



EVA ELLMAIER, BSc

# **BUCHE UND BAMBUS ALS WERKSTOFF FÜR BODENVERNAGELUNGEN IM GRUNDBAU**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte

Institut für Bodenmechanik und Grundbau

Graz, Mai 2014

## EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

### **AFFIDAVIT**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während meiner Studienzeit und im Speziellen beim Verfassen dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Für die ausgezeichnete Betreuung dieser Arbeit und die vielen konstruktiven Diskussionen bedanke ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte, Leiter des Instituts für Bodenmechanik und Grundbau. Ebenso bedanke ich mich bei der Firma Hinteregger, vor allem bei Herrn Bmstr. Ing. Richard Millebner, für den Einbau der Bambusstäbe und die Durchführung der Versuche, deren Erkenntnisse einen wichtigen Teil zu dieser Arbeit beigetragen haben. Weiters bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Gert Ausserer und Herrn Bmstr. Sebastian Hirschmüller, M.Eng. für die Unterstützung mit Daten und Fachwissen.

Ebenso bedanke ich mich bei all meinen Freunden und Kollegen des Stahlbauzeichensaals für die gemeinsame Zeit und die vielen fröhlichen Stunden.

Danken möchte ich weiters meinem Freund Christoph Lercher für die physikalische Unterstützung, die manchmal benötigte Motivation, die Geduld und den guten Kaffee.

Besonderer Dank gebührt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern für die Möglichkeit dieses Studium durchzuführen, die damit verbundene Unterstützung und den Rückhalt in jeder Lebenslage.

Danke!

Graz, am 13.05.2014

---

Eva Ellmaier

### **Kurzfassung**

Derzeit kommen als temporäre Baugrubensicherungen sowie als Böschungssicherungsmaßnahmen oftmals Spritzbetonwände mit Bodennägeln aus Stahl zur Anwendung. Dabei werden die Ankerstangen im Zuge der Aushubarbeiten in den Untergrund eingebaut und verbleiben nach Fertigstellung des Bauwerks im Untergrund. Zur Oberflächensicherung während der Bauphase wird eine 10 – 20 cm dicke Schicht aus bewehrtem Spritzbeton aufgebracht mit der die Stahlzugglieder kraftschlüssig verbunden werden. Speziell bei temporären Baugrubensicherungen sind nach Erstellen des Gebäudes und Hinterfüllen des Arbeitsraums zwischen Gebäude und Baugrube die Baugrubensicherung und somit die eingebauten Nägel aus Stahl nutzlos und verbleiben mangels Ausbaumöglichkeit ohne weitere Funktion im Untergrund. Dabei geht nicht nur tonnenweise hochwertiger Stahl verloren, sondern dieser stellt bei allfälligen späteren Bautätigkeiten und Aushubarbeiten ein Hindernis dar. Weiters werden im Falle von Beanspruchung von Nachbargrund Fremdrechte berührt, die rechtlich und auch finanziell von Nachteil sind.

In dieser Arbeit wird ein alternatives Bauverfahren auf der Basis von nachwachsenden Rohstoffen beschrieben. Dazu wird untersucht, ob die Bodennägel aus Stahl durch Ausführungen aus Holz oder Bambus ersetzt werden können. Diese würden im Boden verrotten und kein Hindernis für spätere Bauarbeiten darstellen. Es werden zwei unterschiedliche Ausführungen betrachtet: Einerseits naturbelassene Bambusrohre und zum anderen hohle Furnierschichtholzrohre aus Buche. Diese würden sich langfristig, bis auf den bei der Herstellung der Furnierrohre verwendeten Klebstoff, rückstandslos im Erdreich abbauen.

Die spezifischen Eigenschaften dieser beiden Materialien und darauf aufbauend, die Machbarkeit einer Nagelwand mit Holz- beziehungsweise Bambusnägeln werden ausführlich diskutiert.

Schlagwörter: Bambus, Holz, Bodenvernagelung, Grundbau

## **Abstract**

Currently, for temporary building pit support systems as well as for slope support systems, shotcrete walls with reinforcing bars of steel are used. The soil nails are installed in the ground during the course of excavation and remain there after the completion of the structure. For surface control during the construction phase, a 10 to 20 cm thick layer of reinforced shotcrete connected with the tension members is built. Especially for temporary pit support, the soil nails are useless after finishing the building and backfilling of the workspace. Without the possibility to remove the nails, they are left to serve no purpose in the subsoil. Thereby tons of high-quality steel are lost and in the case of subsequent construction activities or excavation work, they are an obstacle. Furthermore, if neighbor's ground is touched, there can be judicial and financial disadvantages because of the law concerning the respective interests of neighbors.

In this work, an alternative construction method based on renewable raw materials is described. Therefore it's analysed if the steel soil nails can be replaced by nails made out of wood or bamboo. These nails could decompose in the subsoil and wouldn't be an obstacle for future construction work. Two different types will be considered: on the one hand natural bamboo pipes and on the other hand hollow tubes made of beech veneer. In long term view they would leave no trace in the ground, except the adhesive used for manufacturing the veneer pipes.

The specific properties of these two materials and the feasibility of building a nail wall with wood or bamboo are discussed in detail.

Key words: bamboo, wood, soil nailing, soil engineering

## Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG .....              | 2  |
| AFFIDAVIT .....                              | 2  |
| Danksagung.....                              | 3  |
| Kurzfassung.....                             | 4  |
| Abstract.....                                | 5  |
| Inhaltsverzeichnis .....                     | 6  |
| 1 Einleitung.....                            | 10 |
| 2 Historischer Hintergrund.....              | 11 |
| 2.1 Holz.....                                | 11 |
| 2.2 Bambus.....                              | 12 |
| 2.3 Vorhandene Anwendungen .....             | 13 |
| 3 Vernagelungssysteme.....                   | 14 |
| 3.1 Tunnelbau .....                          | 15 |
| 3.2 Böschungen und Baugruben .....           | 16 |
| 3.2.1 Krainerwand.....                       | 16 |
| 3.2.2 Nagelwand .....                        | 17 |
| 3.3 Herstellung einer Nagelwand.....         | 18 |
| 3.3.1 Drehbohrung.....                       | 18 |
| 3.3.2 Drehschlagbohrung.....                 | 19 |
| 3.3.3 Selbstbohrnagel .....                  | 19 |
| 3.3.4 Verfahrensauswahl .....                | 20 |
| 3.4 Bohrkrone.....                           | 21 |
| 3.4.1 Verrohrte und unverrohrte Bohrung..... | 21 |
| 3.4.2 Verlorene Bohrkrone – IBO.....         | 22 |
| 3.5 Bohrgeräte .....                         | 24 |
| 3.6 Verpresstechnik.....                     | 26 |
| 3.7 Materialien der Nägel .....              | 27 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 3.7.1  | Betonstahl.....                            | 27 |
| 3.7.2  | GEWI-Stab Plus® .....                      | 28 |
| 3.7.3  | Glasfaserverstärkter Kunststoff – GFK..... | 29 |
| 3.8    | Nagelkopfausbildung.....                   | 31 |
| 3.9    | Verpressmörtel.....                        | 33 |
| 3.9.1  | Ankermörtel.....                           | 33 |
| 3.9.2  | Silikatharz.....                           | 34 |
| 3.10   | Korrosionsschutz .....                     | 35 |
| 3.10.1 | Korrosionszugabe.....                      | 35 |
| 3.10.2 | Einkapselung .....                         | 36 |
| 3.10.3 | Oberflächenbeschichtung.....               | 37 |
| 3.10.4 | Geripptes Hüllrohr mit Einpressmittel..... | 37 |
| 3.10.5 | Nicht rostender Stahl.....                 | 37 |
| 3.11   | Abmessungen.....                           | 38 |
| 3.11.1 | Querschnitte .....                         | 38 |
| 3.11.2 | Längen.....                                | 38 |
| 3.12   | Dimensionierung.....                       | 39 |
| 3.12.1 | Äußere Stabilität .....                    | 39 |
| 3.12.2 | Innere Stabilität .....                    | 39 |
| 3.13   | Kosten.....                                | 40 |
| 3.13.1 | Materialkosten.....                        | 41 |
| 3.13.2 | Transportkosten.....                       | 43 |
| 3.13.3 | Einbaukosten .....                         | 45 |
| 3.13.4 | Gesamtkosten .....                         | 46 |
| 4      | Holz und Bambus als Werkstoff .....        | 47 |
| 4.1    | Eigenschaften von Holz .....               | 47 |
| 4.2    | Eigenschaften von Bambus .....             | 49 |
| 4.3    | Feuchtigkeit.....                          | 52 |
| 4.4    | Schutzmaßnahmen .....                      | 53 |
| 4.5    | Schädlinge .....                           | 54 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.6   | Haltbarkeit bei Erdkontakt .....                         | 54 |
| 4.7   | Kombination organischer und mineralischer Baustoff ..... | 55 |
| 4.8   | Formgebung .....   | 56 |
| 4.9   | Tragfähigkeit des Systems.....                           | 57 |
| 4.9.1 | Furnierschichtholzrohr.....                              | 57 |
| 4.9.2 | Bambus .....   | 58 |
| 4.10  | Verbindung – Verlängerung .....                          | 59 |
| 4.11  | Verzahnung .....   | 61 |
| 5     | Vordimensionierung.....                                  | 62 |
| 5.1   | Bambus.....  | 65 |
| 5.2   | Stahl.....   | 67 |
| 6     | Einbau Bambus .....                                      | 69 |
| 6.1   | Übersicht Einbau .....                                   | 70 |
| 6.2   | Verrohrte Bohrung / unverrohrte Bohrung .....            | 70 |
| 6.3   | IBO-Vorbohrung .....                                     | 71 |
| 6.4   | Spülung und Injektion .....                              | 72 |
| 6.5   | Einbringung .....  | 74 |
| 6.5.1 | Zusatzmaßnahmen .....                                    | 76 |
| 6.6   | Kopfausbildung.....                                      | 77 |
| 6.7   | Kosten.....  | 78 |
| 6.7.1 | Materialkosten.....                                      | 79 |
| 6.7.2 | Transportkosten.....                                     | 81 |
| 6.7.3 | Einbaukosten .....                                       | 83 |
| 6.7.4 | Gesamtkosten .....                                       | 84 |
| 7     | Kostenvergleich .....                                    | 85 |
| 7.1   | Materialkosten .....                                     | 86 |
| 7.2   | Transportkosten .....                                    | 88 |
| 7.3   | Einbaukosten.....  | 89 |
| 7.4   | Gesamtkosten .....                                       | 90 |
| 8     | Versuchsreihe – Grundsatzversuche .....                  | 91 |



|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 8.1   | Aufbau der Messung .....                    | 91  |
| 8.2   | Versuchsablauf .....                        | 93  |
| 8.3   | Messungen .....                             | 94  |
| 8.3.1 | Verschiebungen .....                        | 96  |
| 8.3.2 | Kriechmaß .....                             | 97  |
| 8.4   | Analyse der Ergebnisse .....                | 98  |
| 8.4.1 | Verbesserungsmöglichkeiten.....             | 102 |
| 9     | Diskussion möglicher Anwendungsgebiete..... | 103 |
| 9.1   | Tunnelbau .....                             | 103 |
| 9.2   | Baugrubensicherung .....                    | 103 |
| 9.3   | Böschungssicherung.....                     | 104 |
| 9.4   | Vorteile – Nachteile.....                   | 104 |
| 10    | Abbildungsverzeichnis .....                 | 105 |
| 11    | Tabellenverzeichnis .....                   | 107 |
| 12    | Literaturverzeichnis .....                  | 109 |

## 1 Einleitung

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin zu untersuchen ob es möglich ist, eine Bodenvernagelung aus Holz oder Bambus herzustellen. Eine konventionelle Sicherung mit Nägeln wird üblicherweise aus Stahltraggliedern hergestellt. Daher sind die natürlich gewachsenen Materialien Holz und Bambus in dieser Anwendung völlig neu und unerforscht. Als Werkstoff zum Bauen allerdings werden Holz und Bambus schon lange verwendet. Um nun zu verstehen, welchen Stellenwert die beiden Materialien im Laufe der geschichtlichen Entwicklung eingenommen haben, wird darauf im Kapitel 2 *Historischer Hintergrund* eingegangen. Speziell werden vorhandene Anwendungen im Bereich Grundbau und Ausführungen mit Erdkontakt diskutiert.

Die Erklärung zur Herstellung und zur Funktionsweise einer konventionellen Nagelwand mit Stahltraggliedern folgt in Kapitel 3. Dies soll dazu dienen, mit dem System vertraut zu werden und das Grundwissen schaffen, um die ersten Überlegungen zur Ausführung aus Holz oder Bambus entwickeln zu können. Die genauen technischen Daten der einzelnen Elemente einer Bodenvernagelung aus Stahl sind ebenfalls in diesem Kapitel enthalten, wie auch eine kurze Erklärung zur Dimensionierung einer solchen Ausführung.

In Kapitel 4 *Holz und Bambus als Werkstoff* werden die spezifischen Eigenschaften der zwei Materialien beschrieben. Durch die eingehende Betrachtung dieser und durch den Vergleich mit Stahl werden in diesem Kapitel die Möglichkeiten und Probleme der Werkstoffe Holz und Bambus herausgearbeitet. Um die bisher theoretischen Überlegungen zu überprüfen, wurde versucht einige Bambusstäbe auf einer Baustelle einzubauen. Die genaue Vorgehensweise, die entstandenen Probleme, wie auch die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Versuche sind in Kapitel 6 zu finden.

Wenn sich eine neue Methode gegen eine etablierte durchsetzen soll, sind neben den systematischen auch die wirtschaftlichen Vor- und Nachteile abzuwägen. Daher wurde ein Kostenvergleich zwischen den Ausführungen aus Stahl und Bambus aufgestellt. Welches der Materialien zum jetzigen Zeitpunkt kostengünstiger ist und mit welchen Mitteln eine alternative Bauweise interessanter gemacht werden kann, ist in Kapitel 7 beschrieben.

Abschließend wurden Versuche an den eingebauten Bambusstäben durchgeführt, welche erste Referenzwerte über die tatsächliche Leistungsfähigkeit des natürlichen Materials Bambus in der Anwendung als Bodennagel bringen sollten. Wie und in welchem Ausmaß Holz und Bambus in Zukunft im Grundbau angewandt werden können, wird im Kapitel 9 erörtert.

## 2 Historischer Hintergrund

### 2.1 Holz

Holz ist neben Stein der älteste Baustoff der Menschheit. Beweise dafür finden sich auf beinahe allen Kontinenten der Erde. Bereits in der Steinzeit wurde Holz zum Bauen von Häusern in zeltform verwendet. Im Laufe der Entwicklung entstanden klassische Hausbauten, deren Fundamente stets aus Stein hergestellt wurden, um den Kontakt von Holz und Boden zu vermeiden. Erst mit dem Verputzen der Wände mit Lehm, wurde eine Verbindung zwischen Holz und Erdmaterial geschaffen. [1] Mit der Errichtung größerer Bauten und der Notwendigkeit von Gründungen, wurden ganze Baumstämme zur Lastabtragung in den Boden eingebracht. Von Bedeutung sind diese Holzpfähle allerdings nur noch im kleineren Rahmen. Alte Pfähle können hunderte Jahre bestehen, wenn sie stets unter dem Grundwasserspiegel sind. Bei einer Absenkung des Grundwassers und dem dadurch entstehenden Kontakt mit Luft, verrotten die Hölzer schnell und werden von Pilzen und Tieren befallen. Daher können sie bei modernen Bauten nur mehr selten verwendet werden. [2] Wird heutzutage Holz als Baumaterial mit Kontakt zum anstehenden Boden eingesetzt, geschieht dies meist nur noch bei temporären Anwendungen. Je nach Holzart ist aber auch eine längerfristige Anwendung möglich. Mit Hilfe des richtigen Einsatzes von Holzschutzmitteln kann auch oberhalb des Grundwasserspiegels eine Lebensdauer von deutlich über 20 Jahren gewährleistet werden. So werden zum Beispiel zur Sicherung von Hängen und Straßen Holzankerwände gebaut, bei denen zwischen rückverankerten Stahlträgern eine Ausfachung aus Baumstämmen eingefügt wird. [3] Weiters werden zur Befestigung von Flussufern und Wattgebieten Faschinenbündel verwendet, um der Erosion entgegen zu wirken und Land zu gewinnen. [4] Die Anwendung von Holz im Grundbau, die der klassischen Bodenvernagelung am nächsten kommt, ist die sogenannte Krainerwand. Sie wird seit Jahrhunderten vor allem im alpinen Bereich in Österreich als Stützkonstruktion eingesetzt. Dabei werden Rundholzstämme gitterartig aufeinander geschichtet, in den Knotenpunkten vernagelt und lagenweise mit Erde beziehungsweise Steinen verfüllt und verdichtet. Die dadurch entstandene Raumgitterkonstruktion wirkt, ähnlich einer Bodenvernagelung, als Verbundsystem beziehungsweise Schwergewichtsmauer. [5] Auf die genaue Herstellung und die Wirkungsweise der Systeme wird im Kapitel *Böschungen und Baugruben* näher eingegangen.

### 2.2 Bambus

Die Verwendung von Bambus auf den unterschiedlichen Kontinenten wurde sowohl von klimatischen, als auch von wirtschaftlichen Faktoren beeinflusst. Vor rund 3 Millionen Jahren, im Neogen, war Bambus auch in Europa heimisch, starb jedoch infolge der Eiszeit aus. Erst durch einen Brief Alexander des Großen an Aristoteles wurde Bambus in der westlichen Welt wieder bekannt, beziehungsweise das erste Mal schriftlich erwähnt. Danach wurde Bambus weitgefächert angewandt. Er wurde für die Herstellung von Speeren eingesetzt, die viel leichter waren als herkömmliche Waffen. Des Weiteren wurden Flöße und Wohnungen gebaut, die spanischen Eroberer nutzten das gespeicherte Wasser in den Hohlräumen um ihren Durst auf den Streifzügen durch Südamerika zu stillen und auch zur Herstellung von Musikinstrumenten wie Flöten wurde Bambus herangezogen. Doch der Siegeszug von Bambus fand 1902 ein jähes Ende, als der gesamte Hafen von Ecuador, der aus Bambus gebaut war, durch einen verheerenden Großbrand, zerstört wurde. [6] Danach galt Bambus oft als minderwertiges Baumaterial, da es relativ kurzlebig ist und sowohl der Brandschutz, als auch der Schutz vor Tierbefall eine Herausforderung darstellt. Bambus wurde zum Baumaterial der Armen, unter anderem sicher auch, weil es keine repräsentativen Großbauten aus Bambus gibt. Doch in den letzten Jahren ist, ähnlich wie beim Holz, ein Umschwung zu erkennen. Durch zunehmende Forschungsarbeit und den daraus resultierenden Erkenntnissen, wird das Material wieder interessant. Die Lösung einiger Probleme der modernen Zivilisation, wie zum Beispiel die ökologische Herstellung und die, im Verhältnis zum Holz, schnelle Reproduzierbarkeit, werten das Material Bambus sowohl wirtschaftlich, als auch sozial auf. [7] Welchen Stellenwert Bambus in der westlichen Bauindustrie einnehmen kann, wird sich in den nächsten Jahren zeigen. Dass das Material Bambus aus der Baubranche in Asien nicht mehr wegzudenken ist, beziehungsweise immer ein Teil davon war, zeigt sich ganz deutlich am Beispiel der Errichtung von Baugerüsten. Die Möglichkeit diese widerstandsfähiger gegen Erdbeben zu errichten als herkömmliche Stahlgerüste es sind, ist beachtlich. Doch das Wissen über Aufbau, Verbindung und Befestigung der einzelnen Rohre beruht zum größten Teil auf Erfahrungswerten. Daher müssen diese Systeme erst umfangreich geprüft werden, um eine Zulassung auf dem strengen europäischen Markt zu erlangen.

## 2.3 Vorhandene Anwendungen

### Holz



Abbildung 1: Holzankerwand [3]

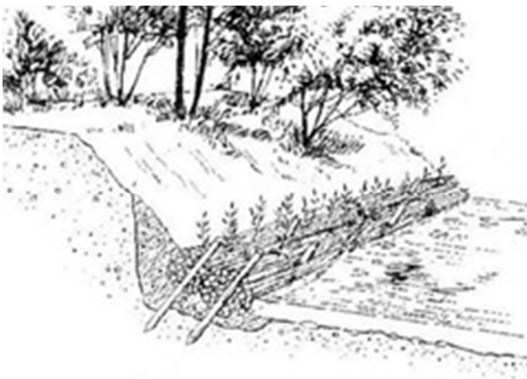


Abbildung 3: Fascine zur Ufersicherung [8]

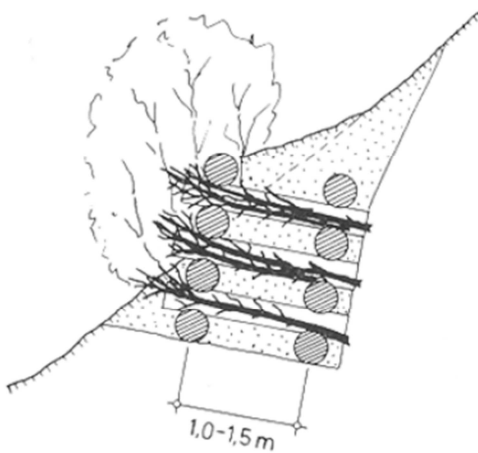


Abbildung 5: Holzkrainerwand mit Begrünung [5]

### Bambus



Abbildung 2: Zeltförmiges Haus [7]



Abbildung 4: Flöße [7]



Abbildung 6: Baugerüst aus Bambus für ein Hochhaus [9]

### 3 Vernagelungssysteme

Bei der Bodenvernagelung werden sogenannte Nägel aus Stahl- oder Kunststoffstäben in den gewachsenen Boden eingebracht. Dadurch entsteht, ähnlich wie bei einer Bewehrten-Erde-Konstruktion, ein Verbundkörper. Das Ziel dabei ist es, durch diese Einlagen eine höhere Zug- und Scherfestigkeit des Bodens zu erlangen. Angewandt wird dieses Verfahren meist zur Sicherung von Böschungen, Hängen und Baugruben. Je nach Nutzungsdauer kann es sich dabei um temporäre oder (semi-)permanente Ausführungen handeln. Bei einer temporären Anwendung wird mit einer Nutzungsdauer von bis zu 2 Jahren gerechnet, bei einer semi-permanenten Ausführung mit 2 bis 5 Jahren und bei einer permanenten Installation mit einer Nutzungsdauer von maximal 50 Jahren. [5]

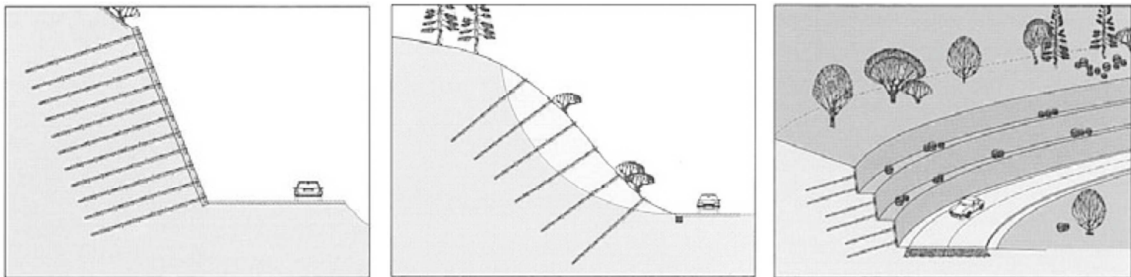


Abbildung 7: Beispiele von Bodenvernagelungen [5]

Die Komponenten, welche zur Herstellung einer solchen Nagelwand nötig sind, setzen sich aus dem Zugglied und einer Frontalausbildung zur Sicherung der Oberfläche zusammen. Der kraftschlüssige Verbund zwischen Nagel und Frontalausbildung wird über den Nagelkopf mit Ankerplatte und Mutter gewährleistet, der zwischen Nagel und Boden mittels Verpresskörper aus Mörtel. Der Vorteil dieser Konstruktion gegenüber einer bewehrten Erde besteht darin, dass der Boden im Zuge des Aushubs lagenweise abgetragen und gesichert wird, also von oben nach unten vorgegangen werden kann. [10]

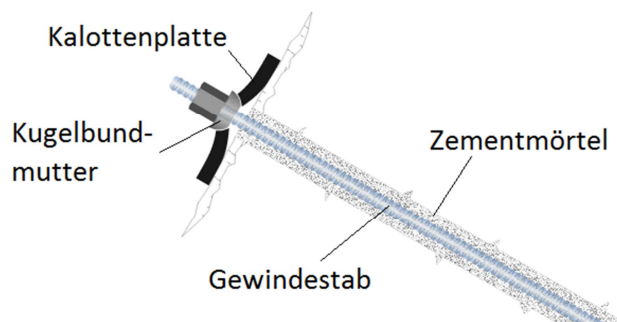


Abbildung 8: Komponenten eines Bodennagels [11]

### 3.1 Tunnelbau

Im Tunnelbau dienen Verankerungen und Vernagelungen hauptsächlich zur Reduktion der Verschiebungen des Gebirges in den Hohlraum hinein. Sie werden angewandt um weniger standfestes Gebirge zu unterstützen und somit die Gebirgseigenschaften zu verbessern. [12] Wird ein Tunnel in der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise hergestellt, wird vor allem auf die Tragfähigkeit des Gebirges, den kraftschlüssigen Verbund der Spritzbetonschale mit dem Gestein und den zeitnahen Einbau von Stützmitteln gesetzt. Ist die Standfestigkeit des Gebirges nicht ausreichend hoch, wird das Gestein mit Ankern oder Nägeln verstärkt. [13]

Auch werden im Tunnelbau Sicherungsanker eingebaut, die verhindern sollen, dass einzelne Blöcke während der Ausbrucharbeiten in den Hohlraum fallen. Dabei muss unterschieden werden, ob es sich um radiale Anker oder um Ortsbrustanker handelt. [12] Die radialen Anker werden zumeist im Gebirge belassen und dienen auch nach dem vollständigen Ausbau als Unterstützung des Gebirges. Die Ortsbrustanker sind dagegen nur temporäre Sicherungsmaßnahmen, welche beim weiteren Vortrieb der Tunnelröhre wieder ausgebaut werden und ihre Wirksamkeit verlieren. Daher ist es wichtig, dass es sich bei diesem System um ausbaubare oder schneidbare Anker aus glasfaserverstärktem Kunststoff handelt, damit diese im weiteren Verlauf des Tunnelausbruchs kein Hindernis darstellen. [14]

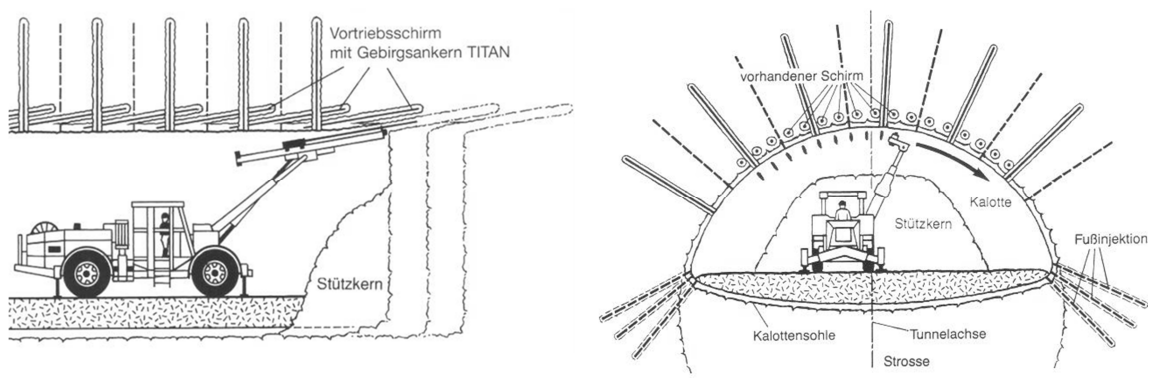


Abbildung 9: Anwendungen im Tunnelbau [15]

### 3.2 Böschungen und Baugruben

Werden Böschungen oder Baugruben hergestellt, bei denen es zum Beispiel aus Platzgründen nicht möglich ist, eine flache Böschungsneigung einzuhalten, müssen die Geländeanschnitte anderwärtig gesichert werden. Diese Sicherungen dienen als künstliche Unterstützung des Bodens und werden im alpenländischen Raum typischerweise wie folgt ausgeführt: [3]

- Stützmauer
- Steinschichtung
- Gabionen
- Polsterwand
- Fertigteilwand
- Holzankerwand
- Krainerwand
- Nagelwand

Hier soll nur auf die beiden letzten Ausführungen eingegangen werden, also auf die Krainerwand und die Nagelwand.

#### 3.2.1 Krainerwand

Krainerwände sind sogenannte Raumgitterkonstruktionen. Diese besteht aus einem Verbundsystem aus Fertigteilen - bei Holzkrainerwänden aus Holz - und verdichtetem Boden. Dabei muss zuerst der gesamte Aushub der Baugrube oder der Böschung gemacht werden und dann kann die Krainerwand von unten nach oben aufgebaut werden. Um eine Krainerwand herstellen zu können, muss der Boden eine relativ hohe Standfestigkeit aufweisen. Der gesamte Geländesprung muss bis zur Fertigstellung der Wand stabil sein, oder es müssen zusätzliche Sicherungsmaßnahmen, zum Beispiel eine vernagelte Spritzbetonwand, vorgesetzt werden. Mit den Holzstämmen wird dann ein Raumgitter erzeugt, welches mit Erde und Steinen verfüllt und verdichtet wird. Dadurch entsteht ein Verbundkörper, der als Schwergewichtsmauer wirkt. [16] Die Lebensdauer solcher Wände beträgt etwa 10 bis 60 Jahre, je nach Art und Behandlung des Holzes und den Eigenschaften des anstehenden Bodens. [3]

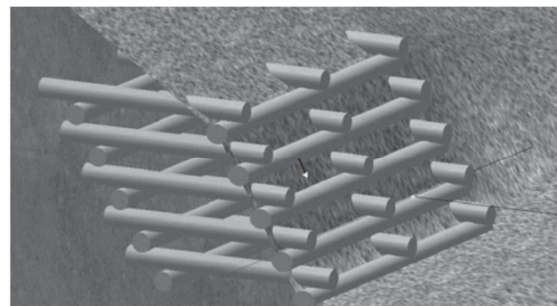


Abbildung 10: Krainerwand aus Holzstämmen [3]



### 3.2.2 Nagelwand

Bei der Vernagelung des Bodens werden Nägel aus Stahl oder Kunststoff in den Untergrund eingebracht. Diese sollen sowohl die Zugfestigkeit, als auch die Scherfestigkeit des Bodens erhöhen und es ermöglichen die Erddruckkräfte abzuleiten. [5]

Diese flexible Art der Sicherung von Geländesprüngen kann sowohl bei temporären, als auch bei (semi-)permanenten Baumaßnahmen angewandt werden. Bei einer temporären Anwendung, die maximal zwei Jahre in Verwendung ist, muss nur bedingt auf den Korrosionsschutz des Stahls geachtet werden. Im Gegensatz dazu ist bei einer permanenten Sicherung durch Stahlnägel der Korrosionsschutz von großer Bedeutung, da ansonsten der Stahl korrodiert und dadurch die Tragfähigkeit des Stahlglieds vermindert wird. [3]

Die Herstellung einer gesicherten Böschung oder Baugrube mit Nägeln erfolgt in mehreren Schritten und wird in der nachfolgenden Abbildung schematisch dargestellt.

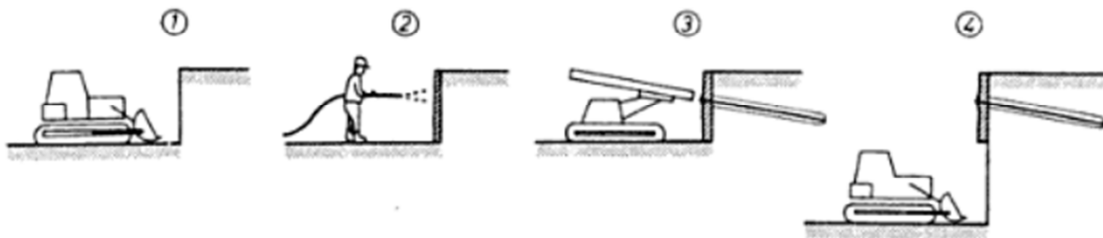


Abbildung 11: Herstellungsschritte einer Nagelwand [10]

Je nach den Eigenschaften des Bodens werden die Höhe und die Breite der einzelnen Abtragfelder angepasst, daher sind die nachfolgenden Werte als Richtwerte anzusehen.

- (1) Aushub der ersten Lage mit einer Höhe von 1-2 m und einer Breite von 2-5 m
- (2) Befestigen der Bewehrung und Aufbringen des Spritzbetons
- (3) Bohren und Einbringen der Nägel, Injizieren der Zementsuspension
- (4) Aushub der nächsten Lage

Diese Schritte werden in einer Ebene immer für jedes zweite Feld durchgeführt, das heißt, es wird auf Lücke gearbeitet. Nach ausreichendem Abbinden des Nagelmörtels des vorigen Feldes werden die Zwischenfelder, die als Stützkeil gedient haben, abgetragen und gesichert. Anschließend wird der Vorgang für die nächste, tiefere Lage wiederholt, bis die gewünschte Endtiefe erreicht ist. [3]

### 3.3 Herstellung einer Nagelwand

Um eine Nagelwand zu errichten, kann entweder mit einem selbstbohrenden Nagel mit verlorener Bohrkronen oder mit einem verrohrt hergestelltem Bohrloch, in das danach der Nagel eingeschoben wird, vorgegangen werden.

Die Herstellung des Bohrloches für den nicht selbst bohrenden Nagel kann sowohl mit einer verrohrten Bohrung, als auch mit einer unverrohrten Bohrung ausgeführt werden und wird in der Regel mit circa 10° Neigung zur Horizontalen durchgeführt. Eine unverrohrte Bohrung darf nur dann gewählt werden, wenn der Boden so standfest ist, dass auch beim Setzen der Nägel kein Material in des Bohrloch verbricht. [17]

Bei der Bohrung können folgende Verfahren zur Anwendung kommen:

- Drehbohrungen
- Drehschlagbohrungen
- Selbstbohrnagel

Ist die geeignete Bohrmethode gefunden, kann diese wiederum mit oder ohne Spülung durchgeführt werden. [18]

#### 3.3.1 Drehbohrung

Bei dem Drehbohrverfahren kann das Material entweder mithilfe einer Schnecke oder durch Spülung mit Luft, Wasser oder Suspension aus dem Bohrloch an die Oberfläche gebracht werden. Je nach Boden- oder Gebirgsverhältnissen muss das Bohrloch mit einer Verrohrung gestützt werden oder ist in sich standfähig.

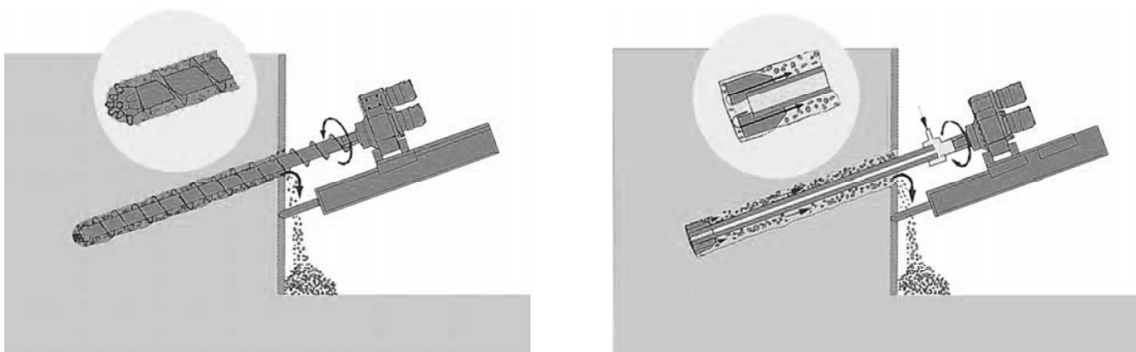


Abbildung 12: Drehbohrung mit Schnecke und im Spühlverfahren [19]

### 3.3.2 Drehschlagbohrung

Auch bei der Drehschlagbohrung kann das Bohrloch mit oder ohne Verrohrung hergestellt werden, je nachdem wie es der Boden, beziehungsweise das Gestein verlangt.

Das neuere Verfahren mit Imlochhammer arbeitet mit einem öldruckbetriebenen Schlaghammer im Bohrloch. Dieser ist leicht, dadurch sehr effizient und kann in unwegsamem Gelände mit Kleingeräten wie Baggern eingesetzt werden. [20]

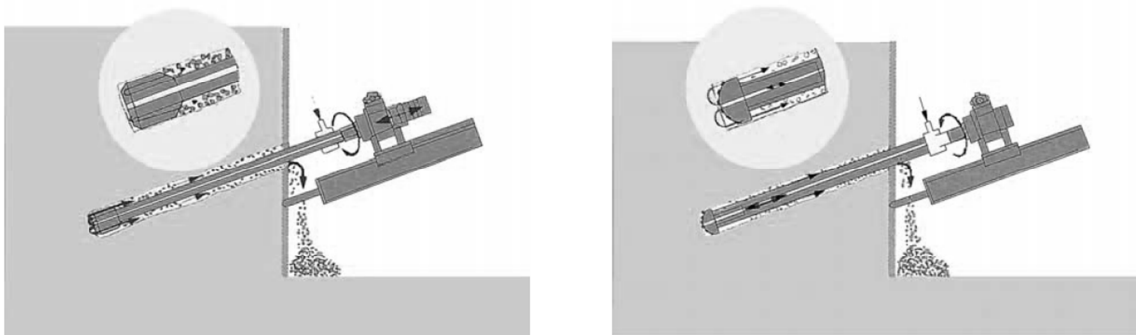


Abbildung 13: Drehschlagbohrung mit Außenhammer sowie Imlochhammer [19]

### 3.3.3 Selbstbohrnagel

Für temporäre, wie auch für (semi-)permanente Vernagelungen kommt immer öfter das System der Selbstbohrnägel zur Anwendung. Dabei sitzt am Ende des Stahls eine verlorene Bohrkronen mit der gebohrt wird, ohne dass eine Verrohrung nötig ist. Die hochfesten Stähle sind innen hohl, um während des Bohrvorganges mit Suspension spülen und stützen zu können. Stand der Technik ist es, das Bohrloch gleich mit dem Verpressmörtel zu stützen. Es kann auch mit Luft oder Wasser gespült werden, allerdings sind diese Verfahren nicht ideal für den Boden, da es zu Auflockerungen und Rutschungen beziehungsweise zu Böschungsverbrüchen kommen kann. Nach Erreichen der Endtiefe wird ansonsten durch diesen Hohlraum der Mörtel gepresst und somit in einem Arbeitsgang der Verbundkörper um den Nagel erstellt. [20] An der Außenseite des Stahls wird durch Walzen ein Rundgewinde beziehungsweise ein Trapezgewinde angebracht, wodurch der Nagel beliebig verlängert und gekürzt werden kann. Die Bohrung wird bei diesem Hohlstab-System mittels Drehschlagbohrung durchgeführt, da diese sehr effizient und bekannt für ihre

Richtungsstabilität ist. Außerdem wird durch das Schlagen der Mörtel, welcher als Stützung des Bohrlochs dient, verdichtet. [21]

Nachfolgend die Systemskizze eines Hohlstab-Bodennagels der Firma Dywidag zur Veranschaulichung und zur Abbildung sämtlicher notwendiger Komponenten bei dem sogenannten Injektionsbohranker.

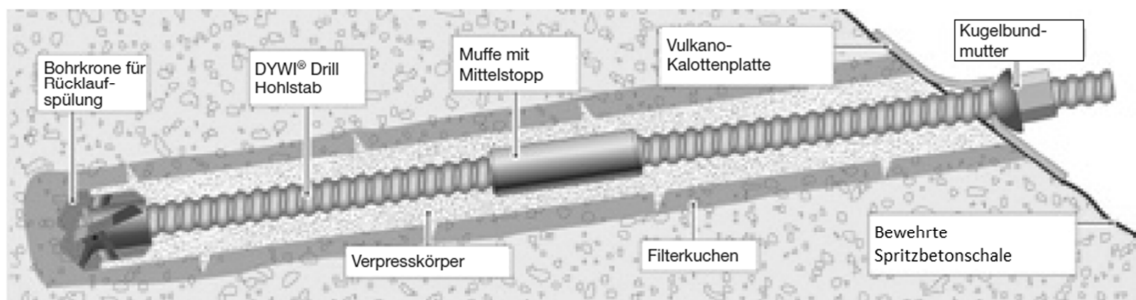


Abbildung 14: Bodennagel - Hohlstabsystem Fa. Dywidag [21]

### 3.3.4 Verfahrensauswahl

Die Wahl des jeweiligen Herstellungsverfahrens und des verwendeten Nagels hängen von folgenden Punkten ab: [18]

- Bodenverhältnisse beziehungsweise Gebirgsverhältnisse
- Grundwasser, Schichtwasser und Kluftwasser
- Durchmesser, Länge und Neigung der Bohrung
- Örtliche Verhältnisse: Zugänglichkeit, Arbeitsraum, Wasser- und Stromanschluss
- Zulässige Störungen des Untergrunds
- Zulässige Schäden an Bauwerken: Setzungen, Hebungen, Erschütterungen
- Zulässige Richtungsabweichung der Bohrlöcher
- Zulässige Umweltbelastung: Lärm, Erschütterungen, Luftverschmutzung
- Energiebedarf und Kosten für Bohr und Einbauarbeiten

### 3.4 Bohrkronen

#### 3.4.1 Verrohrte und unverrohrte Bohrung

Die Bohrung mit einer Schnecke kann, je nach Bodenverhältnissen, verrohrt oder unverrohrt hergestellt werden. Dabei dient die Verrohrung bei nicht standfesten Böden als Stütze gegen den Verbruch in das Bohrloch hinein. Die Schnecke – auch eine Ausführung als Endlosschnecke ist möglich – befördert das gelockerte Material aus dem Bohrloch an die Oberfläche. Zum Lösen des Materials an der Spitze sind Bohrkronen notwendig, die je nach Festigkeit des Untergrunds eine unterschiedliche Ausbildung haben. Dabei wird bei den Bohrkronen darauf geachtet, dass Verschleißteile leicht gewechselt werden können, um längere Wartungszeiten zu vermeiden. Die unten abgebildete Bohrkronen des Typs HD dient hauptsächlich zum Ausräumen des Bohrguts aus dem Rohr, wobei die Bohrkronen des Typs RD zum Ausschneiden des Untergrundes unter dem Rohr zum Einsatz kommt. Die Möglichkeit, die Schneidezähne unter dem Rohr auszuklappen, macht ihr diese Aufgabe erst möglich. Ist der Boden entfernt, wird das Rohr nachgezogen. [22]

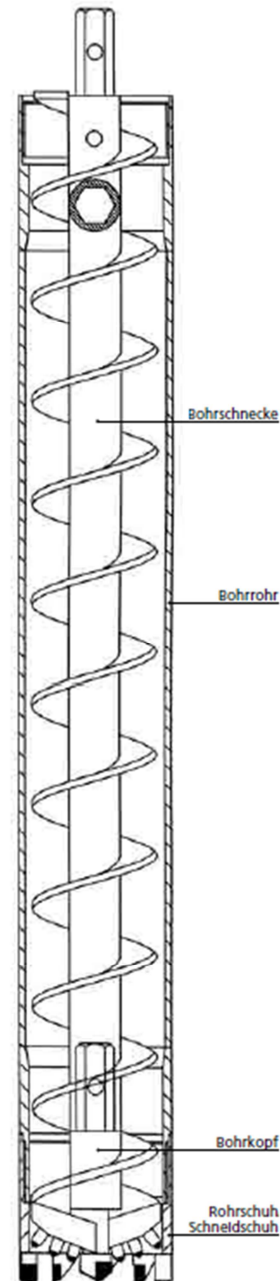


Abbildung 15: Bohrrohr der Firma STDS-Jantz

**Bohrkronen Typ RD**



**Bohrkronen Typ HD**



Abbildung 16: Bohrkronen der Firma STDS-Jantz [22]

### 3.4.2 Verlorene Bohrkronen – IBO

Diese Bohrkronen gelten als verlorene Kronen und werden daher nur einmal zum Bohren verwendet, danach verbleiben sie im Untergrund. Das Material aus dem diese Bohrkronen üblicherweise bestehen, ist Stahl. Teilweise sind Teile aus gehärtetem Stahl eingebaut und für spezielle Komponenten werden Karbid-Einsätze gewählt.

Die Auflistung in Tabelle 1: *Bohrkronen für Hohlstab-Bodennägel der Firma Dywidag* zeigt die möglichen Bohrkronen für dieses System. Die Namensgebung und die genaue Form der Kronen mag zwar bei anderen Firmen abweichen, die Funktionsweise bleibt allerdings dieselbe. Daher ist diese Tabelle als Beispiel für mögliche Bohrkronen zu sehen.

| Beschreibung  | Abbildung   |
|---|---|
| <p><b>Bogenbohrkrone</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Universelle Bohrkronen für unterschiedliche Bodenverhältnisse</li> <li>• 45°-Vorlaufspülung</li> <li>• Anwendung: bindiger Boden, Mischboden, Kalk, Mergel, weiches Sedimentgestein; mit Hartmetalleinsätzen: dichter Kies, Sedimentgestein</li> </ul>  |  |
| <p><b>Stiftbohrkrone – kleiner Durchmesser</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Flache Oberfläche verhindert Hängenbleiben und Blockieren in brüchigem Untergrund</li> <li>• 30°-Vorlaufspülung</li> <li>• Anwendung: Zwischenlagerungen, weicher Ton aus Karbid: brüchiger, klüftiger, mittelharter Fels</li> </ul>                                    |  |
| <p><b>Stiftbohrkrone – großer Durchmesser</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Flache Oberfläche verhindert Hängenbleiben und Blockieren in brüchigem Untergrund</li> <li>• 30°-Vorlaufspülung</li> <li>• Anwendung: Zwischenlagerungen, weicher Ton aus Karbid: brüchiger Untergrund, Schiefer, abrasiver Sandstein, Geröll, brüchiger Fels</li> </ul> |  |

### **Bogenwarzenkrone**

- Mit abgesenkter Mitte und gehärteten Stiften
- 30°-Vorlaufspülung und seitliche Spülung
- Anwendung: Lockergestein, Kalk, Mergel, weiches Sedimentgestein  
mit Hartmetalleinsätzen: dichter Kies, Kalkstein, Schiefer



### **Stiftbohrkrone mit abgesenkter Mitte**

- Abgesenkte Mitte mit Seitenbögen zur besseren Effizienz
- 30°-Vorlaufspülung
- Anwendung: Wechsellagerungen, Lockergestein, weicher Tonstein  
aus Karbid: dichter Kies, brüchiger Untergrund, Schiefer, Geröll, brüchiger Fels



### **Zweistufen-Rücklaufspülungs-Bohrkrone**

- Kreuzbohrkrone mit angeschärften Flügeln
- Rücklaufspülung und seitliche Spülung
- Gegossener Rumpf mit induktionsgehärteten Schneidflächen
- Anwendung: bindige und gemischte Böden



### **Karbid-Meißel-Kreuzbohrkrone**

- Hochleistungs-Kreuzbohrkrone mit Karbid-Meißeln
- Mittel- und 30°-Vorlaufspülung
- Anwendung: Hartgestein, harte Flötze, Hindernisse aus Beton



Tabelle 1: Bohrkronen für Hohlstab-Bodennägel der Firma Dywidag [21]

## 3.5 Bohrgeräte

Um Vernagelungen herzustellen, sind spezielle Bohrgeräte notwendig. Anforderungen an diese sind eine möglichst hohe Manövrierfähigkeit, geringes Eigengewicht, kompakte Abmessungen um auch bei beengenden Verhältnissen arbeiten zu können und die Erreichbarkeit von Bohransatzpunkten in Höhen von bis zu drei Metern. [23]

Dabei kommen zum Einsatz: [15]

- Handliche luftdruckbetriebene Bohrhämmer: Diese kommen beim Einbau von kleinen Stahltraggliedern zum Einsatz.
- Anbaulafetten auf beliebigen Baumaschinen mit hydraulischem Antrieb: für die nächstgrößere Klasse von Stahltraggliedern – also kleine bis mittelgroße – kommen diese Geräte zur Anwendung.
- Ankerbohrgeräte: diese Geräte sind für den Einbau aller Tragglieder geeignet.

**Bohrgerät KR 800-1**

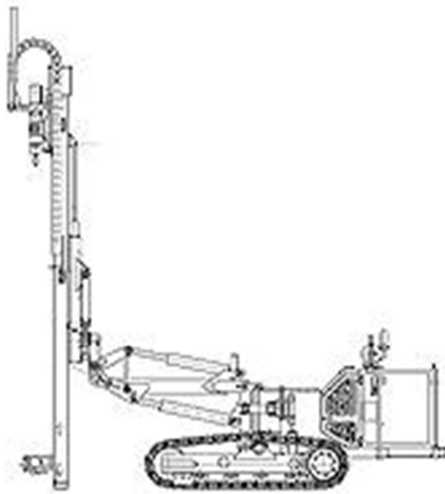


Abbildung 17: Bohrgerät KR 800-1 der Firma Klemm [15]

**Systemskizze Bohrgerät**

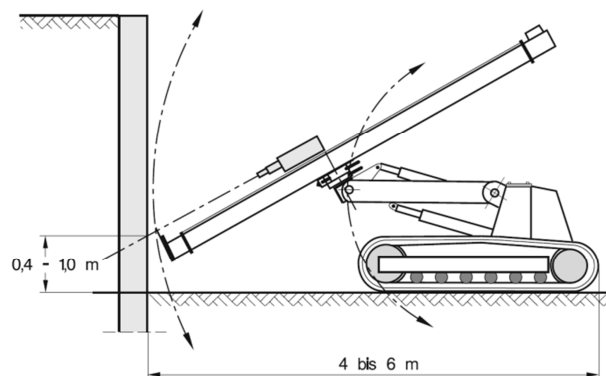


Abbildung 18: Systemskizze Bohrgerät [4]



In unwegsamem Gelände sind dennoch Spezialgeräte notwendig, um die Bohrarbeiten durchzuführen. Als Beispiel wird hier der Menzi Muck der Firma Menzi Muck AG angeführt. Dieser dient als Trägergerät für die verschiedenen Bohrsysteme. Durch die hohe Leistungsfähigkeit, das geringe Eigengewicht, die große Standsicherheit und die gute Bewegungsfähigkeit ist dieser ideal für schwierige Geländebedingungen geeignet. Der speziell konstruierte Schreitfuß mit Abstütz- und Schreitfunktion erleichtert ihm das Arbeiten an steilen Hängen. Kommen schwerere Bohrlafetten zur Anwendung, ist ein Baggerarm mit mehr Hubkraft erhältlich. [24]



Abbildung 19: Menzi Muck mit Bohrlafette [25]

### 3.6 Verpresstechnik

Um einen kraftschlüssigen Verbund zwischen Nagel und Boden herzustellen, wird der Ringraum um das Stahlzugglied mit Zementmörtel oder anderen Verpresstoffen verfüllt. Dadurch kann die Lasteintragung über die Mantelreibung erfolgen.

Hier werden beispielhaft zwei Maschinen der Firma Mai International GmbH, deren technischen Daten und Funktionsweise nachfolgend beschrieben sind, aufgeführt. Diese hydraulischen Injektionspumpen bieten den Vorteil, dass sie in einem Gerät den Vorgang des Mischens und des Förderns durchführen. Dabei kann je nach Bedürfnissen die Misch- und Fördermenge mit unterschiedlichen Förderschnecken variiert werden. [26]



Abbildung 20: Injektionspumpe MAI® 400NT [26]    Abbildung 21: MAI® 400EASY [26]

| Parameter            | Einheit | MAI® 400NT       | MAI® 400EASY             |
|----------------------|---------|------------------|--------------------------|
| Betriebsspannung     | [V/Hz]  | 400/50           | 400/50;<br>220-240/50-60 |
| Min. Leistungsbedarf | [kVA]   | 16               | 16                       |
| Nennleistung         | [kW]    | 6,2              | 4,2                      |
| Fördermenge          | [l/min] | 6 bis 35         | 15                       |
| Max. Förderweite     | [m]     | 60               | 40                       |
| Max. Betriebsdruck   | [bar]   | 45               | 30                       |
| L × B × H            | [mm]    | 1730 × 570 × 960 | 1470 × 650 × 1530        |
| Einfüllhöhe          | [mm]    | 960              | 1050                     |
| Gesamtgewicht        | [kg]    | 213              | 136                      |

Tabelle 2: Technische Daten Injektionspumpen [26]

### 3.7 Materialien der Nägel

#### 3.7.1 Betonstahl

Das gängigste Material aus dem Bodennägel gefertigt werden, ist Betonstahl. Dabei wird Stabstahl mit Gewinderippen der Klasse BSt 500 S verwendet. Die üblichen Durchmesser starten bei 16 mm, über 20 mm, 25 mm, 28 mm, 32 mm bis hin zu 40 mm und 50 mm. Bodennägel aus Betonstahl sind sowohl für den vorübergehenden, als auch für den permanenten Einsatz geeignet. Aus der nachfolgenden Tabelle können die technischen Daten der verschiedenen Durchmesser der Stäbe entnommen werden. [27] Der E-Modul liegt für alle Durchmesser des BSt 500 S bei etwa 200 kN/mm<sup>2</sup>.

| Stabdurchmesser | Stahlgüte | Stahlquerschnitt   | Stahlgewicht | Last an der Streckgrenze | Bruchlast |
|-----------------|-----------|--------------------|--------------|--------------------------|-----------|
| [mm]            |           | [mm <sup>2</sup> ] | [kg/m]       | [kN]                     | [kN]      |
| 16              | BSt 500 S | 201                | 1,58         | 101                      | 111       |
| 20              | BSt 500 S | 314                | 2,47         | 157                      | 173       |
| 25              | BSt 500 S | 490                | 3,85         | 245                      | 270       |
| 28              | BSt 500 S | 615                | 4,83         | 308                      | 338       |
| 32              | BSt 500 S | 804                | 6,31         | 402                      | 442       |
| 40              | BSt 500 S | 1257               | 9,86         | 629                      | 691       |
| 50              | BSt 500 S | 1963               | 15,40        | 982                      | 1080      |

Tabelle 3: Technische Daten BSt 500 S [27]

### 3.7.2 GEWI-Stab Plus®

Die Firma Dywidag bietet außerdem einen GEWI-Stab Plus® mit Rechtsgewinde an, der aus der Stahlgüte S 670/800 gefertigt ist. Das bedeutet, dass es sich um einen mikrolegierten, warmgewalzten und walzhitzevergüteten Stabstahl handelt, der speziell für den Anwendungsbereich Geotechnik entwickelt wurde. [28] Ähnliche Produkte hat auch die Firma Friedrich Ischebeck, diese werden hier allerdings nicht dezidiert aufgezählt. Die dazugehörigen Werte können wieder aus der unten stehenden Tabelle entnommen werden.

| Stabdurchmesser | Stahlgüte | Stahlquerschnitt   | Stahlgewicht | Last an der Streckgrenze | Bruchlast |
|-----------------|-----------|--------------------|--------------|--------------------------|-----------|
| [mm]            |           | [mm <sup>2</sup> ] | [kg/m]       | [kN]                     | [kN]      |
| 18              | S 670/800 | 254                | 2,00         | 170                      | 204       |
| 22              | S 670/800 | 380                | 2,98         | 255                      | 304       |
| 25              | S 670/800 | 491                | 3,85         | 329                      | 393       |
| 28              | S 670/800 | 616                | 4,83         | 413                      | 493       |
| 30              | S 670/800 | 707                | 5,55         | 474                      | 565       |
| 35              | S 670/800 | 962                | 7,55         | 645                      | 770       |
| 43              | S 670/800 | 1452               | 11,40        | 973                      | 1162      |
| 57,5            | S 670/800 | 2597               | 20,38        | 1740                     | 2077      |
| 63,5            | S 670/800 | 3167               | 24,86        | 2122                     | 2534      |

Tabelle 4: Technische Daten S 670/800 [28]

Aus der Bezeichnung der Stahlgüte kann herausgelesen werden, dass es sich bei dem Material um einen Stahl mit Streckgrenze bei 670 N/mm<sup>2</sup> handelt. Dies ist wiederum um 34% höher als bei dem gewöhnlichen Betonstahl BSt 500 S. Auch die Zugfestigkeit ist mit 800 N/mm<sup>2</sup> um gut 45% höher als der Wert 550 N/mm<sup>2</sup> des Betonstahls. [29]

### 3.7.3 Glasfaserverstärkter Kunststoff – GFK

Als alternatives Bauelement werden, vorwiegend im Tunnelbau, auch Anker und Felsbolzen aus glasfaserverstärktem Kunststoff verwendet. Das Material ist ein Verbundstoff aus Glasfasern und Spezialkunstharzen. Einer der Vorteile dieses Materials ist, dass es schneidbar ist. Diese Eigenschaft bringt Vorteile im Untertagebau, wenn beispielsweise mit einer Tunnelbohrmaschine vorgetrieben wird und die Anker nur als temporäre Sicherung der Ortsbrust dienen und anschließend wieder entfernt, beziehungsweise geschnitten werden müssen. [14]

Weitere Vorteile der GFK-Anker und Felsbolzen: [14]

- Geringes Eigengewicht erleichtert den Einbau unter anspruchsvollen Einsatzbedingungen
- Hohe Zugtragfähigkeit
- Beständiges und widerstandsfähiges System, gleichzeitig einfach durch Vortriebsmaschinen oder Bagger abtrennbar
- Verbessertes Korrosionsschutz
- Antistatische Systemkomponenten - problemloser Einsatz in schlagwettergefährdeten Bereichen
- Widerstandsfähige und tragfähige Gewindeform

Die GFK-Stäbe sind in unterschiedlichen Ausführungen erhältlich und weisen daher auch verschiedene Bezeichnungen auf. Die Abkürzungen stehen für:

- Typ CS: gewindeprofilierter Vollstab
- Typ CH: gewindeprofilierter Hohlstab
- Typ CR: Selbstbohr-Hohlstab mit verbesserter Verbundstruktur

Der Nachteil des GFK-Ankers ist die technisch schwierige Krafteinleitung im Ankerkopfbereich. Außerdem ist es derzeit noch nicht möglich, hohe Lasten einzutragen. Dieses Thema ist Gegenstand intensiver Forschung und es sind bereits neue Patente am Markt.

## Vernagelungssysteme

| Stabdurchmesser | Bezeichnung | Querschnitt        | Gewicht | Höchstkraft Stab | Scherkraft Stab |
|-----------------|-------------|--------------------|---------|------------------|-----------------|
| [mm]            |             | [mm <sup>2</sup> ] | [kg/m]  | [kN]             | [kN]            |
| 20              | CS20-190    | 186                | 0,56    | 190              | 90              |
| 25              | CS25-350    | 346                | 0,90    | 350              | 160             |
| 32              | CS32-560    | 580                | 1,30    | 560              | 230             |
| 25              | CH25-250    | 230                | 0,64    | 250              | 110             |
| 32              | CH32-350    | 340                | 0,95    | 350              | 140             |
| 32              | CR32-340    | 340                | 0,95    | 350              | 140             |

Tabelle 5: Technische Daten GFK Anker und Felsbolzen [14]

Der E-Modul aller Stäbe liegt bei etwa 40 kN/mm<sup>2</sup>. Um das System zu vervollständigen gibt es auch GFK-Zubehör, zu welchem diverse Muttern und Platten zählen. Auch erwähnt sollen an dieser Stelle GFK-Bewehrungen werden, die in Kombination einsetzbar sind.

### 3.8 Nagelkopfausbildung

Der Kopf des Nagels kann entweder mit einer quadratischen Ankerplatte und einer Sechskantmutter oder mit einer Kalottenplatte und einer Kugelbundmutter gegen Hineinziehen gesichert werden. Die Ankerplatten müssen immer senkrecht zur Stabachse angebracht werden. Eine Winkelabweichung des Nagels von der Horizontalen lässt sich mit einer Kalottenplatte und einer Kugelbundmutter ausgleichen.

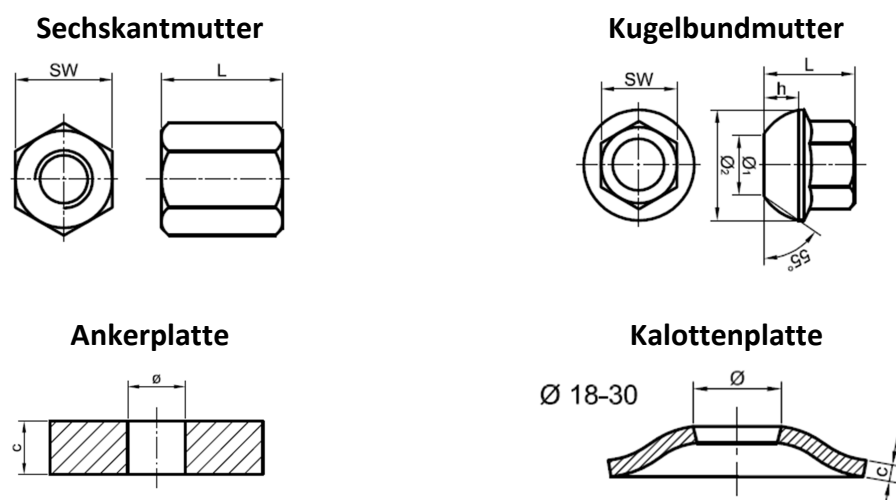


Abbildung 22: Elemente Nagelkopf [30]

Werden zur Sicherung der Böschung gegen Steinschlag Netze angebracht, können diese mit Hilfen von Krallenkalottenplatten und Ringmutter befestigt werden.



Abbildung 23: Krallenkalottenplatte

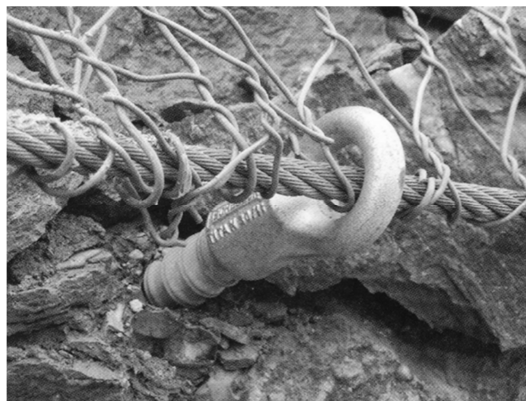


Abbildung 24: Ringmutter [15]

Um den Nagel auch im Kopfbereich vor Umwelteinflüssen und der damit einhergehenden Korrosion zu schützen, muss ein Schrumpfschlauch aufgebracht werden. Dieser sollte 20 cm in das Bohrloch hinein reichen und in die außenseitige Zementüberdeckung eingebunden werden. [30]



### 3.9 Verpressmörtel

Der Verpressmörtel ist nötig, um nach dem Aushärten einen kraftschlüssigen Verbund zwischen Boden und Nagel herzustellen. Dabei werden die Kräfte mittels Reibung auf der gesamten Länge des Tragglieds eingeleitet und unterstützen den gewachsenen Boden beim Ableiten des wirkenden Erddrucks. Dies steht im klaren Gegensatz zu der Wirkungsweise von Freispielankern, bei denen der Lasteintrag nur in einem mit begrenzter Länge und in definierter Tiefe liegendem Verpresskörper hinter der Gleitfuge erfolgt. [31]

#### 3.9.1 Ankermörtel

Ankermörtel besteht aus Portlandzement und hochwertigen mineralischen Zuschlägen, also Gesteinskörnungen und speziellen Zusätzen. Durch diese Zusammensetzung weist der Mörtel rheologische Eigenschaften auf. Das bedeutet, dass der Mörtel gut pumpbar und daher fließfähig und trotzdem viskos genug ist um nicht zum Beispiel aus Überkopfbohrlöchern im Tunnelbau heraus zu fließen. Um bei der Herstellung des Verpresskörpers einen kontinuierlichen Arbeitsfortschritt zu gewährleisten, sind die schnelle Festigkeitsentwicklung und die hohe Endfestigkeit von großer Bedeutung. Auch ist es wichtig, dass der Mörtel frei von korrosionsfördernden Stoffen ist und dass eine gute Haftung zwischen Nagel und Mörtel, sowie zwischen Mörtel und Boden besteht.

Angemischt kann der Ankermörtel mit branchenüblichen Mischern, wie zum Beispiel einem Zwangsmischer, werden. Dabei wird unter Zugabe der nötigen Wassermenge solange gemischt, bis eine homogene, knollenfreie Masse entstanden ist. Unmittelbar danach sollte der Ankermörtel verarbeitet, also in das Bohrloch eingebracht werden. [32]

### 3.9.2 Silikatharz

Als Grundlage der folgenden Beschreibungen dient das DYWI® Inject SILO 8044 – Silikat-Ankerharz. Es ist ein 2-Komponenten-Silikatharz, welches schnell aushärtet und sehr gute Klebeeigenschaften aufweist. Die Anwendungsgebiete erstrecken sich vom Bergbau – vor allem für den Einbau von Überkopfkankern – bis hin zum Verpressen von GFK-Ankern.

Vorteile des Silikatharzes sind: [33]

- Härtet schnell und fest aus
- Sehr gute Hafteigenschaften
- Hohe Endfestigkeit und sofortige Lastübertragung nach Verklebung
- Reaktion auch bei niedrigen Temperaturen
- Gute chemische Beständigkeit
- Ökologisch unbedenklich – daher auch für den Einsatz in Trinkwasserbereichen geeignet

|                                      |                  |                      |        |                      |
|--------------------------------------|------------------|----------------------|--------|----------------------|
| Dichte Komponente A                  | 1,44/0,83        | [g/cm <sup>3</sup> ] |        |                      |
| Dichte Komponente B                  | 1,23/0,71        | [g/cm <sup>3</sup> ] |        |                      |
| Mischdichte                          | 1,28-1,33        | [g/cm <sup>3</sup> ] |        |                      |
| Viskosität Komponente A              | 500              | [mPas]               |        |                      |
| Viskosität Komponente B              | 400              | [mPas]               |        |                      |
| Flammpunkt Komponente A              | Nicht bestimmbar |                      |        |                      |
| Flammpunkt Komponente B              | 200/392          | [°C]                 |        |                      |
| Wärmeentwicklung                     | max. 110         | [°C]                 |        |                      |
| Mischungsverhältnis,<br>volumetrisch | 1:1              |                      |        |                      |
| Reaktionszeit bei:                   | 10[°C]           | 20[°C]               | 30[°C] |                      |
| Fließgrenze                          | 150              | 90                   | 90     | [s]                  |
| fest nach                            | 471              | 360                  | 300    | [s]                  |
| Druckfestigkeit                      | 40               |                      |        | [N/mm <sup>2</sup> ] |
| Biegezugfestigkeit                   | 20               |                      |        | [N/mm <sup>2</sup> ] |

Tabelle 6: Technische Daten DYWI® Inject SILO 8044 – Silikat-Ankerharz [33]

### 3.10 Korrosionsschutz

Um geeignete Vorkehrungen gegen Korrosion von Nägeln treffen zu können, sollten eingangs folgende Punkte geklärt werden: [34]

- Aggressivität der Umgebung
- Zug- oder Druckbelastung
- Art des Stahls und des Nagels
- Erforderliche Lebensdauer

Um nun die gewünschte Lebensdauer zu erreichen, sind laut ÖNORM EN 14490 folgende Methoden möglich:

- Korrosionszugabe (Berücksichtigung einer Abrostrate)
- Einkapselung mit einem geeignetem Einpressmittel, Mörtel oder Beton
- Oberflächenbeschichtung
- Geripptes Hüllrohr mit Einpressmittel
- Nicht rostender Stahl
- Eine Kombination der oben genannten Anwendungen

#### 3.10.1 Korrosionszugabe

Bei diesem Verfahren wird der Querschnitt des Nagels überdimensioniert. Es werden keine anderen Schutzmaßnahmen wie zum Beispiel Einkapselung angewandt. Die Größe der sogenannten Abrostrate kann aus historischen Daten, die in ähnlicher Umgebung aufgezeichnet wurden, entnommen werden. Maßgebend ist dabei die Aggressivität des umgebenden Bodens.

Dieses Verfahren darf nur bei Nägeln angewandt werden, bei denen der erwartete Querschnittsverlust geringer als 50 % des ursprünglichen Querschnitts ist. Weiters ist zu beachten, dass neben den Zugkräften auch Schubkräfte auftreten können.

| Klassifizierung | Kurzzeitig                        | Kurzzeitig               | Langfristig              |
|-----------------|-----------------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                 | ≤ 18 Monate                       | 1,5 Jahre bis ≤ 30 Jahre | 30 Jahre bis ≤ 100 Jahre |
| ≤4/IV           | 0 mm                              | 2 mm                     | 4 mm                     |
| 5 bis 8/III     | 0 mm                              | 4 mm                     | 8 mm                     |
| 9 bis 12/II     | 2 mm                              | 8 mm                     | Kunststoffhüllrohr       |
| ≥ 13/IV         | Kunststoffhüllrohr ist vorzusehen |                          |                          |

Tabelle 7: Angaben zu den Stahldickenverlusten [34]

Um auf die Klassifizierung in Tabelle 7 zu kommen, ist es wichtig, folgende Kriterien zu gewichten und deren Werte aufzuaddieren: Bodenart, Widerstandsfähigkeit, Feuchtegehalt im Boden und der pH-Wert des Wassers. Die genauen Werte und Merkmale können aus der ÖNORM EN 14490: 2010-06 Seite 50 entnommen werden.

### 3.10.2 Einkapselung

Mit Hilfe eines geeigneten Einpressmittels, Mörtel oder Beton wird eine Schutzhülle um den Nagel geschaffen, durch den der Stahl geschützt wird. Das Einpressen kann entweder während des Bohrens, oder nach Abschluss durchgeführt werden und passiert entweder durch einen hohlen Ankerstab oder durch einen separat angebrachten Verpressschlauch, der bis zum Bohrlochtieftsten eingeführt wurde. Um die Schutzfunktion und damit den pH-Wert von 9,5 bis 13,5 aufrecht zu erhalten, ist es nötig, auf eine Rissbreitenbeschränkung von 0,1 mm zu achten. Diese Breite gilt noch als selbstheilend und ist daher auf der sicheren Seite.

Die Größenordnung für die erforderliche Einkapselung kann aus Tabelle 8 entnommen werden.

| Zustand des Bodens | Nutzungsdauer des Bauwerks (Jahre)   |    |    |    |      |
|--------------------|--------------------------------------|----|----|----|------|
|                    | Einkapselung mit Einpressmittel (mm) |    |    |    |      |
|                    | 5                                    | 25 | 50 | 75 | 100  |
| Nicht aggressiv    | 10                                   | 20 | 25 | 35 | -(1) |
| Leicht aggressiv   | 20                                   | 30 | 40 | 50 | -(1) |
| Aggressiv          | 30                                   | 40 | 50 | 75 | -(1) |
| Hoch aggressiv     | Nicht anwendbar                      |    |    |    |      |

(1) Besondere Betrachtung nötig

Tabelle 8: Minimal notwendige Einkapselung [34]

### **3.10.3 Oberflächenbeschichtung**

Einen weiteren Schutz gegen Korrosion kann die Oberflächenbeschichtung darstellen. Bei dieser gibt es zum Beispiel die Galvanisierung oder die Epoxydharzbeschichtung. Der Vorteil der Galvanotechnik ist, dass die Oberfläche resistenter gegen Beschädigung ist und eine Selbstheilung möglich ist. Bei der Epoxydharzbeschichtung ist besonderes Augenmerk auf die Intaktheit der Oberfläche zu legen, da ansonsten die theoretisch hohe Lebensdauer nicht von Nutzen ist.

### **3.10.4 Geripptes Hüllrohr mit Einpressmittel**

Die Elemente dieser Technik sind ein geripptes Hüllrohr und ein geeignetes Einpressmittel, die das Stahltragglied umschließen. Je höher die Abdichtungsleistung, desto besser die Wirksamkeit. Eingesetzt wird dieses System meist im aggressiven Baugrund, in dem die anderen Schutzmaßnahmen nicht mehr ausreichend sind.

### **3.10.5 Nicht rostender Stahl**

Nicht rostender Stahl kann ebenfalls als Bewehrungsstab eingesetzt werden. Verbindungen aus nichtrostendem Stahl und anderem Stahl sollten vermieden werden, da es ansonsten zu galvanischer Korrosion kommen kann.

## 3.11 Abmessungen

### 3.11.1 Querschnitte

Die am Markt erhältlichen Querschnitte sind von Firma zu Firma verschieden, unterscheiden sich aber nur im Millimeterbereich voneinander. Die Durchmesser der Firma Dywidag sind dem Kapitel 3.7 zu entnehmen. Auch die dazugehörigen technischen Daten sind dort aufgelistet.

### 3.11.2 Längen

Die Lieferlänge der Stahltragglieder hängt, wie auch die Querschnittswerte, vom Hersteller ab. Das Unternehmen Friedrich Ischebeck bietet die Bodennägel in den Lagerlängen 2 m, 3 m beziehungsweise 4 m an. Es kann allerdings jeder Nagel beliebig verlängert und gekürzt werden. Dieser Komfort entsteht durch das durchgängige Gewinde, auf welches zur Verlängerung Kopplungsmuffen aufgeschraubt werden können. Die in der Praxis mögliche Einbaulänge für klassische Bodenvernagelungen beträgt maximal 16 m, üblicherweise werden 4 m bis 10 m lange Nägel eingebaut. [31]

Es gibt folgende Unterarten von Muffen: [35]

- Kopplungsmuffe: einfachste Art zur Verlängerung
- Dichtmuffe: hält auch bei hohem Spüldruck während der Bohrung dicht
- Sperrmuffe: sicherer Halt auch im inneren des Bohrlochs – kein Lösen während der Bohrung
- Nachverpressmuffe: ermöglicht nach dem Spülen des Hohlstabinneren mit verschiedenen Injektionsmedien nachzuverpressen



Abbildung 25: Kopplungsmuffe [15]

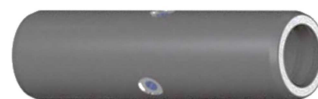


Abbildung 26: Nachverpressmuffe [35]



Abbildung 27: Sperrmuffe [35]

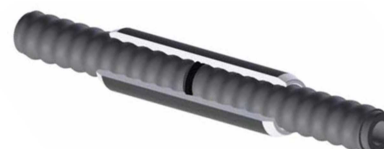


Abbildung 28: Dichtmuffe [35]

### 3.12 Dimensionierung

Zur Berechnung und Bemessung der Tragfähigkeit einer Nagelwand müssen sowohl die innere als auch die äußere Standsicherheit der Wand überprüft werden.

Normalerweise kann mit dem aktiven Erddruck gerechnet werden, wenn davon ausgegangen wird, dass genügend Drainagen gesetzt wurden und sich kein Wasserdruck hinter der Wand aufbaut. Um zu sichern, dass kein zusätzlicher Wasserdruck wirkt, müssen ausreichend Entwässerungsschlitze in die Spritzbetonschale eingebaut werden. [5]

#### 3.12.1 Äußere Stabilität

Da die Wirkungsweise einer Nagelwand der eines Verbundkörpers sehr ähnlich ist, kann der Nachweis der äußeren Standsicherheit wie bei einer konventionellen Schwergewichtsmauer geführt werden. Zu finden sind diese Berechnungsschritte in der ÖNORM 1997-1 Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik.

#### 3.12.2 Innere Stabilität

Die innere Stabilität wird durch den Abtrag der wirkenden Kräfte über die eingebauten Nägel gewährleistet. Dazu muss der mögliche Gleitkörper betrachtet werden, um beurteilen zu können, welche Kräfte von den Nägeln aufgenommen werden sollten. Durch den Vergleich von wirkender Nagelkraft  $N_{\text{vorh}}$  zu aufnehmbarer Nagelkraft  $N_{\text{erf}}$  kann der Sicherheitsfaktor definiert werden. Dieser Faktor muss im Endzustand einen Wert von 2,0 und im Bauzustand einen Wert von 1,5 erreichen. Zusätzlich zu den Nagelkräften kann auch noch der vorhandene mit dem erforderlichen Reibungswinkel verglichen werden, wobei die benötigten Werte mit 1,4 für den Endzustand und 1,3 für den Bauzustand etwas geringer sind. [10]

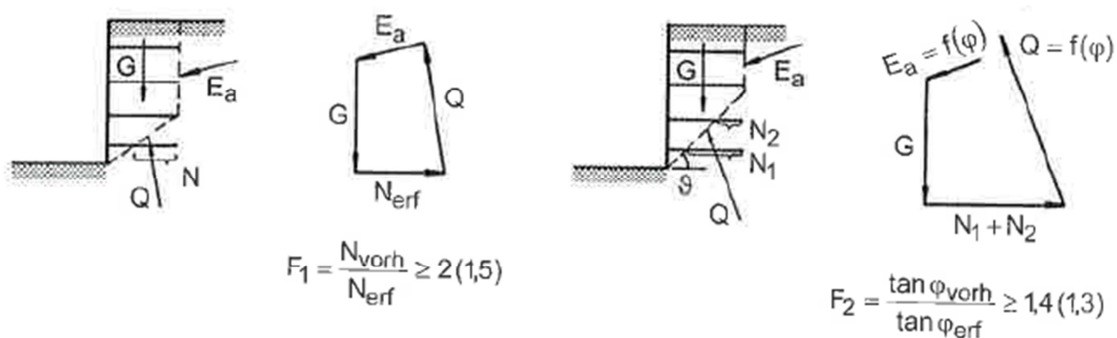


Abbildung 29: Innere Standsicherheit einer Nagelwand [10]

### 3.13 Kosten

Die Gesamtkosten setzen sich aus Materialkosten, Transportkosten und Einbaukosten zusammen. Beispielhaft werden hier zur Durchrechnung der Kosten Stahltragglieder der Firma Ischebeck mit der Bezeichnung TITAN 30/11 verwendet. Dabei handelt es sich um Stahltragglieder die in ein nicht vorgebohrtes Loch ohne Verrohrung eingebracht und anschließend verpresst werden. Die genauen Abmessungen der Nagelwand sind in der nachfolgenden Abbildung dargestellt:

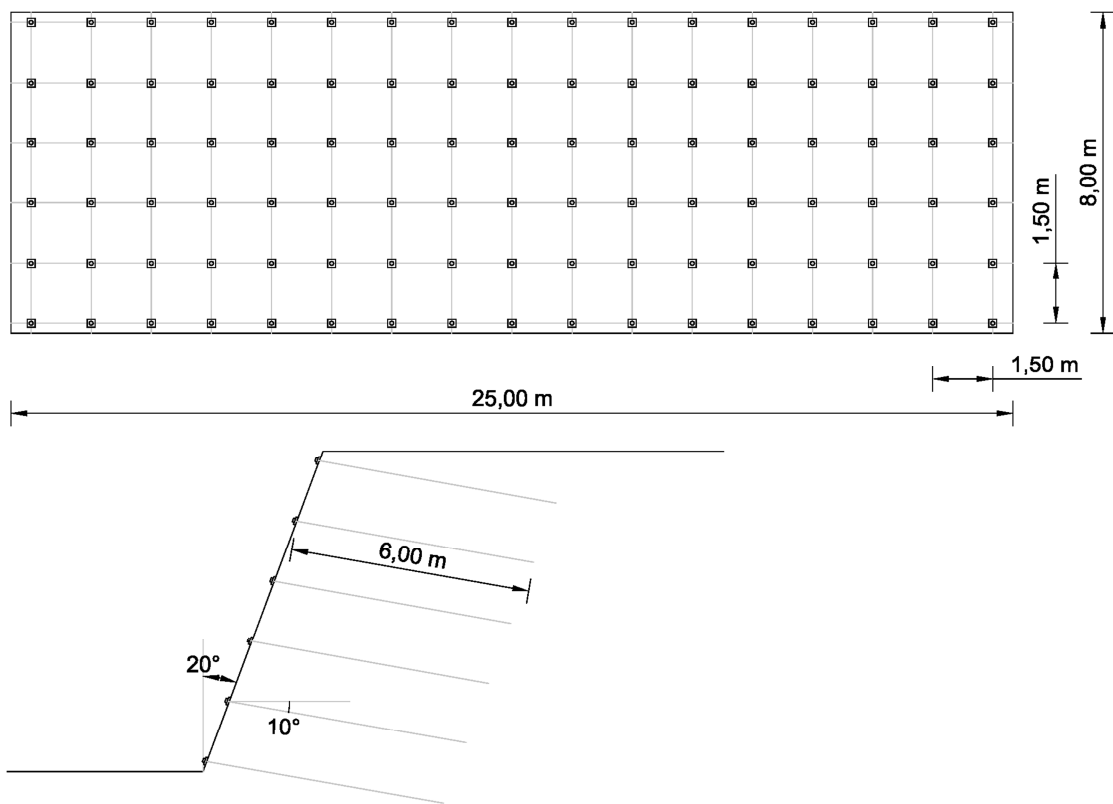


Abbildung 30: Systemskizze der Nagelwand

Für die betrachtete Wand werden auf einer Fläche von  $200 \text{ m}^2$  Nägel im Raster von  $1,5 \times 1,5 \text{ m}$  eingebracht. Die Neigung der Bodennägel zur Horizontalen beträgt etwa  $10^\circ$ , die Böschung ist mit  $70^\circ$  zur Horizontalen geneigt und die Länge der eingebrachten Stahltragglieder wird mit  $6 \text{ m}$  angenommen.



### 3.13.1 Materialkosten

Technische Daten aus der Preisliste der Firma Friedrich Ischebeck:

- Ischebeck TITAN 30/11 mm, 0,2 % Dehngrenze, 225 kN charakteristische Tragfähigkeit, Linksgewinde
- Kopplungsmuffe  $\varnothing$  38 mm x 105 mm, mit Stahlring
- Kugelbundmutter, SW 65 x 35 mm, roh
- Kalottenplatte, 200 x 200 x 8 mm, Bohrung  $\varnothing$  36 mm, roh
- Lehmbohrkrone,  $\varnothing$  75 mm, gehärtet

Die Materialkosten beziehen sich auf einen 6 m langen Bodennagel, der in einen standfesten Untergrund eingebaut wird.

| Element             | Anzahl      | Einzelkosten | Kosten          |
|---------------------|-------------|--------------|-----------------|
| Stahltragglied      | 3 Stk á 2 m | 11,70 €/m    | 70,20 €         |
| Kopplungsmuffe      | 2 Stk       | 9,10 €/Stk   | 18,20 €         |
| Kugelbundmutter     | 1 Stk       | 4,30 €/Stk   | 4,30 €          |
| Kalottenplatte      | 1 Stk       | 4,50 €/Stk   | 4,50 €          |
| Lehmbohrkrone       | 1 Stk       | 9,00 €/Stk   | 9,00 €          |
| <b>Summe Kosten</b> |             |              | <b>106,20 €</b> |

Tabelle 9: Materialkosten je Bodennagel

Aus dieser überschläglichen Rechnung lassen sich Materialkosten pro Laufmeter Nagel von rund 18,00 € ableiten.

Weiters werden Mörtel zum Verpressen der Nägel und Beton zur Herstellung der Frontalausbildung benötigt. Es wird angenommen, dass der Spritzbeton mit einer Stärke von 15 cm aufgebracht und das Bohrloch mit dem Durchmesser 75 mm vorgebohrt wird.

| Element             | Menge               | Einzelkosten            | Kosten         |
|---------------------|---------------------|-------------------------|----------------|
| Verpressmörtel      | 0,10 m <sup>3</sup> | 300,00 €/m <sup>3</sup> | 30,00 €        |
| Spritzbeton         | 0,30 m <sup>3</sup> | 106,00 €/m <sup>3</sup> | 31,80 € [36]   |
| <b>Summe Kosten</b> |                     |                         | <b>61,80 €</b> |

Tabelle 10: Materialkosten je Bodennagel

Da 102 Nägel eingebaut werden, ergibt sich ein Preis von 6.426,00 € für den Spritzbeton und den Verpressmörtel. Ebenso lässt sich aus dieser Tabelle der Bedarf an Beton von 30,00 m<sup>3</sup> und an Verpressmörtel von 10,00 m<sup>3</sup> errechnen.

Weiters werden zur Bewehrung der Spritzbetonschale Bewehrungsmatten benötigt. Zur Anwendung kommen Betonstahlmatten mit der Bezeichnung CQS60 und einer Größe von 6,0 m mal 2,4 m. Die genauen Abmessungen sind in Tabelle 11 aufgeführt:

| <b>Bezeichnung</b> | <b>Stab-<br/>durchmesser<br/>[mm]</b> | <b>Stababstand<br/>längs/quer<br/>[mm]</b> | <b>Querschnitt<br/>längs/quer<br/>[cm<sup>2</sup>/m]</b> | <b>Gewicht je<br/>Matte<br/>[kg]</b> |
|--------------------|---------------------------------------|--|--|--------------------------------------|
| CQS60              | 6,0                                   | 150  | 1,88   | 44,78                                |

Tabelle 11: Technische Daten Betonstahlmatten [37]

Für die zu bewehrende Fläche von 200 m<sup>2</sup> werden 20 Stück dieser Betonstahlmatten benötigt. Bei einem Preis von etwa 0,70 €/kg ergeben sich Kosten von rund 630,00 €.

### 3.13.2 Transportkosten

Die Ermittlung des Gewichtes der Bodennägel und der Bewehrungsmatten ist nachfolgend aufgelistet:

| Element              | Anzahl      | Gewicht      | Gewicht         |
|----------------------|-------------|--------------|-----------------|
| Stahltragglied       | 3 Stk á 2 m | 3,29 kg/m    | 19,74 kg        |
| Kopplungsmuffe       | 2 Stk       | 0,42 kg/Stk  | 0,84 kg         |
| Kugelbundmutter      | 1 Stk       | 0,34 kg/Stk  | 0,34 kg         |
| Kalottenplatte       | 1 Stk       | 2,43 kg/Stk  | 2,43 kg         |
| Lehmbohrkrone        | 1 Stk       | 0,44 kg/Stk  | 0,44 kg         |
| Betonstahlmatte      | 0,2 Stk     | 44,78 kg/Stk | 8,78 kg         |
| <b>Summe Gewicht</b> |             |              | <b>32,57 kg</b> |

Tabelle 12: Gewicht je Bodennagel

Das Gewicht je Bodennagel beträgt rund 33 kg. Multipliziert mit der benötigten Anzahl von 102 Stück ergibt das eine Last von 3.322 kg oder rund 3,3 Tonnen.

Der angenommene Transportweg beträgt zwei mal 100 km und die Fracht kann mit einem LKW mit entsprechender Länge transportiert werden. Dabei beträgt der durchschnittliche Treibstoffverbrauch des LKWs rund 35 l/100 km. Die Kosten die für des Fahrzeugs anfallen werden mit 65 €/h angenommen, dabei sind das Gehalt des Fahrers mit 40 €/h, die Treibstoffkosten und die Miete für das Fahrzeug bereits enthalten.

| Element             | Zeit  | Einzelkosten | Kosten          |
|---------------------|-------|--------------|-----------------|
| Lkw & Fahrer        | 5 Std | 65,00 €/h    | 325,00 €        |
| <b>Summe Kosten</b> |       |              | <b>325,00 €</b> |

Tabelle 13: Transportkosten der Bodennägel

Es ergeben sich demnach Transportkosten für die gesamten Bodennägel inklusive Zubehörteile von etwa 325,00 €.

Die Kosten für den Transport des Betons setzen sich wie folgt zusammen. Vereinfacht wird angenommen, dass die Kosten für den Transport des Verpressmörtels gleich hoch sind.

| Element             | Menge                | Einzelkosten           | Kosten          |
|---------------------|----------------------|------------------------|-----------------|
| Verpressmörtel      | 10,00 m <sup>3</sup> | 23,00 €/m <sup>3</sup> | 230,00 € [36]   |
| Spritzbeton         | 30,00 m <sup>3</sup> | 23,00 €/m <sup>3</sup> | 690,00 € [36]   |
| <b>Summe Kosten</b> |                      |                        | <b>920,00 €</b> |

Tabelle 14: Transportkosten Beton und Mörtel

Es ergeben sich Transportkosten für Beton und Mörtel von rund 920,00 €.

### 3.13.3 Einbaukosten

Die Einbaukosten setzen sich jeweils zusammen aus den Kosten für Personal und den Kosten für die Geräte. Dabei sind folgende Schritte zu beachten:

- Abtragen der Böschung
- Aufbringen der Spritzbetonsicherung
- Herstellung der Bohrung
- Verpressen des Mörtels
- Anbringen der Kopfplatte

| Personal & Gerät für   | Menge                 | Einzelkosten           | Kosten             |
|------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|
| Abtragen der Böschung  | 800,00 m <sup>3</sup> | 20,00 €/m <sup>3</sup> | 16.000,00 €        |
| Aufbringen Spritzbeton | 200,00 m <sup>2</sup> | 20,00 €/m <sup>2</sup> | 4.000,00 €         |
| Bohrung und Injektion  | 612,00 m              | 13,00 €/m              | 7.956,00 €         |
| <b>Summe Kosten</b>    |                       |                        | <b>27.956,00 €</b> |

Tabelle 15: Einbaukosten

Die Einbaukosten ergeben sich somit zu rund 30.000,00 €. Zusätzlich müssen noch die Kosten für die Baustelleneinrichtung verrechnet werden. Diese werden überschläglich mit 5.000,00 € angenommen.

### 3.13.4 Gesamtkosten

Wie bereits erwähnt, setzen sich die Gesamtkosten aus Materialkosten, Transportkosten und Einbaukosten zusammen. Zur besseren Übersicht sind hier alle Einzelbeträge zusammengefasst.

| Kostenart              | Mengen                     | Kosten/Stk     | Kosten             |
|------------------------|----------------------------|----------------|--------------------|
| <b>Materialkosten</b>  |                            |                |                    |
| Bodennägel & Zubehör   | 102 Stk                    | 106,20 €/Stk   | 10.832,40 €        |
| Mörtel & Spritzbeton   | 30,0 & 10,0 m <sup>3</sup> | 61,80 €/Stk    | 6.303,60 €         |
| Betonstahlmatten       | 20 Stk                     | 31,35 €/Stk    | 627,00 €           |
| <b>Transportkosten</b> |                            |                |                    |
| Bodennägel & Zubehör   | 102 Stk                    | 3,20 €/Stk     | 325,00 €           |
| Mörtel & Spritzbeton   | 30,0 & 10,0 m <sup>3</sup> | 9,02 €/Stk     | 920,00 €           |
| <b>Einbaukosten</b>    |                            |                |                    |
| Einbau Gesamtsystem    | 102 Stk                    | 274,08 €/Stk   | 27.956,00 €        |
| Baustelleneinrichtung  | 1 Stk                      | 5.000,00 €/Stk | 5.000,00 €         |
| <b>Summe Kosten</b>    |                            |                | <b>51.436,00 €</b> |

Tabelle 16: Aufstellung Gesamtkosten

Zur Herstellung einer 25 m x 8 m großen Nagelwand mit Spritzbetonsicherung lassen sich Kosten in der Höhe von rund 51.440,00 € ermitteln, das bedeutet umgelegt rund 260,00 €/m<sup>2</sup> Böschungsfläche.

Alle angegebenen Preise verstehen sich als Nettopreise und sind daher exklusive 20 % Mehrwertsteuer.

Die Werte sind teilweise geschätzte Werte, beziehungsweise Erfahrungswerte und dienen daher nur als grobe Abschätzung und zum späteren Vergleich mit der Ausführung aus Bambus in Kapitel 7.

## 4 Holz und Bambus als Werkstoff

Derzeit kommen, wie aus den vorherigen Kapiteln der Arbeit ersichtlich ist, als temporäre Baugrubensicherungen beziehungsweise Böschungssicherungsmaßnahmen oftmals Spritzbetonwände mit Ankerstangen aus Stahl zur Anwendung. Dabei werden die Ankerstangen im Zuge des Aushubs eingebaut und verbleiben nach Fertigstellung des Bauwerks ohne Sicherungsaufgabe im Untergrund. Dies geschieht mangels Ausbaumöglichkeit, wodurch tonnenweise Stahl im Baugrund verloren geht. Um die Ressourcen zu schonen, beziehungsweise ein alternatives Bauverfahren zu entwickeln, soll untersucht werden, ob diese Ankerstangen aus Stahl durch Holz- oder Bambusausführungen ersetzt werden können. Diese würden im Boden verrotten und kein Hindernis für spätere Bauarbeiten darstellen. Als organische Bodennägel werden hier Bambusrohre ohne weitere Bearbeitung und Furnierschichtholzrohre aus Buche untersucht.

Die genauen Eigenschaften und die Machbarkeit werden im nachfolgenden Kapitel diskutiert.

### 4.1 Eigenschaften von Holz

Holz ist ein natürlicher Baustoff, dessen Eigenschaften richtungsabhängig sind. Wird der Werkstoff in Längsrichtung, in radialer Richtung oder in tangentialer Richtung betrachtet, ändern sich jeweils seine mechanischen Eigenschaften. Dieses Verhalten wird als Anisotropie bezeichnet. So sind zum Beispiel die Festigkeit und die Steifigkeit in Faserrichtung auf Grund des natürlichen Wachstums größer als jene Werte quer zur Faser. Die Festigkeit des Holzes wird außerdem von folgenden Faktoren beeinflusst:  
[38]

- Vorhandene Strukturstörungen
- Holzart
- Rohdichte
- Holzfeuchte
- Höhenverhältnis der Probe
- Statische oder dynamische Last
- Dauer der Lasteinwirkung

Die mittleren Festigkeiten der heimischen Holzarten sind in der nachfolgenden Tabelle 17 aufgelistet.

|                    | <b>Rohdichte</b><br>[kg/m <sup>3</sup> ] | <b>Druck<br/>parallel</b> | <b>Druck<br/>normal</b> | <b>Zug<br/>parallel</b> | <b>Zug<br/>normal</b> | <b>Biege-<br/>festigkeit</b> | <b>Abscheren</b> |
|--------------------|--|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------|
|                    |  | [N/mm <sup>2</sup> ]      |                         |                         |                       |                              |                  |
| <b>Nadelhölzer</b> |  |                           |                         |                         |                       |                              |                  |
| Fichte             | 430                                      | 50                        | 5,8                     | 90                      | 2,7                   | 78                           | 6,7              |
| Tanne              | 410                                      | 47                        | -                       | 84                      | 2,3                   | 73                           | 5,0              |
| Kiefer             | 490                                      | 55                        | 7,7                     | 104                     | 3,0                   | 100                          | 10,0             |
| Lärche             | 550                                      | 55                        | 7,5                     | 107                     | 2,3                   | 99                           | 9,0              |
| <b>Laubhölzer</b>  |  |                           |                         |                         |                       |                              |                  |
| Eiche              | 650                                      | 65                        | 11                      | 90                      | 4,0                   | 110                          | 11,0             |
| Buche              | 680                                      | 62                        | 9,5                     | 135                     | 7,0                   | 123                          | 8,0              |
| Esche              | 650                                      | 52                        | 11                      | 165                     | 7,0                   | 120                          | 12,8             |
| Robinie            | 730                                      | 73                        | 19                      | 148                     | 4,3                   | 150                          | 16,0             |

Tabelle 17: Mittlere Festigkeiten fehlerfreier Kleinproben [38]

Genauer wird hier Buchenholz in massiver Form, als stabförmiges Tragelement und als Formrolle aus Funierschichtholz betrachtet. Der Elastizitätsmodul von Buche liegt im Mittel bei circa 14.000 N/mm<sup>2</sup> und ist damit im oberen Bereich der heimischen Hölzer.



## 4.2 Eigenschaften von Bambus

Weltweit ist Bambus die am schnellsten nachwachsende Pflanze. Es wurden Spitzenwerte von bis zu 121 cm Wachstum pro 24 Stunden beim Moso-Bambus gemessen. Durchschnittliche Werte liegen bei etwa 25 cm pro Tag, was immer noch ein enormes Längenwachstum im Vergleich zu Holz ist. Doch so schnell der Bambus auch wächst, ebenso schnell kann er auch sterben. Nach der Blüte sterben die Halme ab. Dies kann zwar je nach Art zwischen 5 und 100 Jahre dauern, bedeutet aber, dass die tatsächliche Lebensdauer von der Blütezeit bestimmt wird. [39]

Ebenso wie beim Holz hängen die Eigenschaften des Bambus von den Klima- und Bodenverhältnissen, wie auch vom Alter, der Schlagzeit, dem Standort und dem Feuchtigkeitsgrad ab. Maßgeblich ist auch die Richtung der Belastung. Je nachdem ob eine senkrechte oder parallele Einwirkung zur Faser auftritt, werden unterschiedliche Werte gemessen.

Die Zugfestigkeit von Bambusrohren ist am höchsten in der Außenhaut. Daher sind kleinere Querschnitte zugfester, da diese flächenmäßig einen größeren Anteil der zugfesten Außenhaut haben. Ebenso verhält es sich bei der Elastizität. Auch hier sind die schlankeren Bambusrohre im Vorteil.

Ein ähnliches Verhalten tritt bei der Scherfestigkeit auf. Diese nimmt mit wachsender Scherflächengröße ab. Das heißt, auch hier können Rohre mit einem kleineren Durchmesser einen größeren Widerstand gegen einwirkende Kräfte entwickeln. Die in Tabelle 18 angegebenen Scherwerte stammen von Versuchen mit nodienlosem Material, also von Abschnitten in denen keine Zwischenhäute sind. Werte für ein Material, welches Nodien enthält, können um 50 % höher sein.

**Festigkeitseigenschaften von Bambus:**

| <b>Druckfestigkeit</b>   | <b>Ø 60 mm</b>  |                   |
|--------------------------|-----------------|-------------------|
| Parallel zur Faser       | 63,6            | N/mm <sup>2</sup> |
| Normal zur Faser         | 52,5 – 93,0     | N/mm <sup>2</sup> |
| <b>Zugfestigkeit</b>     | <b>Ø 80 mm</b>  |                   |
| Äußere Faserschicht      | 306,8 – 327,3   | N/mm <sup>2</sup> |
| Innere Faserschicht      | 148,4 – 163,3   | N/mm <sup>2</sup> |
| Ganze Wanddicke          | 162,7 – 215,1   | N/mm <sup>2</sup> |
| Nodienhaltiger Abschnitt | 227,7           | N/mm <sup>2</sup> |
| Nodienloser Abschnitt    | 291,1           | N/mm <sup>2</sup> |
| <b>Elastizitätsmodul</b> | <b>Ø80 mm</b>   |                   |
| Druck                    | 18.900          | N/mm <sup>2</sup> |
| Zug                      | 17.900 – 24.100 | N/mm <sup>2</sup> |
| Biegung (Ø 70 mm)        | 17.000 – 22.000 | N/mm <sup>2</sup> |
| <b>Biegefestigkeit</b>   | <b>Ø 75 mm</b>  |                   |
|                          | 76,3            | N/mm <sup>2</sup> |
| <b>Scherfestigkeit</b>   |                 |                   |
| Rohr                     | 14,7 – 22,2     | N/mm <sup>2</sup> |
| Stab                     | 16,9 – 23,1     | N/mm <sup>2</sup> |

Tabelle 18: Festigkeitseigenschaften von Bambus [7]

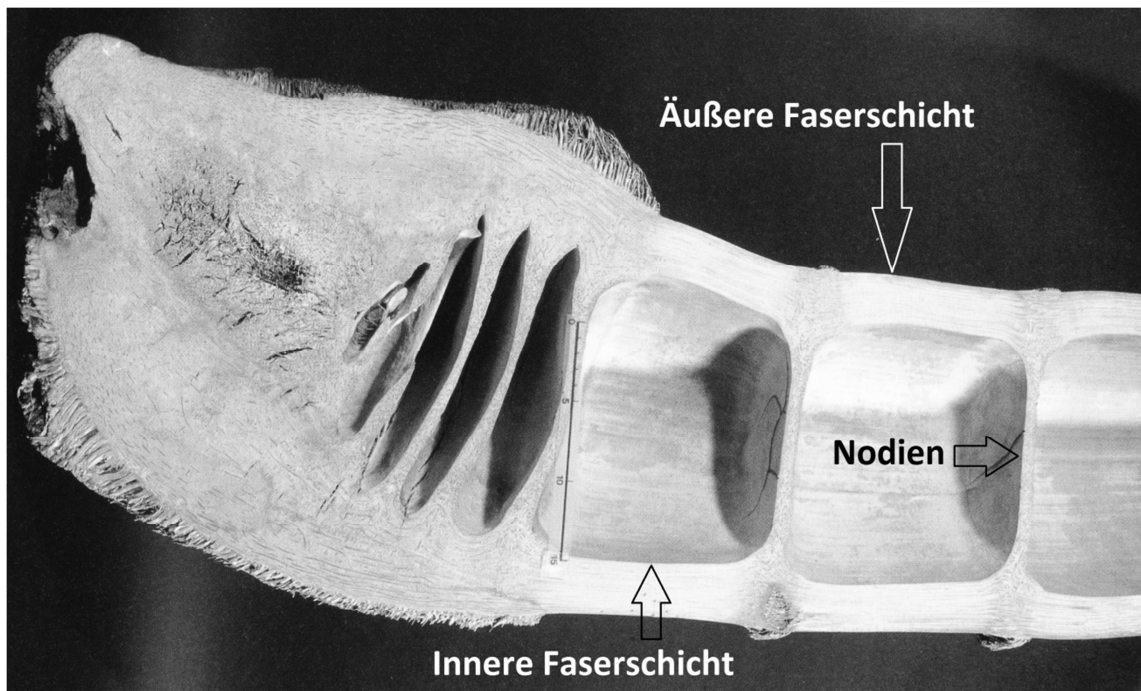


Abbildung 31: Schnitt durch ein Bambusrhizom [6]

Werden Druckwiderstandswerte in Bereichen von Nodien gemessen, sind diese deutlich größer als in nodienlosen Rohrabschnitten. So sind zum Beispiel Festigkeitswerte bei Druck parallel zur Faser um 8 % höher. Noch signifikanter ist dies bei Druck senkrecht zur Faser, hier kann eine Steigerung von 45 % im Vergleich zu nodienlosen Abschnitten gemessen werden. Anders ist dies bei Zugbelastungen, da hier Nodienstellen festigkeitsmindernd wirken. Aus Tabelle 18: *Festigkeitseigenschaften von Bambus* kann zudem entnommen werden, dass die Bambusaußenhaut eine wesentlich höhere Zugfestigkeit aufweist als die innere Faserschicht. [7]

Das Gewicht von Bambus liegt etwa zwischen  $370 \text{ kg/m}^3$  und  $850 \text{ kg/m}^3$ , was die Arbeit und den Transport des Materials im Vergleich zu Stahl wesentlich einfacher macht. Um die Zahlen greifbarer zu machen: ein Bambusrohr mit einer Länge von 5,0 m und einem Durchmesser von 10 cm wiegt etwas unter 20 kg. Im Vergleich dazu wiegt ein hohler Stahlstab mit einer ähnlichen Bruchlast und derselben Länge rund 36 kg. [15]

### 4.3 Feuchtigkeit

Die Materialeigenschaften von Holz und Bambus werden durch Feuchtigkeit in gleicher Weise beeinflusst. Dabei sind die mechanischen und die physikalischen Eigenschaften, wie auch die Möglichkeit der Weiterverarbeitung vom Wassergehalt des Rohstoffes abhängig. Das Quellen und Schwinden von Bambus erfolgt ebenso wie bei Bauholz. Dabei sind die Längen-, Breiten- und Dickenänderung bis zum Fasersättigungspunkt proportional zur Wasseraufnahme. Bei Wasserabnahme schwindet der Bambus wieder bis zu den ursprünglichen Abmessungen, wobei das Gefüge dabei nicht nachteilig beeinflusst wird.

Mit steigendem Wassergehalt sinkt allerdings die Widerstandsfähigkeit des Holz- und Bambusrohrs, dadurch ist es anfälliger für tierische und pflanzliche Schädlinge. Die wasser- und nährstoffgesättigten Fasern bieten zudem einen idealen Lebensraum für Tiere. [7]

#### 4.4 Schutzmaßnahmen

Unter Schutzmaßnahmen sind all jene Vorkehrungen zu verstehen, die die Funktionsfähigkeit und Gebrauchsdauer von Holz und Holzwerkstoffen verlängern und unterstützen. Dabei ist zwischen nicht-chemischen und chemischen Maßnahmen zu unterscheiden. Nachfolgende Punkte gelten sowohl für Holz, als auch für Bambus. [40]

1. Nicht-chemische Maßnahmen:

Dazu zählt zum Beispiel der natürliche Holzschutz, bei dem darauf geachtet wird, dass das Holz der Anwendung entsprechend ausgewählt wird und dadurch Pilzen und Insekten widerstehen kann.

Weiters gehören zum nicht-chemischen Holzschutz bauliche und konstruktive Maßnahmen, bei welchen darauf geachtet wird, dass der Baustoff nicht mit beispielsweise Wasser in Berührung kommt, beziehungsweise Insekten ferngehalten werden.

2. Chemische Maßnahmen:

Bei den chemischen Schutzmaßnahmen ist zu aller erst zwischen bekämpfenden und vorbeugenden Schutzmaßnahmen zu trennen. Die bekämpfenden Mittel werden eingesetzt, wenn bereits Befall besteht und die Schadorganismen vernichtet werden müssen. Im Gegensatz dazu steht der vorbeugende chemische Schutz, bei dem, wie die Bezeichnung schon sagt, im Vorhinein ein Befall verhindert wird.

Je nach Eindringtiefe und Verteilung des Schutzmittels wird auch noch zwischen folgenden Schutzarten unterschieden: Oberflächenschutz, Randschutz, Tiefenschutz. Dabei ist der Tiefenschutz die Maßnahme, die die längste Lebensdauer eines Holzwerkstoffes gewährleisten kann. [40]

Ob nun für die Anwendung von Holz und Bambus als Bodennagel ein chemischer oder nicht-chemischer Schutz nötig ist, muss von Fall zu Fall geklärt werden. Dabei hängt es davon ab, wie lange die Konstruktion wirksam sein soll. Bei kurzzeitigen Anwendungen über wenige Monate hinweg, werden zusätzliche Schutzmaßnahmen hinfällig sein. Bei längeren Einsätzen bis zu einem Jahr muss geprüft werden, welche Bodenverhältnisse anstehen und welche Vorkehrungen sinnvoll sind.

### 4.5 Schädlinge

Was den Schaden an Bambus durch Tiere betrifft, geschieht vieles davon schon während des Wachstums. Dabei treten weidende Ziegen oder Rinder auf das junge Blattwerk oder zerstören die Rhizome. Der Schädling, der auch nach dem Fällen noch einen großen Schaden anrichten kann, ist der sogenannte Bohrkäfer. Er zerlöchert das Material bis es nicht mehr brauchbar ist. [7]

Bei Holz können biologische Schädlinge entweder Pilze, Insekten oder Mistelbewuchs sein. Genauer wird auf dieses Thema allerdings nicht eingegangen, sondern es wird nur auf das Skriptum Holzbau – Der Roh- und Werkstoff Holz von Gerhard Schickhofer, verwiesen. [38]

Bei den Ankerstäben aus Holz und Bambus handelt es sich um temporäre Sicherungsmaßnahmen, die nach der Nutzungsdauer im Boden verbleiben und verrotten sollen. Daher ist es sogar erwünscht, dass diese zerfallen und ihre Tragfähigkeit verlieren. Wie lange es bei welchen Umgebungsbedingungen dauert, bis ein Zerfall des jeweiligen Materials eintritt, muss genauer untersucht werden. Damit kann die Standsicherheit bis zu dem gewünschten Zeitpunkt garantiert werden. Dies muss in umfangreichen Versuchen geschehen, die über längeren Zeitraum beobachtet werden, und ist daher nicht Teil dieser Arbeit.

### 4.6 Haltbarkeit bei Erdkontakt

Der direkte Kontakt zwischen Erde und Holz beziehungsweise Bambus wird bei der Konstruktion als Ankerstab nicht auftreten, da der Stab immer noch mit einem Zementmörtel oder ähnlichem umgeben ist. Es kann zwar passieren, dass durch die Zug- und Schubbeanspruchung der Bodennägel Risse in der Ummantelung entstehen, dabei wird aber maximal Wasser bis zum Holz oder Bambus vordringen. Die so entstandenen Risse werden sich im unteren Millimeter-Bereich abspielen und daher keinen Eintrag von Bodenmaterial ermöglichen. Die Problematik liegt damit im Quellen und Schwinden der Materialien Holz und Bambus, zum Beispiel während des Einbauprozesses und dem damit verbundenen Kontakt mit dem Verpressgut.

#### 4.7 Kombination organischer und mineralischer Baustoff

Die Verbindung von organischen und mineralischen Baustoffen, also von Holz oder Bambus und Beton beziehungsweise Zement, stellt in chemischer Hinsicht kein Problem dar. Dies zeigt sich an den vielen bereits vorhandenen Anwendungen. Zum Beispiel wurde in den 1920ern aufgrund von Mangel an Bewehrungsstahl, Holz als Tragkonstruktion in Verbindung mit Beton verwendet. [41] Weitere Beispiele finden sich im Brückenbau mit den Holz-Beton-Verbundbrücken, sowie im kleineren Bereich beim Spielplatzbau und Möbelbau.

Problematisch könnte es da eher bei einem mögliche Abbruch oder Rückbau werden. Laut Abfallwirtschaftsgesetz BGGl. Nr. 325/1990 heißt es: [42]

*„Wer die Ausführung einer Bau- oder Abbruchtätigkeit im Rahmen eines Bauvorhabens veranlasst, hat aus den dabei anfallenden Materialien folgende Stoffgruppen zu trennen, sofern die nachstehend angeführte Mengenschwelle je Stoffgruppe überschritten wird.“*

| Stoffgruppe             | Mengenschwelle |
|-------------------------|----------------|
| Bodenaushub             | 20 t           |
| Betonabbruch            | 20 t           |
| Asphaltabbruch          | 5 t            |
| Holzabfälle             | 5 t            |
| Metallabfälle           | 2 t            |
| Kunststoffabfälle       | 2 t            |
| Baustellenabfälle       | 10 t           |
| Mineralischer Bauschutt | 40 t           |

Tabelle 19: Stoffgruppen [42]

Wie aus Tabelle 19 ersichtlich ist, kann es bei größeren Mengen zu einer verpflichtenden Trennung kommen. Dies ist bei einer Verbindung von Zement und Holz beziehungsweise Bambus nicht nur extrem zeitaufwendig, sondern auch sehr teuer.

### 4.8 Formgebung

Um die ideale Form eines Körpers gegenüber einer Lasteinwirkung zu ermitteln, ist es notwendig sowohl den Elastizitätsmodul, wie auch des Flächenträgheitsmoment zu kennen. Dabei ist der E-Modul ein Materialkennwert und kann für Buchenholz mit etwa 14.000 N/mm<sup>2</sup> [38] und für Bambus mit etwa 20.000 N/mm<sup>2</sup> [7] angenommen werden. Die Flächenträgheitsmomente können für die als Ankerstab am ehesten eingesetzten Querschnitte aus der nachfolgenden Tabelle 20: *Flächenmomente 2. Grades* entnommen werden.

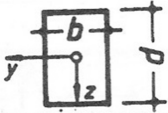





| Querschnitt   | A                              | I <sub>y</sub>                     | I <sub>z</sub>             |
|---|--------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
|    | $b * d$                        | $\frac{b * d^3}{12}$               | $\frac{d * b^3}{12}$       |
|   | $r^2 * \pi$                    | $\frac{r^4 * \pi}{4}$              |                            |
|  | $\frac{\pi}{4} * (D^2 - d^2)$  | $\frac{\pi}{64} * (D^4 - d^4)$     |                            |
|  | $\frac{3 * \sqrt{3} * s^2}{2}$ | $\frac{5 * \sqrt{3} * s^4}{16}$    |                            |
|  | $\frac{\pi}{4} * a * b$        | $\frac{\pi}{64} * a * b^3$         | $\frac{\pi}{64} * a^3 * b$ |
|  | $2,828 * R^2$                  | $\frac{1 + 2 * \sqrt{2}}{6} * R^4$ |                            |

Tabelle 20: Flächenmomente 2. Grades [43]

Mithilfe dieser Flächenträgheitsmomente können wiederum die Widerstandsmomente der einzelnen Querschnitte errechnet werden. Diese stellen dann den Widerstand gegen Biegung bei einer einwirkenden Kraft mit Hebelarm dar.



## 4.9 Tragfähigkeit des Systems

Da es sich bei beiden Systemen um eine neuartige Art der Anwendung handelt, gibt es, vor allem bei dem Furnierschichtholzrohr, keine vorhandenen Messwerte. Daher müssen diese, speziell auf das Verhalten im Boden bezogen, neu ermittelt werden.

Die Tragfähigkeit des Systems wird in Versuchen ermittelt, welche in Kapitel 8 genau beschrieben werden. Die bereits durchgeführten Belastungen sind nachfolgend in diesem Kapitel dargestellt.

### 4.9.1 Furnierschichtholzrohr

Das von Sebastian Hirschmüller an der Hochschule Rosenheim in Deutschland entwickelte Holzrohr, wird zurzeit noch in Einzelproduktion hergestellt. Das derzeit hergestellte Rohr weist einen Außendurchmesser von 90 mm und einen Innendurchmesser von 60 mm auf. Eine Vorrichtung zur Messung von maximal möglichen Zugkräften konnte aus finanziellen Gründen noch nicht hergestellt werden. Es wurden allerdings bereits ein Druckversuch mit einem 240 mm langen Stück durchgeführt, dessen Ergebnis in der nachfolgenden Abbildung 32 dargestellt ist.

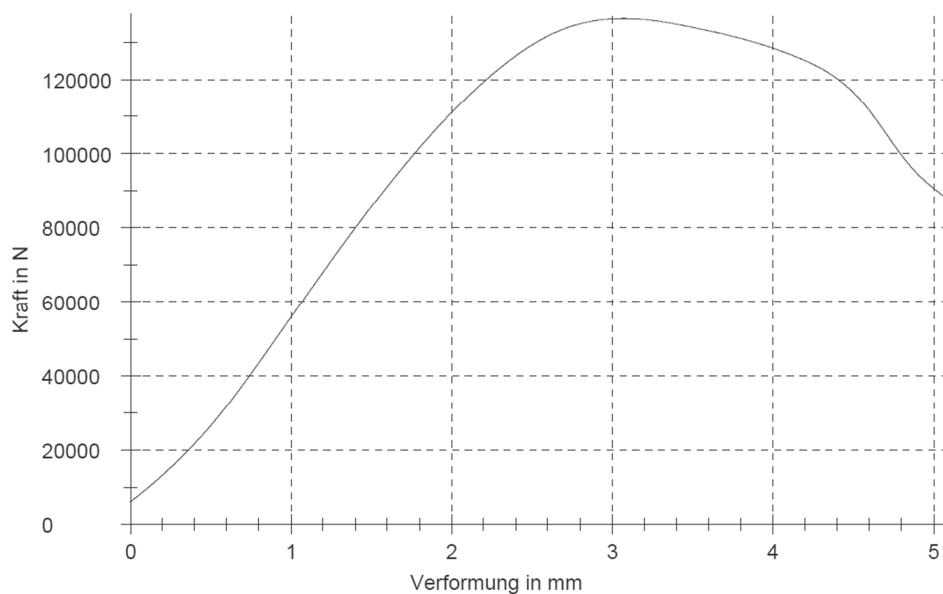


Abbildung 32: Druckversuch [44]

Ersichtlich ist, dass eine maximale Druckbelastung von 136,45 kN möglich ist, bevor der Bruch eintritt, der als Bartbruch auftritt. Das entspricht einer Druckfestigkeit von rund 38,60 N/mm<sup>2</sup>. Dabei kommt es zu einer Verformung von etwa 3 mm bis zum Versagen.

### **4.9.2 Bambus**

Die Festigkeitseigenschaften von Bambus können dem Kapitel 4.2 entnommen werden. Bei dem verwendeten Bambus handelt es sich um das naturbelassene Produkt, daher gibt keine Änderung der Eigenschaften zum Beispiel aufgrund von speziellen Verarbeitungstechniken.

### 4.10 Verbindung – Verlängerung

Um auf die gewünschte Einbaulänge von Bodenvernagelungen zu kommen, kann es nötig sein zwei oder mehrere Teilstücke miteinander zu verbinden. Dabei ist es wichtig, die wirkenden Kräfte zu übertragen.

Die Verbindungstechnik im Holzbau ist eine über Jahrhunderte entwickelte Technik, die von Versätzen über Dübelverbindungen, Nagel- und Klammerverbindungen, Schraubverbindungen bis hin zu Klebverbindungen reicht. Dabei ist stets auf die Belastungsrichtung, ob Zug oder Druck wirkt, zu achten. Je nach Einwirkung kann dann die passende Verbindungsart gewählt werden. [43]

Bei der Herstellung der Furnierschichtholzrohre wurde ausschließlich auf Verbindungen in Klebtechnik gesetzt. Es wurde ein 1-Komponenten Polyurethan-Klebstoff verwendet, da dieser nach dem Aushärten reaktionsarm ist und daher keine Gefahr für den Boden darstellt. Dadurch kommen keine weiteren Fremdstoffe in den Untergrund.

In Abbildung 33 sind die Prototypen der Rohre aus Buchenschäl furnier zu sehen. Mit den geeigneten Maschinen könnten diese Rohre in jeder beliebigen Länge hergestellt werden. Dazu werden die beiden Halbschalen mit einigen Zentimetern Versatz aufeinander geklebt. Sie sind innen hohl und können daher auch problemlos verpresst werden.



Abbildung 33: Furnierschichtholzrohre aus Buche [44]

Die Verlängerung von Bambusrohren ist da schon schwieriger. Es gibt zwar unzählige Arten von Verbindungen, jedoch sind die wenigsten zur Verlängerung in eine Richtung und für Zugbelastungen geeignet.

Zusätzlich gibt es kaum Stöße die ohne Querschnittsvergrößerung funktionieren. Mit größerem Querschnitt ist allerdings das Einbringen in das Bohrloch nicht möglich und die maximale Einbaulänge beschränkt sich auf die natürliche Wuchslänge des Bambus.

In Abbildung 34 ist eine Liste von bewährten Knotenpunkten zu sehen. Wie zu erkennen ist, stehen die Anschlusspunkte in einem gewissen Winkel aufeinander und sind daher nicht für die Verlängerung zur Herstellung von Bodennägeln aus Bambus geeignet.

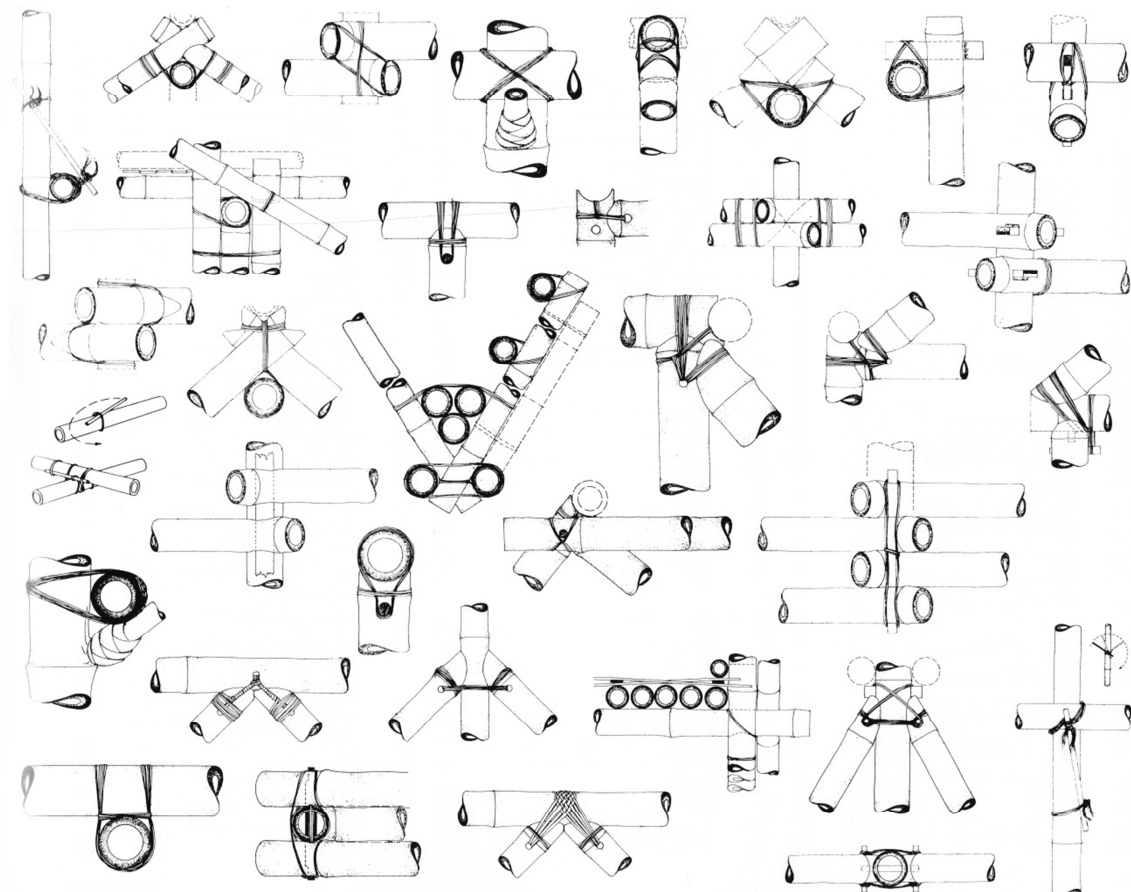


Abbildung 34: Vorhandene Verbindungen von Bambus [7]

#### 4.11 Verzahnung

Um das Hinausrutschen des Nagels aus dem Mörtelkörper zu verhindern, ist es notwendig, entweder einen festen Verbund zwischen Holz beziehungsweise Bambus und Verpressmörtel herzustellen, oder eine Verzahnung zu gewährleisten. Der Verbund kann dann schwierig werden, wenn die Bewegungen von Holz oder Bambus und dem Mörtel infolge des Abbindevorganges unterschiedlich sind. Je nachdem wie stark das Holz, beziehungsweise der Bambus durch die Wasseraufnahme aus der Suspension quillt und anschließend wieder schwindet, müssen zusätzliche Maßnahmen getroffen werden. Eine Möglichkeit ist die Herstellung einer Verzahnung oder eines konischen Nagels. Die ist beim Bambus durch das natürliche Wachstum, gegeben. Wird nun das Bambusrohr mit dem dicken Ende voraus in das Bohrloch geschoben, kann es nach dem Verpressen, auch bei einer möglichen Schwindbewegung, nicht mehr aus dem Loch gleiten. Ein ähnliches Prinzip könnte auch bei Vollholz angewandt werden, indem der Stab wie in Abbildung 35 dargestellt ist, gefertigt wird.

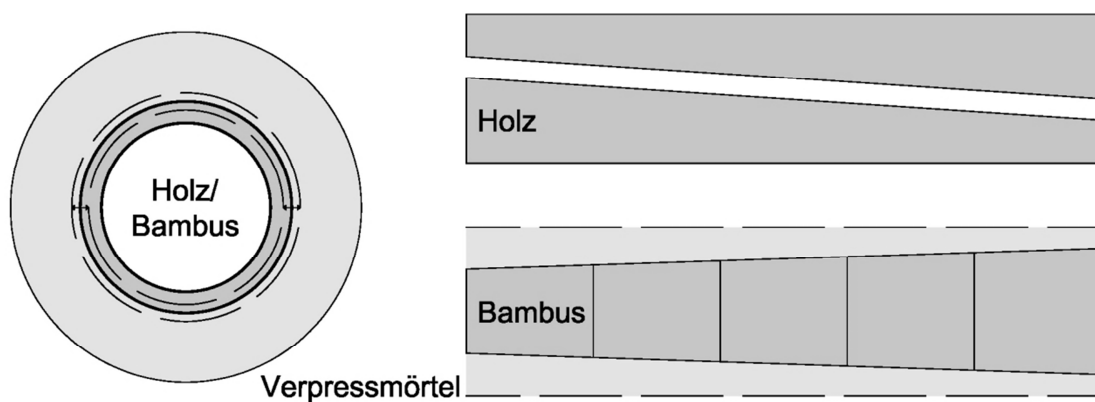


Abbildung 35: Schwindbewegung von Holz und Bambus

## 5 Vordimensionierung

In welcher Form ein mögliches Versagen einer Böschung eintritt, hängt auf der einen Seite von den Bodeneigenschaften und auf der anderen Seite von der Art der Belastung ab. Um sich die Versagensformen einer Nagelwand beispielhaft vorstellen zu können, wurde ein Berechnungsmodell mit dem Programm Slide der Firma Roc Science erstellt. Damit soll versucht werden, die wirkenden Kräfte und die möglichen Gleitflächen anschaulich darzustellen und den Sicherheitsfaktor zu ermitteln.

Die Bodenparameter wurden wie folgt angenommen.

| Parameter      |           | Einheit                 |
|----------------|-----------|-------------------------|
| Wichte Boden   | $\gamma$  | 20,00 kN/m <sup>3</sup> |
| Reibungswinkel | $\varphi$ | 27,5 °                  |
| Kohäsion       | c         | 5,00 kN/m <sup>2</sup>  |

Tabelle 21: Bodenparameter

Die Höhe des Geländesprungs beträgt rund 6,00 m mit einer Neigung von 80°. Da es sich bei dem Modell um eine zweidimensionale Abbildung handelt, sind Längenabmessungen nicht nötig. Der Abstand der Nägel aus der Ebene kann bei den Eigenschaften der Nägel definiert werden und wird mit 1,50 m angenommen.

In Abbildung 36 ist der maßgebende Gleitkreis des Versagens zu sehen, wenn keine Stützmaßnahmen in Form von Bodennägeln eingebaut werden. Zuzufolge der rechnerischen Kohäsion von  $5 \text{ kN/m}^2$  sind die oberflächennahen Gleitkreise nicht maßgebend. Der Einfachheit halber wurden kein Zugriss beziehungsweise keine offene Kluft im Kopfbereich des Gleitkreises berücksichtigt.

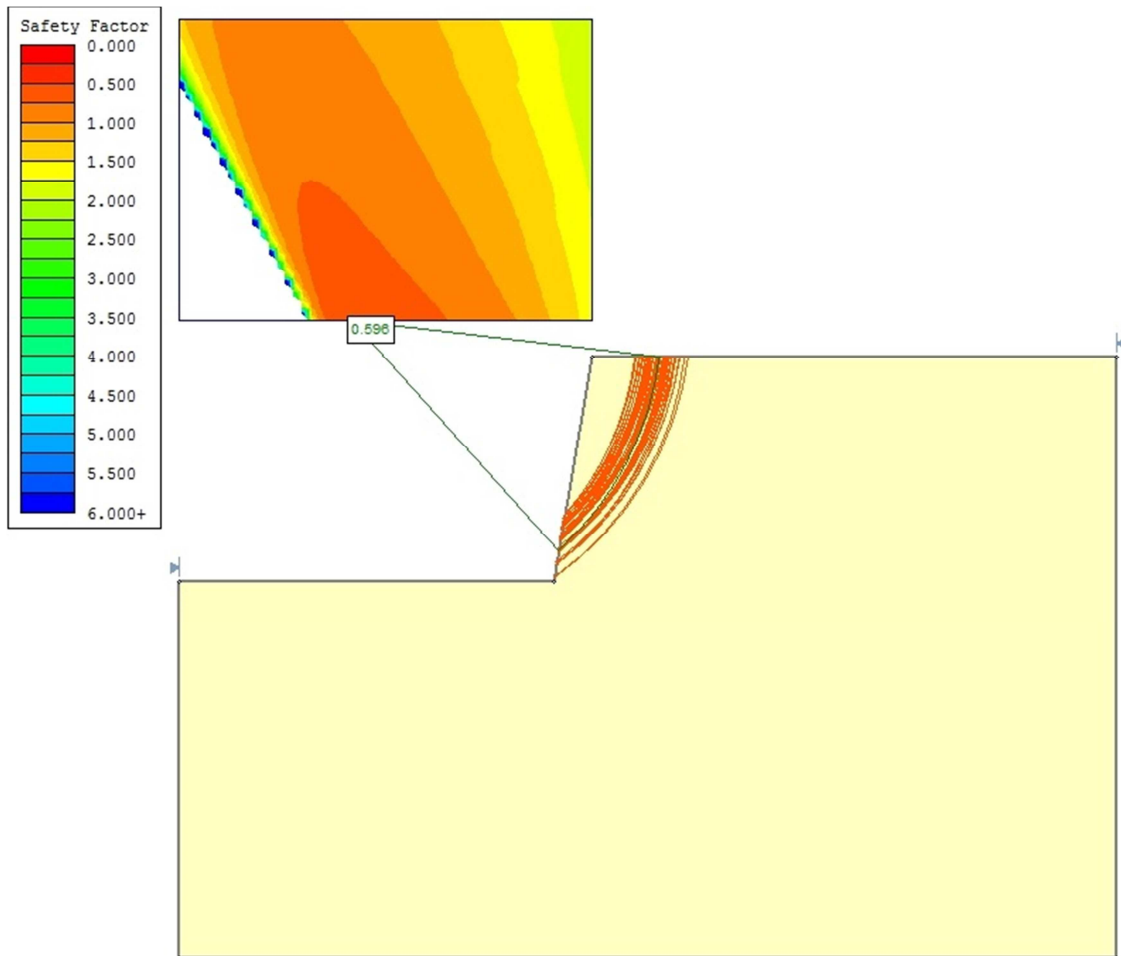


Abbildung 36: Versagen ohne Stützmaßnahmen

Zu erkennen ist, dass ohne Sicherung nur eine rechnerische Sicherheit von 0,598 gegeben ist. Der geforderte Sicherheitsfaktor wurde für diesen Fall mit  $\eta \geq 1,2$  festgelegt.

Um die gewünschte Sicherheit zu erreichen, kann im Programm Slide mit einer sogenannten Back Analysis vorgegangen werden. Mit dieser kann der Gleitkreis angezeigt werden, ab dem die gewünschte Sicherheit herrscht. In diesem Fall wurde der Faktor 1,20 eingegeben. Zusätzlich ist aus der Grafik ersichtlich, welche horizontale Stützkraft dem Gleitkeil entgegengebracht werden muss. Diese ergibt sich zu rund 112 kN/m in der Mitte des Geländesprungs.

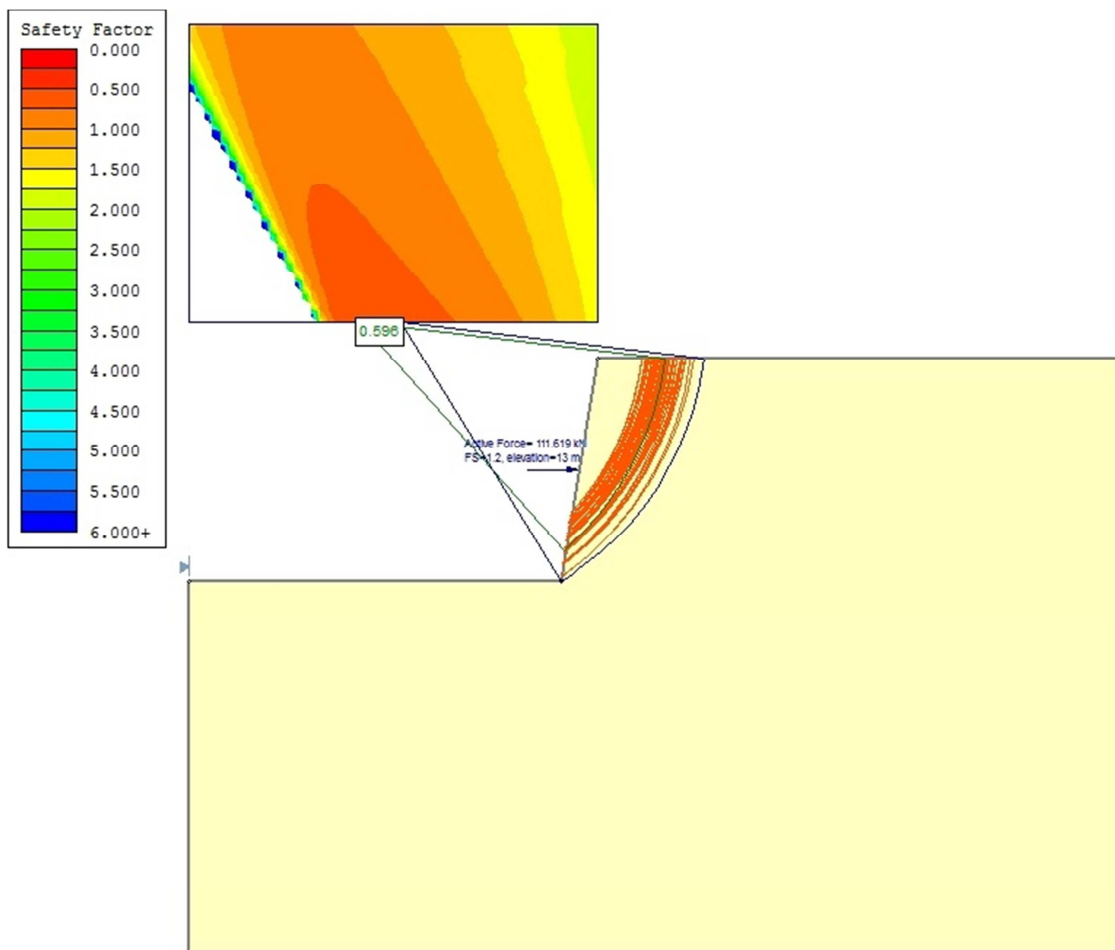


Abbildung 37: Back Analysis für die rückhaltende Kraft

Mit dem Measure Tool kann der Abstand zwischen Geländeanschnitt und dem berechneten Gleitkreis gemessen werden und ergibt in diesem Fall circa 2,4 m bis 2,8 m. Die verwendeten Nägel sollten daher mindestens eine Länge von 3,5 m haben und damit über die Gleitfuge reichen.



## 5.1 Bambus

Es werden Bodennägel mit einem Winkel von  $10^\circ$  zur Horizontalen und einer Länge von 4,0 m eingebaut. Das Material der Nägel kann im Programm definiert werden und entspricht den Eigenschaften des Bambusrohres mit dem Durchmesser von 100 mm. Über die Höhe von 6,00 m wurden 3 Bodennägel mit dem vertikalen Abstand von 1,70 m eingebracht.

### Bambus

---

|                   |        |                   |
|-------------------|--------|-------------------|
| Zugfestigkeit     | 200,00 | N/mm <sup>2</sup> |
| Scherwiderstand   | 16,00  | N/mm <sup>2</sup> |
| Ausziehwiderstand | 35,00  | kN/m              |

Tabelle 22: Festigkeitseigenschaften des Bambusrohres

Die eigentliche Scherfestigkeit von Bambus beträgt  $20 \text{ N/mm}^2$ , da der Boden allerdings nicht ausreichend steif ist und daher ein Abscheren nur in Kombination mit Biegung möglich ist, wurde dieser Wert reduziert. Der Ausziehwiderstand beträgt bei einem Rohr mit dem Durchmesser 100 mm und einem Bohrdurchmesser von 150 mm in einem feinkorndominierten Boden mit halbfester bis steifer Konsistenz etwa  $35,0 \text{ kN/m}$ . Die an der Kopfplatte aktivierte Kraft wurde mit  $35,0 \text{ kN}$  angenommen.

Mithilfe der Farbskala, beziehungsweise mit den dargestellten Gleitkreisen mit der geringsten Sicherheitszahl von  $\eta = 1,234$  ist zu erkennen, dass die gewünschte Sicherheit von 1,20 erreicht wurde. Ebenso eingezeichnet sind die maximal mobilisierbaren Kräfte der Bodennägel.

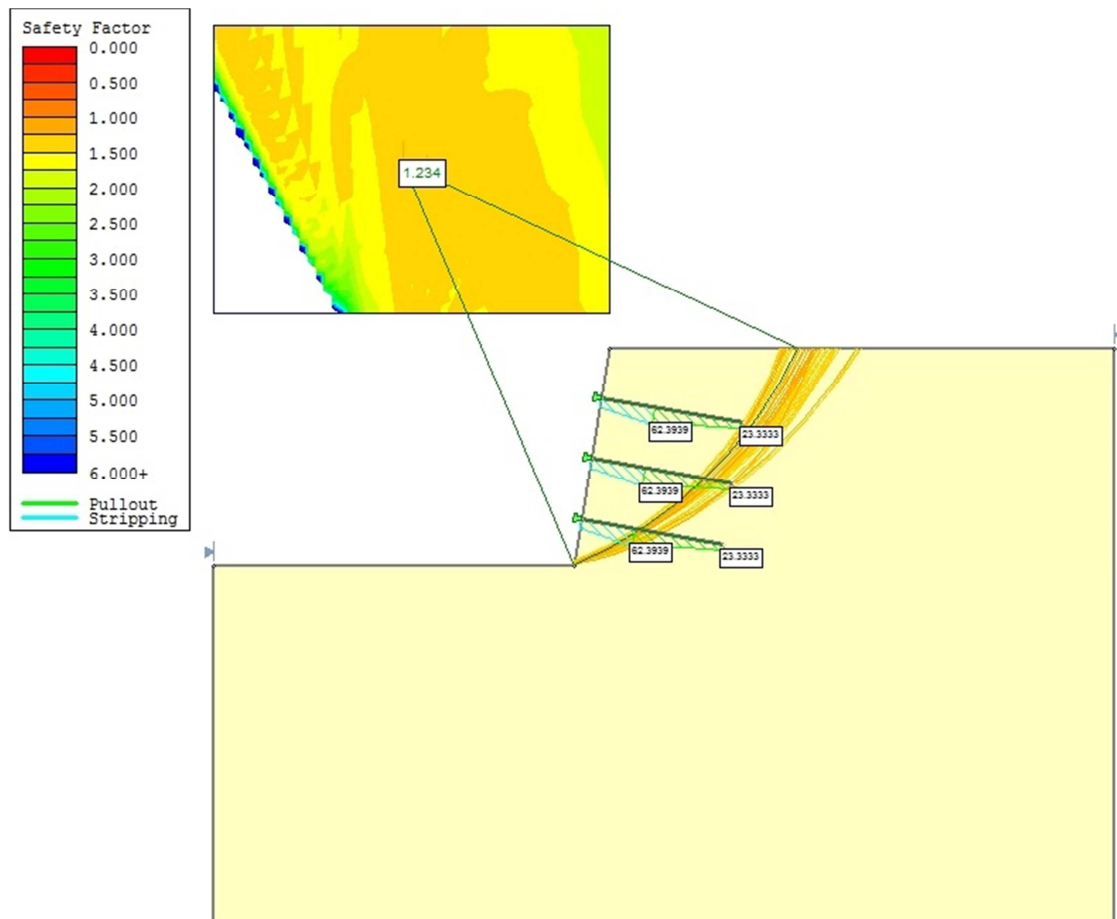


Abbildung 38: Eingebaute Bodennägel aus Bambus mit 10° Neigung

## 5.2 Stahl

Um im weiteren Verlauf der Arbeit den Kostenvergleich zwischen Stahl und Bambus führen zu können, muss ermittelt werden, welche Länge die Stahlzugglieder haben müssen. Dazu werden die Materialeigenschaften der Bodennägel geändert.

Bei den eingebauten Stahltraggliedern handelt es sich um Betonstahl der Güte BSt500S mit einem Durchmesser von 32 mm. Die Bodennägel werden mit einem Winkel von 15° zur Horizontalen eingebaut und weisen eine Länge von 5,00 m auf. Die Festigkeitseigenschaften sind aus Tabelle 23 zu entnehmen.

### Stahl

---

|                    |        |                   |
|--------------------|--------|-------------------|
| Zugfestigkeit      | 550,00 | N/mm <sup>2</sup> |
| Scherwiderstand    | 25,00  | N/mm <sup>2</sup> |
| Auszieh Widerstand | 20,00  | kN/m              |

Tabelle 23: Festigkeitseigenschaften der Stahlnägel

Ebenso wie bei Bambus muss der Scherwiderstand reduziert werden. Stahl hätte eine Scherfestigkeit von rund 440 N/mm<sup>2</sup>. Da das Stahltragglied, beziehungsweise das Bohrloch einen geringeren Durchmesser als die Bambusausführung hat und damit die mögliche Angriffsfläche kleiner ist, verringert sich auch der Scherwiderstand im Vergleich zu Bambus. Ähnlich verhält es sich beim Auszieh Widerstand, da der Umfang und damit die Mantelfläche kleiner sind, ist weniger Reibungsfläche vorhanden. Daher wird der Widerstand mit 20 kN/m angenommen.

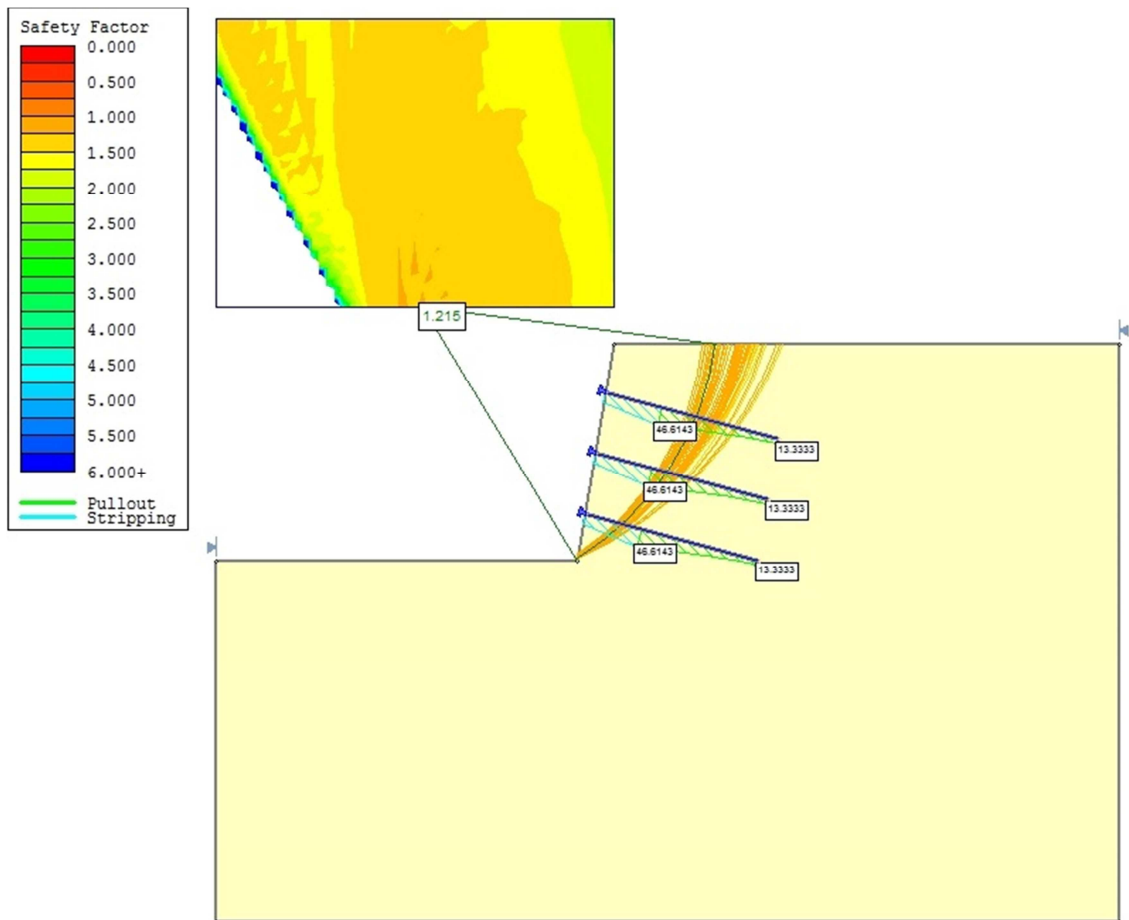


Abbildung 39: Eingebaute Bodennägel aus Stahl mit 15° Neigung

Bei der Ausführung aus Stahl werden Bodennägel mit einer Länge von 5,0 m benötigt um eine Sicherheit von über 1,20 zu gewährleisten.

### 6 Einbau Bambus

Um die Einbaubarkeit und das Verhalten von Bambus und Buche als Bodennagel beurteilen zu können, wurden einige Stangen unter Baustellenbedingungen eingebaut. Da die Herstellung der Buchenfurnierholzrohre noch nicht in benötigter Länge möglich ist, werden der Einbau und die Versuche mit Bambusrohren durchgeführt.

Dabei handelt es sich um zwei unterschiedliche Bambusarten mit verschiedenen Vorbehandlungen. Wie in Abbildung 40 zu erkennen ist, gibt es eine hellere und eine dunklere Sorte. Bei der helleren Bambusart handelt es sich um den aus China importierten Moso-Bambus (*Phyllostachys Pubescens*). Dieser wurde lediglich gebleicht, daher auch die hellere Farbe, ansonsten aber nicht weiter behandelt. Die dunkleren Bambusrohre stammen aus Kolumbien und wurden mit Borsalz behandelt, was einen Pilz- und Insektenbefall verhindern soll. Die Bezeichnung dieser Bambusunterart ist *Guadua Natur* oder *Guadua Angustifolia*.

Die geeignete Baustelle für den Einbau wurde von der Firma Hinteregger zur Verfügung gestellt und befindet sich in der Nähe von Opponitz in Niederösterreich. Dabei handelt es sich um die Sanierung eines Wasserstollens, bei der eine Zufahrtsstraße verlegt werden musste. Durch die neue Linienführung kam es zu einem Böschungsanschnitt, der gesichert werden musste. Dies geschah mit konventionellen Bodennägeln aus Stahl und einer Spritzbetonschale zur Sicherung der Oberfläche. In den Zwischenräumen wurden Bambusstäbe eingebaut, die allerdings keine tragende Wirkung haben und nur zum Versuch der Einbaufähigkeit und im weiteren Verlauf zur Untersuchung des Ausziehwiderstandes dienen.

### 6.1 Übersicht Einbau

Wie auf Abbildung 40 zu erkennen, war die eigentliche Sicherung der Böschung bereits abgeschlossen. Nun wurden in einem horizontalen Abstand von 1,25 m und einer Höhe von etwa 1,50 m Markierungen angebracht, an denen die Bohrungen durchgeführt wurden.



Abbildung 40: Positionen für die Bohrungen

### 6.2 Verrohrte Bohrung / unverrohrte Bohrung

Ist der Boden nicht standfest und verbricht nach der Bohrung in das abgeteufte Loch hinein, muss dieses gestützt werden. Das kann zum Beispiel mit Hilfe einer Verrohrung geschehen. Da dieses Verfahren allerdings teuer und aufwendig ist, kommt es bei der Herstellung von Bodennägeln eher selten zur Anwendung. Vorgezogen wird eine unverrohrte Bohrung, die mit Suspension gestützt wird.

Beim Einbau der Bambusstäbe in Opponitz war weder das eine, noch das andere Verfahren notwendig, da der Boden eine hohe Standfestigkeit aufwies und das

Bambusrohr ohne größere Probleme eingeschoben werden konnte. Einzig bei der ersten Bohrung war ein Stein am Rand des Bohrloches, an dem sich das Stahlgestänge problemlos vorbeibewegte. Der Bambus, welcher steifer ist und einen größeren Durchmesser hat, passte nicht vorbei. Somit wurde dieses Loch ausgelassen. Bei den weiteren Bohrungen konnten die Bambusrohre ohne Hindernisse eingeführt werden.

### 6.3 IBO-Vorbohrung

Zur Erstellung der Bohrlöcher mit einer Länge von 6,0 m und einer Neigung von etwa 10° wurde die Vorbohrung mittels IBO-Anker gewählt. Dabei wurde eine Lehmbohrkrone der Marke Ischebeck TITAN mit dem Durchmesser 150 mm verwendet. Das Gestänge zum Bohren hatte einen Durchmesser von 52 mm und bestand aus zwei zusammengesetzten Stücken mit den Längen 3,0 m und 4,0 m.

Durchgeführt wurden die Bohrungen mit einem Bagger mit aufgesetzter Bohrlafette. In der nachfolgenden Abbildung 41 sind alle beschriebenen Elemente zu sehen.



Abbildung 41: Bagger mit Bohrlafette

## 6.4 Spülung und Injektion

Um während der Bohrung das Material an die Oberfläche zu transportieren, muss gespült werden. Diese Spülung kann entweder mittels Suspension, Wasser oder Luft erfolgen. Bei großen Bohrungen wie dem 150 mm-Loch ist allerdings mit einem großen Suspensions- beziehungsweise Wasserverlust zu rechnen. Das bedeutet gleichzeitig hohe Kosten im Fall der Suspensionsspülung, beziehungsweise eine Aufweichung bei bindigem Baugrund bei Wasserspülung. Daher wurde bei den Versuchsbohrungen mit Druckluft gespült. Durch die eingeblasene Luft wurde das gelöste Material an die Oberfläche befördert. Zusätzlich wurde während des Abteufens die Ankerstange immer wieder zurückgezogen, was ein Verstopfen des Hohlraums durch das lose Bodenmaterial verhinderte.



Abbildung 42: Spülung mit Druckluft

Nach Erreichen der Bohrlochtiefe von bis zu 6,0 m wurde das Bohrgestänge ganz heraus gezogen. Der Druckluftschlauch wurde abgeschlossen und durch einen Schlauch zur Injektionspumpe ersetzt. Mit dieser wurde der Zement in das Bohrloch gepresst.



Verwendeter Zement:

- EN 197-1-CEM II/B-M (S-L) 32,5 R

Dabei handelt es sich um einen Portlandkompositzement mit den Hauptbestandteilen Hüttensand und Kalkstein. Der Zement weist nach 2 Tagen eine Festigkeitsentwicklung von mindestens 10 N/mm<sup>2</sup> und nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 32,5 N/mm<sup>2</sup> bis 52,5 N/mm<sup>2</sup> auf. [43]



Abbildung 43: Einbringen der Suspension

Vom Bohrlochtiefsten aus wurde langsam die Zementsuspension eingebracht. Dabei wurde der Zement durch den IBO-Anker gepumpt und trat an der Bohrkrone aus. Um eine vollständige Verfüllung des Hohlraums zu gewährleisten, wurde die Lanze immer wieder schrittweise hinein und hinaus gezogen. Tritt die Zementsuspension an der Oberfläche aus, ist dieser Vorgang abgeschlossen und es wird zum Einbringen des Bambusrohres übergegangen.

### 6.5 Einbringung

Da das Bambusrohr auf einer Länge von 6,0 m nur ein Gewicht von rund 20 kg hat, kann es gewöhnlich von einer Person getragen werden. Zum Ausrichten und Einschieben ist es von Vorteil, wenn eine zweite Arbeitskraft mithilft. Auf den ersten paar Metern fiel es leicht, das Rohr einzubringen, danach wurde es auf Grund der Reibung zwischen Bambus und Zementsuspension, beziehungsweise eventuellen Hindernissen in den Bohrlöchern schwieriger.



Abbildung 44: Händisches Einbringen des Bambusrohres

Aus diesem Grund wurde das Bambusrohr dann nur noch in der richtigen Position gehalten und mit dem Bagger ins Loch gedrückt. Dazu setzte der Baggerführer den flachen Teil der Bohrlafette auf das Rohrende und schob es in den Hohlraum.



Abbildung 45: Einbringen des Bambusrohrs mit dem Bagger

Anschließend wurde noch versucht, mit Hilfe des Außenhammers an der Bohrlafette das Bambusrohr weiter in das Loch einzubringen. Dazu wurde eine Kopfplatte zwischen Bambus und Bohrkrone gelegt und dann mit dem Gerät gehämmert. Es war jedoch nicht möglich das Rohr weiter als 5,0 m in das Loch einzuführen. Daher wurde von jedem Bambusstab etwa 1,0 m abgeschnitten, um bündig mit der Spritzbetonwand abzuschließen.

Im Allgemeinen funktionierte das Einbringen mit der Bohrlafette am Bagger gut, jedoch wäre es von Vorteil, eine Schutzhülse für das Bambusrohr anzufertigen. Dadurch soll verhindert werden, dass sich beim Andrücken das Rohr spaltet oder andere Schäden entstehen. Dabei stellt die variierende Rohrstärke allerdings ein Problem dar, da sie es schwierig macht, größtenteils Aufsätze zu verwenden. Ebenso ist es schwierig, eine Vorrichtung mit der der Bambus eingedreht werden könnte zu entwickeln. Da es sich um einen natürlich gewachsenen Baustoff mit unterschiedlichen Dicken handelt, macht das ein Angreifen mit einer Maschine kompliziert.

### 6.5.1 Zusatzmaßnahmen

Um das Einbringen zu vereinfachen, wurde das Rohr auf zwei Seiten abgeschrägt, um eine Spitze zu erzeugen. Dadurch soll sich weniger Zementsuspension beim Einschieben an der Spitze festsetzen und den Vorgang somit erleichtern.



Abbildung 46: Angespitztes Bambusrohr

Als weitere Zusatzmaßnahmen wurden mit Hilfe eines 4,0 m langen Stabstahls die Nodien im Inneren des Bambusrohres durchgeschlagen. Diese sind durch das Trocknen sehr spröde und lassen sich leicht entfernen. Die Nodien konnten ohne Hilfsmittel und ohne Bohrung einfach mit der Hand durchstoßen werden.

Dadurch konnte die Suspension beim Einschieben auch durch den inneren Hohlraum fließen. Neben dem geringeren Spitzenwiderstand konnte dadurch die Tragfähigkeit des Systems erhöht werden.

### 6.6 Kopfausbildung

Im Zuge der ersten Versuche wurde eine Kopfausbildung gewählt, die hauptsächlich der Durchführung der späteren Ausziehversuche dient. Dabei wurde ein Stabstahl der Klasse R 32-400 der Firma Dywidag in das Bambusrohrende gesteckt. Die Gesamtlänge des Stahlstabes beträgt 3,0 m und wurde bis auf 30 cm in das Bambusrohr hinein geschoben. Somit ergab sich eine Verankerungslänge von 2,70 m im Zementstein.



Abbildung 47: Kopfausbildung Bambusnagel

Anschließend wurden die Ringräume zwischen Bambus und Boden, sowie zwischen Bambus und Stabstahl über den eingeschobenen Stahlstab noch mit Zementsuspension verpresst. Bei jenen Bambusrohren, bei welchen die Nodien durchgeschlagen wurden, kann bis zur Rohrspitze verpresst werden. Um die benötigten Versuche durchführen zu können, muss gewartet werden, bis der Mörtel ausgehärtet ist und die Endfestigkeit erreicht hat.

## 6.7 Kosten

Nach dem gleichen Prinzip wie in Kapitel 3.13 für konventionelle Stahlnägel wird eine Kostenaufstellung für die Bambusnägel durchgeführt. Dabei werden Bambusstäbe „Guadua Natur“ mit einer Länge von 4,00 m der Firma Conbam eingebaut. Bei dem Untergrund handelt es sich um einen standfesten Boden, in dem Bohrlöcher ohne Verrohrung und Stützung hergestellt werden können. Die Abmessungen der Baustelle sind aus Abbildung 48 zu entnehmen.

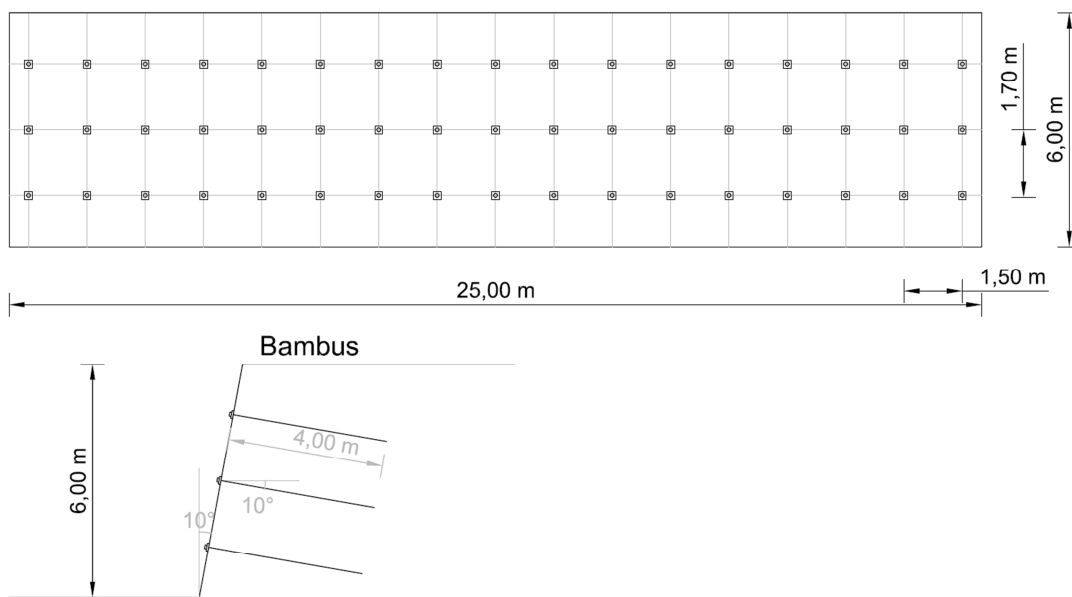


Abbildung 48: Systemskizze Bambusnagelwand

Dabei werden auf eine Fläche von rund  $150 \text{ m}^2$  Nägel im Raster von  $1,50 \times 1,70 \text{ m}$  eingebracht. Die Neigung der Bodennägel zur Horizontalen beträgt etwa  $10^\circ$ , die Böschung ist mit  $80^\circ$  geneigt und die Länge der eingebrachten Bambustragglieder wird mit  $4,00 \text{ m}$  festgelegt.

### 6.7.1 Materialkosten

Technische Daten:

- Bambusrohr Guadua Natur
- Länge: 4,00 m
- Durchmesser: 75 – 100 mm
- schwach konisch
- ca. 10 – 20% Abholzigkeit
- Ischebeck TITAN 30/11 mm, 0,2 % Dehngrenze, 225 kN charakteristische Tragfähigkeit, Linksgewinde
- Länge: 1,00 m
- Kugelbundmutter, SW 65 x 35 mm, roh
- Kalottenplatte, 200 x 200 x 8 mm, Bohrung Ø 36 mm, roh

Die Materialkosten beziehen sich auf einen 4 m langen Bambusnagel, der in einen standfesten Untergrund eingebaut wird.

| Element               | Anzahl      | Einzelkosten | Kosten         |
|-----------------------|-------------|--------------|----------------|
| Bambusrohr            | 1 Stk á 4 m | 5,83 €/m     | 23,32 €        |
| Stabstahl Titan 30/11 | 1 Stk á 1 m | 11,70 €/m    | 11,70 €        |
| Kugelbundmutter       | 1 Stk       | 4,30 €/Stk   | 4,30 €         |
| Kalottenplatte        | 1 Stk       | 4,50 €/Stk   | 4,50 €         |
| <b>Summe Kosten</b>   |             |              | <b>43,82 €</b> |

Tabelle 24: Materialkosten je Bambusnagel

Aus dieser überschläglichen Rechnung lassen sich Materialkosten pro Laufmeter Bambusnagel von rund 11,00 € ableiten.

Weiters werden Mörtel zum Verpressen der Nägel und Beton zur Herstellung der Frontalausbildung benötigt. Es wird angenommen, dass der Spritzbeton mit einer Stärke von 15 cm aufgebracht wird und dass das Bohrloch mit dem Durchmesser 150 mm vorgebohrt wurde.

| Element             | Menge               | Einzelkosten            | Kosten         |
|---------------------|---------------------|-------------------------|----------------|
| Verpressmörtel      | 0,15 m <sup>3</sup> | 300,00 €/m <sup>3</sup> | 45,00          |
| Spritzbeton         | 0,40 m <sup>3</sup> | 106,00 €/m <sup>3</sup> | 42,40 € [36]   |
| <b>Summe Kosten</b> |                     |                         | <b>87,40 €</b> |

Tabelle 25: Beton-/ Mörtelkosten je Bambusnagel

Da 51 Nägel eingebaut werden, ergibt sich ein Preis von rund 4.457,40 € für den Spritzbeton und den Verpressmörtel. Ebenso lässt sich aus dieser Tabelle der Bedarf an Beton von 22,00 m<sup>3</sup> und an Verpressmörtel von 7,50 m<sup>3</sup> errechnen.

Weiters werden zur Bewehrung der Spritzbetonschale Bewehrungsmatten benötigt. Zur Anwendung kommen Betonstahlmatten mit der Bezeichnung CQS60 und einer Größe von 6,0 m mal 2,4 m. Die genauen Abmessungen sind in Tabelle 26 aufgeführt:

| Bezeichnung | Stab-<br>durchmesser<br>[mm] | Stababstand<br>längs/quer<br>[mm] | Querschnitt<br>längs/quer<br>[cm <sup>2</sup> /m] | Gewicht je<br>Matte<br>[kg] |
|-------------|------------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------|
| CQS60       | 6,0                          | 150                               | 1,88  | 44,78                       |

Tabelle 26: Eigenschaften Betonstahlmatten [37]

Für die zu bewehrende Fläche von 150,00 m<sup>2</sup> werden 12 Stück dieser Betonstahlmatten benötigt. Bei einem Preis von etwa 0,70 €/kg ergeben sich Kosten von rund 380,00 €.



## 6.7.2 Transportkosten

Die Ermittlung des Gewichtes der Bodennägel ist nachfolgend aufgelistet:

| Element               | Anzahl      | Gewicht      | Gewicht         |
|-----------------------|-------------|--------------|-----------------|
| Bambusrohr            | 1 Stk á 4 m | 3,40 kg/m    | 13,60 kg        |
| Stabstahl Titan 30/11 | 1 Stk á 1 m | 3,29 kg/m    | 3,29 kg         |
| Kugelbundmutter       | 1 Stk       | 0,87 kg/Stk  | 0,87 Kg         |
| Kalottenplatte        | 1 Stk       | 3,50 kg/Stk  | 3,50 kg         |
| Betonstahlmatten      | 0,24 Stk    | 44,78 kg/Stk | 10,54 kg        |
| <b>Summe Gewicht</b>  |             |              | <b>31,80 kg</b> |

Tabelle 27: Gewicht je Bambusnagel

Das Gewicht je Bodennagel beträgt 31,80 kg. Multipliziert mit der benötigten Anzahl von 51 Stück ergibt das eine Last von 1.622,00 kg oder 1,62 Tonnen.

Der angenommene Transportweg beträgt zwei mal 100 km. Das Gewicht von 1,62 Tonnen ist zwar im Vergleich zu den konventionellen Bodennägeln viel geringer, das Transportvolumen bleibt allerdings ähnlich, beziehungsweise vergrößert sich leicht. Daher wird ebenfalls ein LKW verwendet, womit die Kosten gleich bleiben.

| Element             | Zeit  | Einzelkosten | Kosten          |
|---------------------|-------|--------------|-----------------|
| Lkw & Fahrer        | 5 Std | 65 €/h       | 325,00 €        |
| <b>Summe Kosten</b> |       |              | <b>325,00 €</b> |

Tabelle 28: Transportkosten der Bambusnägel

Zusätzlich müssen die Bambusrohre aus Deutschland importiert werden, was zu Versandkosten von etwa 75,00 € für 51 Stäbe führt.

Es ergeben sich demnach Transportkosten für die gesamten Bambusnägel inklusive Zubehörteile von 400,00 €.

Die Kosten für den Transport des Betons setzen sich wie folgt zusammen. Vereinfacht wird angenommen, dass die Kosten für den Transport des Verpressmörtel gleich hoch sind.

| <b>Element</b> | <b>Menge</b>         | <b>Einzelkosten</b>    | <b>Kosten</b>   |
|----------------|----------------------|------------------------|-----------------|
| Verpressmörtel | 7,50 m <sup>3</sup>  | 23,00 €/m <sup>3</sup> | 172,50 € [36]   |
| Spritzbeton    | 22,00 m <sup>3</sup> | 23,00 €/m <sup>3</sup> | 506,00 € [36]   |
|                |                      | <b>Summe Kosten</b>    | <b>678,50 €</b> |

Tabelle 29: Transportkosten Beton und Mörtel

Die Transportkosten für Beton und Mörtel betragen rund 680,00 €.

### 6.7.3 Einbaukosten

Die Einbaukosten setzen sich jeweils zusammen aus den Kosten für Personal und den Kosten für die Geräte. Dabei sind folgende Schritte zu beachten:

- Abtrag der Böschung
- Aufbringen der Spritzbetonsicherung
- Herstellung der Bohrung
- Verpressen des Mörtels in das Bohrloch
- Einbringen des Bambusrohres in das mit Mörtel gefüllte Bohrloch und befestigen der Kopfausbildung

| Personal & Gerät für   | Menge                 | Kosten                 | Kosten             |
|------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|
| Abtrag der Böschung    | 380,00 m <sup>3</sup> | 20,00 €/m <sup>3</sup> | 7.600,00 €         |
| Aufbringen Spritzbeton | 150,00 m <sup>2</sup> | 20,00 €/m <sup>2</sup> | 3.000,00 €         |
| Bohrung & Injektion    | 204,00 m              | 15,00 €/m              | 3.060,00 €         |
| Einbringen Bambus      | 204,00 m              | 2,00 €/m               | 408,00 €           |
| <b>Summe Kosten</b>    |                       |                        | <b>14.068,00 €</b> |

Tabelle 30: Einbaukosten für die Bambusnägel

Zusätzlich zu den Einbaukosten kommen noch die Kosten für das 4,00 m lange Bohrgestänge mit dem die 51 Löcher gebohrt werden. Es wurde ein TITAN 52-26 der Firma Ischebeck mit einer Lehmbohrkrone des Durchmessers 150 mm verwendet. Die Kosten dafür belaufen sich auf rund 160,00 €.

Somit ergibt sich eine Summe von 14.228,00 € für den Einbau der 51 Bambusnägel.

Zusätzlich müssen noch die Kosten für die Baustelleneinrichtung verrechnet werden. Diese werden überschlägich mit 5.000,00 € angenommen.

#### 6.7.4 Gesamtkosten

Wie bereits erwähnt, setzen sich die Gesamtkosten aus Materialkosten, Transportkosten und Einbaukosten zusammen. Zur besseren Übersicht sind hier alle Einzelbeträge zusammengefasst.

| Kostenart              | Mengen                    | Einzelkosten | Kosten             |
|------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|
| <b>Materialkosten</b>  |                           |              |                    |
| Bodennägel & Zubehör   | 51 Stk                    | 43,82 €/Stk  | 2.234,82 €         |
| Mörtel & Spritzbeton   | 7,5 & 22,0 m <sup>3</sup> | 87,40 €/Stk  | 4.457,40 €         |
| Betonstahlmatten       | 12 Stk                    | 31,67 €/Stk  | 380,00 €           |
| <b>Transportkosten</b> |                           |              |                    |
| Bodennägel & Zubehör   | 51 Stk                    | 7,84 €       | 400,00 €           |
| Mörtel & Spritzbeton   | 7,5 & 22,0 m <sup>3</sup> | 13,30 €      | 678,50 €           |
| <b>Einbaukosten</b>    |                           |              |                    |
| Einbau Gesamtsystem    |                           |              | 14.228,00 €        |
| Baustelleneinrichtung  |                           |              | 5.000,00 €         |
| <b>Summe Kosten</b>    |                           |              | <b>27.378,72 €</b> |

Tabelle 31: Aufstellung Gesamtkosten

Zur Herstellung einer 25 m x 6,0 m großen Bambusnagelwand mit Spritzbetonsicherung lassen sich Kosten in der Höhe von rund 27.400,00 € errechnen, das bedeutet umgelegt rund 180,00 €/m<sup>2</sup> Böschungswand.

Alle angegebenen Preise verstehen sich als Nettopreise und sind daher exklusive 20 % Mehrwertsteuer.

Die Werte sind teilweise geschätzte Werte, beziehungsweise Erfahrungswerte und dienen daher nur als grobe Abschätzung und zum späteren Vergleich mit der Ausführung aus Stahl in Kapitel 7.

## 7 Kostenvergleich

Um die Kosten vergleichbar zu machen, wird mit beiden Traggliedern aus Stahl und Bambus eine Wand von der Größe 25,00 m mal 6,00 m vernagelt. Eingebaut werden 4,00 m lange Nägel aus dem Material Bambus mit einem Einbauwinkel von  $10^\circ$  und 5,00 m lange Nägel aus Stahl mit einem Winkel von  $15^\circ$ . Der Raster der Bambusnägel hat einen Abstand von 1,50 m mal 1,70 m, ebenso der der Stahltragglieder. In Summe ergeben sich damit 51 Stück Bambus- und Stahlnägel.

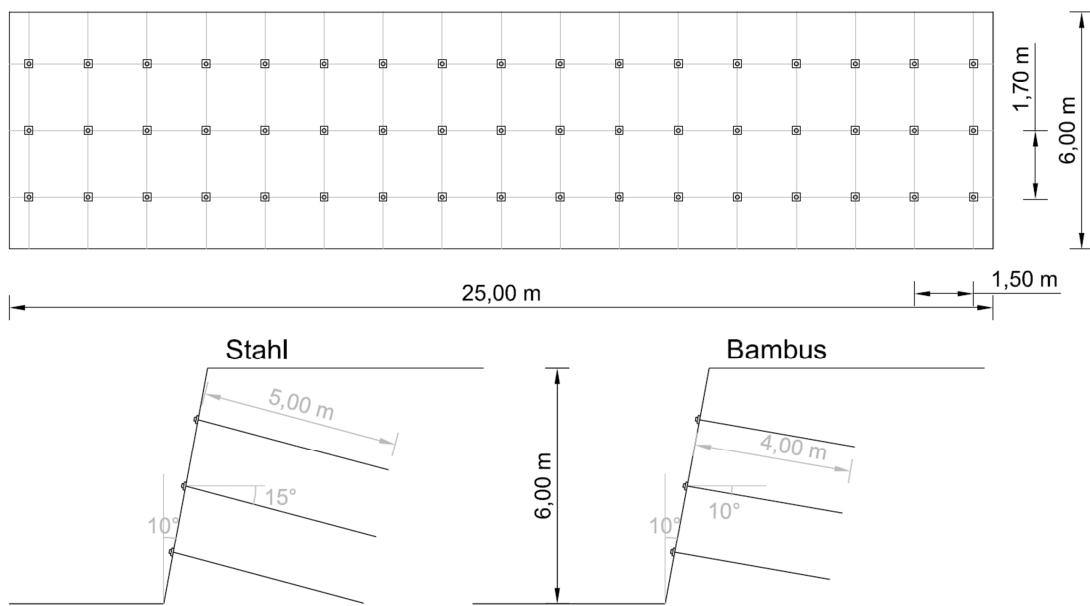


Abbildung 49: Vergleichsskizze Bambus – Stahl

## 7.1 Materialkosten

In Tabelle 32 sind zum direkten Vergleich die Materialkosten von Bambus und Stahl aufgelistet.

|                       | Einzelkosten        | Kosten         |
|-----------------------|---------------------|----------------|
| <b>Bambus</b>         |                     |                |
| Bambusrohr 4,00 m     | 5,83 €/m            | 23,32 €        |
| Stabstahl TITAN 30/11 | 11,70 €/m           | 11,70 €        |
| Kugelbundmutter       | 4,30 €/Stk          | 4,30 €         |
| Kalottenplatte        | 4,50 €/Stk          | 4,50 €         |
|                       | <b>Summe Kosten</b> | <b>43,82 €</b> |
| <b>Stahl</b>          |                     |                |
| Stahltragglied 5,00 m | 11,70 €/m           | 58,50 €        |
| Kopplungsmuffe        | 9,10 €/Stk          | 9,10 €         |
| Kugelbundmutter       | 4,30 €/Stk          | 4,30 €         |
| Kalottenplatte        | 4,50 €/Stk          | 4,50 €         |
| Lehmbohrkrone         | 9,00 €/Stk          | 9,00 €         |
|                       | <b>Summe Kosten</b> | <b>85,40 €</b> |

Tabelle 32: Materialkostenvergleich Stahl – Bambus

Das Verhältnis der Materialkosten zwischen Bambus und Stahl ist etwa 0,50. Eine weitere Einsparung bei den Bambusnägeln wäre möglich, wenn eine Kopfausbildung ohne Stabstahl möglich wäre. Dadurch ließen sich die Kosten auf rund 30,00 € pro 4,0 m Bambusnagel reduzieren.

## Kostenvergleich

---

Zum Verpressen der Löcher wird bei beiden Systemen Zementsuspension benötigt. Allerdings in unterschiedlichem Ausmaß, da der Hohlraum für das Bambusrohr viel größer vorgebohrt werden muss. Der Verbrauch an Beton ist je Stahl- und Bambusnagel gleich hoch.

|                | Menge               | Einzelkosten            | Kosten         |
|----------------|---------------------|-------------------------|----------------|
| <b>Bambus</b>  |                     |                         |                |
| Verpressmörtel | 0,15 m <sup>3</sup> | 300,00 €/m <sup>3</sup> | 45,00 €        |
| Spritzbeton    | 0,40 m <sup>3</sup> | 106,00 €/m <sup>3</sup> | 42,40 €        |
|                |                     | <b>Summe</b>            | <b>87,40 €</b> |
| <b>Stahl</b>   |                     |                         |                |
| Verpressmörtel | 0,10 m <sup>3</sup> | 300,00 €/m <sup>3</sup> | 30,00 €        |
| Spritzbeton    | 0,40 m <sup>3</sup> | 106,00 €/m <sup>3</sup> | 42,40 €        |
|                |                     | <b>Summe</b>            | <b>72,40 €</b> |

Tabelle 33: Materialkostenvergleich Zement und Beton

Bei den Kosten für Zement sind die Kosten für die Ausführung aus dem Material Bambus etwa um 15,00 € höher als jene bei einer konventionellen Herstellung aus Stahl. Daher müsste hier optimiert und versucht werden, weniger Verpressmörtel zu benötigen.

Für die zu bewehrende Fläche von 150,00 m<sup>2</sup> werden 12 Stück Betonstahlmatten benötigt. Bei einem Preis von etwa 0,70 €/kg ergeben sich Kosten von rund 380,00 € für die Ausführungen aus Bambus und Stahl.

## 7.2 Transportkosten

Wie bereits in Kapitel 6.7.2 beschrieben, bleiben die Kosten sowohl beim Stahltransport, wie auch beim Bambustransport gleich. Grund dafür ist das größere Volumen der Bambusrohre, durch das ebenfalls ein großer LKW benötigt wird. Die Ladefläche muss eine Minimallänge von 4,00 m haben, da die Bambusrohre in einem Stück geliefert werden. Allerdings müssen beim Bambus noch die Versandkosten für den Import aus Deutschland von etwa 75,00 € bezahlt werden.

|               | Zeit | Einzelkosten | Kosten          |
|---------------|------|--------------|-----------------|
| <b>Bambus</b> |      |              |                 |
| Lkw & Fahrer  | 5 h  | 65,00 €/h    | 325,00 €        |
| Import        |      | 75,00 €      | 75,00 €         |
|               |      | <b>Summe</b> | <b>400,00 €</b> |
| <b>Stahl</b>  |      |              |                 |
| Lkw & Fahrer  | 5 h  | 65,00 €/h    | 325,00 €        |
|               |      | <b>Summe</b> | <b>325,00 €</b> |

Tabelle 34: Vergleich Transportkosten

Die Transportkosten für Zement hängen lediglich von der benötigten Menge ab und unterscheiden sich bei Stahl und Bambus wie folgt:

|               | Menge                | Einzelkosten           | Kosten          |
|---------------|----------------------|------------------------|-----------------|
| <b>Bambus</b> |                      |                        |                 |
| Mörtel        | 7,50 m <sup>3</sup>  | 23,00 €/m <sup>3</sup> | 172,50 €        |
| Beton         | 22,00 m <sup>3</sup> | 23,00 €/m <sup>3</sup> | 506,00 €        |
|               |                      |                        | <b>678,50 €</b> |
| <b>Stahl</b>  |                      |                        |                 |
| Mörtel        | 5,10 m <sup>3</sup>  | 23,00 €/m <sup>3</sup> | 117,30 €        |
| Beton         | 22,00 m <sup>3</sup> | 23,00 €/m <sup>3</sup> | 506,00 €        |
|               |                      |                        | <b>623,30 €</b> |

Tabelle 35: Transportkostenvergleich Stahl - Bambus



### 7.3 Einbaukosten

Bei den Einbaukosten sind bei beiden Systemen, egal ob das Tragglied aus Holz oder Bambus ist, folgende Schritte zu beachten:

- Abtrag der Böschung
- Aufbringen der Spritzbetonsicherung
- Herstellen der Bohrung
- Verpressen mit Mörtel
- Anbringen der Kopfplatte und der Mutter

Berücksichtigt werden hier die Kosten für die 25,0 m mal 6,0 m große Nagelwand.

| <b>Bambus</b>          | <b>Menge</b>          | <b>Einzelkosten</b>    | <b>Kosten</b>      |
|------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|
| Abtrag der Böschung    | 380,00 m <sup>3</sup> | 20,00 €/m <sup>3</sup> | 7.600,00 €         |
| Aufbringen Spritzbeton | 150,00 m <sup>2</sup> | 20,00 €/m <sup>2</sup> | 3.000,00 €         |
| Bohrung & Injektion    | 204,00 m              | 15,00 €/m              | 3.060,00 €         |
| Einbringen Bambus      | 204,00 m              | 2,00 €/m               | 408,00 €           |
| <b>Summe Kosten</b>    |                       |                        | <b>14.068,00 €</b> |

| <b>Stahl</b>           | <b>Menge</b>          | <b>Einzelkosten</b>    | <b>Kosten</b>      |
|------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|
| Abtrag der Böschung    | 380,00 m <sup>3</sup> | 20,00 €/m <sup>3</sup> | 7.600,00 €         |
| Aufbringen Spritzbeton | 150,00 m <sup>2</sup> | 20,00 €/m <sup>2</sup> | 3.000,00 €         |
| Bohrung & Injektion    | 255,00 m              | 13,00 €/m              | 3.315,00 €         |
| <b>Summe Kosten</b>    |                       |                        | <b>13.915,00 €</b> |

Tabelle 36: Vergleich Einbaukosten

Zusätzlich kommt bei der Ausführung aus Bambus noch das Einbringen des Rohres hinzu. Dieses wird nach dem Verpressen des Mörtels eingeführt und mit einem Stahltragglied, durch welches anschließend verpresst wird, versehen.

Ebenso ist es mit den einmaligen Kosten für den verwendeten IBO-Nagel, mit welchem die Löcher für das Bambusrohr hergestellt werden. Diese betragen rund 160,00 €.

## 7.4 Gesamtkosten

Die Gesamtkosten werden für die Nagelwand mit der Größe 25,00 m mal 6,00 m berechnet.

| Kostenart                  | Mengen | Einzelkosten   | Kosten             |
|----------------------------|--------|----------------|--------------------|
| <b>Materialkosten</b>      |        |                |                    |
| Bambus                     | 51 Stk | 131,22 €/Stk   | 6.692,22 €         |
| Stahl                      | 51 Stk | 157,82 €/Stk   | 8.047,80 €         |
| <b>Transportkosten</b>     |        |                |                    |
| Bambus                     | 51 Stk | 21,15 €/Stk    | 1.078,50 €         |
| Stahl                      | 51 Stk | 18,60 €/Stk    | 948,30 €           |
| <b>Einbaukosten</b>        |        |                |                    |
| Bambus                     | 51 Stk | 278,98 €/Stk   | 14.228,00 €        |
| Stahl                      | 51 Stk | 272,84 €/Stk   | 13.915,00 €        |
| Baustelleneinrichtung      | 1 Stk  | 5.000,00 €/Stk | 5.000,00 €         |
| <b>Summe Kosten Bambus</b> |        |                | <b>26.998,72 €</b> |
| <b>Summe Kosten Stahl</b>  |        |                | <b>27.911,10 €</b> |

Tabelle 37: Gesamtkostenvergleich Stahl - Bambus

Unterm Strich ergeben sich für die Bambusausführung Kosten in der Höhe von rund 27.000,00 € und für die Ausführung aus Stahl 28.000,00 €, das bedeutet umgerechnet 180,00 €/m<sup>2</sup> beziehungsweise 187,00 €/m<sup>2</sup> Böschungswand.

Da es erst mithilfe der Versuche und mit genauen Berechnungen möglich ist, die tatsächliche Tragfähigkeit der Bambusrohre zu bestimmen, können sich die Kosten noch ändern. Pro Laufmeter Bambus ergeben sich aus der obigen Rechnung Kosten von 130,00€/lfm. Bei Stahl wären es rund 110,00€/lfm.

## 8 Versuchsreihe – Grundsatzversuche

Um die tatsächliche Tragfähigkeit der Bambusnägel zu prüfen, wurden Versuche an diesen durchgeführt. Bei den Versuchen handelt es sich um Zugversuche mit deren Hilfe der Auszieh Widerstand der Bambusnägel gemessen werden soll. Die Versuche wurden rund 8 Wochen nach dem Einbau durchgeführt, wodurch ein vollständiges Aushärten des Zementmörtels gesichert war.

### 8.1 Aufbau der Messung

Um einen Kraftkurzschluss zwischen Pressenkraft und Reaktionskraft im Boden zu vermeiden, wurde eine Traverse aus Stahl angefertigt. Auf die Traverse kann die Hohlkolbenpresse zum Aufbringen des Drucks gesetzt werden. Der Abstand der Auflager der Traverse zum Nagel sollte mindestens 1,0 m betragen. In Abbildung 50 ist die Traverse mit den Abmessungen von 2,5 m mal 1,5 m aus einem HEB 200 Träger zu sehen.



Abbildung 50: Traverse zur Nagelprüfung

Zusätzlich zu der Hohlkolbenpresse wurden ein Stativ und eine Messuhr benötigt. Mit Hilfe des Stativs konnte die Absolutbewegung des Nagelkopfes gemessen werden. Die Durchbiegung der Traverse oder andere Bewegungen hatten dadurch keinen Einfluss auf die Messergebnisse. Die Dehnung beziehungsweise das Kriechen des Nagels wurde mit der Messuhr auf 1/100 mm genau abgelesen. Um den Einfluss von äußeren Umwelteinwirkungen möglichst gering zu halten, wurde über die gesamten Prüfeinrichtung ein Zelt gestellt, wodurch Sonneneinstrahlung abgeschirmt und Temperaturschwankungen reduziert wurden.



Abbildung 51: Versuchseinrichtung

## 8.2 Versuchsablauf

Die Belastung des Bambusnagels erfolgte in mehreren Laststufen. Dazu wurde die Hohlkolbenpresse mit dem Stabstahl, welcher rund 2,70 m in das Bambusrohr hineinreicht und mit Mörtel verpresst wurde, verbunden. Zu Beginn wurde eine Vorlast von 25 kN aufgebracht und das Verschiebungsniveau auf Null gestellt. Anschließend wurde die Last in circa 30 kN-Schritten erhöht bis eine Kraft von 200 kN, beziehungsweise die Grenztraglast erreicht war. Zusätzlich wurde nach der Laststufe von 110 kN eine Schleife gefahren. Dazu wurde die Last bis auf die Vorlaststufe von 25 kN reduziert und dann wieder erhöht. In Abbildung 52 ist der Kraft-Verschiebungsverlauf dargestellt.

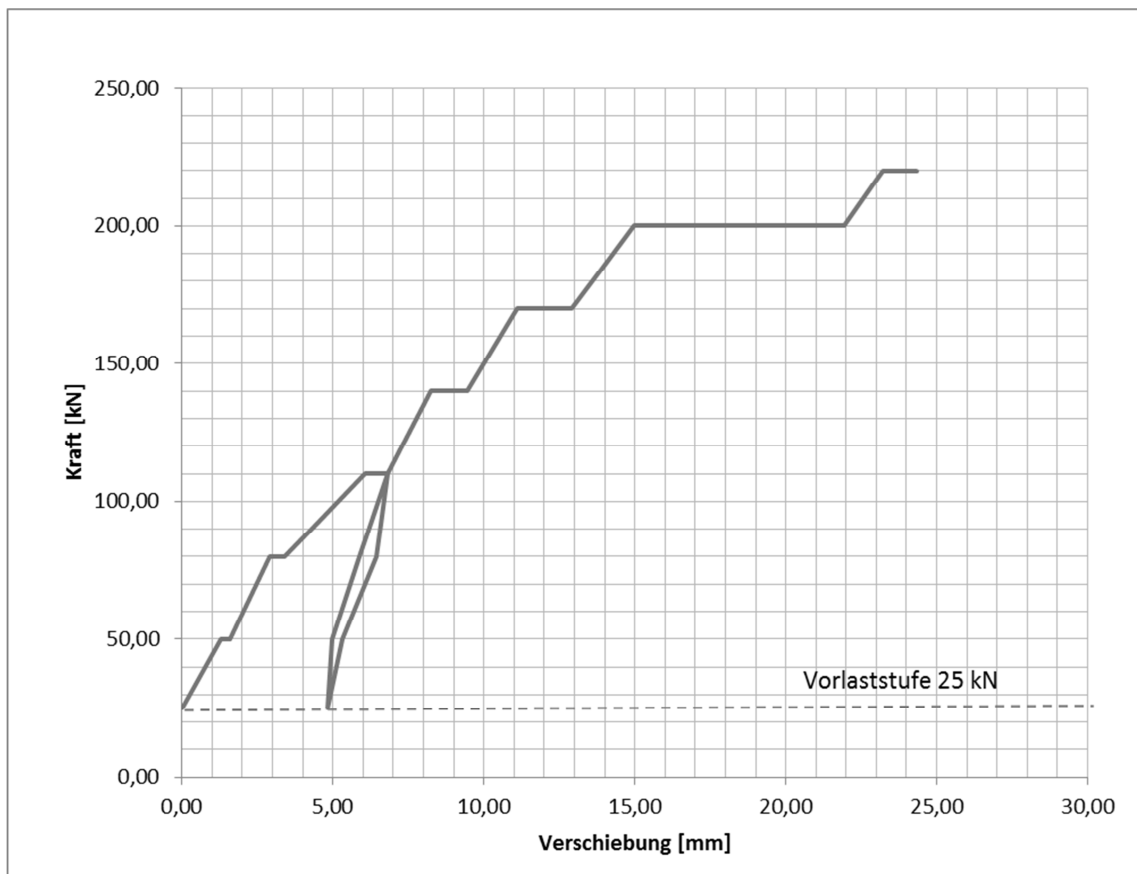


Abbildung 52: Laststufen

Bei der Abbildung 52 handelt es sich um das Kraft-Weg-Diagramm des ersten geprüften Bambusnagels.

### 8.3 Messungen

Gemessen werden konnten die Verschiebungen bei den unterschiedlichen Laststufen. Abgelesen wurden die Verschiebungen direkt nach dem Aufbringen der Laststufe, sowie nach 1', 2', 5', 10' und 15'. War keine Beruhigung der Verschiebung zu erkennen, wurde weiter gemessen. Bei den durchgeführten Versuchen bis zu 45 Minuten lang.

Aus den gemessenen Bewegungen lässt sich das Kriechmaß  $k_s$  wie folgt ermitteln:

$$k_s = \frac{(s_2 - s_1)}{\log\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}$$

Dabei ist  $t_1$  der Zeitpunkt 1 und  $s_1$  die Verschiebung zum Zeitpunkt  $t_1$ . Mit dem Kriechmaß wird die Bewegung des Nagels bei konstant gehaltener Zugkraft innerhalb einer definierten Zeitspanne beschrieben. [31]

Die gemessenen Verschiebungen der beiden Bodennägel sind in den nachfolgenden Tabellen aufgelistet. Dabei wurde der erste Nagel mit einer Last von bis zu 220 kN und der zweite Nagel mit einer Last von bis zu 170 kN beansprucht.

|                       | LS 0 | LS 1 | LS 2 | LS 3 | LS 4 | LS 5 | LS 6 | LS 7 | LS 8 | LS 9 | LS 10 | LS 11 | LS 12 | LS 13 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Laststufe [kN]</b> | 25   | 50   | 80   | 110  | 80   | 50   | 25   | 50   | 80   | 110  | 140   | 170   | 200   | 220   |
| <b>Zeit [min]</b>     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
| 0                     | 0,00 |      | 2,91 | 6,06 | 6,42 | 5,32 | 4,83 | 4,98 | 5,86 | 6,80 | 8,25  | 11,09 | 14,98 | 23,20 |
| 1                     |      | 1,28 | 2,99 | 6,19 | 6,42 |      | 4,82 | 4,98 | 5,88 | 6,82 | 8,75  | 11,28 | 15,84 | 23,80 |
| 2                     |      | 1,51 | 3,02 | 6,45 |      |      |      |      |      |      | 8,99  | 11,36 | 16,23 | 23,94 |
| 5                     |      | 1,56 | 3,08 | 6,54 |      |      |      |      |      |      | 9,15  | 12,06 | 16,71 | 24,15 |
| 10                    |      | 1,57 | 3,38 | 6,82 |      |      |      |      |      |      | 9,45  | 12,22 | 17,97 | 24,35 |
| 15                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       | 12,72 | 18,80 |       |
| 20                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       | 12,82 | 19,35 |       |
| 25                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       | 12,89 | 20,21 |       |
| 30                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       | 20,49 |       |
| 35                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       | 21,00 |       |
| 40                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       | 21,53 |       |
| 45                    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       | 21,92 |       |
| <b>Verschiebung</b>   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |       |
| <b>[mm]</b>           | 0,00 | 1,57 | 3,38 | 6,82 | 6,42 | 5,32 | 4,83 | 4,98 | 5,88 | 6,82 | 9,45  | 12,89 | 21,92 | 24,35 |

Tabelle 38: Messdaten Nagel 1

|                       | LS 0 | LS 1 | LS 2 | LS 3 | LS 4 | LS 5 | LS 6 | LS 7 | LS 8 | LS 9 | LS 10 | LS 11 | LS 12 |
|-----------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| <b>Laststufe [kN]</b> | 25   | 50   | 80   | 100  | 110  | 80   | 50   | 25   | 50   | 80   | 110   | 140   | 170   |
| <b>Zeit [min]</b>     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
| <b>0</b>              | 0,00 | 0,39 | 1,11 | 1,63 | 2,05 | 1,83 | 0,26 | 0,00 | 1,00 | 1,63 | 2,22  | 3,64  | 13,65 |
| <b>1</b>              |      | 0,42 | 1,20 | 1,64 | 2,08 |      |      |      |      |      |       | 4,50  | 14,20 |
| <b>2</b>              |      | 0,42 | 1,20 | 1,65 | 2,10 |      |      |      |      |      |       | 4,61  | 16,51 |
| <b>5</b>              |      | 0,43 | 1,21 | 1,67 |      |      |      |      |      |      |       | 5,83  | 20,28 |
| <b>10</b>             |      | 0,44 |      | 1,86 |      |      |      |      |      |      |       | 7,03  | 28,56 |
| <b>15</b>             |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       | 8,13  | 38,20 |
| <b>Verschiebung</b>   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |       |
| <b>[mm]</b>           | 0,00 | 0,44 | 1,21 | 1,86 | 2,10 | 1,83 | 0,26 | 0,00 | 1,00 | 1,63 | 2,22  | 8,13  | 38,20 |

Tabelle 39: Messdaten Nagel 2

Bei den jeweils höchsten Belastungsstufen sind große Verschiebungen aufgetreten, was auf ein Versagen hindeutet, daher wurden die Messungen beendet.

In der nachfolgenden Tabelle 40 ist das Kriechmaß bei den einzelnen Laststufen berechnet worden. Die Werte stammen von dem Versuch am ersten Nagel und werden im weiteren Verlauf für den Graphen in Abbildung 54 benötigt.

| <b>Laststufe</b> | LS 0 | LS 1 | LS 2 | LS 3 | LS 10 | LS 11 | LS 12 | LS 13 |
|------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| <b>[kN]</b>      | 25   | 50   | 80   | 110  | 140   | 170   | 200   | 220   |
| <b>Kriechmaß</b> |      |      |      |      |       |       |       |       |
| <b>ks [mm]</b>   | 0,00 | 0,29 | 0,39 | 0,63 | 0,70  | 1,15  | 3,68  | 0,55  |

Tabelle 40: Kriechmaß Nagel 1

### 8.3.1 Verschiebungen

Anhand der maximalen Verschiebungen je Laststufe des Nagels 1 wurde die Abbildung 53 erstellt. Dabei ist der lineare Verlauf der Verschiebung im Verhältnis zur aufgetragenen Kraft bis zu 110 kN zu erkennen. Ebenso zeigte sich, dass bei Wegnahme der Kraft nach der Laststufe von 110 kN die Verschiebung wieder abnahm. Bei diesem Anteil der Verschiebung handelt es sich um eine elastische Bewegung. Die Verschiebung geht allerdings nicht wieder auf Null zurück, was bedeutet, dass ebenso eine plastische Verformung aufgetreten ist. Ab einer Belastungsgröße von 170 kN wurde der Verlauf der Linie flacher, was eine größere Verschiebung bedeutet. Mit Aufbringen der Last von 230 kN trat das Versagen ein.

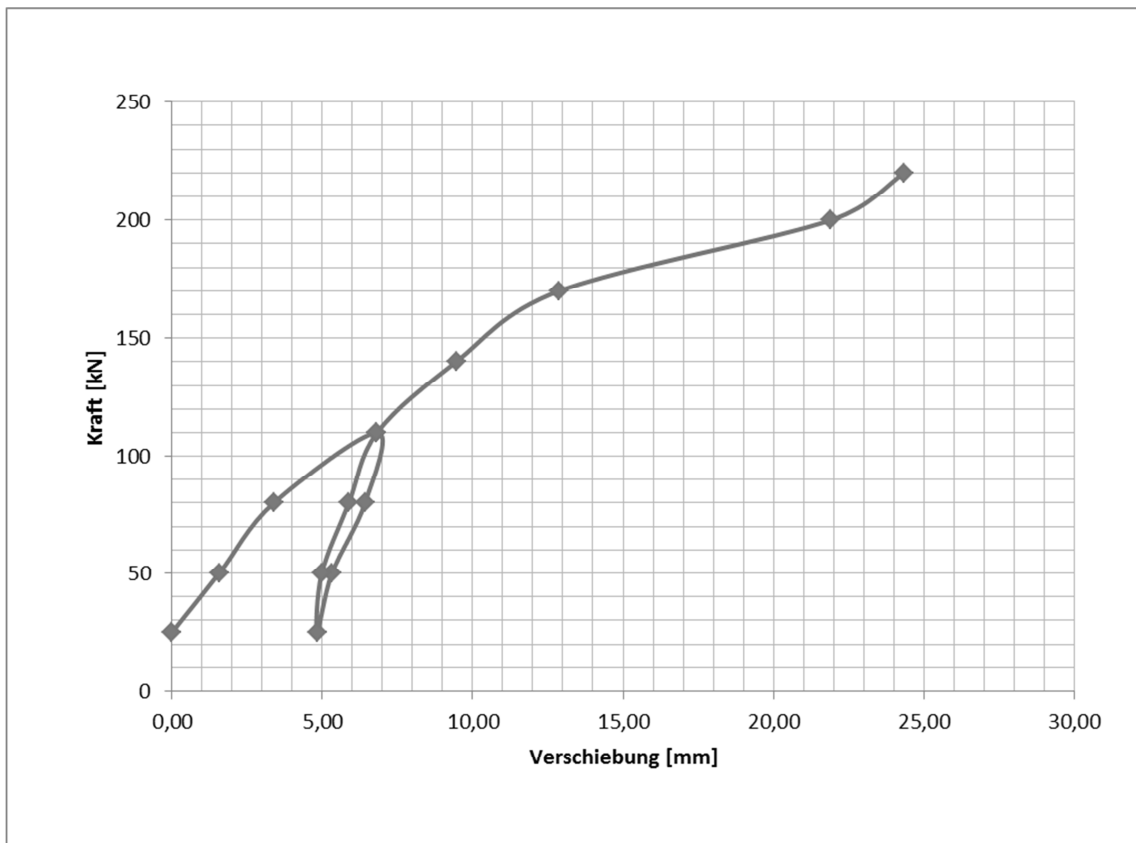


Abbildung 53: Kraft - Verschiebung Nagel 1



### 8.3.2 Kriechmaß

Zur Ermittlung der kritischen Kriechlast wie auch des Herausziehwerstandes des Nagels ist der Graph aus Abbildung 54 nötig. Dazu werden zwei Asymptoten an die Funktion gelegt und miteinander verschnitten. Am Kreuzungspunkt ist die kritische Kriechlast  $P_c'$  abzulesen. Diese wird ermittelt, wenn  $P_c$  nicht mit ausreichender Genauigkeit festgelegt werden kann.

$$P_c = 0,9 * P_c'$$

Die Enden der beiden geradlinigen Äste entsprechen der kritischen Kriechlast  $P_c$  und dem Herausziehwerstand  $R_a$  des Nagels. [31]

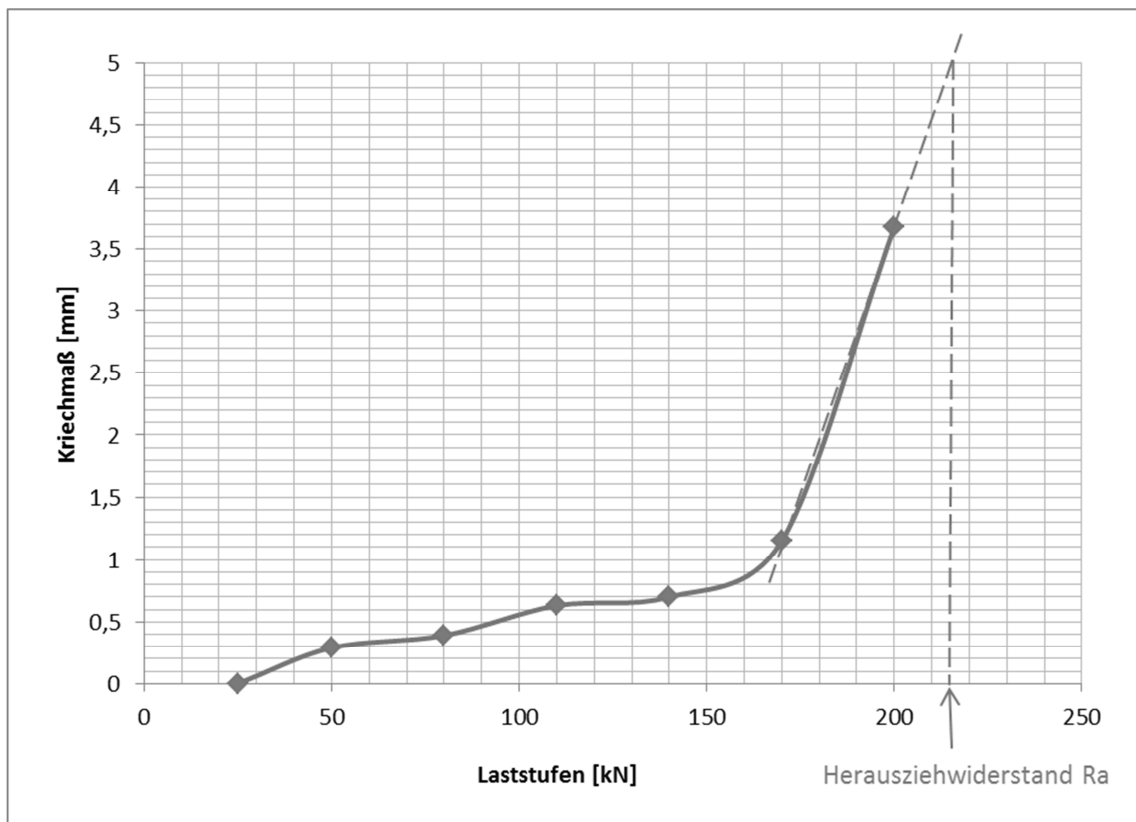


Abbildung 54: Ermittlung der Kriechlast Nagel 1

Da der Herausziehwerstand  $R_a$  nicht eindeutig ermittelt werden kann, wird er mit jener Kraft bei 5 mm Kriechmaß gleichgesetzt und entspricht etwa 215 kN. Dies entspricht der Kraft, bei welcher ein hörbares Versagen aufgetreten ist. Dabei ist das Stahlglied stückweise aus dem Bambusrohr gerutscht. [45]

#### 8.4 Analyse der Ergebnisse

Es wurden zwei Bambusnägel geprüft, der erste der Sorte Moso und der zweite der Sorte Guadua Natur. Um die Presse anbringen zu können, wurde bereits beim Einbau der Bambusrohre ein hohler Stabstahl R32-400 mit einer Länge von 3,0 m mit verpresst.



Abbildung 55: Stabstahl zum Ansetzen der Presse

Zusätzlich wurde der Ringraum um den Bambus verfüllt. Dieser sollte vor Versuchsbeginn im Bereich der Spritzbetonschale wieder frei gestemmt werden um nicht eine scheinbare Verstärkung der Tragfähigkeit durch die Spritzbetonschale zu messen.

Wie auch schon beim Einbringen der Bambusrohre traten bei der Zugbelastung schnell sichtbare Längsrisse im Bambusrohr auf. Diese entstanden einerseits durch den kegelförmigen Zementkörper der aufgrund des konischen Rohrverlaufs auf die Innenseite des Bambusrohres drückte und andererseits als Ringspaltzug während der Zugbeanspruchung des Stahlstabes. Dadurch entstanden Querkräfte, die vom Bambus nicht aufgenommen werden können und zu Rissen führen. In Abbildung 56 sind die wirkenden Kräfte zur Veranschaulichung schematisch dargestellt.

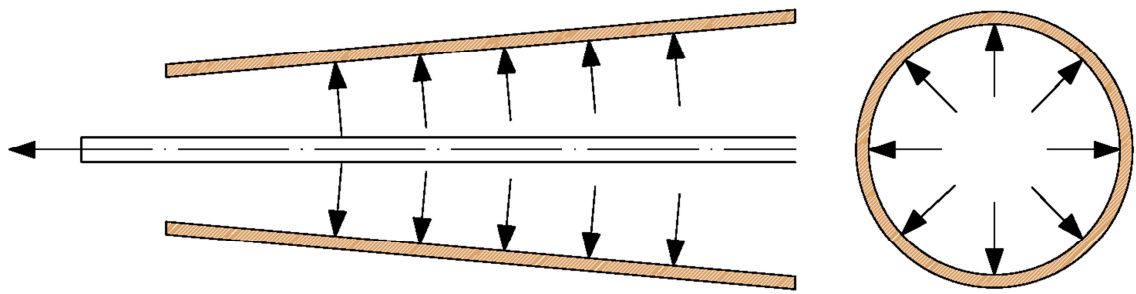


Abbildung 56: Belastung Bambusrohr

Durch die Risse entstand zusätzlich eine Schwächung des Zementkörpers, der nun weniger stützende Ringkräfte zur Verfügung hatte. Die Risse im Zement entstanden sowohl im Inneren wie auch rund um das Bambusrohr.



Abbildung 57: Entstandene Risse im Bambus und im Zementkörper

Da die Zugkraft auf den Stabstahl konstant gehalten, beziehungsweise schrittweise erhöht wurde, trat ein Versagen ein. Mit steigender Last glitt der Verpresskörper aus dem Bambusrohr und konnte den Stahl nicht mehr halten, sodass dieser ebenfalls heraus rutschte. Die Bewegungen des Stahls geschahen sprunghaft, da dieser ein Gewinde hat. Öffnete sich nun der Zementkörper aufgrund der Risse und der zu hohen Last, bewegte sich der Stahl um eine Rippe nach außen. Diese Bewegungen waren sowohl hörbar als auch sichtbar, da sich bei jedem Sprung das Bambusrohr leicht öffnete. Nach einigen Minuten mit konstant gehaltener Belastung reichte der Zementkörper rund 10 cm aus dem Bambusrohr. Zu sehen ist dies in Abbildung 58. Das heißt, in den Versuchen wurde nicht wie geplant der Herauszieh Widerstand des Bambusstabes aus dem Boden, sondern der Herauszieh Widerstand des 3,0 m langen Stahlstabes aus dem vermörtelten Bambusrohr gemessen. Aus diesem Grund wird es eine weitere Reihe von Versuchen geben, die allerdings nicht mehr Teil dieser Masterarbeit ist.



Abbildung 58: Bewegung des Zementkörpers aus dem Bambusrohr

Um das weitere Verhalten zu beobachten wurde das System weiter belastet. Dazu musste die Hohlkolbenpresse nach einem Hub von etwa 15 cm nachgesetzt werden und eine neue Belastungsschleife wurde begonnen.

Eine Abnahme der Verschiebungen war nicht zu beobachten, allerdings wurde die benötigte Kraft zum Ausziehen des Stabstahls immer geringer. Auch die Öffnung des Bambusrohres und die schlagartigen Sprünge des Stahls nahmen ab.



Abbildung 59: Herausgezogener Stabstahl

In Abbildung 59 ist der herausgezogene Stabstahl zu sehen. Anfangs klebten noch größere mitgerissene Stücke Mörtel an dem Stahl. Beim weiteren Herausziehen wurde die Masse zusehends feiner und zermahlener. Daraus lässt sich schließen, dass die in den Mörtel gegossenen Rippen durch die Bewegungen abgerieben wurden und dadurch ein kontinuierliches Gleiten des Stabstahls möglich wurde.

Eine Bewegung des Bambusrohres an sich konnte nicht festgestellt werden. In Abbildung 58 ist rechts gut zu sehen, dass sich der Bambus von der Spritzbetonschale gelöst hat. Somit sollte bei dieser Messung des ersten Nagels keine Verfälschung aufgetreten sein. Anders sieht es hierzu beim zweiten Nagel aus, wo ein fester Verbund zwischen Bambus und Spritzbeton bestand. Daher werden diese Messwerte nicht weiter ausgewertet.

Welche Werte die Zugfestigkeit von Bambus in Kombination mit Boden annehmen kann, ist durch diese Versuche leider nicht geklärt worden. Das schwächste Glied in der Kette ist die Querkraft des Bambus. In welchen Anteilen die Zugbelastung in das Bambusrohr und in den Mörtel gelangte, muss mit überarbeiteten Versuchen nochmals geprüft werden.

#### **8.4.1 Verbesserungsmöglichkeiten**

Um die Querkräfte zu verhindern, beziehungsweise die Risse zu unterbinden, muss das Bambusrohr verstärkt werden. Diese Unterstützung könnte mit einer Art Schelle gewährleistet werden. Nötig wäre diese nur auf den ersten Metern in denen die Kraft durch den Stahlstab eingeleitet wird. Wie die Konstruktion aufgebracht wird, muss im Detail überlegt werden, da dies vor dem Einbringen in das Bohrloch und dem Verpressen mit Mörtel geschehen muss. Zusätzlich muss darauf geachtet werden, dass für die Messungen im Bereich des Nagelkopfes nicht verpresst wird. Dadurch soll ein Kraftkurzschluss zwischen Nagel und Spritzbetonschale verhindert werden. Zu prüfen wären mindestens drei Nägel, um einen Ausreißer eliminieren zu können.

Es wird darauf hingewiesen, dass diese Versuche nur grundlegende Untersuchungen zum Verbundverhalten des Bodennagels aus Bambus mit dem Mörtel und Boden sind. Die tatsächliche Beanspruchung eines Nagels bei einer sach- und fachgerecht geplanten und ausgeführten Vernagelung entspricht nicht dem Kraftverlauf welcher in diesen Versuchen auftrat. Außerdem ist das aufgetretene Problem des mangelnden Verbunds zwischen Stahlstab und Bambus in der Praxis nicht gleichermaßen relevant, da die Konstruktion hauptsächlich für die Versuche diente.

## **9 Diskussion möglicher Anwendungsgebiete**

Nachfolgend werden Anwendungsmöglichkeiten der Bodenvernagelung aus Holz und Bambus diskutiert. Dabei wird auf die Vor- und Nachteile der Materialien eingegangen. Zukünftige Anwendungsfelder im Grundbau werden ebenso erwähnt wie auch ökologische Vorteile im Vergleich zu konventionellen Bodenvernagelungen aus Stahl.

### **9.1 Tunnelbau**

Im Tunnelbau werden Anker aus glasfaserverstärktem Kunststoff eingesetzt, wenn diese nachträglich wieder ausgebaut werden müssen. [12] Zukünftig könnten hierfür Bodennägel aus Holz oder Bambus eingesetzt werden. Diese sind ebenfalls leicht zu transportieren, mechanisch zerspanbar und weisen neben einer hohen Zugfestigkeit eine relativ geringe Schubfestigkeit auf. Diese in den meisten Anwendungen nachteilige Eigenschaft ist von Vorteil, wenn es um den Ausbau der Nägel geht. Durch die geringe Scherfestigkeit lassen sich die Holz- beziehungsweise Bambusnägel leichter brechen und ermöglichen somit den Ausbau auch bei beengenden Platzverhältnissen.

### **9.2 Baugrubensicherung**

Bei der Sicherung von Baugruben handelt es sich in der Vielzahl der Fälle um eine temporäre Maßnahme. Die Befestigung des Geländeanschnitts wird während der Bauarbeiten benötigt um eine ausreichend sichere Baugrubenböschung zu errichten. Nach Fertigstellung des Bauwerks ist es aus verschiedenen Gründen im Allgemeinen unmöglich, die Bodennägel wieder auszubauen. Werden die Sicherungselemente nun aus Holz oder Bambus hergestellt, könnten diese verrotten und müssten nicht entfernt werden. Dadurch stellen sie kein Hindernis für weitere Bauarbeiten dar und es gehen auch keine wertvollen Ressourcen verloren. Ebenso stellen die Holz- und Bambusnägel im Zuge eines späteren Aushubs im vernagelten Bereich ein wesentlich geringeres Hindernis dar.

### 9.3 Böschungssicherung

Ähnlich wie bei der Baugrubensicherung gibt es auch bei der Böschungssicherung Bauwerke, die nur eine begrenzte Standzeit haben. Als Beispiel wäre hier die Sicherung einer Baustraße zu erwähnen, welche nur während der Bauzeit befahrbar und gesichert sein muss. Anschließend werden diese Straßen meist rückgebaut. Im Falle einer Holz- oder Bambusvernagelung könnten die Tragelemente einfach im Boden belassen werden und würden mit der Zeit verrotten. Dadurch wird der Arbeitsschritt des Ausbaus eingespart.

### 9.4 Vorteile – Nachteile

Der Hauptvorteil der Materialien Holz und Bambus gegenüber Stahl für temporäre Sicherungsmaßnahmen besteht darin, dass diese verrotten. Dadurch haben sie zwar eine deutlich kürzere Lebensdauer als Stahl, jedoch ist oft eine lange Nutzungsdauer gar nicht nötig. Mit den Ergebnissen der Tragfähigkeitsversuche und den Materialeigenschaften der zwei organischen Werkstoffe kann eine Bemessung für die benötigte Lebensdauer durchgeführt werden. Nach Ende der Nutzung verbleiben die Holz- und Bambusnägel im Untergrund und werden abgebaut.

Die geringe Schubfestigkeit im Verhältnis zur Zugfestigkeit stellt allerdings ein gewisses Problem dar. Die an der Gleitfuge wirkenden Schubkräfte können von dem Tragglied nur bedingt aufgenommen werden, beziehungsweise müssen durch einen größeren Querschnitt abgetragen werden. Daher sind hier noch genauere Überlegungen zum Einbauwinkel und zum Abtrag der Kräfte zu führen.

Was die Materialressourcen betrifft, haben sowohl Bambus als auch Buche in Zukunft ein großes Potential. Die Förderung von Buchenholzanwendungen wird in den kommenden Jahren in Europa noch zunehmen. Für den asiatischen und südamerikanischen Bereich ist natürlich die Ausführung mit Bambusstäben von größerer Bedeutung. Das schnell wachsende Gras ist einfach und günstig zu beschaffen.



## 10 Abbildungsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 1: Holzankerwand [3] .....  | 13 |
| Abbildung 2: Zeltförmiges Haus [7] .....                                      | 13 |
| Abbildung 3: Faschine zur Ufersicherung [8].....                              | 13 |
| Abbildung 4: Flöße [7].....   | 13 |
| Abbildung 5: Holzkrainerwand mit Begrünung [5] .....                          | 13 |
| Abbildung 6: Baugerüst aus Bambus für ein Hochhaus [9] .....                  | 13 |
| Abbildung 7: Beispiele von Bodenvernagelungen [5].....                        | 14 |
| Abbildung 8: Komponenten eines Bodennagels [11] .....                         | 14 |
| Abbildung 9: Anwendungen im Tunnelbau [15].....                               | 15 |
| Abbildung 10: Krainerwand aus Holzstämmen [3] .....                           |    |
| Abbildung 11: Herstellungsschritte einer Nagelwand [10].....                  | 17 |
| Abbildung 12: Drehbohrung mit Schnecke und im Spühlverfahren [19] .....       | 18 |
| Abbildung 13: Drehschlagbohrung mit Außenhammer sowie Imlochhammer [19] ..... | 19 |
| Abbildung 14: Bodennagel - Hohlstabsystem Fa. Dywidag [21].....               | 20 |
| Abbildung 15: Bohrröhr der Firma STDS-Jantz .....                             | 21 |
| Abbildung 16: Bohrkronen der Firma STDS-Jantz [22] .....                      | 21 |
| Abbildung 17: Bohrgerät KR 800-1 der Firma Klemm [15] .....                   | 24 |
| Abbildung 18: Systemskizze Bohrgerät [4] .....                                | 24 |
| Abbildung 19: Menzi Muck mit Bohrlafette [25].....                            | 25 |
| Abbildung 20: Injektionspumpe MAI® 400NT [26] .....                           | 26 |
| Abbildung 21: MAI® 400EASY [26].....  | 26 |
| Abbildung 22: Elemente Nagelkopf [30].....                                    | 31 |
| Abbildung 23: Krallenkalottenplatte.....                                      | 32 |
| Abbildung 24: Ringmutter [15] .....   | 32 |
| Abbildung 25: Kopplungsmuffe [15].....  | 38 |
| Abbildung 26: Nachverpressmuffe [35].....                                     | 38 |
| Abbildung 27: Sperrmuffe [35] .....   | 38 |
| Abbildung 28: Dichtmuffe [35] .....   | 38 |
| Abbildung 29: Innere Standsicherheit einer Nagelwand [10] .....               | 39 |
| Abbildung 30: Systemskizze der Nagelwand .....                                | 40 |
| Abbildung 31: Schnitt durch ein Bambusrhizom [6].....                         | 51 |
| Abbildung 32: Druckversuch [44] .....   | 57 |
| Abbildung 33: Furnierschichtholzrohre aus Buche [44] .....                    | 59 |
| Abbildung 34: Vorhandene Verbindungen von Bambus [7].....                     | 60 |

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 35: Schwindbewegung von Holz und Bambus .....             | 61  |
| Abbildung 36: Versagen ohne Stützmaßnahmen .....                    | 63  |
| Abbildung 37: Back Analysis für die rückhaltende Kraft.....         | 64  |
| Abbildung 38: Eingebaute Bodennägel aus Bambus mit 10° Neigung..... | 66  |
| Abbildung 39: Eingebaute Bodennägel aus Stahl mit 15° Neigung.....  | 68  |
| Abbildung 40: Positionen für die Bohrungen .....                    | 70  |
| Abbildung 41: Bagger mit Bohrlafette .....                          | 71  |
| Abbildung 42: Spülung mit Druckluft.....                            | 72  |
| Abbildung 43: Einbringen der Suspension.....                        | 73  |
| Abbildung 44: Händisches Einbringen des Bambusrohres .....          | 74  |
| Abbildung 45: Einbringen des Bambusrohres mit dem Bagger.....       | 75  |
| Abbildung 46: Angespitztes Bambusrohr .....                         | 76  |
| Abbildung 47: Kopfausbildung Bambusnagel .....                      | 77  |
| Abbildung 48: Systemskizze Bambusnagelwand .....                    | 78  |
| Abbildung 49: Vergleichsskizze Bambus – Stahl.....                  | 85  |
| Abbildung 50: Traverse zur Nagelprüfung.....                        | 91  |
| Abbildung 51: Versuchseinrichtung.....                              | 92  |
| Abbildung 52: Laststufen .....                                      | 93  |
| Abbildung 53: Kraft - Verschiebung Nagel 1.....                     | 96  |
| Abbildung 54: Ermittlung der Kriechlast Nagel 1 .....               | 97  |
| Abbildung 55: Stabstahl zum Ansetzen der Presse .....               | 98  |
| Abbildung 56: Belastung Bambusrohr .....                            | 99  |
| Abbildung 57: Entstandene Risse im Bambus und im Zementkörper ..... | 99  |
| Abbildung 58: Bewegung des Zementkörpers aus dem Bambusrohr .....   | 100 |
| Abbildung 59: Herausgezogener Stabstahl.....                        | 101 |

## 11 Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Bohrkronen für Hohlstab-Bodennägel der Firma Dywidag [21] .....        | 23 |
| Tabelle 2: Technische Daten Injektionspumpen [26] .....                           | 26 |
| Tabelle 3: Technische Daten BSt 500 S [27].....                                   | 27 |
| Tabelle 4: Technische Daten S 670/800 [28] .....                                  | 28 |
| Tabelle 5: Technische Daten GFK Anker und Felsbolzen [14] .....                   | 30 |
| Tabelle 6: Technische Daten DYWI® Inject SILO 8044 – Silikat-Ankerharz [33] ..... | 34 |
| Tabelle 7: Angaben zu den Stahldickenverlusten [34] .....                         | 35 |
| Tabelle 8: Minimal notwendige Einkapselung [34] .....                             | 36 |
| Tabelle 9: Materialkosten je Bodennagel .....                                     | 41 |
| Tabelle 10: Materialkosten je Bodennagel .....                                    | 41 |
| Tabelle 11: Technische Daten Betonstahlmatten [37] .....                          | 42 |
| Tabelle 12: Gewicht je Bodennagel .....   | 43 |
| Tabelle 13: Transportkosten der Bodennägel .....                                  | 43 |
| Tabelle 14: Transportkosten Beton und Mörtel .....                                | 44 |
| Tabelle 15: Einbaukosten.....   | 45 |
| Tabelle 16: Aufstellung Gesamtkosten .....  | 46 |
| Tabelle 17: Mittlere Festigkeiten fehlerfreier Kleinproben [38] .....             | 48 |
| Tabelle 18: Festigkeitseigenschaften von Bambus [7] .....                         | 50 |
| Tabelle 19: Stoffgruppen [42] .....   | 55 |
| Tabelle 20: Flächenmomente 2. Grades [43].....                                    | 56 |
| Tabelle 21: Bodenparameter .....  | 62 |
| Tabelle 22: Festigkeitseigenschaften des Bambusrohres.....                        | 65 |
| Tabelle 23: Festigkeitseigenschaften der Stahlnägel.....                          | 67 |
| Tabelle 24: Materialkosten je Bambusnagel .....                                   | 79 |
| Tabelle 25: Beton-/ Mörtelkosten je Bambusnagel.....                              | 80 |
| Tabelle 26: Eigenschaften Betonstahlmatten [37] .....                             | 80 |
| Tabelle 27: Gewicht je Bambusnagel.....   | 81 |
| Tabelle 28: Transportkosten der Bambusnägel.....                                  | 81 |
| Tabelle 29: Transportkosten Beton und Mörtel .....                                | 82 |
| Tabelle 30: Einbaukosten für die Bambusnägel.....                                 | 83 |
| Tabelle 31: Aufstellung Gesamtkosten .....  | 84 |
| Tabelle 32: Materialkostenvergleich Stahl – Bambus .....                          | 86 |
| Tabelle 33: Materialkostenvergleich Zement und Beton .....                        | 87 |
| Tabelle 34: Vergleich Transportkosten .....                                       | 88 |

## Tabellenverzeichnis

---

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 35: Transportkostenvergleich Stahl - Bambus ..... | 88 |
| Tabelle 36: Vergleich Einbaukosten.....                   | 89 |
| Tabelle 37: Gesamtkostenvergleich Stahl - Bambus .....    | 90 |
| Tabelle 38: Messdaten Nagel 1.....                        | 94 |
| Tabelle 39: Messdaten Nagel 2.....                        | 95 |
| Tabelle 40: Kriechmaß Nagel 1 .....                       | 95 |

## 12 Literaturverzeichnis

1. **Schickhofer, Günther.** *Alte & neue Holzhäuser.* Graz : Leopold Stocker Verlag, 2002. 3-7020-0960-4.
2. **Kolymbas, Dimitrios.** *Geotechnik.* Berlin : Springer Verlag, 2007. 978-3-540-68965-2.
3. **Wietek, Bernhard.** *Böschungen und Baugruben.* Innsbruck : Vieweg + Teubner Verlag, 2011. 978-3-8348-1708-2.
4. **Schmidt, Hans-Henning, Buchmaier, Roland F. und Vogt-Breyer, Carola.** *Grundlagen der Geotechnik.* Wiesbaden : Springer Verlag, 2014. 978-3-8348-1620-7.
5. **Boley, Conrad.** *Handbuch Geotechnik.* München : Vieweg + Teubner Verlag, 2012. 978-3-8348-0372-6.
6. **Vélez, Simón.** *Grow Your Own House.* Weil am Rhein : Vitra Design Museum, 2000. 3-931936-25-2.
7. **Dunkelberg, Klaus.** *Bambus.* Stuttgart : Karl Krämer Verlag, 1985. 3-7828-2031-2.
8. **Haaren-Wasseracht.** [www.haaren-wasseracht.de](http://www.haaren-wasseracht.de). [Online] [Zitat vom: 07. 02 2014.] <http://www.haaren-wasseracht.de/index.php/wissenswertes/naturnahe-ufersicherung>.
9. **The Travelling Trini.** [www.thetravellingtrini.com](http://thetravellingtrini.com). [Online] [Zitat vom: 07. 02 2014.] <http://thetravellingtrini.com/2012/10/23/bamboo-boys/>.
10. **Smolczyk, Ulrich.** *Grundbau-Taschenbuch Teil 3: Gründungen.* Berlin : Ernst & Sohn, 2001. 3-433-01447-7.
11. **Dywidag Systems - Geotechnische Systeme.** [www.dywidag-systems.de](http://www.dywidag-systems.de). [Online] [Zitat vom: 01. 09 2014.] [http://www.dywidag-systems.de/uploads/media/DSI\\_SUSPA-Systems\\_DYWIDAG-Geotechnische-Systeme\\_de\\_02.pdf](http://www.dywidag-systems.de/uploads/media/DSI_SUSPA-Systems_DYWIDAG-Geotechnische-Systeme_de_02.pdf).
12. **Kainrath-Reumayer, S. und Dolsak, W.** Gebirgsanker im Berg- und Tunnelbau. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte.* 2008, 153.
13. **Galler, Robert.** 50 Jahre NATM - ein kurzer Abriss. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte.* 2012, 157.

14. **Dywidag Systems - Tunnelbau.** [www.dywidag-systems.at](http://www.dywidag-systems.at). [Online] [Zitat vom: 03. 01 2014.] [http://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI\\_ALWAG-Systems\\_Produkt-Katalog\\_Tunnelbau-und-Bergbau\\_de.pdf](http://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI_ALWAG-Systems_Produkt-Katalog_Tunnelbau-und-Bergbau_de.pdf).
15. **ISCHEBECK.** [www.ischebeck.de](http://www.ischebeck.de). [Online] [Zitat vom: 14. 01 2014.] <http://www.ischebeck.de/startseite/service/prospektbestellung.html>.
16. **Möller, Gert.** *Geotechnik*. Berlin : Ernst & Sohn Verlag, 2012. 978-3-433-02976-3.
17. **Deutsches Institut für Bautechnik.** *Zulassung Z-20.1-101, Fa. Bauer*. s.l. : Zulassungsstelle für Bauprodukte und Bauarten, 2011.
18. **Witt, Karl Josef.** *Grundbau-Taschenbuch Teil 2: Geotechnische Verfahren*. Berlin : Ernst & Sohn, 2001. 3-433-01446-9.
19. **Schnettkerbruecke.** [www.schnettkerbruecke.de](http://www.schnettkerbruecke.de). [Online] [Zitat vom: 31. 12 2013.] [http://www.schnettkerbruecke.de/texte/Anker\\_Verfahren.pdf](http://www.schnettkerbruecke.de/texte/Anker_Verfahren.pdf).
20. **Rüegger, Rudolf.** *Entwurf & Konstruktion in der Geotechnik - Vorlesungsskriptum*. St. Gallen : ETH Zürich, Institut für Geotechnik, 2010.
21. **Dywidag Systems - Drill Hohlstab.** [www.dywidag-systems.at](http://www.dywidag-systems.at). [Online] [Zitat vom: 02. 01 2014.] [http://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI\\_DYWI\\_Drill\\_Hohlstab\\_System\\_AT\\_01.pdf](http://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI_DYWI_Drill_Hohlstab_System_AT_01.pdf).
22. **STDS-Jantz.** [www.stds.de](http://www.stds.de). [Online] [Zitat vom: 08. 01 2014.] <http://www.stds.de/drehbohrwerkzeuge.html>.
23. **Klemm-Bohrtechnik.** [www.klemm-bohrtechnik.de](http://www.klemm-bohrtechnik.de). [Online] [Zitat vom: 09. 01 2014.] [http://www.klemm-bohrtechnik.de/cms/front\\_content.php?idcat=246](http://www.klemm-bohrtechnik.de/cms/front_content.php?idcat=246).
24. **Menzi Muck AG.** [www.menzimuck.com](http://www.menzimuck.com). [Online] [Zitat vom: 09. 01 2014.] <http://www.menzimuck.com/pdf/de/multi/prospekt/p-spezialtiefbau-0310-de.pdf>.
25. **Bauforum 24.** [www.forum.bauforum24.biz](http://www.forum.bauforum24.biz). [Online] [Zitat vom: 09. 01 2014.] <http://forum.bauforum24.biz/forum/index.php?showtopic=58130&st=60>.
26. **MAI INTERNATIONAL GMBH.** [www.mai.at](http://www.mai.at). [Online] [Zitat vom: 15. 01 2014.] <http://www.mai.at/content/blogcategory/127/150/lang.de/>.
27. **Deutsches Institut für Bautechnik.** *Zulassung Z-20.1-108, BVV Stystems GmbH*. s.l. : Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung, 2011.

28. **Dywidag Systems - Bodennägel.** www.dywidag-systems.de. [Online] [Zitat vom: 03. 01 2014.] <http://www.dywidag-systems.de/produkte/geotechnik/dywidag-bodennaegel/uebersicht.html>.
29. **Dywidag Systems - Plus Systeme.** www.dywidag-systems.com. [Online] [Zitat vom: 05. 01 2014.] [http://www.dywidag-systems.com/uploads/media/DSI\\_SUSPA-Systems\\_GEWI-Plus\\_Geotechnik\\_Systeme\\_02.pdf](http://www.dywidag-systems.com/uploads/media/DSI_SUSPA-Systems_GEWI-Plus_Geotechnik_Systeme_02.pdf).
30. **ANP-SYSTEMS.** www.anp-systems.at. [Online] [Zitat vom: 05. 01 2014.] [http://www.anp-systems.at/fileadmin/user\\_upload/downloads/zulassungen/S670\\_Nagel.pdf](http://www.anp-systems.at/fileadmin/user_upload/downloads/zulassungen/S670_Nagel.pdf).
31. **Marte, Roman.** *Vorlesungsunterlagen Bodenmechanik.* Graz : Technische Universität, 2013.
32. **Schwenk Zement.** www.schwenk-zement.de. [Online] [Zitat vom: 09. 02 2014.] <http://www.schwenk-zement.de/Downloads/Technische-Merkblaetter/Spezialbaustoffe/TM-Ankermoertel-Allmendingen.pdf>.
33. **Dywidag Systems - Inject.** www.dywidag-systems.at. [Online] [Zitat vom: 09. 01 2014.] [http://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI\\_ALWAG-Systems\\_DYWI-Inject-Systeme-Anker\\_und\\_Felsbolzen\\_de.pdf](http://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI_ALWAG-Systems_DYWI-Inject-Systeme-Anker_und_Felsbolzen_de.pdf).
34. **Österreichisches Normungsinstitut.**  
*ÖNORM EN 14490: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bodenvernagelung.*  
Wien : Austrian Standards Institute, 2010. EN 14490:2010-06.
35. **Dywidag Systems - Systemzubehör.** www.dywidag-systems.at. [Online] [Zitat vom: 15. 01 2014.] [http://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI\\_ALWAG-Systems\\_DYWI-Drill\\_Systemzubehoer\\_DE\\_01.pdf](http://www.dywidag-systems.at/uploads/media/DSI_ALWAG-Systems_DYWI-Drill_Systemzubehoer_DE_01.pdf).
36. **Harrer Beton & Schotter.** www.harrerbeton.at. [Online] [Zitat vom: 29. 01 2014.] [http://www.harrerbeton.at/index.php?option=com\\_content&task=view&id=16&Itemid=30](http://www.harrerbeton.at/index.php?option=com_content&task=view&id=16&Itemid=30).
37. **BSTG GmbH.** www.bstg.at. [Online] [Zitat vom: 01. 04 2014.] <http://www.bstg.at/at/schlaufenmatten/cqs-matten>.
38. **Schickhofer, Gerhard.** *Skriptum: Holzbau - Der Roh- und Werkstoff.* s.l. : Technische Universität Graz, 2006.
39. **Holzmann, Gerhard, Wangelin, Matthias und Bruns, Rainer.** *Natürliche und pflanzliche Baustoffe.* Wiesbaden : Springer Verlag, 2012. 978-3-8348-1321-3.

40. **Deutscher Holzschutz Verband.** www.holzschutz.com. [Online] [Zitat vom: 04. 03 2014.]  
<http://www.holzschutz.com/de/aussenholzprodukte/wissen/schutzmassnahmen/>.
41. **pro:Holz.** www.proholz.at. [Online] [Zitat vom: 13. 03 2014.]  
<http://www.proholz.at/zuschnitt/45/holz-beton-verbund/>.
42. **Lebensministerium.** www.lebensministerium.at. [Online] [Zitat vom: 13. 03 2014.]  
<http://www.lebensministerium.at/umwelt/abfall-ressourcen/abfall-altlastenrecht/awg-verordnungen/brmtvo.html>.
43. **Schneider, Klaus-Jürgen.** *Bautabellen für Ingenieure.* Düsseldorf : Werner Verlag, 2002. 3-8041-4190-0.
44. **Hirschmüller, Sebastian.** Deutschland : FH Rosenheim, 2014.
45. **Europäisches Komitee für Normung.** *prEN ISO 22477-5: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Prüfung von geotechnischen Bauwerken und Bauwerksteilen -Teil 5: Ankerprüfungen.* Brüssel : Beuth, 2005. prEN ISO 22477-5: 2005-04.