt wird. Kernpunkt der bodenphysikalischen Bodenverbesserung ist immer die Korngrößenverteilung und die Dichte des zu verbessernden Bodens, über die der Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt aus bodenphysikalischer Sicht gesteuert wird. Zusätzlich sind weiterhin die jeweiligen Tragfestigkeitseigenschaften (z.B. die Scherfestigkeit) oder auch die Auswirkung auf die bodenchemischen Eigenschaften zu beachten.

Die vegetationstechnischen Eigenschaften von Böden/Mineralstoffen stehen nach HEIDGER [16] im Widerspruch zu den bautechnischen Anforderungen, wie man Bild 3 entnehmen kann. Durch straßenbautechnische Verdichtungsmaßnahmen beim Bau einer Verkehrsfläche werden die Grob- und Mittelporen oftmals soweit reduziert, so dass das in sehr feinen Mikroporen stark gebundene Wasser nicht mehr für die Vegetation verfügbar ist. Nur ein für beide Seiten (*Bautechnik und Vegetationstechnik*) tragbarer technischer Kompromiss kann diesen grundsätzlichen Gegensatz für beide Bereiche lösen.

Es ist bekannt, dass Lava und Bims aufgrund ihrer hohen Porosität bei gleichzeitig relativ hoher Kornfestigkeit für vegetationstechnische Baustoffe in „bautechnischen Lösungen“ gut geeignet sind.

Einsatz von Kalksandstein-Recycling-Material: Granulate aus recyceltem Kalksandstein-Mauerwerk erfüllen nach Einschätzung der Antragsteller die gestellten Anforderungen hinsichtlich der hohen Wasserspeicherkapazität und Tragfähigkeit und können bei höheren Verdichtungsgraden im Bauwerk ebenfalls als poröse Gesteinskörnungen eingesetzt werden. Die Eignung von Kalksandstein-Recycling-Granulaten soll mit diesem Projekt nachgewiesen werden. Die Lösung besteht darin, die komplexen Zusammenhänge aus bodenphysikalischer-, bodenchemischen- und bodenbiologischer Sicht mit den bautechnischen Eigenschaften abzustimmen.

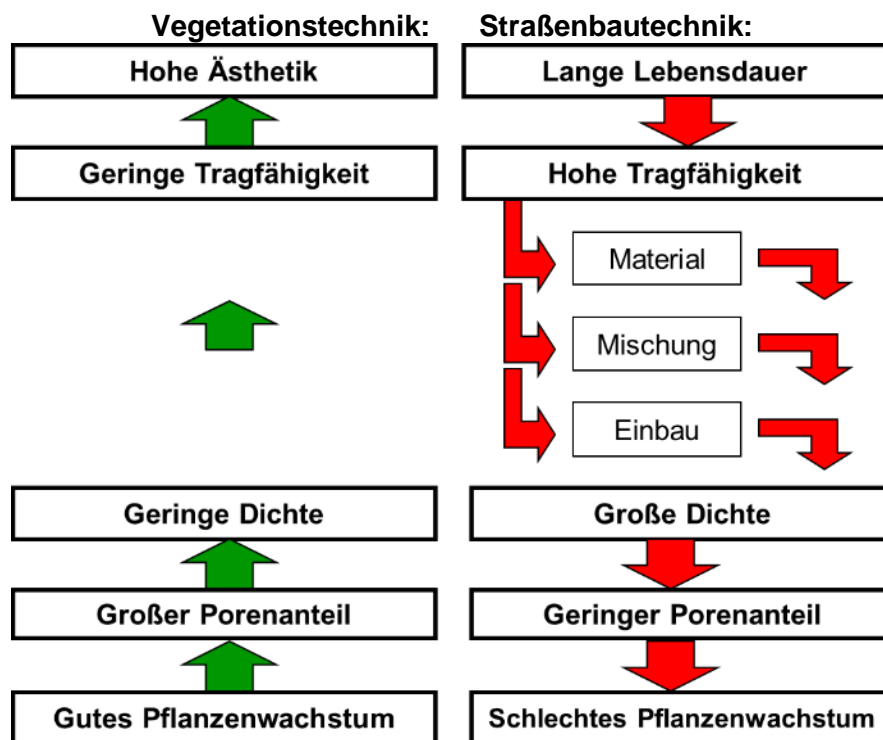


Bild 3: Gegensätzlichkeit der Anforderungen von Vegetationstechnik (grün)- und Straßenbautechnik (rot) gemäß HEIDGER [16]

Grundlage für vegetationstechnische Maßnahmen sind die DIN-Normen der Reihe „*Vegetationstechnik im Landschaftsbau*“ 18915: *Bodenarbeiten* [1], 18916: *Pflanzen und Pflanzarbeiten* [17], 18917: *Rasen und Saatarbeiten* [18] sowie 18918: *Ingenieurb biologische Sicherungsbauweisen* [19]. Die vegetationstechnische Bodenverbesserung betrifft dabei hauptsächlich den Bereich der *Bodenarbeiten* [1]. Mineralische Stoffe zur Bodenverbesserung werden in Kapitel 6.2.3 der Norm wie folgt beschrieben:

„*Mineralische Stoffe zur Bodenverbesserung, z.B. **Kalk, Sand**, Kies, Splitt, Bims, Lava, Steinmehl, Blähton, Silikat-Kolloid, müssen für den vorgesehenen Verwendungszweck geeignet sein...*“. Kalksandstein wird aus Kalk, Sand und Wasser erzeugt. Daher kann abgeleitet werden, dass er auch als rezyklierte Gesteinskörnung für die physikalische und chemische Bodenverbesserung geeignet ist.

Klimaveränderung

Das Frühjahr und der Sommer 2015 mit lang anhaltender Trockenheit und vielfachen Höchsttemperaturen in Deutschland über 40 °C haben einen Vorgeschmack ergeben, wie sich das Klima in Deutschland zukünftig langfristig aufgrund des prognostizierten Klimawandels [20] verändern kann. Dass in Deutschland in Zukunft vermehrt mit Hitzewellen zu rechnen sein wird, zeigt ebenfalls eine aktuelle Studie, die das *Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft* [21] kürzlich vorgestellt hat. Demnach droht in den nächsten Jahrzehnten eine signifikante Zunahme von Hitzeperioden mit sehr heißen Tagen.

Unsere Städte wachsen, Wohnraumverknappung und steigende Grundstückspreise führen zu immer stärkerer baulicher Verdichtung der Innenstädte und einzelner, attraktiver Stadtbezirke. Dabei wird der prognostizierte Klimawandel für unsere Städte eine:

- Erhitzung der Stadtzentren und dicht bebauten Stadtteile
- erhöhte Kohlenstoffdioxid-, Staub- und Feinstaubbelastungen
- zunehmende Sauerstoffarmut in der Luft
- fehlende Beschattung
- mangelnde Attraktivität und eintöniges Stadtbild

bedeuten [22], wenn es nicht gelingt, geeignete Gegenmaßnahmen, wie z.B. der Aufwertung unserer Grünflächen, einzuleiten.

Aber auch im Bereich des Straßenbegleitgrüns dürfte der Klimawandel massive Veränderungen bewirken. Aufgrund langer Trockenphasen mit vereinzelt, starken Niederschlägen werden sich die Wachstumsbedingungen für die Pflanzen in den Böden deutlich verändern. Der Trockenstress wird eine nicht in allen Fällen vorauszusehende Selektion der verwendbaren Pflanzen bewirken. Aufgrund dieser Situation werden für Stadtbäume derzeit zukunftssträchtige Baumarten und Möglichkeiten zu Pflanzbauweisen erforscht [23 bis 25].

Um dieser Veränderung der Umwelt durch das Klima in unseren Städten und an unseren Verkehrswegen entgegenzuwirken, wird heute und auch zukünftig ein leistungsfähiges und attraktives Stadtgrün/Straßenbegleitgrün benötigt. Die verstärkte Anwendung von vegetationstechnischen Bodenverbesserungsmaßnahmen zur erhöhten Speicherung von Niederschlagswasser soll als geeignete Gegenmaßnahme etabliert werden.

Anforderungen für Vegetationsbaustoffe

Seit mehr als 50 Jahren wurden die Bauweisen und Anforderung für Vegetationstragschichten erarbeitet. Heute liegen insbesondere fein abgestimmte Anforderungsprofile für Dachsubstrate [26], Schotterrasen [27] und Baumsubstrate [4, 28, 29] vor. Alle Regelwerke nutzen poröse Baustoffe zur Verbesserung der vegetationsstechnischen Eigenschaften von Substraten und Böden. In der *Dachbegrünungsrichtlinie* [26] wird als Vorgabe für den Bodenluft- und Bodenwasserhaushalt z.B. gefordert, siehe **Tabelle 2**:

Parameter	Intensivbegrünungen	Extensivbegrünungen
Luftgehalt	≥ 15 Vol.-%	20 bis 25 Vol.-%
Wasserspeicherkapazität	≥ 45 Vol.-%	≥ 20 bis ≥ 35 Vol.-%.

Tabelle 2: Anforderungen an Dachsubstrate [26]

Seit Ende der 80er Jahre ist man bestrebt, den Standraum von Bäumen in Verkehrsflächenbereichen (auch für versiegelten Bereichen) so zu optimieren, dass der Entwicklungs- und Gesundheitszustand der Bäume auf Dauer, also nachhaltig gesichert wird.

Bei der Beurteilung der Substrateigenschaften hat die wasserspeichernde Funktion Vorrang. Aber auch weitere Faktoren entscheiden mit über die Verfügbarkeit des Bodenwassers. Hier ist vor allem die Durchwurzelbarkeit zu nennen. Diese steht in direktem Zusammenhang mit der Luftspeicherkapazität. Diese wiederum ergibt sich aus der Lagerungsdichte des Bodens bzw. des Substrates. Die Dichte wird maßgeblich durch die chemisch-mineralische Zusammensetzung und durch die Bodentextur bestimmt. Letztlich üben die Vegetationsform und sogar noch die jeweilige Pflanzenart einen beachtlichen Einfluss auf die Durchwurzelbarkeit des Bodens aus.

Der Einsatz von zusätzlichen geringen Mengen an Bodenhilfsstoffen kann die Bodenverbesserung zusätzlich chemisch und bodenbiologisch beeinflussen [30].

Tabelle 3 gibt einen Überblick über den erforderlichen Prüfumfang bei Beurteilung einer vegetationsstechnischen Bodenverbesserungsmaßnahme. Die markierten Zeilen weisen die wichtigsten Eigenschaftswerte hinsichtlich des geforderten Bodenluft- und Bodenwasserhaushalt sowie der Tragfähigkeitseigenschaften aus.

Aktuell ist von HEIDGER [31] ein Anforderungsprofil für Vegetationstragschichten für die Ausbildung von Grünbrücken veröffentlicht worden, siehe **Tabelle 4**. Den Kornverteilungsbereich (Soll) veranschaulicht **Bild 4**.

Eigenschaften	Einheit	HEIDGER 2006	FGSV- Hinweise, 2006	FLL-Empfehlungen, 2010	
		Pflanz- gruben- bauweise 2	überbaubar	Pflanz- gruben- bauweise 1	Pflanz- gruben- bauweise 2
Korngrößenverteilung					
Korngemisch gemäß angegebener Korngrößenverteilung der Regelwerke	mm	0/11 - 0/22	0/11 - 0/22	0/11 - 0/32	0/16 - 0/32
Anteil d < 0,063 mm	Masse-%	5 - 15	5 - 15	5 - 25	5 - 15
Anteil d = 0,063 - 2 mm	Masse-%	-	-	≥ 30	≥ 30
Anteil d = 2 - 31,5 mm	Masse-%	-	35 - 70	-	-
Größtkorn d	mm	-	-	-	-
Gesteinskörnung (TL der FGSV)	-	TL Gestein-StB	TL Gestein-StB	-	-
Bodenphysikalische Eigenschaften (Bodenluft- und Bodenwasserhaushalt)					
Proctordichte der Prüfkörper	%	95	95	85	95
Wasserdurchlässigkeit k_f	m/s	$\leq 1,0 \times 10^{-5}$ und $\geq 1,0 \times 10^{-6}$	$\leq 1,0 \times 10^{-5}$ und $\geq 1,0 \times 10^{-6}$	$\leq 5,0 \times 10^{-4}$ (Soll) und $\geq 5,0 \times 10^{-6}$	$\leq 5,0 \times 10^{-4}$ (Soll) und $\geq 5,0 \times 10^{-6}$
Maximale Wasserkapazität (max. WK)	Vol.-%	≥ 30	≥ 35 - < 40	≥ 25	≥ 25
Gesamtporenvolumen (GPV)	Vol.-%	≥ 40	≥ 40	-	-
Luftkapazität bei max. WK oder	Vol.-%	-	-	≥ 10 oder	≥ 10 oder
Luftkapazität bei pF 1,8 (weite Grobporen)	Vol.-%	≥ 15	≥ 15	≥ 15	≥ 15
Bodenchemische Eigenschaften					
Bodenreaktion - pH-Wert	-	-	4,5 - 8,5	5,0 - 8,5	5,0 - 8,5
Organische Substanz	Masse-%	≤ 2,0	≤ 2,0	1,0 - 4,0	1,0 - 2,0
Salzgehalt im Wasserauszug oder	mg/100 g	≤ 150	-	≤ 150	≤ 150
Salzgehalt in gesättigter Gipslösung	mg/100 g	≤ 150	-	≤ 100	≤ 100
Kalkgehalt nur für Sonderfälle	-	-	-	-	-
Tragfähigkeit und Verdichtung					
Verformungsmodul E_{V2}	MN/m ²	≥ 45*	≥ 45*	-	≥ 45
E_{V2}/E_{V1}	-	≤ 2,5	≤ 2,5	-	-
Einbau-Wassergehalt	Masse-%	≤ W_{Pr}	≤ W_{Pr}	erdfeucht	erdfeucht
Verdichtungsgrad D_{Pr}	%	-	-	83 - 87	≤ 95

Tabelle 3: Anforderungsprofile für Baumsubstrate

* Das Substrat sollte nicht wesentlich über ein Verformungsmodul von $E_{V2} \geq 45$ MN/m² verdichtet werden, da die bodenphysikalischen Eigenschaften (Wasser- und Lufthaushalt) beeinträchtigt werden können.

Das Anforderungsprofil für Grünbrücken kann auch für die Beurteilung von vegetationstechnischen Bodenverbesserungsmaßnahmen aus bodenphysikalischer Sicht herangezogen werden, da es Bodenanteile bis zu 50 M.-% bei einem bautechnischen Verdichtungsgrad von 90 % vorsieht. Die Bilder 5 und 6 zeigen ein Beispiel für eine Bodenverbesserungsmaßnahme bei einer Grünbrücke mit Ziegel-Recyclingmaterial. Der entsprechende Nachweis für Kalksandstein-Recyclingmaterial steht noch aus.

Anforderungsprofil für Vegetationssubstrate für Grünbrücken		
Anteil an abschlämmbaren Teilen ($d < 0,063 \text{ mm}$)	Masse-%	≤ 25
Anteil an Fein-, Mittel- und Grobkies ($d > 2,0 \text{ mm}$)	Masse-%	≤ 70
Wasserdurchlässigkeit k_f	m/s	$\geq 1,0 \times 10^{-5}$
Maximale Wasserkapazität (WK_{\max})	Vol.-%	≥ 30
Gesamtporenvolumen (GPV)	Vol.-%	≥ 40
Luftvolumen bei pF 1,8 (weite Grobporen)	Vol.-%	≥ 15
Organische Substanz	Masse-%	$\leq 5,0$
Einbau-Wassergehalt	Masse-%	$\leq 0,9 W_{Pr}$
Volumengewicht, trocken	g/cm^3	1,2 – 1,8
Verdichtungsgrad, Proctordichte	$D_{Pr} \%$	90

Tabelle 4: Anforderungsprofil für Vegetationssubstrate für Grünbrücken, HEIDGER [31]

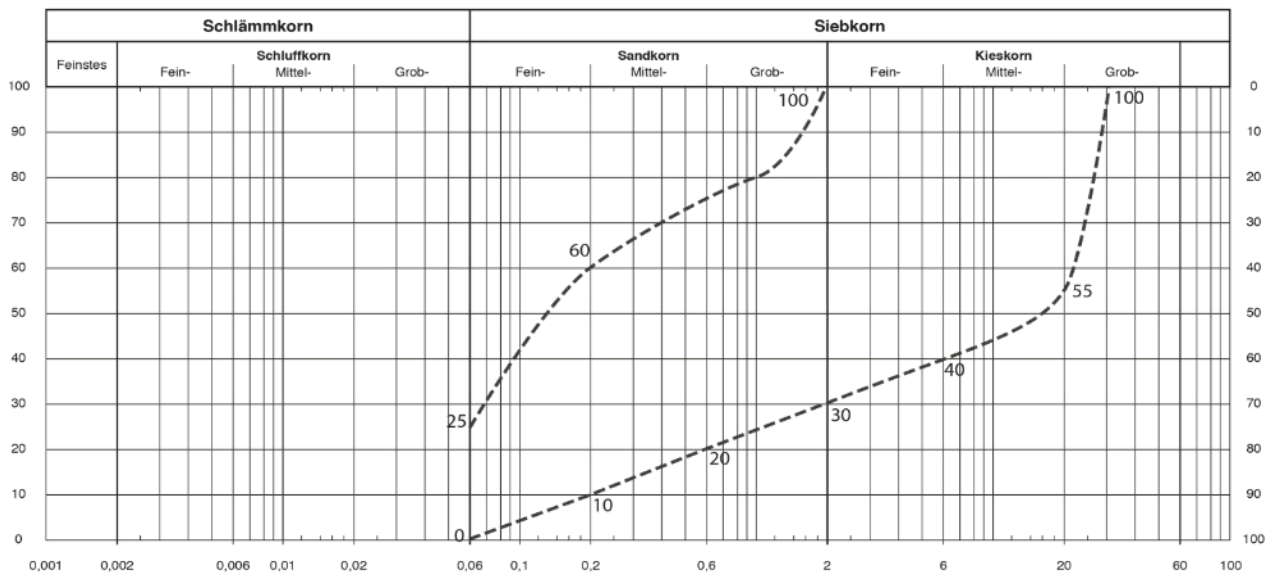


Bild 4: Grenzbereiche für Vegetationssubstrate für Grünbrücken nach HEIDGER [31]



Bilder 5 und 6: Einsatz einer vegetationstechnischen Bodenverbesserungsmaßnahme mit Ziegelbruch bei der Grünbrücke A 14 bei Colbitz – links: während der Bauausführung; rechts: nach der Begrünung

3 UNTERSUCHUNGSPROGRAMM

3.1 AP1: Beschaffung, Aufbereitung und Voruntersuchung der ausgewählten Böden und Referenzmaterialien

Für die Untersuchungen wurden verschiedene repräsentative Stoffproben von unterschiedlichen Böden (tonig, sandig, gemischtkörnig) aus Deutschland in ausreichender Menge aus der Praxis beschafft (12 Böden der Körnung max. bis 0/45 mm). Das aufzubereitende Kalksandsteinmaterial (stofflich sortenrein sowie aus KS-Mauerwerk mit Mörtel und Putzanhaftungen) wurde großtechnisch in die Körnung 0/32 mm aufbereitet und Anteile davon im Labor in die Fraktionen 0/2, 2/8, 8/16, 16/32, 0/16 und 2/16 mm abgeseibt. Als Referenz waren Lava-Körnungen zu beschaffen. Weitere spezielle Körnungen waren nicht erforderlich. An den verschiedenen Körnungen wurden folgende Kennwerte ermittelt:

a. Allgemeine/Bodenphysikalische Untersuchungen (Bimolab)

- Korngrößenverteilung nach DIN 18123
- Wassergehalt nach DIN 18121-1
- Kornform und Kornfestigkeit sowie Schüttdichte
- Kornrohichte und Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6 mit dem „Wasseryknometer“
- Kornrohichte mit dem „Luftpyknometer“ nach TP BF StB Teil 3.3

b. Ergänzende bautechnische Untersuchungen (FV Kalksandstein)

- Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel in Anlehnung an DIN EN 772-18

c. Bodenchemische Untersuchungen (Bimolab)

- pH-Wert nach VDLUFA-A 5.1.1 in CaCl₂
- Salzgehalt nach VDLUFA-A 10.1.1.
- Salzgehalt nach VDLUFA-A 13.4.2 (Gipsextrakt)
- Hauptnährstoffe nach FLL
- Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust) nach DIN 18128

d. Ergänzende Untersuchungen zur Charakterisierung der KS-Mauerwerks-Ausgangsstoffe (FV Kalksandstein)

- Bestimmung der Festigkeit, des Freikalkgehalts und der Rohdichte zur Charakterisierung des Ausgangsmaterials

3.2 AP 2: Packungsdichteberechnungen für Kombinationen aus Böden und KS-RC-Materialien für unterschiedliche Verwendungsgebiete (FV Kalksandstein)

Für die verschiedenen Ausgangsmaterialien/Körnungen des AP 1 und daraus vorgeschlagenen Mischungen wurden Packungsdichteberechnungen durchgeführt:

- Packungsdichteberechnung Ausgangskörnungen
- Mischungs- und Packungsdichteberechnung für verschiedene Vegetationsgemische

3.3 AP 3: Eignungsuntersuchungen an verschiedenen Bodengemischen

Für verschiedene vegetationstechnische Bodenverbesserungsmaßnahmen wurden exemplarische Eignungsuntersuchungen mit Hilfe ausgewählter Böden und Kalksandstein-Recycling-Gemische des AP 1 und der darauf aufbauenden Packungsdichte-Berechnungen (AP 2) durchgeführt. Dabei waren die unterschiedlichen Verdichtungsgrade der verschiedenen Verwendungsgebiete zu beachten: Rasensubstrat für Dammbegrünung, Grünbrückensubstrat 90 M.-%, Baums substrat 85 und 95 M.-% (3 unterschiedliche Verdichtungsgrade).

Die verschiedenen Baustoffe wurden hinsichtlich folgender Kennwerte überprüft:

a. Untersuchung der bodenphysikalischen Eigenschaften

- Korngrößenverteilung nach DIN 18123
- Wassergehalt nach DIN 18121-1
- Proctorversuch nach DIN 18127
- Rohdichtebestimmung mit dem Luftpyknometer nach FLL
- Rohdichtebestimmung mit dem Wasserypyknometer nach FLL
- Wasserspeicherkapazität nach FLL
- Wasserdurchlässigkeit nach FLL
- Porengrößenverteilung / Luftvolumen bei pF 1,8 nach FLL

b. Untersuchung der bodenchemischen Eigenschaften

- pH-Wert nach VDLUFA A 5.1.1 in CaCl₂
- Salzgehalt nach VDLUFA A 10.1.1 und VDLUFA A 13.4.2 (Gipsextrakt)
- Gehalt an organischer Substanz (Glühverlust) nach DIN 18128
- Nährstoffe nach FLL
- Keimtest (Kresse)

c. Ergänzende bautechnische Eigenschaften

- Tragfähigkeit CBR-Versuch
- Scherversuche nach DIN 18137

3.4 AP 4: Praxisversuche an einem Dammbauwerk

Auf Basis der Eignungsuntersuchungen des AP 3 wurden ausgewählte Varianten auf geneigten Flächen von Wällen in Versuchsfelder eingebaut und über einen Zeitraum von zwei Vegetationsperioden beobachtet und untersucht. Hierbei stand die Anfangsentwicklung, die Etablierung der Vegetation nach 1 und 2 Vegetationsperioden sowie des Erosionsschutzes im Mittelpunkt der Beobachtungen.

Die ausgewählten Gemische wurden praxisgemäß auf die Böschungen aufgebracht und per Baggerschaufel angedrückt. Als Ansaat dienten auf den Versuchsfeldern eine herkömmliche Grasaatgutmischung und eine Blumenmischung.

Die Praxisversuche wurden untersuchungstechnisch wie folgt begleitet:

a) Ansaat

Die hergestellten Praxisgemische (6 Varianten) wurden analog den Untersuchungsverfahren des AP 3 kontrolliert. Die Ansaat erfolgt im Frühjahr/Sommer.

b) während der Vegetationsphasen

- Niederschlagsmengen und der Temperaturen (Daten vom Wetteramt).
- Dokumentation der Pflegemaßnahmen (Wässerung, Düngung)
- Deckungsgrad (vierteljährlich)
- Artenvielfalt (vierteljährlich)
- Beobachtung und Dokumentierung des Pflanzenwuchses (monatlich)

c) zum Abschluss der Untersuchungen

- Deckungsgrad der Versuchsfelder
- Artenvielfalt auf den Versuchsfeldern
- Korngrößenverteilung nach DIN 18123
- Wassergehalt nach DIN 18121-1
- Dichte mit dem Stechzylinderverfahren nach DIN 18126
- pH-Wert der vegetationstechnischen Bodenverbesserung
- Salzgehalt der vegetationstechnischen Bodenverbesserung
- Nährstoffgehalt der vegetationstechnischen Bodenverbesserung
- Fotodokumentation

4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

4.1 AP1: Beschaffung, Aufbereitung und Voruntersuchung der ausgewählten Böden und Referenzmaterialien

4.1.1: Beschaffte Ausgangsstoffe

Für die Durchführung des Untersuchungsprogramms wurden folgende Stoffproben von verschiedenen Aufbereitungsanlagen aus verschiedenen Regionen von Deutschland beschafft, um in das Projekt einen möglichst breiten Querschnitt von natürlichen Böden einfließen zu lassen:

- B1: Saurer, sandiger Oberboden 0/1 mm
- B2: Saurer, sandiger Unterboden 0/1 mm
- B3: Basischer, sandiger Recycling-Boden 0/2 mm
- B4: Sandiger Boden 0/1 mm
- B5: Vulkanischer gemischtkörniger Oberboden 0/16 mm
- B6: Vulkanischer gemischtkörniger Unterboden 0/16 mm
- B7: Schluffiger Oberboden, Löss 0/4 mm
- B8: Schluffiger Unterboden, Löss 0/4 mm
- B9: Karbonatischer Oberboden 0/4 mm
- B10: Karbonatischer Unterboden 0/16 mm
- B11: Toniger Oberboden 0/1 mm
- B12: Schluffiger Oberboden, Löss 0/4 mm
- B13: Toniger schluffiger Oberboden, Löss 0/4 mm
- B14: Toniger schluffiger Unterboden, Löss 0/16 mm

Folgendes Kalksandsteinmaterial wurde für die Untersuchungen ausgewählt und in die folgenden Körnungen aufbereitet:

- KS1: Kalksandstein 0/2 mm
- KS2: Kalksandstein 2/8 mm
- KS3: Kalksandstein 8/16 mm
- KS4: Kalksandstein 16/32 mm
- KS5: Kalksandstein 0/16 mm
- KS6: Kalksandstein 0/32 mm
- KS7: Kalksandstein 2/16 mm

Als Referenz wurden folgende Stoffproben beschafft und vergleichend untersucht:

- L1: Lava 0/2 mm
- L2: Lava 2/8 mm
- L3: Lava 8/16 mm
- L4: Lava 16/32 mm

In **Tabelle 5** sind die Herkunft und Beschreibung der Ausgangsmaterialien aufgeführt. Ober- und Unterböden stammen von derselben Entnahmestelle, soweit die Proben nicht einzeln entnommen wurden.

Stoff-Nr./Stoffkennzeichnung	Beschreibung der Stoffproben		
	Bodenart	Herkunft	Körnung [mm]
B1	Oberboden	Saurer sandiger Boden, Norddeutschland	0/1
B2	Unterboden		0/1
B3	RC-Boden	Basischer sandiger rezyklierter Boden aus Norddeutschland	0/2
B4	Oberboden	Sandiger Boden aus Niedersachsen	0/1
B5	Oberboden	Vulkanischer gemischtkörniger Boden aus Rheinland-Pfalz	0/16
B6	Unterboden		0/16
B7	Oberboden	Schluffiger Boden, Löss aus Rheinland-Pfalz	0/4
B8	Unterboden		0/4
B9	Oberboden	Karbonatischer Boden aus Rheinland-Pfalz	0/4
B10	Unterboden		0/16
B11	Oberboden	Toniger Oberboden aus Rheinland-Pfalz	0/1
B12	Oberboden	Schluffiger Oberboden, Löss aus Rheinland-Pfalz	0/4
B13	Oberboden	Toniger schluffiger Boden, Löss aus Rheinland-Pfalz	0/4
B14	Unterboden		0/16
KS1	Gesteinskörnung	Aufbereiteter Kalksandstein, RC-Ausschussware eines KS-Werkes aus Niedersachsen	0/2
KS2	Gesteinskörnung		2/8
KS3	Gesteinskörnung		8/16
KS4	Gesteinskörnung		16/32
KS5	Gesteinskörnung		0/16
KS6	Gesteinskörnung		0/32
KS7	Gesteinskörnung		2/16
L1	Gesteinskörnung	Aufbereitete Lava aus dem Neuwieder Becken, Rheinland-Pfalz	0/2
L2	Gesteinskörnung		2/8
L3	Gesteinskörnung		8/16
L4	Gesteinskörnung		16/32

Tabelle 5: Beschreibung der verschiedenen Stoffproben/Ausgangsmaterialien

4.1.2 Ergebnisse der allgemeinen bodenphysikalischen Untersuchungen

Die Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen für Wassergehalt, Dichte und Wasseraufnahme an den untersuchten Ausgangsstoffen sind in **Tabelle 6** wiedergegeben.

Stoff-Nr./Stoffkennzeichnung	Wassergehalt	Schüttdichte trocken	Korndichte Luftpyknometer	Korndichte Wasseryknometer	Wasseraufnahme Wasseryknometer
	[%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
B1	8,2	1,31	2,620	2,615	
B2	7,7	1,32	2,625	2,613	
B3	4,1	1,44	2,616	2,605	
B4	5,0	1,26	2,652	2,650	
B5	14,5		2,249	2,145	
B6	9,3		2,388	2,301	
B7	31,5		2,586	2,577	
B8	13,5		2,616	2,589	
B9	21,4		2,628	2,586	
B10	16,8		2,596	2,574	
B11	15,0		2,690	2,598	
B12	6,9		2,615	2,586	
B13	5,6		2,632	2,610	
B14	8,7		2,597	2,581	
KS1	4,9	1,42	2,687	2,594	
KS2	9,0	1,38	2,671	2,556	10,1
KS3	2,8	1,34	2,669	2,555	9,9
KS4	4,8	1,32	2,668	2,551	9,5
KS5	5,1	1,45	2,680	2,588	
KS6	5,0	1,47	2,676	2,587	
KS7	5,6	1,35	2,670	2,548	
L1	9,8	1,45	2,725	2,693	
L2	9,8	1,37	2,878	2,510	12,2
L3	7,8	1,35	2,732	2,355	11,8
L4	4,9	1,36	2,457	2,190	11,8

Tabelle 6: Bodenphysikalische Untersuchungsergebnisse der verschiedenen Stoffproben/ Ausgangsmaterialien

Die Bestimmung der Wasseraufnahme der Kalksandstein- und Lava-Körnungen für die Bodenverbesserung erfolgte an den Einzelkörnungen für den Kornbereich > 2 mm.

Der Wassergehalt gibt den Wassergehalt zum Prüfzeitpunkt wieder. Insbesondere bei den bindigen Böden (B7 und B9) ergab sich ein höherer Prüfwassergehalt aufgrund der hohen Oberfläche.

Die Korndichte wurde mittels Luftpyknometer und Wasseryknometer bestimmt. Alle Werte des Wasseryknometers liegen unter denen des Luftpyknometers. Mit höherer Porosität des Bodens oder der Gesteinskörnung, ergibt sich erwartungsgemäß eine geringere Korndichte ermittelt mit dem Luftpyknometer. Die Bestimmung der Korndichte hat in der Vegetationstechnik eine besondere Bedeutung, da diese in die Berechnung des Gesamtporenvolumens und des Luftgehaltes für die Bestimmung des Bodenlufthaushaltes eingeht. Dabei würden die Werte des Luftpyknometers auch höhere Gesamtporenvolumen und einen höheren Luftgehalt bedeuten.

Die Ergebnisse der Schüttdichte sowie der Wasseraufnahme liegen im typischen Erfahrungsreich.

4.1.3 Kornfestigkeit, Kornform, Schüttdichte und Frost-Tau-Widerstand

Tabelle 7 enthält die ergänzenden bodenphysikalischen Untersuchungsergebnisse an den Stoffproben zur Bodenverbesserung

Stoff-Nr./Stoffkennzeichnung	Kornfestigkeit (Widerstand gegen Schlagzertrümmerung)	Kornform SI (> 4 mm)	Schüttdichte	Frost-Tau-Widerstand
	%	-	kg/dm ³	Anzahl schadenfreier Frost-Tau-Wechsel
KS1 – 0/2 mm	46,2 (SZ _{8/12})		1,34	-
KS2 – 2/8 mm		44	1,36	-
KS3 – 8/16 mm		51	1,38	8
KS4 – 16/32 mm		29	1,39	-
KS5 – 0/16 mm		44	1,37	-
KS6 – 0/32 mm		27	1,38	-
KS7 – 2/16 mm		47	1,66	-
L1 – 0/2 mm	38,9 (SZ _{8/12})		1,18	-
L2 – 2/8 mm		42	1,19	-
L3 – 8/16 mm		48	1,21	-
L4 – 16/32 mm		33	1,25	-

Tabelle 7: Ergänzende bodenphysikalische Untersuchungsergebnisse an den Stoffproben zur Bodenverbesserung

Der Schlagzertrümmerungsversuch gemäß DIN EN 1097-2 wurde an der Körnung 8/12 mm geprüft. Die Ergebnisse der Kornformkennzahl SI wurden nach DIN EN 933-4 bestimmt.

4.1.4 Charakterisierung der KS-Mauerwerks-Ausgangsstoffe (FV Kalksandstein)

Charakterisierung der Kalksandsteine

Tabelle 8 gibt die physikalischen Kennwerte sowie die chemische Zusammensetzung des Ausgangsmaterials von den verschiedenen Recyclinghöfen bzw. des Kalksandsteinmaterials aus dem Kalksandsteinwerk für die Erprobungsfelder wieder. Die **Bilder 7 bis 8** zeigen vergleichend die Steindruckfestigkeiten und Steinrohdichten.

Format	Anhaftender Putz- bzw. Mauermörtel	Steindruckfestigkeitsklasse	Steinroh-dichte-klasse	Freikalkgehalt DTA	Hg-füllbare Porosität
		N/mm ²	kg/dm ³	M.-%	Vol.-%
KS-2DF bis XL-RE	nein	12 bis 20	1,4 bis 2,0	0,0 bis 0,15	0,11 bis 0,18
RFA	Anhaftender Putz- bzw. Mauermörtel	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃
		M.-%	M.-%	M.-%	M.-%
KS-2DF bis XL-RE	nein	94,2	1,1	0,2	4,5

Tabelle 8: Kalksandstein-Ausgangsmaterial von den verschiedenen Recyclinghöfen

Steindruckfestigkeiten und Steinrohdichten der Kalksandsteine

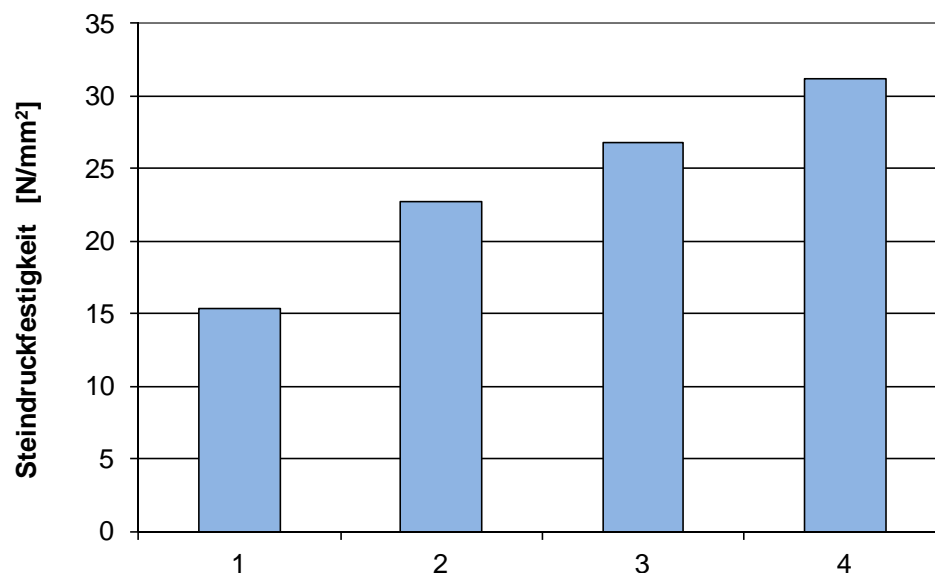


Bild 7: Steindruckfestigkeiten (ausgesägte Würfel der Kantenlänge 50 x 50 mm)

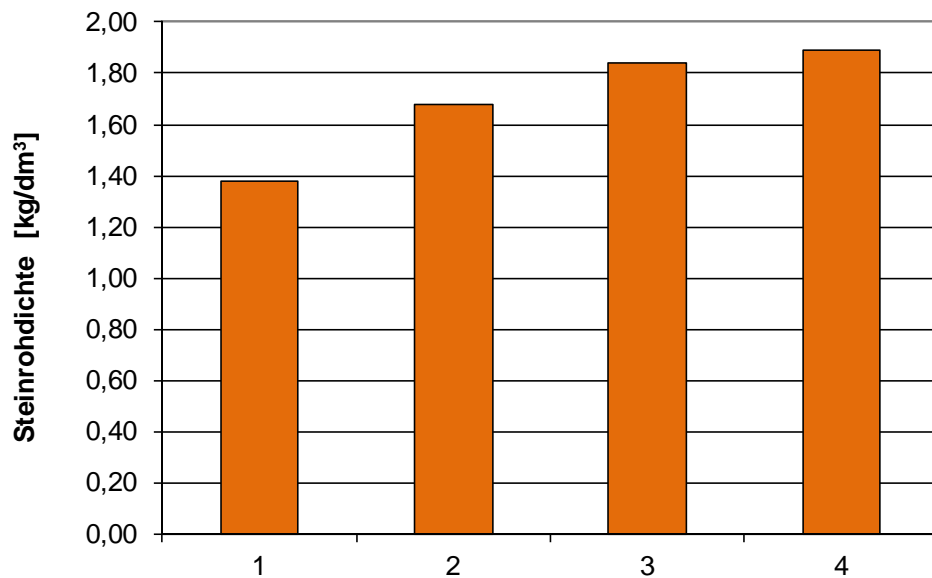


Bild 8: Steinrohddichten (ausgesägte Würfel der Kantenlänge 50 x 50 mm)

4.1.5 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung wurde immer durch kombinierte Nass- und Trockensiebung nach DIN 18123 ermittelt. Die Ergebnisse sind in den folgenden **Tabelle 9** und **10** sowie in **Bild 9** und **10** wiedergegeben. In **Tabelle 9** sind die Kies-, Sand- und Schluff/Ton-Gehalte angegeben. Zur genaueren Differenzierung in Grob-, Mittel- und Feinkies oder -sand bei der Korngrößenverteilung der Ausgangsböden kann neben den Abbildungen weiterhin **Tabelle 10** hinzugezogen werden.

Stoff-Nr./Stoff- kennzeichnung	Korngrößenverteilung [Masse-%]		
	Kies	Sand	Schluff u. Ton
	2,0 - 31,5 mm	0,063 - 2,0mm	< 0,063mm
B1	1,8	90,6	7,6
B2	0,3	94,3	5,3
B3	5,2	80,8	14,0
B4	0,5	88,2	11,3
B5	45,4	39,7	14,9
B6	40,3	41,8	17,9
B7	22,0	49,1	28,9
B8	30,5	40,4	29,1
B9	11,7	27,2	61,1
B10	46,2	34,2	19,6
B11	0,0	34,9	65,1
B12	9,9	55,0	35,1
B13	23,9	43,4	32,7
B14	5,7	47,2	47,0
KS1	4,7	88,8	6,4
KS2	94,2	4,5	1,3
KS3	96,5	3,0	0,5
KS4	98,2	1,5	0,3
KS5	59,1	37,8	3,1
KS6	68,7	28,9	2,4
KS7	95,3	3,8	0,9
L1	14,6	77,6	7,8
L2	95,5	3,0	1,5
L3	97,2	1,9	0,9
L4	98,4	1,5	0,1

Tabelle 9: Korngrößenverteilung in Hauptfraktionen der verschiedenen Stoffproben/
Ausgangsmaterialien

Stoff-Nr./Stoff- kennzeichnung	Korngrößenverteilung [Masse-%]						
	Kies			Sand			Schluff u. Ton
	Grobkies 20,0 - 31,5 mm	Mittelkies 6,3 - 20,0 mm	Feinkies 2,0 - 6,3 mm	Grobsand 0,63 - 2,0 mm	Mittelsand 0,2 - 0,63 mm	Feinsand 0,063 - 0,2 mm	< 0,063 mm
B1	0,0	0,8	1,0	4,2	65,2	21,2	7,6
B2	0,0	0,2	0,1	7,1	62,7	24,5	5,4
B3	0,0	1,9	3,3	15,2	45,0	20,6	14,0
B4	0,0	0,2	0,3	0,7	27,9	59,6	11,3
B5	7,1	15,4	23,1	22,6	11,2	5,9	14,9
B6	0,0	15,1	25,3	25,0	11,1	5,6	17,9
B7	2,5	6,5	13,0	25,1	17,0	7,0	28,9
B8	8,7	10,6	11,3	19,9	14,7	5,8	29,1
B9	1,1	6,3	4,3	9,0	8,3	9,9	61,1
B10	23,1	15,9	7,2	8,5	9,2	16,6	19,6
B11	0,0	0,0	0,0	4,0	9,3	21,5	65,1
B12	4,0	4,1	1,8	14,6	31,4	8,9	35,1
B13	12,2	8,6	3,1	7,7	28,1	7,6	32,7
B14	0,0	3,5	2,2	11,8	29,1	6,3	47,0
KS1	0,0	0,0	4,7	27,8	36,2	24,9	6,4
KS2	0,0	6,3	87,9	1,2	1,1	2,2	1,3
KS3	0,0	95,8	0,7	0,2	1,3	1,5	0,5
KS4	44,8	52,9	0,5	0,7	0,5	0,3	0,3
KS5	0,0	30,7	28,4	11,5	15,2	11,1	3,1
KS6	8,4	36,7	23,6	8,8	11,6	8,5	2,4
KS7	0,0	51,1	44,3	0,7	1,2	1,9	0,9
L1	0,0	0,0	14,6	46,2	24,4	7,0	7,8
L2	0,0	70,4	25,1	0,5	1,2	1,3	1,5
L3	0,4	96,5	0,3	0,2	0,7	1,0	0,9
L4	45,0	52,9	0,5	0,5	0,5	0,5	0,1

Tabelle 10: Korngrößenverteilung in Einzelfractionen der verschiedenen Stoffproben/
Ausgangsmaterialien

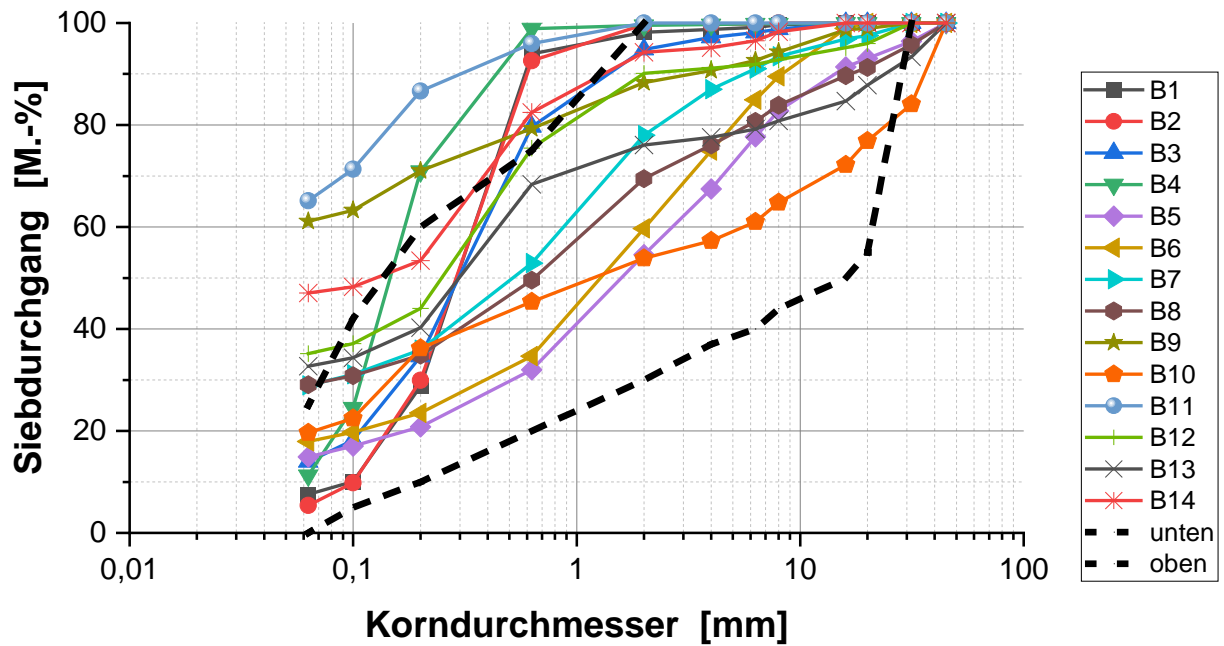


Bild 9: Korngrößenverteilung der Boden-Stoffproben mit Korngrößenbegrenzungsbereich für Grünbrücken nach HEIDGER (gestrichelt)

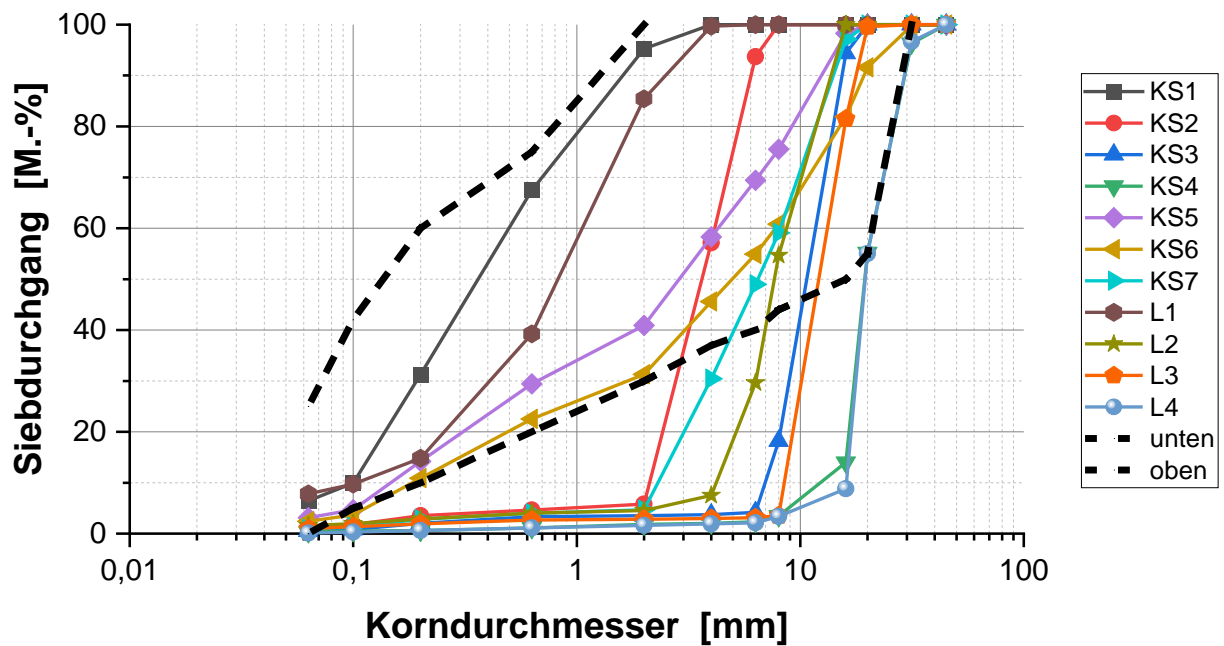


Bild 10: Korngrößenverteilung der Kalksandstein- und Lava-Stoffproben mit Korngrößenbegrenzungsbereich für Grünbrücken nach HEIDGER (gestrichelt)

Bild 9 und **10** sowie **Tabelle 11** und **12** sowie kann man entnehmen, dass die vierzehn ausgewählten natürlichen Ober- und Unterböden sowie der rezyklierte Boden B3 ein breites Spektrum unterschiedlicher Böden für die Untersuchung wiedergeben. Insbesondere können sie gemäß **Tabelle 5** in sandige und bindige (ton- und schluffreiche) Böden unterschieden werden. Bei den bindigen Böden liegt der Ton- und Schluffgehalt bei den Böden B9, B11, B14 mit 47,0 bis 65,1 M.-% besonders hoch. Typische sandige Böden sind beispielsweise die Böden B1 bis B4. Böden; gemischt-körnige Böden sind z.B. die vulkanische Böden B5 und B6.

4.1.6 Ergebnisse der bodenchemischen Untersuchungen

In den **Tabellen 9 und 10** sind die Ergebnisse der Bodenreaktion, dem Salzgehalt, der Organischen Substanz und der Nährstoffgehalte für die verschiedenen untersuchten Böden tabellarisch aufgeführt.

Je nach Entnahmeort als Ober- oder Unterboden oder Aufbereitungsanlage unterscheiden sich die Böden in Ihrem organischen Gehalt aber auch in ihren chemischen Eigenschaften.

Stoff-Nr./Stoffkennzeichnung	Bodenchemische Eigenschaften		
	pH-Wert	Salzgehalt [mg/100g]	Gehalt an organischer Substanz [Masse-%]
B1	6,4	30	2,1
B2	6,8	25	1,1
B3	7,4	80	2,6
B4	7,5	10	0,0
B5	7,1	50	3,3
B6	7,4	45	3,2
B7	6,1	90	6,1
B8	7,8	80	3,6
B9	7,5	60	4,1
B10	7,3	35	2,1
B11	8,4	110	2,1
B12	7,4	80	2,7
B13	7,4	75	2,3
B14	7,6	40	4,0

Tabelle 11: pH-Wert, Salzgehalt und Gehalt an organischer Substanz der verschiedenen Böden

Die untersuchten Böden B1, B2 und B7 weisen nach Bodenkundlicher Kartieranleitung [5] eine sehr schwache saure Bodenreaktion auf. Bis auf B5 (neutral) sind die weiteren Böden als sehr schwach alkalisch einzustufen. Eine Ausnahme bildet hier nur der tonige Boden B11 (schwach alkalisch). Da mineralische Bodenverbesserungsstoffe in der Regel als sehr schwach alkalisch (z.B. Lava) oder schwach bis mäßig alkalisch einzustufen sind (z.B. Kalksandstein), ist bei Bodenverbesserungsmaßnahmen bei Mischungen mit einer Erhöhung der Bodenreaktion zu rechnen, siehe AP4 und ist hier im Regelfall zu bestimmen. Der Salzgehalt aller Böden mit < 150 mg/100 g liegt für Substrate im Bereich der Vegetationstechnik im unkritischen Bereich.

Der Gehalt an organischer Substanz ist bei den verschiedenen Böden als humusfrei (B4), schwach humos (B2) und bei einer Spanne von 2 bis < 4 M.-% nach [5] als mittel humos einzustufen. B9 und B7 weisen demgemäß noch eine höhere Einstufung auf.

Die festgestellten Nährstoffgehalte der Böden (**Tabelle 12**) sind weitgehend als nährstoffarm zu bezeichnen. Gemäß FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen sollten Düngemaßnahmen erst bei der Pflanzung erfolgen. Eine ähnliche Vorgehensweise wird auch für Bodenverbesserungsmaßnahmen empfohlen, damit Nährstoffe der angestrebten Vegetation zugutekommen und nicht ins Grundwasser gelangen.

Stoff-Nr./Stoffkennzeichnung	Bodenchemische Eigenschaften / Hauptnährstoffe				
	Stickstoff (N) [mg/100g]	Nitrat-Stickstoff (NO ₃ -N) [mg/100g]	Ammonium-Stickstoff (NH ₄ ⁻ N) [mg/100g]	Phosphat (P ₂ O ₅) [mg/100g]	Kalium (K ₂ O) [mg/100g]
B1	1	1	< 1	17	3
B2	1	1	< 1	16	3
B3	23	23	<1	36	12
B4	1	1	< 1	30	3
B5	3	3	< 1	17	24
B6	2	2	< 1	19	27
B7	2	2	< 1	5	28
B8	2	2	< 1	4	30
B9	2	2	< 1	3	23
B10	2	2	< 1	2	28
B11	3	3	<1	13	25
B12	11	8	3	18	22
B13	9	7	2	20	27
B14	2	1	< 1	15	28

Tabelle 12: Hauptnährstoffe der verschiedenen Böden

4.2 AP 2: Packungsdichteberechnungen für Kombinationen aus Böden und KS-RC-Materialien für unterschiedliche Verwendungsgebiete (FV Kalksandstein)

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse der Packungsdichteberechnungen an den Ausgangsmaterialien sowie Mischungen aller Böden jeweils mit den KS-Körnungen 0/16 (KS5) oder 2/16 mm (KS7) aufgeführt. Der KS-Anteil wurde dabei für alle Böden jeweils mit 10, 20 und 40 Vol.-% berechnet. Die KS-Körnungen 0/16 (KS5) oder 2/16 mm (KS7) wurden für die Berechnungen mit den unterschiedlichen Böden gewählt, um der Einfluss einer stetigen Korngrößenverteilung mit Schluff- und Sandanteilen im Vergleich zu einem groben Gesteinskörnungsgemisch aufzuzeigen.

Das in dieser Arbeit für die Packungsdichteberechnungen verwendete Rechenprogramm basiert auf den Rechenalgorithmen von SCHWANDA [37]. Diesen Algorithmus nutzten mit Erfolg auch schon RESCHKE [36], GEISENHANSLÜKE [35] und EDEN [34] für ihre jeweiligen Arbeiten im Bereich der Beton- und Kalksandsteintechnologie. Das Rechenprogramm mit der Benutzeroberfläche in Excel wurde für die hier durchgeführten Berechnungen um einen bodenphysikalischen Siebsatz in der Fassung „BdP v. 3.03“ [33] erweitert.

Im Mittelpunkt der durchgeführten Berechnungen für die Bodenverbesserung sollte die Maximierung des Gesamtporenvolumens GPV stehen und somit nicht wie bei den zuvor genannten Anwendungen die Maximierung des Feststoffanteils (Gestein). Ein höheres GPV steht dabei in der Vegetationstechnik für eine bessere Durchwurzelbarkeit des Bodens.

Es wurden verschiedene Berechnungen an den Böden B1 bis B14, KS1 bis KS7 und L1 bis L4 als 1-Stoff-System (0 bis X mm) und als Bodenverbesserungsmaßnahme für die Gemische aus Boden und Kalksandstein-Gesteinskörnung als 2-Stoff-System durchgeführt.

Den Berechnungsergebnissen kann man entnehmen, dass mit steigender Zugabemenge an Kalksandstein K5 oder K7 im Bereich von 0 bis 40 M.-% die Packungsdichte unabhängig vom Boden meist ansteigt. Eine Mischung würde durch die Bodenverbesserungsmaßnahme daher dichter. Der Anstieg dieser Packungsdichteerhöhung ist aber bei der Zugabe der Körnung 0/16 mm (KS5) nicht so ausgeprägt wie bei der Zugabe der groben Gesteinskörnung 2/16 mm, KS7.

Ein Vergleich der Packungsdichten der Einzelkörnungen KS1 bis KS4 mit dem Lava-Körnungen L1 bis L4 zeigt nahezu identische Ergebnisse der Packungsdichteberechnung auf. Siehe **Tabelle 13**.

Stoff-Nr./Stoff- kennzeichnung	Packungsdichteberechnungen Ausgangsstoffe und Gemische						
	Feststoffanteil [Vol.-%]						
	Stoffprobe 100 M.-%	Boden- probe mit 10 M.-% KS5 0/16 mm	Bodenpro- be mit 20 M.-% KS5 0/16 mm	Boden- probe mit 40 M.-% KS5 0/16 mm	Boden- probe mit 10 M.-% KS5 2/16 mm	Bodenpro- be mit 20 M.-% KS5 2/16 mm	Boden- probe mit 40 M.-% KS5 2/16 mm
B1	61,3	62,3	63,4	65,5	62,9	64,5	67,7
B2	61,0	62,0	63,1	65,3	62,6	64,3	67,5
B3	63,8	64,7	65,6	67,4	65,4	67,0	69,8
B4	60,2	61,6	63,0	66,0	62,3	64,5	69,0
B5	72,7	72,5	72,2	71,7	72,6	72,3	71,0
B6	72,0	71,8	71,7	71,4	72,1	72,1	71,1
B7	70,3	72,2	71,7	72,1	72,1	73,3	74,2
B8	72,1	73,0	73,8	73,7	73,9	75,6	75,7
B9	62,5	64,1	65,8	69,4	64,8	67,2	72,6
B10	75,4	75,9	75,9	75,6	76,9	77,9	77,6
B11	58,9	60,7	62,6	66,7	61,3	63,8	69,6
B12	66,2	67,5	68,8	71,0	68,3	70,5	74,2
B13	69,0	70,1	71,3	73,0	70,9	73,0	76,3
B14	63,8	65,3	66,9	70,2	66,0	68,4	73,6
KS1	63,1						
KS2	58,6						
KS3	58,4						
KS4	60,3						
KS5	70,1						
KS6	70,7						
KS7	61,0						
L1	64,3						
L2	59,6						
L3	57,8						
L4	61,0						

Tabelle 13: Packungsdichteberechnungen der verschiedenen Ausgangsmaterialien und Gemische

4.3 AP 3: Eignungsuntersuchungen an verschiedenen Bodengemischen

Auf Basis der Ergebnisse von AP 1 und AP 2 wurden folgende Vegetationsgemische mit vier unterschiedlichen Verdichtungsgraden (100% Proctor, 95 %, 90% und 85%) als Vegetationstragschichtgemisch geprüft. Vergleichend wurden jeweils auch die gewählten Ausgangsböden als Referenz zu 100 % in die Untersuchungen einbezogen. In einer ersten Serie wurden die Böden B1, B3 und B4 jeweils mit unterschiedlichen Anteilen aufbereiteten Kalksandstein KS5 und KS7 in den Körnungen 0/16 und 2/16 geprüft, siehe **Tabelle 14**.

Mischungs-Nr./ Stoffmischung	Mischungen, Serie 1, sandig [Masse-%]					
	Boden			Kalksandstein		
	Stoff-Nr.	Bezeichnung	Anteil	Stoff-Nr.	Bezeichnung	Körnung
M1 / B1	B1	Saurer, sandiger Oberboden, Norddeutschland	100	--	--	--
M2			75	KS5	Aufbereiteter Kalksandstein aus Niedersachsen	25
M3			50			50
M4			75	KS7		25
M5			50			50
M6 / B3	B3	Basischer, sandiger rezyklierter Boden, Norddeutschland	100	--		--
M7			75	KS5	Aufbereiteter Kalksandstein aus Niedersachsen	25
M8			50			50
M9			75	KS7		25
M10			50			50
M11 / B4	B4	Sandiger Boden aus Niedersachsen	100	--		--
M12			75	KS5	Aufbereiteter Kalksandstein aus Niedersachsen	25
M13			50			50
M14			75	KS7		25
M15			50			50

Tabelle 14: Mischungszusammensetzung der Eignungsuntersuchungen, Serie 1, sandig

In einer 2. Serie wurden die tonig bindigen Böden B7, B9 und B11 aufgrund ihrer hohen Oberfläche analog lediglich im Mischungsverhältnis 1:1 untersucht, siehe **Tabelle 15**.

Mischungs-Nr./ Stoffmischung	Mischungen, Serie 2, tonig/schluffig [Masse-%]					
	Boden			Kalksandstein		
	Stoff-Nr.	Bezeichnung	Anteil	Stoff-Nr.	Bezeichnung	Körnung
M16 / B7	B7	Schluffiger Oberboden, Löss	100	--	--	--
M17			50	KS5	Aufbereiteter Kalksandstein	50
M18			50	KS7		50
M19 / B9	B9	Karbonatischer Oberboden	100	--	--	--
M20			50	KS5	Aufbereiteter Kalksandstein	50
M21			50	KS7		50
M22 / B11	B11	Toniger Oberboden	100	--	--	--
M23			50	KS5	Aufbereiteter Kalksandstein	50
M24			50	KS7		50

Tabelle 15: Mischungszusammensetzung der Eignungsuntersuchungen, Serie 2, tonig/schluffig

4.3.1 Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen

An den verschiedenen Mischungen wurden folgende bodenphysikalischen Untersuchungen durchgeführt und tabellarisch ausgewertet:

- Wassergehalt **Tabelle 16**
- Proctordichte **Tabelle 17**
- Korngrößenverteilung **Tabelle 18 und Tabelle 19**
- Korndichte **Tabelle 16**
- Wasserkapazität **Tabelle 20**
- Wasserdurchlässigkeit **Tabelle 21**
- Gesamtporenvolumen **Tabelle 22**
- Luftvolumen bei pF 1,8 **Tabelle 23**

In **Bild 11 bis 16** sind die Korngrößenverteilungen zusätzlich grafisch dargestellt. Die Ergebnisse der Keimtests sind in den **Tabelle 16** ergänzt.

Die Untersuchungen für den Bodenwasser- und Bodenluftgehalt sind jeweils für die Proctordichte (100 %) sowie 95, 90 und 85 % Verdichtungsgrad für die Mischungen ermittelt worden.

An der M16/B7, M19/B9 und M22/B11 konnte kein Proctor-Versuch aufgrund der Bindigkeit der Böden durchgeführt werden. Dadurch konnte auch der Bodenluft- und Bodenwasserhaushalt an den Ausgangsböden bei 100 % D_{Pr} nicht bestimmt werden.

CBR-Werte konnten bei den Mischungen nicht bestimmt werden, da der Eindringwiderstand bei den feinkörnigen Mischungen insbesondere bei geringem Verdichtungsgrad, zu gering war.

Mischungs-Nr./ Stoffmischung	Wassergehalt, Korndichte und Keimtest			
	Wassergehalt	Korndichte Luftpyknometer	Korndichte Wasserpykno- meter	Keimtest Kresse
	[%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	--
M1 / B1	6,9	2,620	2,615	positiv
M2	7,4	2,603	2,562	positiv
M3	6,7	2,603	2,547	positiv
M4	7,6	2,608	2,557	positiv
M5	6,9	2,602	2,521	positiv
M6 / B3	6,6	2,616	2,605	positiv
M7	4,4	2,643	2,587	positiv
M8	4,6	2,616	2,552	positiv
M9	4,5	2,634	2,600	positiv
M10	4,9	2,605	2,566	positiv
M11 / B4	8,1	2,652	2,650	positiv
M12	5,0	2,609	2,542	positiv
M13	5,1	2,593	2,527	positiv
M14	5,2	2,611	2,554	positiv
M15	5,3	2,600	2,501	positiv
M16 / B7	31,5	2,586	2,577	positiv
M17	18,3	2,570	2,520	positiv
M18	18,6	2,545	2,511	positiv
M19 / B9	21,4	2,628	2,586	positiv
M20	13,3	2,613	2,587	positiv
M21	13,5	2,609	2,590	positiv
M22 / B11	15,0	2,690	2,598	positiv
M23	10,1	2,643	2,614	positiv
M24	10,3	2,642	2,603	positiv

Tabelle 16: Wassergehalt, Korndichte und Keimtest der verschiedenen Stoffmischungen

Mischungs-Nr./ Stoffmischung	Optimaler Wasser- gehalt (W_{opt})	Proctor- Dichte (100 %)	Trocken- dichte (95%)	Trocken- dichte (90%)	Trocken- dichte (85%)
	[Masse-%]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]	[g/cm ³]
M1 / B1	12,0	1,802	1,712	1,622	1,532
M2	13,0	1,759	1,671	1,583	1,495
M3	15,0	1,710	1,625	1,539	1,454
M4	13,0	1,779	1,690	1,601	1,512
M5	15,0	1,728	1,642	1,555	1,469
M6 / B3	11,0	1,908	1,813	1,717	1,622
M7	16,0	1,646	1,564	1,481	1,399
M8	18,0	1,657	1,574	1,491	1,408
M9	16,0	1,667	1,584	1,500	1,417
M10	17,0	1,667	1,584	1,500	1,417
M11 / B4	14,3	1,668	1,585	1,501	1,418
M12	12,0	1,862	1,769	1,676	1,583
M13	14,0	1,788	1,670	1,609	1,520
M14	12,0	1,877	1,783	1,689	1,595
M15	14,0	1,757	1,669	1,581	1,493
M16 / B7	nicht ermittelbar				
M17	13,0	1,533	1,456	1,380	1,303
M18	23,0	1,525	1,449	1,304	1,296
M19 / B9	nicht ermittelbar				
M20	16,5	1,718	1,632	1,546	1,460
M21	17,0	1,651	1,568	1,486	1,403
M22 / B11	nicht ermittelbar				
M23	15,0	1,783	1,694	1,605	1,516
M24	15,0	1,756	1,668	1,580	1,493

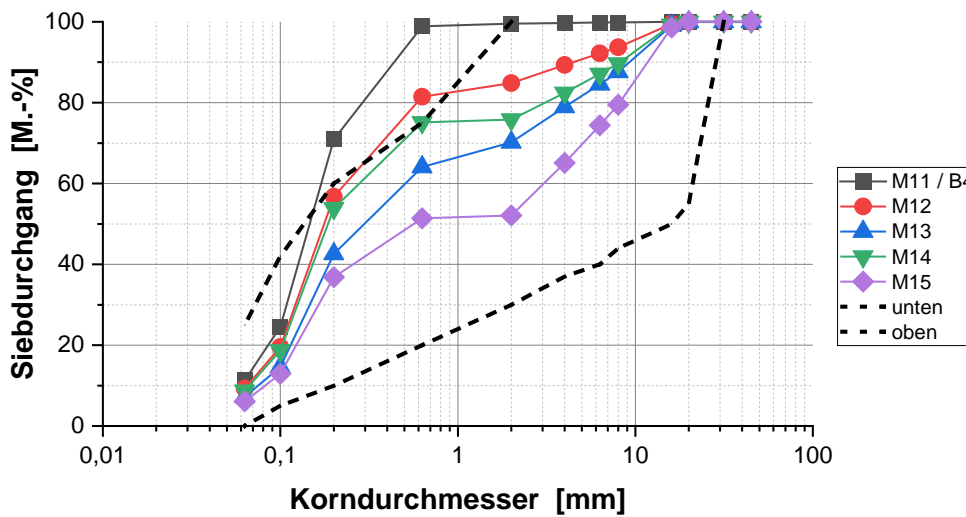
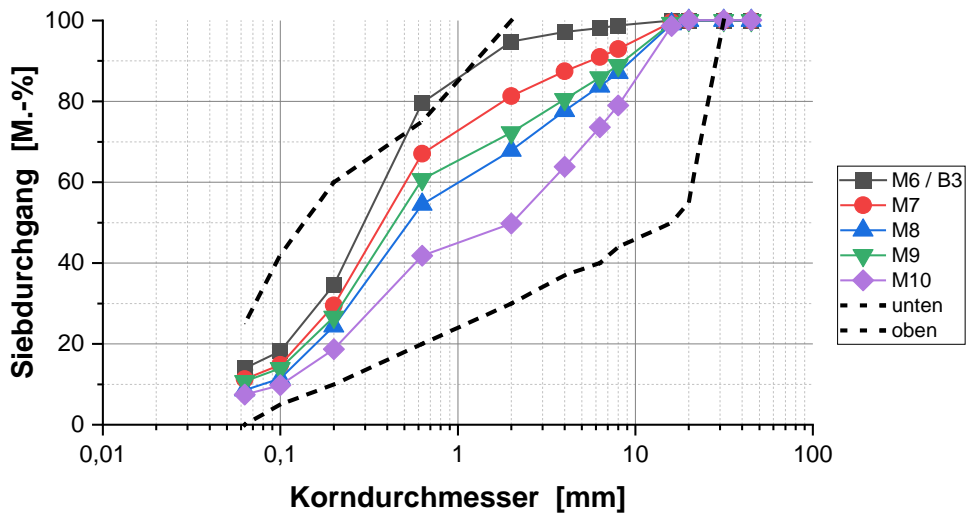
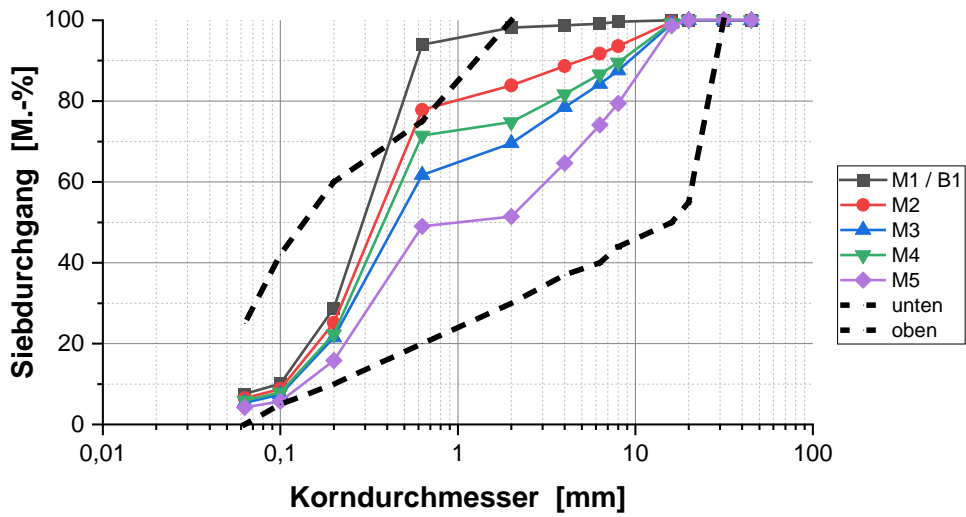
Tabelle 17: Proctordichte, Dichte bei D_{Pr} 0,95, D_{Pr} 0,90 und D_{Pr} 0,85 der verschiedenen Stoffmischungen

Mischungs-Nr./ Stoffmischung	Korngrößenverteilung [Masse-%]		
	Kies	Sand	Schluff u. Ton
	2,0 - 31,5 mm	0,063 - 2,0mm	< 0,063mm
M1 / B1	2,9	90,1	7,0
M2	16,1	77,4	6,5
M3	30,5	64,2	5,4
M4	25,2	68,9	5,9
M5	48,7	47,2	4,3
M6 / B3	4,8	80,7	14,5
M7	18,7	70,1	11,3
M8	32,2	59,3	8,6
M9	27,8	61,6	10,7
M10	50,4	42,3	7,5
M11 / B4	0,3	90,1	9,6
M12	15,1	75,6	9,3
M13	29,8	63,0	7,2
M14	24,2	67,1	8,7
M15	48,0	46,0	6,1
M16 / B7	22,0	49,1	28,9
M17	40,6	43,5	16,0
M18	58,8	26,5	14,9
M19 / B9	11,7	27,2	61,1
M20	35,5	32,5	32,1
M21	53,4	15,5	31,0
M22 / B11	0,0	34,9	65,1
M23	29,6	36,3	34,1
M24	47,8	19,3	33,0

Tabelle 18: Korngrößenverteilung in Hauptfraktionen der verschiedenen Stoffmischungen

Mischungs-Nr./ Stoffmischung	Korngrößenverteilung [Masse-%]						
	Kies			Sand			Schluff u. Ton
	Grobkies 20,0 - 31,5 mm	Mittelkies 6,3 - 20,0 mm	Feinkies 2,0 - 6,3 mm	Grobsand 0,63 - 2,0 mm	Mittelsand 0,2 - 0,63 mm	Feinsand 0,063 - 0,2 mm	< 0,063 mm
M1 / B1	0,0	1,7	1,2	13,2	56,5	20,4	7,0
M2	0,0	8,3	7,9	6,0	52,7	18,7	6,5
M3	0,0	15,8	14,7	7,9	40,2	16,2	5,4
M4	0,0	13,4	11,8	3,3	49,2	16,4	5,9
M5	0,0	26,0	22,7	2,5	33,2	11,6	4,3
M6 / B3	0,0	1,3	3,5	13,5	45,0	22,2	14,5
M7	0,0	9,0	9,7	14,3	37,6	18,2	11,3
M8	0,0	16,3	15,9	13,4	30,1	15,9	8,6
M9	0,0	14,2	13,6	11,6	34,1	15,9	10,7
M10	0,0	26,5	23,9	8,0	23,1	11,3	7,5
M11 / B4	0,0	0,0	0,3	0,7	27,2	62,2	9,6
M12	0,0	7,8	7,3	3,4	24,7	47,5	9,3
M13	0,0	15,4	14,4	6,1	21,6	35,4	7,2
M14	0,0	12,9	11,3	0,7	21,2	45,2	8,7
M15	0,0	25,7	22,3	0,7	14,6	30,8	6,1
M16 / B7	2,5	6,5	13,0	25,1	17,0	7,0	28,9
M17	1,3	18,6	20,7	18,3	16,1	9,1	16,0
M18	1,3	28,9	28,7	12,9	9,1	4,5	14,9
M19 / B9	1,1	6,3	4,3	9,0	8,3	9,9	61,1
M20	0,6	18,6	16,4	10,3	11,8	10,5	32,1
M21	0,6	28,8	24,4	4,9	4,8	5,9	31,0
M22 / B11	0,0	0,0	0,0	4,0	9,3	21,5	65,1
M23	0,0	15,4	14,2	7,8	12,3	16,3	34,1
M24	0,0	25,6	22,2	2,4	5,3	11,7	33,0

Tabelle 19: Korngrößenverteilung in Einzelfractionen der verschiedenen Stoffmischungen



Bilder 11-13: Korngrößenverteilungen der Stoffgemische – „sandig“, Serie 1: M1 bis M15 mit Korngrößenverteilungsbereich für Grünbrücken nach HEIDGER (gestrichelt)

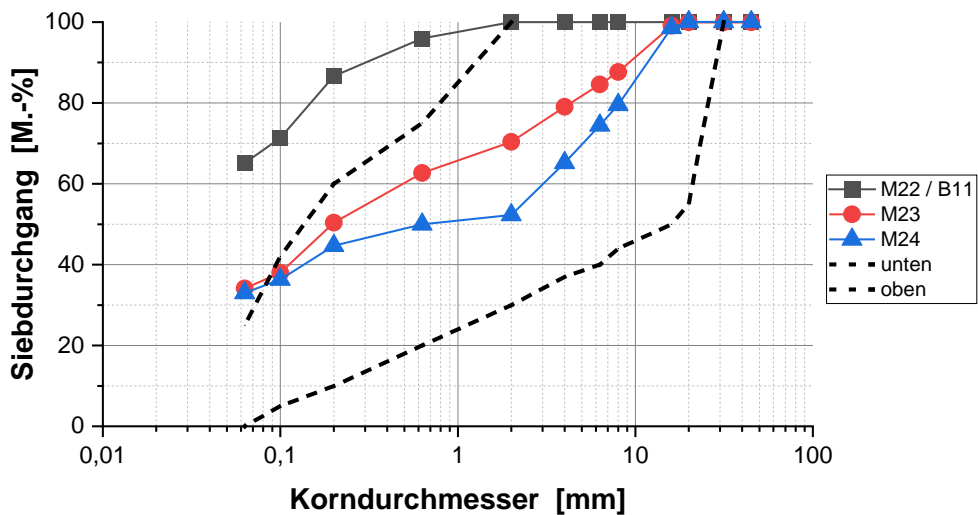
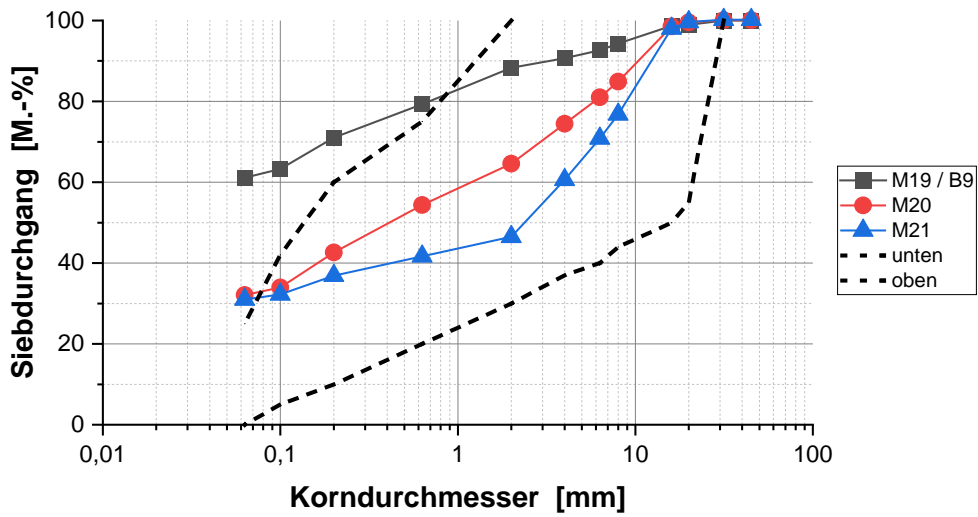
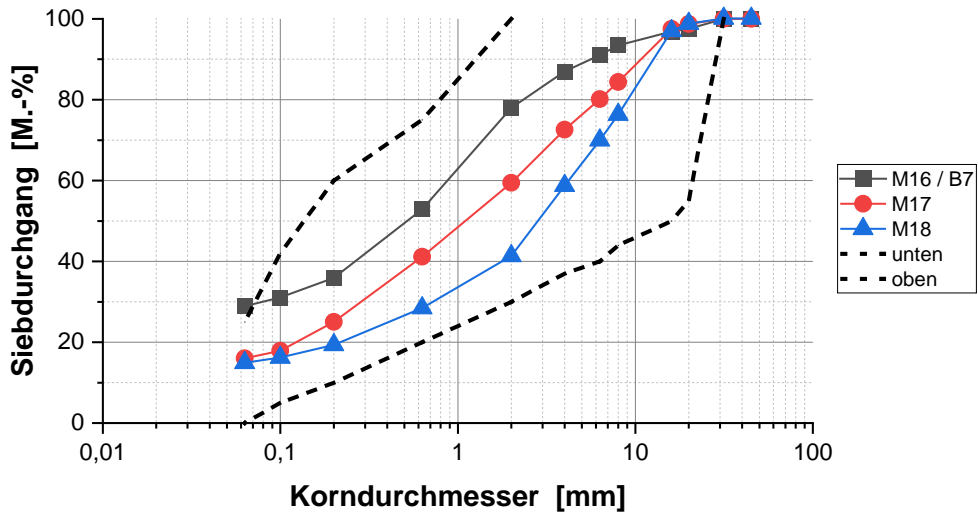


Bild 14-16: Korngrößenverteilungen der der Stoffgemische – „tonig schluffig“, Serie 2: M16 bis M24 mit Korngrößenbegrenzungsbereich für Grünbrücken nach HEIDGER (gestrichelt)

Mischungs-Nr./ Stoffmischung	Maximale Wasserkapazität WK _{max} .			
	100 %	95 %	90 %	85 %
	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]
M1 / B1	30,1	32,7	35,6	39,5
M2	28,6	32,7	36,0	38,7
M3	31,3	33,4	36,3	38,4
M4	26,3	29,7	37,2	40,0
M5	29,4	31,7	33,7	36,0
M6 / B3	27,0	29,9	32,5	36,5
M7	32,3	35,9	37,6	38,6
M8	32,6	34,8	36,6	36,9
M9	32,9	36,3	37,4	36,4
M10	31,3	36,7	39,7	40,5
M11 / B4	32,7	35,2	36,9	38,7
M12	26,0	27,0	32,7	36,6
M13	28,5	33,4	33,7	35,8
M14	25,7	26,3	32,7	34,8
M15	28,7	31,8	35,7	35,4
M16 / B7	nicht ermittelbar			
M17	38,6	40,3	42,7	43,6
M18	38,4	40,5	42,9	41,8
M19 / B9	nicht ermittelbar			
M20	32,2	33,5	39,4	41,2
M21	32,5	33,8	35,8	36,5
M22 / B11	nicht ermittelbar			
M23	30,7	32,0	37,1	37,1
M24	31,0	32,5	35,4	34,6

Tabelle 20: Maximale Wasserkapazität WK_{max} bei D_{Pr} 1,0, D_{Pr} 0,95, D_{Pr} 0,90 und D_{Pr} 0,85 der verschiedenen Stoffmischungen

Mischungs-Nr./ Stoffmischung	Wasserdurchlässigkeit			
	100 %	95 %	90 %	85 %
	[m/s]	[m/s]	[m/s]	[m/s]
M1 / B1	$1,3 \times 10^{-5}$	$2,3 \times 10^{-5}$	$4,7 \times 10^{-5}$	$9,8 \times 10^{-5}$
M2	$< 5 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-5}$	$2,8 \times 10^{-5}$	$7,2 \times 10^{-5}$
M3	$< 5 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-5}$	$3,3 \times 10^{-5}$	$7,2 \times 10^{-5}$
M4	$< 5 \times 10^{-7}$	$5,1 \times 10^{-6}$	$3,8 \times 10^{-5}$	$7,8 \times 10^{-5}$
M5	$< 5 \times 10^{-7}$	$1,16 \times 10^{-5}$	$3,5 \times 10^{-5}$	$8,2 \times 10^{-5}$
M6 / B3	$1,9 \times 10^{-6}$	$6,6 \times 10^{-6}$	$1,3 \times 10^{-5}$	$2,9 \times 10^{-5}$
M7	$< 5 \times 10^{-7}$	$2,6 \times 10^{-5}$	$3,2 \times 10^{-5}$	$4,6 \times 10^{-5}$
M8	$< 5 \times 10^{-7}$	$1,4 \times 10^{-5}$	$2,6 \times 10^{-5}$	$3,8 \times 10^{-5}$
M9	$< 5 \times 10^{-7}$	$2,0 \times 10^{-6}$	$2,9 \times 10^{-5}$	$4,3 \times 10^{-5}$
M10	$< 5 \times 10^{-7}$	$7,2 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-5}$	$3,5 \times 10^{-5}$
M11 / B4	$1,0 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^{-5}$	$2,8 \times 10^{-5}$	$4,1 \times 10^{-5}$
M12	$< 5 \times 10^{-7}$	$3,4 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-5}$	$3,0 \times 10^{-5}$
M13	$5,8 \times 10^{-6}$	$5,8 \times 10^{-6}$	$2,3 \times 10^{-5}$	$6,8 \times 10^{-5}$
M14	$< 5 \times 10^{-7}$	$2,4 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-5}$
M15	$< 5 \times 10^{-7}$	$9,7 \times 10^{-6}$	$2,7 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-4}$
M16 / B7	nicht ermittelbar			
M17	$< 5 \times 10^{-7}$	$< 5 \times 10^{-7}$	$4,3 \times 10^{-6}$	$7,5 \times 10^{-6}$
M18	$< 5 \times 10^{-7}$	$< 5 \times 10^{-7}$	$1,7 \times 10^{-5}$	$3,6 \times 10^{-5}$
M19 / B9	nicht ermittelbar			
M20	$< 5 \times 10^{-7}$	$< 5 \times 10^{-7}$	$3,2 \times 10^{-6}$	$8,4 \times 10^{-6}$
M21	$< 5 \times 10^{-7}$	$< 5 \times 10^{-7}$	$4,7 \times 10^{-5}$	$7,6 \times 10^{-5}$
M22 / B11	nicht ermittelbar			
M23	$< 5 \times 10^{-7}$	$< 5 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-6}$	$5,1 \times 10^{-5}$
M24	$< 5 \times 10^{-7}$	$< 5 \times 10^{-7}$	$2,8 \times 10^{-5}$	$1,1 \times 10^{-4}$

Tabelle 21: Wasserdurchlässigkeit bei D_{Pr} 1,0, D_{Pr} 0,95, D_{Pr} 0,90 und D_{Pr} 0,85 der verschiedenen Stoffmischungen

Mischungs-Nr./ Stoffmischung	Gesamtporenvolumen GPV			
	100 %	95 %	90 %	85 %
	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]
M1 / B1	31,2	34,7	38,1	41,5
M2	32,4	35,8	39,2	42,6
M3	34,3	37,6	40,9	44,2
M4	31,8	35,2	38,6	42,0
M5	33,6	36,9	40,2	43,6
M6 / B3	27,1	30,7	34,4	38,0
M7	37,7	40,8	43,9	47,1
M8	36,7	39,8	43,0	46,2
M9	36,7	39,9	43,0	46,2
M10	36,0	39,2	42,4	45,6
M11 / B4	37,1	40,3	43,4	46,5
M12	28,6	32,2	35,8	39,3
M13	31,1	34,5	37,9	41,4
M14	28,1	31,7	35,3	38,9
M15	32,4	35,8	39,2	42,6
M16 / B7	nicht ermittelbar			
M17	40,3	43,3	46,3	49,3
M18	40,1	43,1	46,1	49,1
M19 / B9	nicht ermittelbar			
M20	34,2	37,5	40,8	44,1
M21	36,9	39,9	43,1	46,2
M22 / B11	nicht ermittelbar			
M23	32,6	35,9	39,3	42,7
M24	33,6	36,9	40,2	43,5

Tabelle 22: Gesamtporenvolumen GPV bei $D_{Pr} 1,0$, $D_{Pr} 0,95$, $D_{Pr} 0,90$ und $D_{Pr} 0,85$ der verschiedenen Stoffmischungen

Mischungs-Nr./ Stoffmischung	Luftvolumen bei pF1,8			
	100 %	95 %	90 %	85 %
	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[Vol.-%]
M1 / B1	14,9	19,6	23,3	27,7
M2	8,1	18,3	22,3	26,5
M3	8,3	16,0	21,1	25,9
M4	8,9	17,6	21,0	26,1
M5	7,2	17,1	21,5	26,3
M6 / B3	6,3	11,8	15,8	19,8
M7	12,1	16,8	19,9	22,7
M8	7,6	14,3	18,6	22,2
M9	10,3	15,8	20,2	23,8
M10	6,6	12,6	14,6	18,1
M11 / B4	18,1	21,8	25,7	27,8
M12	5,1	13,0	15,0	20,4
M13	4,8	9,7	16,5	21,2
M14	4,3	12,5	15,3	20,2
M15	7,6	13,8	16,2	20,8
M16 / B7	nicht ermittelbar			
M17	3,3	6,8	12,2	16,9
M18	3,5	6,5	13,6	19,5
M19 / B9	nicht ermittelbar			
M20	3,1	6,5	10,4	14,5
M21	4,5	10,6	17,3	20,7
M22 / B11	nicht ermittelbar			
M23	3,4	6,5	8,9	15,3
M24	3,6	7,9	12,8	18,0

Tabelle 23: Luftvolumen pF1,8 bei D_{Pr} 1,0, D_{Pr} 0,95, D_{Pr} 0,90 und D_{Pr} 0,85 der verschiedenen Stoffmischungen

Der Wassergehalt in **Tabelle 16** gibt den Wassergehalt zum Prüfzeitpunkt wieder. Insbesondere bei den bindigen Böden (B7 und B9) ergab sich ein höherer Prüfwassergehalt aufgrund der hohen Oberfläche der Partikel. Die Bestimmung der Korndichte mit dem Luftpyknometer lieferte, schon wie bei der Durchführung von AP1, systematisch höhere Werte. Bei der Durchführung der Keimtest mit Kresse waren keine Unterschiede zu verzeichnen. Alle Mischungen lieferten ein positives Ergebnis.

In **Tabelle 17** sind die Ergebnisse des Proctor-Versuchs für die Mischungen aufgeführt. Mit den angegebenen Dichten für die unterschiedlichen Verdichtungsgrade (100% bis 85%) wurden in der Folge der Bodenluft- und Bodenwasserhaushalt bestimmt.

Die Korngrößenverteilungen wurden durch kombinierte Nass- und Trockensiebung nach DIN 18123 ermittelt. Die Ergebnisse sind in der **Tabelle 18** als Hauptfraktionen und **Tabelle 19** in Einzelfraktionen wiedergegeben. In **Bild 11 bis 16** sind die Korngrößenverteilungen grafisch dargestellt. Den Bildern kann man entnehmen, dass mit Hilfe der Bodenverbesserungsmaßnahmen alle Korngrößenverteilungen in den empfohlenen Korngrößenverteilungsbereichen nach HEIDGER für Grünbrücken „verschoben“ werden. Das gilt sowohl für die sandigen Ausgangsböden wie auch die bindigen Varianten. Der Einsatz der Kalksandsteinkörnung 2/16 mm verschiebt im direkten Vergleich zu 0/16 mm bei einer Zugabe von 25 oder 50 M.-% die Korngrößenverteilung weiter in den größeren Korngrößenbereich.

In **Tabelle 20** sind die Ergebnisse der der Maximalen Wasserkapazität aufgeführt. In den **Tabellen 21 bis 23** folgen analog die Ergebnisse für die Wasserdurchlässigkeit, das Gesamtporenvolumen sowie das Luftvolumen bei pF_{1,8} für die untersuchten Verdichtungsgrade. Vergleicht man die Ergebnisse mit den Anforderungswerten der **Tabelle 3** für Baumpflanzungen und der **Tabelle 4** für Grünbrücken nach HEIDGER kann man erkennen, dass der Anforderungswert von 30 Vol.-% für die maximale Wasserkapazität bei 90 % Verdichtung von allen Mischungen für Vegetationssubstrate für Grünbrücken erfüllt wird. Der Anforderungswert für Baumsubstrate, bei einem Verdichtungsgrad von 85 oder 95 % für die Pflanzgrubenbauweisen 1 oder 2 werden mit mindestens 25 Vol.-% ebenfalls von allen Mischungen überschritten.

Den Anforderungswert für die Wasserdurchlässigkeit von 1×10^{-5} m/s für Grünbrückensubstrate erfüllen bei 90 % Verdichtung alle Mischungen bis auf die bindigen Varianten M17, M20 und M23 unter Verwendung von Kalksandstein in der Körnung 0/16 mm. Den Anforderungswert an die Wasserdurchlässigkeit von 5×10^{-6} m/s für Baumpflanzungen der Pflanzgrubenbauweise 1 erfüllen alle geprüften Varianten. Bei einem Verdichtungsgrad von 95 % für Baumsubstrate der Pflanzgrubenbauweise 2 erfüllen nur die sandigen Varianten diese Anforderung bis auf M12 und M14.

Für den Bodenwasser- und -lufthaushalt werden an das Gesamtporenvolumen heute für Baumpflanzungen keine Anforderungen mehr gestellt. Für Grünbrückensubstrate fordert HEIDGER hier einen Wert von mindestens 40 Vol.-%. Der **Tabelle 22** kann man entnehmen, dass dieser Sollwert nahezu von allen Mischungen erreicht wird. Ein ausreichendes Luftvolumen (**Tabelle 23**) von mindestens 15 Vol.-% wird für Grünbrückensubstrate von allen sandigen Varianten erfüllt. Bis auf die Mischung M21 gilt dies aber nicht für die bindigen Varianten. Ähnlich verläuft die Bewertung für Baumsubstrate. Bei einem Verdichtungsgrad von 85 % erfüllen nahezu alle Varianten, bis auf M20 mit 14,5 Vol.-% den Anforderungswert. Eine Verdichtung von 95 % für die Pflanzgrubenbauweise 2 zeigt jedoch die Grenzen der Bodenverbesserungsmaßnahmen bei den unterschiedlichen Varianten deutlich auf.

4.3.2 Ergebnisse der bodenchemischen Untersuchungen

Weiterhin wurden die folgenden bodenchemischen Ergebnisse an den Versuchsmischungen ermittelt:

- pH-Wert **Tabelle 24**
- Salzgehalt **Tabelle 24**
- Organische Substanz **Tabelle 24**
- Hauptnährstoffe **Tabelle 25**

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse tabellarisch ausgewertet. Man kann den Ergebnissen der **Tabelle 24** entnehmen, dass systembedingt die Bodenreaktion durch die Zugabe des Kalksandsteinmaterials ansteigt. Das kann auch die schwach saure Variante M1/B1 nicht verhindern. Alle Werte des pH-Wertes liegen aber meist noch unter 8,5, dem Anforderungswert gemäß Tabelle 3 für Baumpflanzungen. HEIDGER hat für Grünbrücken keinen Anforderungswert empfohlen.

Der Salzgehalt aller Varianten mit einem Anforderungswert < 150 mg/100 g liegt für Substrate für den Bereich der Vegetationstechnik in einem unkritischen Bereich.

Der Gehalt an organischer Substanz wird bei allen Varianten durch die Zugabe von Kalksandsteinmaterial im Vergleich zum Ausgangsboden gesenkt, könnte aber ausgeglichen werden durch die Zugabe von z.B. Kompost zur Mischung.

Die festgestellten Nährstoffgehalte der Böden (**Tabellen 24** und **25**) sind bei allen Mischungen als nährstoffarm zu bezeichnen. Gemäß FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen sollten Düngemaßnahmen erst bei der Pflanzung erfolgen. Eine ähnliche Vorgehensweise wird daher auch für Bodenverbesserungsmaßnahmen empfohlen.

Mischungs-Nr./ Stoffmischung	Bodenchemische Untersuchungen		
	pH-Wert	Salzgehalt	Gehalt an organischer Substanz
	--	[mg/100g]	[Masse-%]
M1 / B1	6,4	30	2,1
M2	7,6	35	1,5
M3	7,5	35	1,4
M4	7,8	30	1,2
M5	7,9	35	1,0
M6 / B3	7,4	80	2,6
M7	7,9	70	1,8
M8	8,0	60	1,7
M9	8,2	50	1,4
M10	8,1	55	1,4
M11 / B4	7,5	10	0,0
M12	8,7	20	/
M13	8,4	25	
M14	8,2	25	
M15	8,5	20	
M16 / B7	6,1	90	6,1
M17	8,1	90	3,1
M18	7,3	110	3,1
M19 / B9	7,5	60	4,1
M20	8,6	50	2,1
M21	8,3	50	2,1
M22 / B11	8,4	110	2,1
M23	8,8	50	1,1
M24	8,7	50	1,1

Tabelle 24: pH-Wert, Salzgehalt und Gehalt an organischer Substanz der verschiedenen Stoffmischungen

Mischungs-Nr./ Stoffmischung	Bodenchemische Eigenschaften / Hauptnährstoffe				
	Stickstoff (N) [mg/100g]	Nitrat- Stickstoff (NO ₃ -N) [mg/100g]	Ammonium- Stickstoff (NH ₄ -N) [mg/100g]	Phosphat (P ₂ O ₅) [mg/100g]	Kalium (K ₂ O) [mg/100g]
M1 / B1	1	1	<1	17	3
M2	1	1	<1	13	3
M3	1	1	<1	12	2
M4	1	1	<1	15	4
M5	1	1	<1	14	2
M6 / B3	23	23	<1	36	12
M7	21	21	<1	20	10
M8	19	19	1	22	11
M9	11	11	<1	24	8
M10	15	15	<1	15	9
M11 / B4	1	1	<1	30	3
M12	1	1	<1	31	2
M13	1	1	<1	28	2
M14	1	1	<1	24	2
M15	1	1	<1	27	3
M16 / B7	2	2	<1	5	28
M17	2	3	<1	4	29
M18	3	2	<1	4	30
M19 / B9	2	2	<1	3	23
M20	2	2	<1	5	23
M21	2	2	<1	4	28
M22 / B11	3	3	<1	13	25
M23	3	3	<1	13	24
M24	2	2	<1	12	31

Tabelle 25: Hauptnährstoffe der verschiedenen Stoffmischungen

4.4 AP 4: Praxisversuche an einem Dammbauwerk

4.4.1 Bau und Aufbau der Versuchsfelder

Die Praxisversuche an Dammbauwerken konnten bei den Fa. BAUREKA, Aufbereitungsstandort Igelburg in Habichtswald bei Kassel und später zusätzlich bei der Fa. LOBMEIER in Edermünde durchgeführt werden. BAUREKA und LOBMEIER stellten für diesen Zweck Ausgangsstoffe, Aufbereitungstechnik und ihre Betriebsgrundstücke zur Verfügung.

Dazu wurden bei Baureka vorhandene Wälle mit einer Länge von ca. 200 m mit folgenden unterschiedlichen Versuchsfeldern im Frühjahr 2018 belegt:

- Feld H1a: Sandiger Boden (Referenz) mit einer Gräseransaat
- Feld H1b: Sandiger Boden (Referenz) mit einer Blumenansaat
- Feld H2a: Bindiger Boden (Referenz) mit einer Gräseransaat
- Feld H2b: Bindiger Boden (Referenz) mit einer Blumenansaat
- Feld H3a: Sandiger Boden mit 20 M.-% Kalksandstein 0/16 mm mit einer Gräseransaat
- Feld H3b: Sandiger Boden mit 20 M.-% Kalksandstein 0/16 mm mit einer Blumenansaat
- Feld H4a: Bindiger Boden mit 20 M.-% Kalksandstein 0/16 mm mit einer Gräseransaat
- Feld H4b: Bindiger Boden mit 20 M.-% Kalksandstein 0/16 mm mit einer Blumenansaat
- Feld H5a: Sandiger Boden mit 40 M.-% Kalksandstein 0/16 mm mit einer Blumenansaat
- Feld H5b: Sandiger Boden mit 40 M.-% Kalksandstein 0/16 mm mit einer Gräseransaat
- Feld H6a: Bindiger Boden mit 40 M.-% Kalksandstein 0/16 mm mit einer Blumenansaat
- Feld H6b: Bindiger Boden mit 40 M.-% Kalksandstein 0/16 mm mit einer Gräseransaat

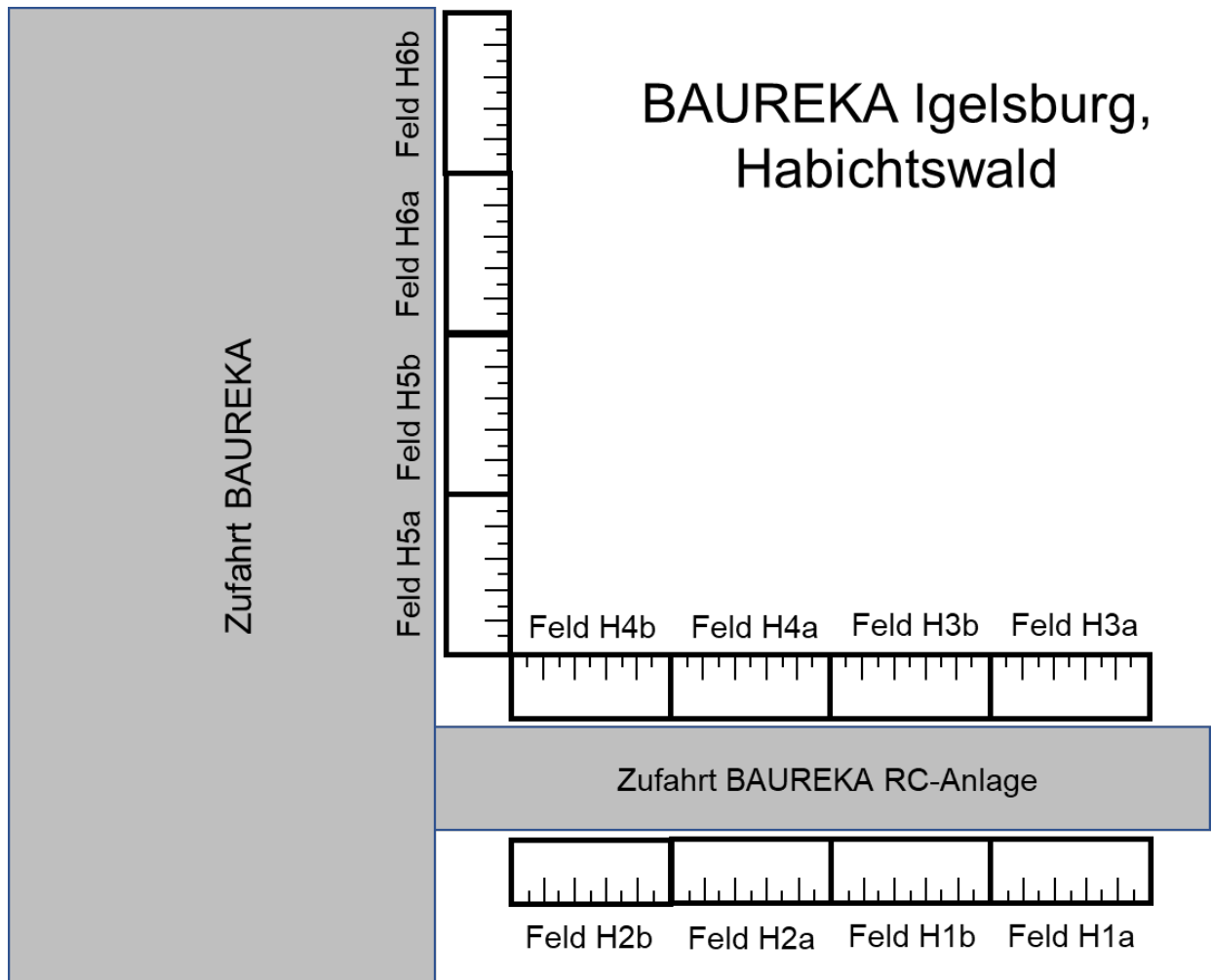
Variiert wurde in den Versuchsfeldern der auf dem Aufbereitungsplatz zur Verfügung stehende Boden (sandig und bindig). Das zur Bodenverbesserung zugegebene Kalksandstein-Gesteinskörnungsgemisch 0/16 mm [in 0 (Referenz), 20 und 40 M.-%] sowie die Ansaat in Form einer Gräsermischung und einer Blumenmischung ergaben insgesamt 12 Varianten.

Da auf dem Gelände der Baureka für eventuelle Pflegemaßnahmen kein Gießwasser zur Verfügung stand und sich das Jahr 2018 als besonderes „Dürrejahr“ herausstellte, wurde die Ansaat hier erst im Frühjahr 2019 aufgebracht und danach über zwei Vegetationsperioden untersucht. Für das Projekt wurde ein Verlängerungsantrag um ein Jahr gestellt, dem stattgegeben wurde.

Im Jahr 2019 bestand bei der Fa. Lobmeier in Edermünde zusätzlich die Möglichkeit, weitere drei Versuchsfelder anzulegen und diese für eine Vegetationsperiode zusätzlich zu untersuchen:

- Feld E1: Schluffiger Oberboden (Referenz) mit einer Gräser- Wildblumenmischungsansaat
- Feld E2: Schluffiger Oberboden mit 20 M.-% aufbereiteten Kalksandstein 0/16 mm mit einer Gräser- Wildblumenmischungsansaat
- Feld E3: Schluffiger Oberboden mit 40 M.-% aufbereiteten Kalksandstein 0/16 mm mit einer Gräser- Wildblumenmischungsansaat

Es konnte so ein weiterer schluffiger Oberboden als Referenz sowie eine Bodenverbesserung mit 20 und 40.-M.-% aufbereiteten Kalksandstein 0/16 mm mit einer Gräser- Wildblumenmischungsansaat zusätzlich in die Untersuchungen einfließen. In dem folgenden **Bild 17** ist der Versuchsaufbau der Felder dargestellt.



LOBMEIER, Edermünde

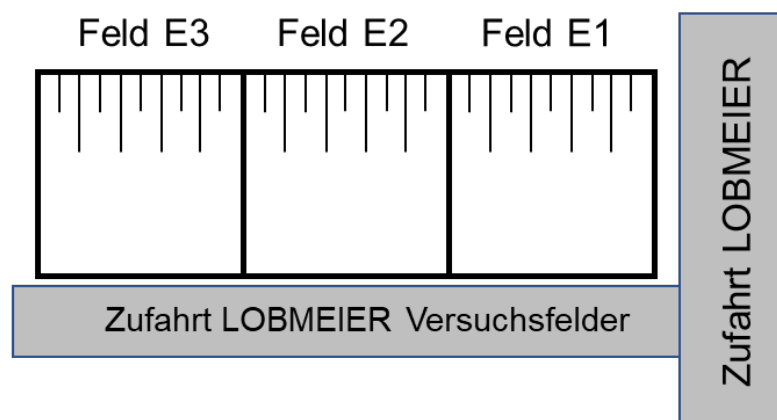


Bild 17: Anordnung der Wall-Versuchsfelder bei Baureka und Lobmeier

Die Größe der Felder konnte baubedingt in Habichtswald auf ca. 10 x 2,5 m und in Edermünde auf 10 x 8 m ausgebildet werden. Die Neigung lag bei ca. 1:1,5. Bei den Feldern H5 und H6 lag die Böschungsneigung bei ca. 1:1.

4.4.2 Verwendete Samenmischungen für die Versuchsfelder

Rasensamenmischung Versuchsfelder Habichtswald

Als Gräseransaat kam eine pflegeleichte und trockenheitstolerante Mischung zur Anwendung, die für viele Lagen geeignet ist. Die Mischung wächst schnell an und soll so für eine rasche Begrünung sorgen. Die Zusammensetzung besteht aus 80 % Deutsches Weidelgras und 20 % Rotschwingel. Die Aufwandmenge soll laut Herstellangaben: 35 g/m² betragen.

Deutsches Weidelgras zeichnet sich durch die Entwicklung einer dichten, feinen Narbe und der geringen Wuchshöhe aus. Das Gras entwickelt sich anfangs sehr schnell und führt damit zu einer schnellen Begrünung neu angelegter Flächen. Das Deutsche Weidelgras ist robust und trittfest und besitzt eine hohe Trockenresistenz. Auch Rotschwingel hat eine gute Anfangsentwicklung. Das Gras ist konkurrenzfähig, unkrautverdrängend und trockenheitsresistent.

Blumensamenmischung Versuchsfelder Habichtswald

Als Blumenansaat wurde eine blütenreiche Blumenmischung für die Versuchsfelder verwendet, die ein- und mehrjährige Arten in Form von Blumen und Kräutern enthält. Die Wuchshöhe beträgt 20 bis 120 cm und bestand vorwiegend aus Klatschmohn, Kornblumen, Ringelblume, Sonnenhut und anderen. Die Ansaatstärke wird vom Hersteller mit 1 g/m² angegeben.

Gräser- und Wildblumenansaat Versuchsfelder Edermünde

Für die Versuchsfelder in Edermünde wurde eine spezielle Gräser- und Wildblumenansaat gewählt, die für Böschungen des Straßenbegleitgrüns zur ingenieurbioologischen Hangsicherung eingesetzt wird und von der Fa. Rieger und Hoffmann angeboten wird. Sie besteht aus 30 % Blumen und 70 % Gräsern. Es handelt sich um eine optisch ansprechende, ausdauernde Pflanzengesellschaft mit bodenfestigenden Eigenschaften. Die Wuchshöhe beträgt bis zu 1 m. Vor der Ansaat war zu beachten, dass die Böschungsoberfläche etwas aufgeraut bleibt, um das Abschwemmen des Saatguts zu verhindern. Empfohlene Ansaatstärke: 5 g/m², 50 kg/ha bei in **Tabelle 26** aufgeführter Zusammensetzung.

Vor der Einsaat wurden alle Versuchsfelder mit einer Harke aufgeraut und grobe mineralische Partikel noch entfernt. Als Einsaatmenge wurde jeweils die doppelte Menge der Herstellerempfehlung verwendet, um eine ausreichende Begrünung der Böschungen zu erzielen.

Die Versuchsfelder in Edermünde konnten in der Keimphase in den ersten sechs Wochen regelmäßig (zweimal wöchentlich) bewässert werden.

Gräser- und Wildblumenmischung Versuchsfelder Edermünde			
Blumen 30%	Botanischer Name	Deutscher Name	%
	<i>Achillea millefolium</i>	Gewöhnliche Schafgarbe	1,20
	<i>Agrimonia eupatoria</i>	Kleiner Odermennig	1,50
	<i>Campanula rotundifolia</i>	Rundblättrige Glockenblume	0,10
	<i>Centaurea cyanus</i>	Kornblume	3,00
	<i>Centaurea jacea</i>	Wiesen-Flockenblume	1,20
	<i>Centaurea scabiosa</i>	Skabiosen-Flockenblume	0,50
	<i>Cichorium intybus</i>	Gewöhnliche Wegwarte	1,10
	<i>Clinopodium vulgare</i>	Gewöhnlicher Wirbeldost	0,20
	<i>Daucus carota</i>	Wilde Möhre	1,70
	<i>Echium vulgare</i>	Gewöhnlicher Natternkopf	1,00
	<i>Galium album</i>	Weißes Labkraut	1,20
	<i>Galium verum</i>	Echtes Labkraut	0,50
	<i>Hypericum perforatum</i>	Echtes Johanniskraut	0,50
	<i>Hypochaeris radicata</i>	Gewöhnliches Ferkelkraut	0,30
	<i>Knautia arvensis</i>	Acker-Witwenblume	0,60
	<i>Leucanthemum ircutianum/vulgare</i>	Wiesen-Margerite	2,00
	<i>Linaria vulgaris</i>	Gewöhnliches Leinkraut	0,20
	<i>Lotus corniculatus</i>	Hornschotenklee	1,00
	<i>Medicago lupulina</i>	Gelbklee	1,00
	<i>Origanum vulgare</i>	Gewöhnlicher Dost	0,20
	<i>Papaver rhoeas</i>	Klatschmohn	1,00
	<i>Pastinaca sativa</i>	Gewöhnlicher Pastinak	1,00
	<i>Picris hieracioides</i>	Gewöhnliches Bitterkraut	0,20
	<i>Plantago lanceolata</i>	Spitzwegerich	1,50
	<i>Plantago media</i>	Mittlerer Wegerich	0,30
	<i>Prunella vulgaris</i>	Gewöhnliche Braunelle	0,50
	<i>Salvia pratensis</i>	Wiesen-Salbei	1,20
	<i>Sanguisorba minor</i>	Kleiner Wiesenknopf	1,90
	<i>Scorzoneroides autumnalis</i>	Herbst-Löwenzahn	0,30
	<i>Silene latifolia</i> ssp. <i>alba</i>	Weißer Lichtnelke	0,80
	<i>Silene vulgaris</i>	Gewöhnliches Leimkraut	1,50
	<i>Verbascum nigrum</i>	Schwarze Königskerze	0,40
	<i>Verbascum thapsus</i>	Kleinblütige Königskerze	0,40
Gräser 70%	<i>Agrostis capillaris</i>	Rotes Straußgras	3,00
	<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Tresse	3,00
	<i>Bromus hordeaceus</i>	Weiche Tresse	5,00
	<i>Cynosurus cristatus</i>	Weide-Kammgras	5,00
	<i>Festuca guestfalica (ovina)</i>	Schafschwingel	15,00
	<i>Festuca rubra</i>	Horst-Rotschwingel	21,00
	<i>Lolium perenne</i>	Deutsches Weidelgras	5,00
	<i>Poa angustifolia</i>	Schmalblättriges Rispengras	9,00
	<i>Poa compressa</i>	Platthalm-Rispengras	4,00

Tabelle 26: Zusammensetzung der Gräser- und Wildblumenmischung

4.4.3 Wetterdaten für die Versuchsfelder

Die Temperatur- und Niederschlagsdaten stammen vom Deutschen Wetterdienst und wurden über die Internetseite <https://cdc.dwd.de/portal> abgerufen. Die Daten stammen von der Wetterstation Schauenburg-Elgershausen, welche sich Luftlinie ca. 9 km von den Versuchsfeldern in Habichtswald und Edermünde befindet. Die Wetterstation liegt auf 317 m Höhe bei einem Breitengrad von 51.2835 und Längengrad 9.3590, **Bild 18**.

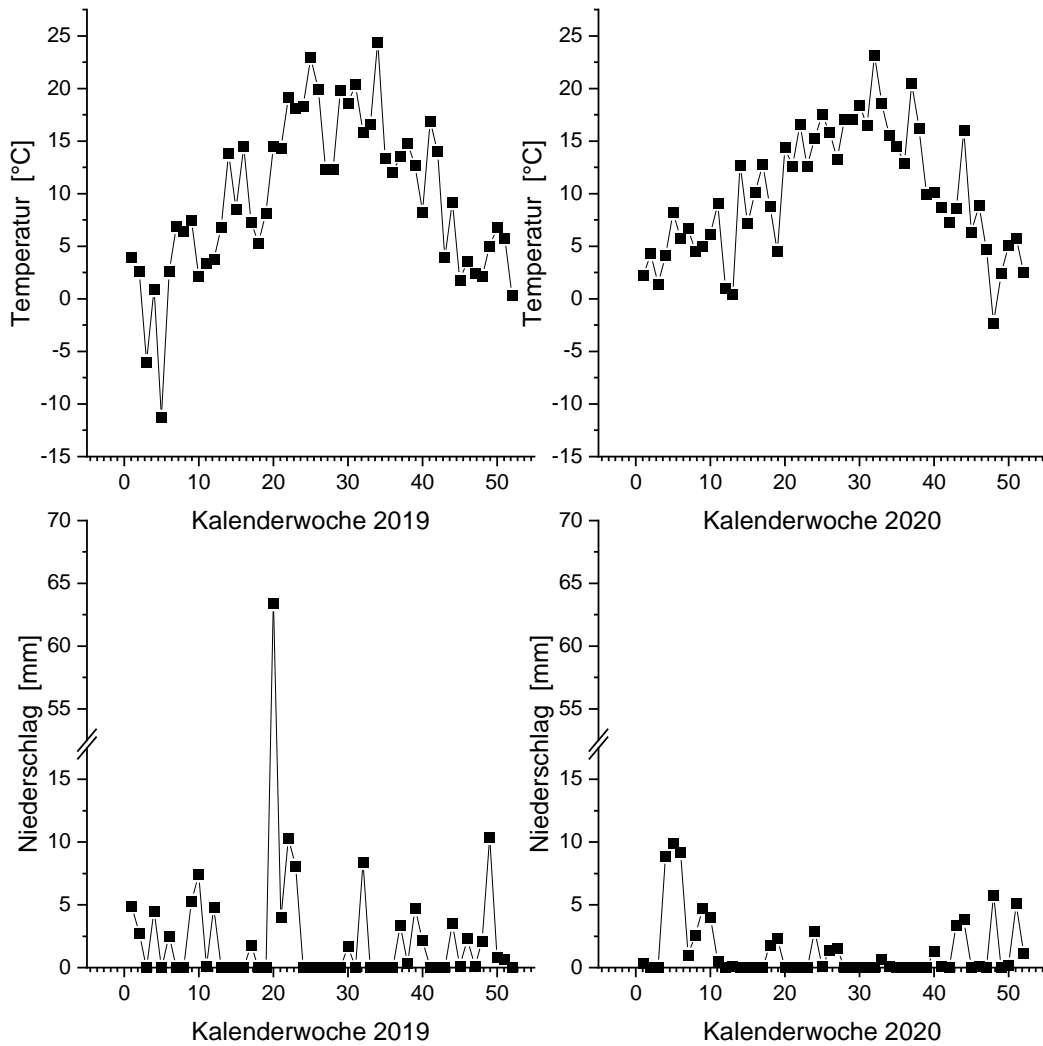


Bild 18: Tagestemperatur und Niederschlag pro Woche während der zwei Vegetationsperioden, Wetterstation Schauenburg-Elgershausen

Der Jahresniederschlag lag 2019 bei 754,7 mm und 2020 bei 578,4 mm. Am 20.05.2019 fiel allein ein Niederschlag in Höhe von 63,4 mm.

4.4.4 Entwicklung und Etablierung der Vegetation nach 1 und 2 Vegetationsperioden

Die Versuchsfelder bei Baureka in Habichtswald wurden über 2 Vegetationsperioden begleitet; im Jahre 2019 und 2020. Für die drei zusätzlichen Versuchsfelder bei Lobmeier in Edermünde stand eine Vegetationsperiode im Jahr 2020 zur Beobachtung zur Verfügung.

Dabei entwickelte sich die Vegetation auf den Versuchsfeldern sehr unterschiedlich. Die Artenvielfalt konnte daher nur visuell und punktuell erfasst werden. Das galt insbesondere für die Versuchsfelder mit reiner Blumenansaat und wechselnder Blühfolge. So ergaben sich folgende Beobachtungen während der Dauer der zwei Vegetationsperioden:

Versuchsfelder in Habichtswald

Mai, Juni 2018: Bau der Versuchsfelder in Habichtswald. Größere Gehölze werden auf den Versuchsfeldern bewusst stehen gelassen und nicht gerodet. Die anhaltende Dürre im Jahr 2018 machte eine Einsaat unmöglich, da mit einer ordnungsgemäßen Keimung nicht gerechnet werden konnte. Die Einsaat wurde daher auf das Folgejahr verschoben. Auf den Flächen entstand nur vereinzelt eine Vegetation in Form von Kräutern. Gräser traten nahezu nicht auf.

Juni 2018: Auf den Versuchsfeldern kommt teilweise die Begrünung des Unterbodens in Form von Huflattich durch. Als Spontanbegrünung treten vereinzelt und unsystematisch Johanniskraut, Rainfarn, Wilde Möhre auf.

April 2019: Einsaat auf den Versuchsfeldern.

Mai 2019: Keimung von Gräsern und Blumen auf den Versuchsfeldern ist erfolgt. Insbesondere auf Feldern H3 und H4 kommt Huflattich aus dem Unterboden deutlich auf.

Juni 2019: Auf den Versuchsfeldern sind die Gräser aufgegangen und Blumen haben angefangen zu blühen. Augenscheinlich hat sich die Vegetation in Form von Gräsern am besten auf den Feldern H3 und H4 entwickelt. Bei Blumen entwickelten sich die Referenzfelder H1 und H2 am blühkräftigsten. Wuchshöhe der Gräser ca. 10 bis 15 cm, Wuchshöhe der Blumen ca. 30 bis 60 cm. Bei den Blumen waren insbesondere Klatschmohn, Kornlumen, Ringelblume, Löwenzahn, Phacelia, Schafgarbe, Disteln und vereinzelt Melde vertreten.

August 2019: Auf den Blumenfeldern bestimmen Ringelblumen, Malven, Rainfarn und Wicken das Bild. Die Samenbildung hat begonnen. Die Gräserfelder haben weiter an Dichte zugenommen.

September 2019: Auf den Blumenfeldern bestimmen noch Ringelblumen und Disteln das Gesamtbild. Die Samenbildung ist im vollen Gange, Blumenstengel sind am Vertrocknen. Die Gräserfelder stagnieren in ihrem Wachstum und beginnen sich gelblich zu färben.

Dezember 2019: Laubfall auf den Feldern. Auf den Feldern H5 und H6 hat sich teilweise Moos gebildet. Auf den Blumenfeldern bestimmen noch blühende Ringelblumen das Bild. Andere sind vertrocknet. Bei den Gräserfeldern haben sich die Gräser zurückgezogen und zeigen einen vergilbten Zustand.

April 2020: Im Bereich der Versuchsfelder H3b, H4a und H4b ist der Wall beschädigt worden und muss erneuert werden. Für den beschädigten Bereich wird das Bodengemisch mit 20 M.-% Kalksandstein 0/16 mm neu gemischt und aufgetragen. Wie in Edermünde erfolgt nur eine Begrünung mit der Gräser- und Wildblumenmischung.

Mai 2020: Auf den Versuchsfeldern begrünten die Gräser und die Blumen haben angefangen zu blühen. Hier dominieren die Ringelblumen, Phacelia und Schafgarbe. Teilweise treiben die Disteln und Löwenzahn. Vereinzelt treten Klatschmohn, Melde und Malven auf. Der Rainfarn blüht noch nicht, weist eine intensiv dunkelgrüne Farbe bei den Blättern auf. Auf Feld 2b ist Sauerampfer zu erkennen. Im Feld 3 kommt Huflattich aus dem Unterboden wieder dominant durch. Bei den Gräsern ist ein beginnender Neuaustrieb zu beobachten. Auf den Feldern 5 und 6 sind die Gräser noch gelb/grün. Auf allen Versuchsfeldern sind vereinzelt Ahorn zu beobachten. Das neu errichtete Versuchsfeld im Bereich H4 beginnt zu begrünen.

Juni 2020: Die Blumenversuchsfelder sind wie im Vorjahr in voller Blüte und haben an Artenvielfalt zugenommen. Bei den Gräser Versuchsfeldern hat sich eine volle Begrünung noch nicht eingestellt.

Juli 2020: Melde kommt in dem neuerstellten Versuchsfeld im Bereich H4 auf und erreicht eine Größe von ca. 50 cm und wird entfernt.

August 2020: Das neuerstellte Versuchsfeld im Bereich H4 weist mit der neuen Gräser-Wildblumenmischung einen Deckungsgrad von nahezu 100 % auf.

September 2020 und zum Ende der zweiten Vegetationsperiode, November 2020: Die Versuchsfelder weisen im Vergleich zum Vorjahr einen „trockneren“ Zustand auf, im Gegensatz zum neuerstellten Versuchsfeld im Bereich H4 mit voller Begrünung bei Substratwechsel.

Versuchsfelder in Edermünde

April 2020: Bau der Versuchsfelder in Edermünde.

Mai 2020: Eine Keimung ist noch nicht erfolgt.

Juni 2020: Melde kommt in den Versuchsfeldern auf. Die Keimung der Saat beginnt.

Juli 2020: Die Melde ist bis zu ca. 60 cm hoch und wird weitgehend händisch entfernt. Gekeimte Gräser und Wildblumen befinden sich verstärkt am Böschungsfuß.

August 2020: Die Begrünung der Versuchsfelder ist erfolgt und weist durchgehend einen grünen Eindruck auf. Wildblumen beginnen zu blühen. In Böschungsfußbereich hat sich die Vegetation mit einem Deckungsgrad von 100 % ausgebildet.

September 2020: Wie im Vormonat.

Zum Ende der ersten Vegetationsperiode, November 2020: Der Deckungsgrad und die Höhe der Einsaat haben weiter zugenommen. Vereinzelt blühen noch Wildblumen, wie z.B. Kamille, Schafgarbe, Natternkopf, Klippenleimkraut, Mohn, Graukresse, Margariten, Eselsdistel Spitzwegerich, Beifuß Wiesensauerampfer .

In der folgenden **Tabelle 27** ist die Entwicklung des Deckungsgrades und der maximalen Wuchshöhe in den Versuchsfeldern quartalsweise zugeordnet.

Versuchsfeld-Nr./ Versuchsfeld-kennzeichnung	Jahr	Entwicklung und Etablierung der Vegetation in den Vegetationsperioden						
		Deckungsgrad [%] und maximale Wuchshöhe [cm] der Vegetation im Quartal						
		I	II		III		IV	
H1a (Gräser)	2019	Bau der Versuchsfelder, erste Keimung, Wiederbegrünung in der zweiten Vegetationsperiode	50	15	60	20	60	10
	2020		50	10	50	15	70	20
H1b (Blumen)	2019		50	60	50	120	50	60
	2020		50	50	40	40	50	100
H2a (Gräser)	2019		50	15	60	15	50	10
	2020		40	10	50	15	70	20
H2b (Blumen)	2019		40	60	50	100	40	50
	2020		50	60	20	40	40	80
H3a (Gräser)	2019		50	15	70	15	60	10
	2020		60	15	70	15	95	20
H3b (Blumen)	2019		50	60	60	50	40	60
	2020		40	40	50	50	30	60
H4a (Gräser) (Gräser/Wildblumen)	2019		60	15	60	15	60	10
	2020		Neubau		60	15	100	60
H4b (Blumen) (Gräser/Wildblumen)	2019		50	60	50	60	40	50
	2020		Neubau		50	15	100	60
H5a (Blumen)	2019		40	50	40	60	20	50
	2020		40	50	20	30	40	50
H5b (Gräser)	2019		40	15	40	15	30	10
	2020		30	10	40	10	30	15
H6a (Blumen)	2019		30	50	30	60	20	50
	2020		20	30	20	30	20	30
H6b (Gräser)	2019		50	15	50	15	30	10
	2020		30	15	30	10	50	15
E1 (Gräser/Wildblumen)	2020	50	50	60	60	40	40	
E2 (Gräser/Wildblumen)	2020	60	50	70	70	60	40	
E3 (Gräser/Wildblumen)	2020	40	50	60	50	50	40	

Tabelle 27: Entwicklung des Deckungsgrades und der maximalen Wuchshöhe

4.4.5 Ergebnisse der bodenphysikalischen Untersuchungen zum Projektende

Zu Versuchsende wurden im September 2020 auf allen Versuchsfeldern Stechzylinder und Bodenproben entnommen und folgende bodenphysikalischen Untersuchungen durchgeführt und tabellarisch ausgewertet:

- Wassergehalt **Tabelle 28**
- Einbaudichte an entnommenen Stechzylindern, Durchmesser 150 mm **Tabelle 28**
- Korngrößenverteilung **Tabelle 29 und Tabelle 30**
- Korndichte **Tabelle 28**
- Wasserkapazität **Tabelle 31**
- Wasserdurchlässigkeit **Tabelle 31**
- Gesamtporenvolumen **Tabelle 31**
- Luftvolumen bei pF 1,8 **Tabelle 31**

In **Bild 19 und 20** sind die Korngrößenverteilungen zusätzlich grafisch dargestellt.

4.4.6 Ergebnisse der bodenchemischen Untersuchungen zum Projektende

Weiterhin wurden zu Versuchsende die folgenden bodenchemischen Ergebnisse an den entnommenen Bodenproben der Versuchsfelder ermittelt:

- Bodenreaktion **Tabelle 32**
- Salzgehalt **Tabelle 32**
- Organische Substanz **Tabelle 32**
- Hauptnährstoffe **Tabelle 33**

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse tabellarisch ausgewertet.

4.4.7 Beobachtungen bei Aufbereitung und Einbau und Erosionsgefahr

Die Versuchsmaterialien mit angestrebter Bodenverbesserung durch die Zugabe von stetig abgestuften Gesteinskörnungen aus Kalksandstein, wiesen alle nach der Mischung eine sandig krümelige Struktur auf. Das bindige Verhalten wurde damit, insbesondere bei den tonig-schluffigen Böden, teilweise aufgehoben und die Einbaubarkeit verbessert.

Bei allen Versuchsfeldern in Habichtswald waren keine Erosionsrinnen bis zu einer Neigung der Böschung von 1:1 beobachtbar. Bei Feld E1 der Referenz in Edermünde traten deutliche Erosionsrinnen auf, die in den Feldern E2 und E3 mit Kalksandstein-Bodenverbesserung nicht zu erkennen waren. Siehe **Tabelle 28**.

Versuchsfeld- Nr./ Versuchs- feld- kennzeichnung	Wassergehalt, Einbaudichte und Korndichte			
	Wassergehalt [M-%]	Einbaudichte [g/cm ³]	Korndichte [g/cm ³]	
			Luftpyknometer	Wasserpyknometer
H1	11,4	1,620	2,575	2,562
H2	11,3	1,635	2,560	2,548
H3	10,9	1,683	2,561	2,533
H4	17,7	1,738	2,655	2,632
H5	13,7	1,710	2,558	2,524
H6	14,0	1,723	2,548	2,527
E1	8,2	1,715	2,632	2,610
E2	9,4	1,732	2,610	2,601
E3	8,3	1,748	2,595	2,580

Tabelle 28: Wassergehalt, Einbaudichte und Korndichte in den Versuchsfeldern bei Versuchs-
ende

Versuchsfeld-Nr./ Versuchsfeld- kennzeichnung	Korngrößenverteilung [Masse-%]		
	Kies	Sand	Schluff u. Ton
	2,0 - 31,5 mm	0,063 - 2,0mm	< 0,063mm
H1a	40,4	21,7	38,0
H1b	37,9	19,8	42,3
H1	39,2	20,5	40,2
H2a	36,1	20,6	43,4
H2b	37,8	24,9	37,3
H2	37,0	22,8	40,4
H3a	54,7	23,7	21,5
H3b	49,4	30,7	19,9
H3	52,1	27,2	20,7
H4a	22,6	14,7	62,6
H4b	21,7	17,0	61,3
H4	22,2	15,9	62,0
H5a	41,1	32,9	26,0
H5b	45,8	37,1	17,1
H5	43,5	35,0	21,6
H6a	48,7	28,9	22,4
H6b	44,5	28,8	26,7
H6	46,6	28,9	24,6
E1	2,9	27,8	69,3
E2	11,1	32,4	56,4
E3	18,1	39,8	42,1

Tabelle 29: Korngrößenverteilung in Hauptfraktionen der verschiedenen Bodenverbesserungsmaßnahmen in den Versuchsfeldern bei Versuchsende

Versuchsfeld-Nr./ Versuchsfeld-kennzeichnung	Korngrößenverteilung [Masse-%]						
	Kies			Sand			Schluff u. Ton
	Grobkies 20,0 - 31,5 mm	Mittelkies 6,3 - 20,0 mm	Feinkies 2,0 - 6,3 mm	Grobsand 0,63 - 2,0 mm	Mittelsand 0,2 - 0,63 mm	Feinsand 0,063 - 0,2 mm	< 0,063 mm
H1a	13,5	15,0	11,9	8,4	8,2	5,0	38,0
H1b	14,6	12,4	10,8	7,7	6,8	5,3	42,3
H1	14,0	13,7	11,4	8,0	7,5	5,2	40,1
H2a	13,5	12,4	10,1	7,6	7,6	5,4	43,4
H2b	15,9	12,1	9,7	8,2	10,9	5,8	37,3
H2	14,7	12,3	9,9	7,9	9,2	5,6	40,3
H3a	18,4	20,2	16,1	10,7	7,7	5,3	21,5
H3b	11,6	20,2	17,6	12,8	11,2	6,7	19,9
H3	15,0	20,2	16,9	11,7	9,5	6,0	20,7
H4a	3,3	9,1	10,3	6,3	4,9	3,6	62,6
H4b	3,6	10,5	7,6	6,0	6,4	4,6	61,3
H4	3,4	9,8	8,9	6,2	5,6	4,1	62,0
H5a	4,4	20,3	16,4	14,2	11,7	7,0	26,0
H5b	9,7	19,7	16,4	15,9	13,9	7,3	17,1
H5	7,1	20,0	16,4	15,1	12,8	7,2	21,5
H6a	9,6	22,5	16,6	11,8	10,6	6,5	22,4
H6b	10,4	19,4	14,7	11,5	10,8	6,5	26,7
H6	10,0	21,0	15,6	11,6	10,7	6,5	24,6
E1	0,0	1,1	1,9	2,7	10,5	14,6	69,3
E2	1,2	4,8	5,1	6,0	13,9	12,6	56,4
E3	2,4	7,1	8,5	12	16,7	11,2	42,1

Tabelle 30: Korngrößenverteilung in Einzelfractionen der verschiedenen Bodenverbesserungsmaßnahmen in den Versuchsfeldern

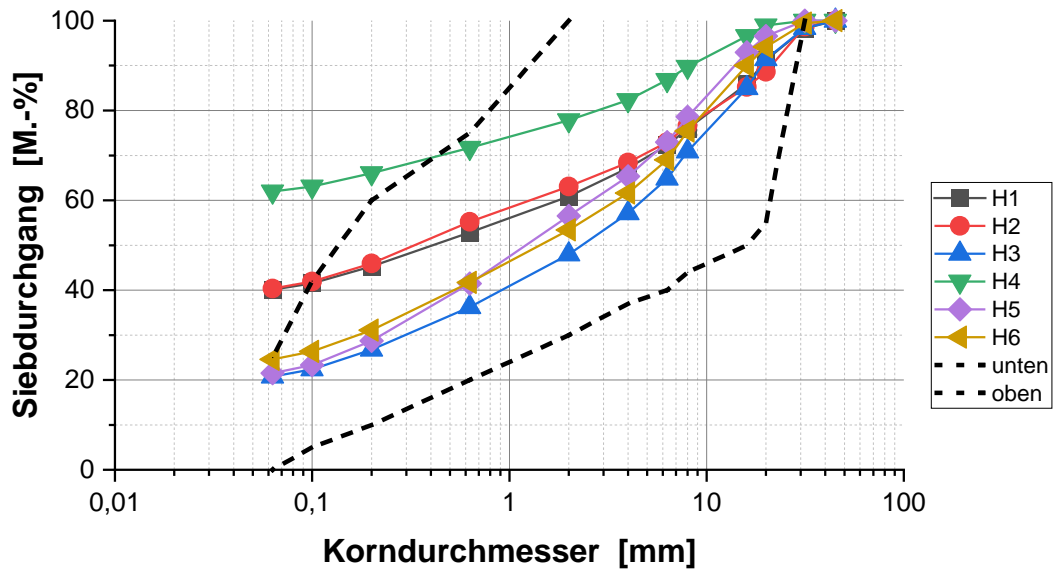


Bild 19: Korngrößenverteilung der mit Korngrößenbegrenzungsbereich für Grünbrücken nach HEIDGER (gestrichelt) zum Ende des Projektes

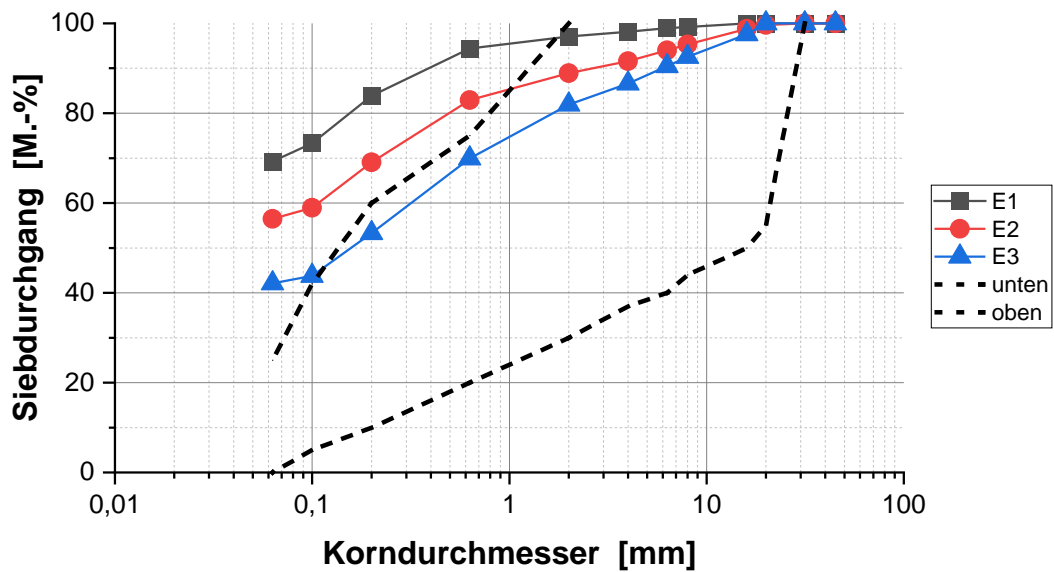


Bild 20: Korngrößenverteilung der mit Korngrößenbegrenzungsbereich für Grünbrücken nach HEIDGER (gestrichelt) zum Ende des Projektes

Versuchsfeld-Nr./ Versuchsfeld-kennzeichnung	Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt an Prüfcylindern mit einem Durchmesser von 150 mm aus dem Versuchsfeld			
	Maximale Wasserkapazität (WK _{max}) [Vol.-%]	Wasserdurchlässigkeit [m/s]	Gesamtporenvolumen GPV [Vol.-%]	Luftvolumen pF _{1,8} [Vol.-%]
H1	42,3	$8,1 \times 10^{-6}$	45,1	15,5
H2	41,6	$5,3 \times 10^{-6}$	44,9	15,7
H3	43,5	$8,0 \times 10^{-5}$	46,7	16,1
H4	44,7	$6,9 \times 10^{-6}$	46,2	17,3
H5	42,8	$5,2 \times 10^{-5}$	45,5	17,4
H6	42,7	$4,9 \times 10^{-5}$	45,8	16,8
E1	40,1	$4,3 \times 10^{-6}$	43,0	14,5
E2	40,4	$6,4 \times 10^{-5}$	43,5	17,5
E3	39,3	$1,1 \times 10^{-5}$	43,2	18,1

Tabelle 31: Bodenwasser- und Bodenlufthaushalt nach Versuchsende in den Versuchsfeldern

Versuchsfeld-Nr./ Versuchsfeld-kennzeichnung	Bodenchemische Eigenschaften		
	pH-Wert	Salzgehalt H ₂ O / CaSO ₄ [mg/100g]	Gehalt an organischer Substanz [Masse-%]
H1	7,8	70 / 33	2,9
H2	7,8	70 / 33	2,6
H3	9,2	70 / 40	1,7
H4	8,5	70 / 46	1,6
H5	8,8	70 / 33	1,2
H6	9,0	60 / 33	1,1
E1	7,5	50 / 28	3,0
E2	8,4	55 / 31	2,4
E3	8,7	55 / 34	1,8

Tabelle 32: pH-Wert, Salzgehalt und Gehalt an organischer Substanz der verschiedenen Bodenverbesserungsmaßnahmen in den Versuchsfeldern

Versuchsfeld-Nr./ Versuchsfeld-kennzeichnung	Bodenchemische Eigenschaften / Hauptnährstoffe						
	Stickstoff (N) [mg/100g]	Nitrat-Stickstoff (NO ₃ -N) [mg/100g]	Ammonium-Stickstoff (NH ₄ -N) [mg/100g]	Phosphat (P ₂ O ₅) [mg/100g]	Kalium (K ₂ O) [mg/100g]	Magnesium (Mg) [mg/100g]	Calcium (Ca) [mg/100g]
H1	3	3	< 1	10	24	10	978
H2	5	5	< 1	12	22	10	1357
H3	2	2	< 1	6	28	2	1740
H4	3	3	< 1	8	22	4	1646
H5	2	2	< 1	6	26	2	1970
H6	< 2	1	< 1	< 5	24	2	2327
E1	8	8	< 1	15	27	8	1241
E2	6	5	1	11	29	5	1690
E3	5	5	<1	7	21	3	2140

Tabelle 33: Hauptnährstoffe der verschiedenen Bodenverbesserungsmaßnahmen in den Versuchsfeldern

4.4.8 Bilder der Versuchsböschungen nach Abschluss des Projektes



Bilder 21-23: Versuchsfelder Habichtswald zu Projektende, Mai 2021, oben und mitte: Feld 3 und 4, zunehmender Deckungsgrad, unten zunehmende Artenvielfalt



Bild 24-26: Versuchsfelder Edermünde zu Projektende, Mai 2021, oben: Gesamtüberblick, mitte: zugewonnener Deckungsgrad, unten zunehmende Artenvielfalt

5. Literaturverzeichnis

- [1] DIN 18915, Vegetationstechnik im Landschaftsbau, Bodenarbeiten. Berlin: Beuth- Verlag, Ausgabe 2002-08
- [2] BISCHOFF, G.; EDEN, W.; HEIDGER, C.; KURKOWSKI, H.; GRÄFENSTEIN, R.; MIDDENDORF, B.: Vegetationssubstrate aus rezyklierten Gesteinskörnungen aus Mauerwerk. Hannover: Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Februar 2014
- [3] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau - FLL: Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 1: Planung, Planzarbeiten, Pflege. Bonn, Ausgabe 2015
- [4] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau - FLL: Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate. Bonn, Ausgabe 2010
- [5] Bodenkundliche Kartieranleitung: *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (Hrsg.)*. Hannover, 5. Auflage, 2005
- [6] SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P.: Lehrbuch der Bodenkunde. (15. Auflage). Heidelberg/Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, 2002.
- [7] ARYA, L.M.; LEU, F.J; GNUCHTEN, M.T.; SHOUSE, P.J.: Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data, J. Soil Sci.. Soc. Am. 63, 510 – 519
- [8] MITCHELL: Fundamentals of soil behaviour, 3. Auflage, J. Wiley, New York, 2005
- [9] ALLEN, J.R.L.: Principles of physical sedimentology, Allen & Unwin, Boston, 1985
- [10] JURY, W.A.; GARDNER, W.R.; GARDNER, W.H.; WILEY, J.: Soil Physics. 5. ed. Wiley, New York, 1992
- [11] BLUME, H.-P.; STAHR, K.; LEINWEBER, P.: Bodenkundliches Praktikum. (3. Auflage). Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2011
- [12] BEEK, K.J.: Land evaluation for agricultural development. International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1978
- [13] DIN 18916, Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke. Berlin, Beuth-Verlag, Mai 2011
- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - FGSV: Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau - ZTV E-StB 2009. Köln, FGSV-Verlag, Ausgabe 2009
- [15] HENZINGER, C.; BARKA, E.: Belastbarkeit von eingeführten Volumen-% bzw. Massen-% - Grenzen bei Bodenmaterial. Technische Universität München im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, Entwurf des Schlussberichtes zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben FE-Nr. 05.0183/2013/CGB, Juli 2015
- [16] HEIDGER, C.; KURKOWSKI, H.: Multifunktionaler recyclinggerechter und ökologischer Straßenbau. Isernhagen: Giesel-Verlag, Heft 6, 2002
- [17] DIN 18916, Vegetationstechnik im Landschaftsbau, Pflanzen und Pflanzarbeiten. Berlin: Beuth-Verlag. 2002-08
- [18] DIN 18917, Rasen und Saatarbeiten. Berlin: Beuth-Verlag. 2002-08
- [19] DIN 18918, Vegetationstechnik im Straßenbau, Ingenieurbiologische Sicherungsbauweisen. Berlin: Beuth-Verlag. 2002-08
- [20] IPCC: Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change, Summary for Policymakers, Technical Summary. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015
- [21] BMEL: Extreme Wetterereignisse in der Land- und Forstwirtschaft - Was bringt die Zukunft, was ist zu tun? Berlin, 06/2015
- [22] BGL: Klimaveränderung sorgt für Zunahme der Hitzeperioden; Ohne lebendiges Stadtgrün trocknen die Städte aus. Bad Honnef, 08/2015
- [23] SCHÖNFELD, P.: Stadtgrün 2021 – zukunftsfähige Baumarten im Klimatest. Veitshöchheimer Berichte der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, 12. Symposium zur Pflanzenverwendung in der Stadt, 30. und 31. Mai 2011

- [24] GRABOWSKI, J.: Recommended urban trees: Tree selection for stress tolerance, Rutgers University, New Jersey, USA. Veitshöchheimer Berichte der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, 12. Symposium zur Pflanzenverwendung in der Stadt, 30. und 31. Mai 2011
- [25] HIEMSTRA, J.A.: Street tree testing in the Netherlands, Wageningen UR, Applied Plant Research, Nursery Stock Section, Netherlands. Veitshöchheimer Berichte der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau, 12. Symposium zur Pflanzenverwendung in der Stadt, 30. und 31. Mai 2011
- [26] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau - FLL: Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen, Bonn, Ausgabe 2008
- [27] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau - FLL: Richtlinie für die Planung, Ausführung und Unterhaltung von begrünbaren Flächenbefestigungen, Bonn, Ausgabe 2008
- [28] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen - FGSV: Hinweise zur Straßenbepflanzung in bebauten Gebieten. Köln, Ausgabe 2006
- [29] HEIDGER, C.: Anforderungsprofil für Baumsubstrate, FLL-Tagung, Leipzig 2006
- [30] WALLACE, A.; TERRY, R.E.: Handbook auf soil conditioners: substances that enhance the physical properties of Soil, ISBN 0-8247-0117-8, 1998
- [31] HEIDGER, C.: Technische Ausgestaltung von Querungsbauwerken, Statement im Rahmen der Landschaftstagung der FGSV in Stade, 2015

Literatur zur Packungsdichteberechnung

- [33] BÄZ, R.; DÖRING, J.: Programm zur Berechnung von Packungsdichten, Version BdP v. 3.03, Release 10.02.2012, Kassel, Freiburg.
- [34] EDEN, W.: Einfluss der Verdichtung von Kalk-Sand-Rohmassen auf die Scherbenrohndichte von Kalksandsteinen. Hannover, 2010.
- [35] GEISENHANSLÜKE, C.: Einfluss der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen. Universität Kassel, 2008. Bd. Dissertation.
- [36] RESCHKE, T.: Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und Festigkeit von Beton. Düsseldorf: Verlag Bau und Technik, 2001. Bde. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 62/2000, Dissertation.
- [37] SCHWANDA, F.: Der Bestwert der Kornzusammensetzung von Betonzuschlagstoffen. Der Bauingenieur. 1956. Bd. 31, Seiten 41-46.

6. Anhang

6.1 Angewandte vegetationstechnische Untersuchungsmethodik

Bodenphysikalische Eigenschaften

- Korngrößenverteilung durch kombinierte Nass- und Trockensiebung nach DIN 18123.
- Volumengewicht (Einbaudichte) trocken, feucht im verdichteten Zustand in Verbindung mit der Bestimmung der Wasserkapazität.
- Wassergehalt im erdfeuchten Zustand nach DIN EN 13286-2.
- Proctorversuch nach DIN 18127 Baugrund - Untersuchung von Bodenproben.
- Wasserkapazität gemäß FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2, normativer Anhang 1, nach Verdichtung bei Proctorwassergehalt in Zylindern von 15 cm Durchmesser, 1-lagig auf 0,95 DPr und 24 Stunden Wassersättigung durch Überstau 1 cm über Probenoberkante und 2 Stunden Abtropfenlassen auf der Lochplatte.
- Wasserdurchlässigkeit durch Bestimmung der Infiltrationsrate mod. kf gemäß FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2, normativer Anhang 1, nach Verdichtung bei Proctorwassergehalt in Zylindern von 15 cm Durchmesser, 1-lagig auf 0,95 DPr.
- Gesamtporenvolumen durch Bestimmung und Berechnung der im Luftpyknometer ermittelten Korndichte in Anlehnung an DIN EN12350-7 und dem Volumengewicht (trocken).
- Luftvolumen durch Bestimmung der Differenz zwischen Gesamtporenvolumen (GPV) und maximaler Wasserkapazität.
- Luftvolumen bestimmt bei pF 1,8 (60 mbar) gemäß FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2, normativer Anhang 1, nach Verdichtung bei Proctorwassergehalt in Zylindern von 15 cm Durchmesser, 1-lagig auf 0,95 DPr.

Bodenchemische Eigenschaften:

- pH-Wert elektrometrisch in 0,01 m CaCl₂-Lösung nach 24 Std. gemäß VDLUFA A 5.1.1.
- Salzgehalt als KCl in % durch Leitfähigkeitsmessung in der Suspension gemäß VDLUFA A 10.1.1. oder in gesättigter Gipslösung nach VDLUFA A 13.4.1.
- Gehalt an organischer Substanz durch Glühverlust bei 550° C gemäß VDLUFA A 15.2.
- Gehalt an Primär-Nährstoffen N, P, K gemäß VDLUFA

6.2 Fotodokumentation

Versuchsfelder BAUREKA Igelsburg, Habichtswald



Bild A1:
Wall für die Begrünung Ha-
bichtswald – Richtung Aufbe-
reitungsanlage (Unterboden),
Mai 2018



Bild A2:
Wall für die Begrünung Ha-
bichtswald – Richtung Aufbe-
reitungsanlage (Unterboden),
Mai 2018



Bild A3:
Wall für die Begrünung Ha-
bichtswald – Richtung Bo-
dendeponie (Unterboden),
Mai 2018



Bild A4:
Angelieferter Kalksandstein
vor der Aufbereitung,
Mai 2018



Bild A5:
Angelieferter Kalksandstein
vor der Aufbereitung,
Mai 2018



Bild A6:
Angelieferter Kalksandstein
vor der Aufbereitung,
Mai 2018



Bild A7:
Aufbereiteter Kalksandstein
0/32 mm,
Juni 2018



Bild A8:
Aufbereiteter Kalksandstein
0/32 mm,
Juni 2018



Bild A9:
Aufbereiteter Kalksandstein
0/32 mm,
Juni 2018



Bild A10:
Verdichteter Ausgangsbo-
den,
Juli 2018



Bild A11:
Unaufbereiteter Ausgangs-
boden, links bindig, rechts
„sandig“,
Juli 2018



Bild A12:
Mischen des bindigen Bo-
dens,
Juli 2018



Bild A13:
Mischen des bindigen Bodens,
Juli 2018



Bild A14:
Mischen des bindigen Bodens mit Kalksandstein 0/16 mm mittels Radlader,
Juli 2018



Bild A15:
Mischen des bindigen Bodens mit Kalksandstein 0/16 mm mittels Radlader,
Juli 2018



Bild A16:
Einbau des gemischten Ma-
terials in die Versuchsfelder
mittels Radlader,
Juli 2018



Bild A17:
Aufgelegtes gemischten Ma-
terial auf die Versuchsfelder
mittels Radlader,
Juli 2018

- Erste Vegetationsperiode, Juni 2019



Bild A18:
Feld H1a,
Juni 2019



Bild A19:
Feld H3a bis H4b,
Juni 2019



Bild A20:
Feld H4b,
Juni 2019



Bild A21:
Feld H5a bis H6b,
Juni 2019



Bild A22:
Feld H5b,
Juni 2019



Bild A23:
Feld H5b,
Juni 2019

- Erste Vegetationsperiode, Juli 2019



Bild A24:
Feld H1a bis H2b,
Referenz
Juli 2019



Bild A25:
Feld H3a bis H4b,
20 M.-% KS-Zugabe,
Juli 2019



Bild A26:
Feld H1a,
Juli 2019



Bild A27:
Feld H1a,
Juli 2019



Bild A28:
Feld H1b,
Juli 2019



Bild A29:
Feld H1b,
Juli 2019



Bild A30:
Feld H2b,
Juli 2019



Bild A31:
Feld H1b,
Referenz,
Juli 2019



Bild A32:
Feld H3a bis H4b,
20 M.-% KS-Zugabe,
Juli 2019



Bild A33:
Feld H3a bis H4b,
20 M.-% KS-Zugabe,
Juli 2019



Bild A34:
Feld H3b,
Juli 2019



Bild A35:
Feld H4a,
Juli 2019



Bild A36:
Feld H4a,
Juli 2019



Bild A37:
Feld H5b,
Juli 2019



Bild A38:
Feld H5b,
Juli 2019



Bild A39:
Feld H5a,
Juli 2019



Bild A40:
Feld H6a,
Juli 2019

- Erste Vegetationsperiode, Oktober 2019



Bild A41:
Feld H1a bis H2b,
Referenz
Oktober 2019



Bild A42:
Feld H1a,
Oktober 2019



Bild A43:
Feld H1a,
Oktober 2019



Bild A44:
Feld H1b,
Oktober 2019



Bild A45:
Feld H1b,
Oktober 2019



Bild A46:
Feld H2a,
Oktober 2019



Bild A47:
Feld H2a,
Referenz,
Oktober 2019



Bild A48:
Feld H2b,
Referenz,
Oktober 2019



Bild A49:
Feld H3a,
20 M.-% KS-Zugabe,
Oktober 2019



Bild A50:
Feld H3a,
20 M.-% KS-Zugabe,
Oktober 2019



Bild A51:
Feld H3b,
Oktober 2019



Bild A52:
Feld H4a,
Oktober 2019



Bild A53:
Feld H5b,
Oktober 2019



Bild A54:
Feld H5a,
Oktober 2019



Bild A55:
Feld H6b,
Oktober 2019

- Zweite Vegetationsperiode, Mai 2020



Bild A56:
Feld H1a bis H2b,
Referenz
Mai 2020



Bild A57:
Feld H1a,
Mai 2020



Bild A58:
Feld H1a,
Mai 2020



Bild A59:
Feld H1b,
Mai 2020



Bild A60:
Feld H1b,
Mai 2020



Bild A61:
Feld H2a,
Mai 2020



Bild A62:
Feld H2b,
Referenz,
Mai 2020



Bild A63:
Feld H2b,
Referenz,
Mai 2020



Bild A64:
Neubau Feld H3b bis H4b,
20 M.-% KS-Zugabe,
Mai 2020



Bild A65:
Feld H5b,
Mai 2020



Bild A66:
Feld H5b,
Mai 2020



Bild A67:
Feld H5a,
Mai 2020

- Zweite Vegetationsperiode, August 2020



Bild A68:
Feld H1a,
August 2020



Bild A69:
Feld H1b,
August 2020



Bild A70:
Feld H1b,
August 2020



Bild A71:
Feld H2a,
August 2020



Bild A72:
Feld H2b,
Referenz,
August 2020



Bild A73:
Feld H3a,
20 M.-% KS-Zugabe,
August 2020



Bild A74:
Feld H3a,
20 M.-% KS-Zugabe,
August 2020



Bild A75:
Feld H3b,
August 2020



Bild A76:
„Neubau“
Feld H3b,
August 2020



Bild A77:
„Neubau“
Feld H4a und 4b,
August 2020



Bild A78:
„Neubau“, Melde,
Feld H4a und 4b,
August 2020



Bild A79:
Feld H5a,
August 2020



Bild A80:
Feld H5a,
August 2020



Bild A81:
Feld H5a,
August 2020



Bild A82:
Feld H5b,
August 2020



Bild A83:
Feld H6a,
August 2020

- Zweite Vegetationsperiode, November 2020



Bild A84:
Feld H1a,
November 2020



Bild A85:
Feld H1a,
November 2020



Bild A86:
Feld H1b,
November 2020



Bild A87:
Feld H1b,
November 2020



Bild A88:
Feld H2a,
November 2020



Bild A89:
Feld H2a,
Referenz,
November 2020



Bild A90:
Feld H2b,
Referenz,
November 2020



Bild A91:
Feld H2b,
Referenz,
November 2020



Bild A92:
Feld H3a,
20 M.-% KS-Zugabe,
November 2020



Bild A93:
Feld H3a,
20 M.-% KS-Zugabe,
November 2020



Bild A94:
Feld H3b,
November 2020



Bild A95:
„Neubau“
Feld H4a und 4b,
November 2020



Bild A96:
„Neubau“
Feld H4a und 4b,
November 2020



Bild A97:
Feld H5a bis H6b,
November 2020



Bild A98:
Feld H5b,
November 2020



Bild A99:
Feld H5b,
November 2020



Bild A100:
Feld H5a,
November 2020



Bild A101:
Feld H6b,
November 2020

Versuchsfelder Bautechnik Lobmeier, Edermünde



Bild A102:
Bauvorbereitung,
April 2020



Bild A103:
Bauvorbereitung,
April 2020



Bild A104:
Bauvorbereitung,
April 2020



Bild A105:
Anlieferung Boden,
April 2020



Bild A106:
Anlieferung Kalksandstein-
Gesteinskörnung 0/16 mm,
April 2020



Bild A107:
Mischen der Stoffmischun-
gen mit dem Radlader,
April 2020

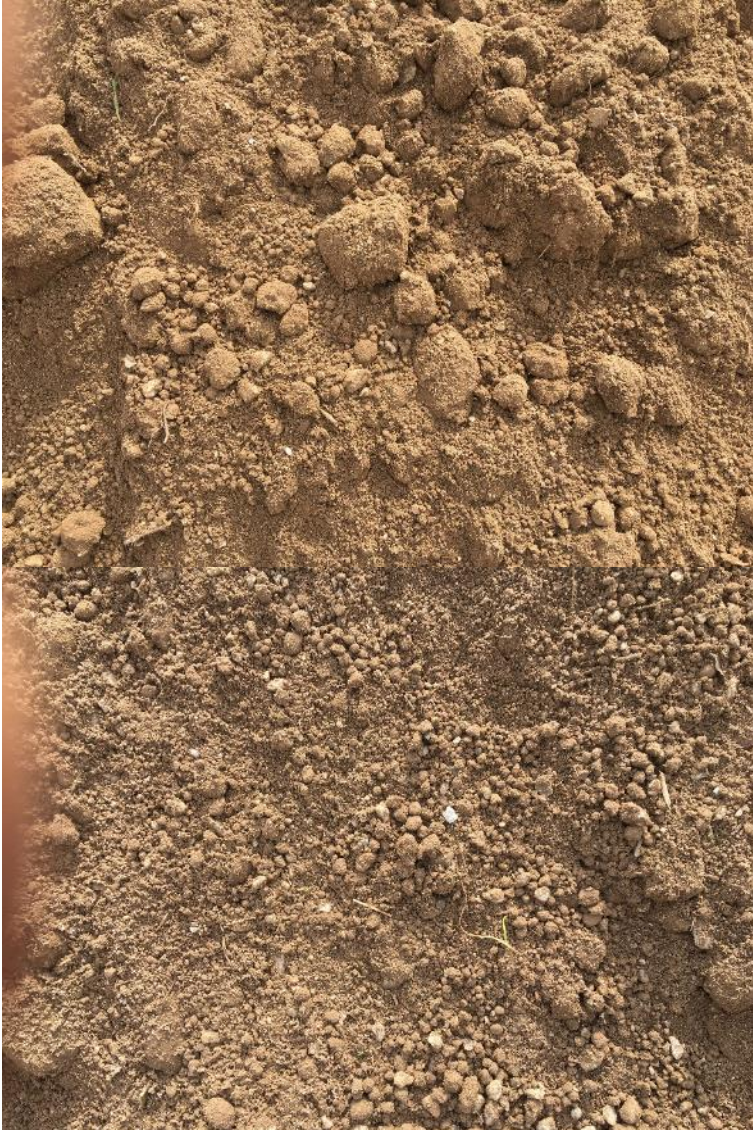


Bild A108:
Boden für die Versuchsfelder,
April 2020



Bild A109:
Boden mit 20 M.-% Kalk-
sandstein für as Versuchs-
feld E2,
April 2020

Bild A110:
Bau des Versuchsfeld E1,
Referenz,
April 2020



Bild A111:
Bau des Versuchsfeld E1,
Referenz,
April 2020



Bild A112:
Bau des Versuchsfeld E2,
mit 20 M.-% Kalksandstein
0/16 mm,
April 2020



Bild A113:
Fertiggestellte Versuchsfel-
der,
April 2020



Bild A114:
Fertiggestellte Versuchsfelder nach der Einsaat,
Anfang Mai 2020

- Erste Vegetationsperiode, Juni/Juli 2020



Bild A115:
Erstbegrünung Melde,
Juni 2020



Bild A116:
„Wuchern“ der Melde,
Anfang Juli 2020



Bild A117:
„Wuchern“ der Melde,
Anfang Juli 2020



Bild A118:
Gekeimte Saatgutmischung
am Fuß der Böschung,
Anfang Juli 2020



Bild A119:
Versuchsfeld E1, Referenz,
nach dem Entfernen der
Melde,
Mitte Juli 2020



Bild A120:
Versuchsfeld E2, nach dem
Entfernen der Melde,
Mitte Juli 2020



Bild A121:
Versuchsfeld E3, nach dem
Entfernen der Melde,
Mitte Juli 2020

- Erste Vegetationsperiode, August 2020



Bild A122:
Versuchsfeld E1 bis E3,
August 2020



Bild A123:
Versuchsfeld E1, Referenz,
August 2020



Bild A124:
Versuchsfeld E2
mit 20 M.-% Kalksandstein,
August 2020



Bild A125:
Versuchsfeld E2
mit 20 M.-% Kalksandstein,
August 2020



Bild A126:
Versuchsfeld E2
mit 40 M.-% Kalksandstein,
August 2020



Bild A127:
Versuchsfeld E2
mit 40 M.-% Kalksandstein,
August 2020

- Erste Vegetationsperiode, November 2020



Bild A128:
Versuchsfeld E1, Referenz
nach einer
Vegetationsperiode,
November 2020



Bild A129:
Versuchsfeld E1, Referenz
nach einer
Vegetationsperiode,
November 2020



Bild A130:
Versuchsfeld E1, Referenz
nach einer
Vegetationsperiode,
November 2020



Bild A131:
Versuchsfeld E2 mit 20 M.-%
Kalksandstein nach einer
Vegetationsperiode,
November 2020



Bild A132:
Versuchsfeld E2 mit 20 M.-%
Kalksandstein nach einer
Vegetationsperiode,
November 2020



Bild A133:
Versuchsfeld E2 mit 40 M.-%
Kalksandstein nach einer
Vegetationsperiode,
November 2020



Bild A134:
Versuchsfeld E2 mit 40 M.-%
Kalksandstein nach einer
Vegetationsperiode,
November 2020