

Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Anwendung von CFK- & GFK- Zuelementen und deren Monitoring in der Geotechnik

Applications of CFRP- & GFRP- tensile elements and their monitoring in
Geotechnical Engineering

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan L. Burtscher, TVFA- Wien

E206

Institut für Hochbau und Technologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Dominik Gächter

0425624

Noflerstraße 9a

A – 6800 Feldkirch

Wien, im Jänner 2013

.....
(Dominik Gächter)

Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen Beteiligten, die zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben, recht herzlich bedanken.

Durch diese Abschlussarbeit habe ich die Komplexität eines recht überschaubar wirkenden Themengebiets kennengelernt. Dadurch bin ich auf die Wichtigkeit der interdisziplinären Betrachtung eines solchen Themengebietes aufmerksam gemacht worden. Für die Erarbeitung zukünftiger Problemstellungen habe ich dadurch eine andere Herangehensweise kennengelernt die für den erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit sehr entscheidend war.

Mein Besonderer Dank gilt Herrn Doz. DI. Dr. techn. Stefan L. Burtscher von der TVFA Wien, der das Erstellen dieser Diplomarbeit ermöglicht hat und mir zu jeder Zeit mit wertvoller Unterstützung zur Seite gestanden ist.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn DI. Dr. techn. Stefan Blovsky, Leiter des Erdbaulabors der TU-Wien, recht herzlich bedanken, da ich durch Ihn auf dieses spannende Thema aufmerksam gemacht wurde wodurch der Grundstein für diese Arbeit gelegt wurde.

Großer Dank gilt auch der Firma Keller Grundbau GmbH die diese Arbeit mit großem Engagement unterstützt hat. Hierbei möchte ich Herrn DI. Dr. techn. Václav Račanský, Beratung und Entwicklung, und Herrn Ing. Reinhard Kulmer, Spartenleiter der Bohr-, Anker- und Injektionstechnik, besonderen Dank aussprechen.

Des Weiteren möchte ich die gesamten Hersteller an dieser Stelle dankend erwähnen, da durch Ihre Bereitschaft mich mit Unterlagen und Erkenntnissen aus den letzten Jahren zu unterstützen diese Arbeit in dieser Form erst ermöglicht wurde.

Sämtlichen Studienkollegen die mich während meiner Zeit an der TU- Wien begleitet haben möchte ich für die unvergesslichen Momente in Wien und an der Universität danken.

Mein größter Dank gehört meiner Familie die mich in den vergangenen Jahren stets unterstützt hat und mich ermüdungslos zum Abschluss dieser Arbeit motiviert hat.

Kurzfassung

In dieser Diplomarbeit werden mögliche Anwendungsgebiete von faserverstärkten Kunststoffen für Bodenanker in der Geotechnik untersucht. Zusätzlich werden auch Systeme für die Überwachung der Zuelemente im eingebauten Zustand evaluiert.

Die zu untersuchenden Zuelemente bestehen aus Kohlenstoff- oder Glasfasern die mit diversen Harzen zu Faserbundwerkstoffen verklebt werden. Diese Elemente sollen eine Alternative zu den konventionell verwendeten Stahlquerschnitten darstellen. Dabei sind die Korrosionsbeständigkeit sowie die hohe Zugfestigkeit von faserverstärkten Kunststoffen in Verbindung mit dem geringen Gewicht dieser Materialien ebenso wie die Zerspanbarkeit hervorzuheben.

Bislang werden CFK- Elemente vor allem in der Automobil- und Luftfahrtbranche eingesetzt sowie für nachträgliche Bauteilverstärkungen im Hoch- und Brückenbau. In der Geotechnik werden GFK-Produkte hauptsächlich in Form von Rohren, Manschettenrohre für die Injektionstechnik, sowie für temporäre Ortsbrustsicherungen im Tunnelbau eingesetzt. CFK- Produkte finden aufgrund fehlender Erkenntnisse über deren Einsetzbarkeit, in den oft sehr widrigen Bedingungen des Spezialtiefbaus, nur sehr selten Anwendung. Daher gilt es im Zuge dieser Arbeit die am Markt erhältlichen Produkte in Verbindung mit deren Eigenschaften zu untersuchen und deren Anwendungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Um die tatsächliche Einsetzbarkeit der faserverstärkten Kunststoffe zu beurteilen werden diese in einer Wirtschaftlichkeitsanalyse mit dem derzeit dominierenden Material, Stahl, gegenübergestellt.

Für das Monitoring wird das in den letzten Jahren stark weiterentwickelte Fiber-Optic-Sensing herangezogen. Die vor kurzem veröffentlichten Neuerungen im Bereich des Fiber-Optic-Sensing lassen auf eine detaillierte, kontinuierliche Messung von Dehnungen in der Krafteinleitungsstrecke hoffen. Bislang waren die Dehnungsmessungen auf einige wenige Punktmessungen entlang der Haftstrecke beschränkt. Hierbei wird jedoch angemerkt, dass dieser Einsatz in den oft schwierigen Bedingungen des Spezialtiefbaus noch genauer untersucht und in Feldversuchen erprobt werden muss.

Abstract

In this Master's Thesis I would like to show up the different applications of Fibre-Reinforced-Materials in case of geotechnical engineering. The main topic is to find a proper way to use this materials as the tensile element of ground anchors. Meanwhile steel is the most common material used for this application, because of missing knowledge about the Fiber Reinforced Materials. In this Thesis the focus is on Glasfibre- and Carbonfibre- Reinforced Materials because of their high tensile strength and many advantages competing to steel. One of the biggest advantage I would like to highlight is the high resistance against chemical environments, especially corrosion resistance.

First of all there is an overview of different types of ground anchors as well as a discussion of the different characteristics of Fibre Reinforced Materials. There will be an economical analysis of the different materials in competition to the mainly used material, steel as well as a design of a Carbon Fibre anchor including the Fibre Optic Monitoring.

The second major topic is the monitoring of these tensile tendons during their lifetime. Therefore are the different ways of monitoring with Fibre-Optic elements discussed. Fibre Optic Sensors are quite new on the market but offers a lot of advantages for the application in geotechnical engineering. This kind of material is widely used for data transfer in the electrical branch but till now not often in the harsh conditions of ground engineering. For the applications in geotechnical engineering this system can open a completely new way of monitoring and help to improve the understanding of the relation between the geotechnical elements and the surrounding soil. For the monitoring of ground anchors the strain distribution along the fixed-length of prestressed anchors can be shown with fibre optic sensors in a high resolution what was not possible till now. Another useful application is the monitoring of these anchors during the whole lifetime to see the performance and changes in the load and strain distribution.

Especially in the present situation where just the price is the criteria to get a jobsite it's very important to have a deeper understanding of the soilmechanics to design the geotechnical elements in an economical way.

The usability of the designed anchor needs to be tested in the real geotechnical surroundings to find out if this type is working well or not.

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT	1
KURZFASSUNG	2
ABSTRACT	3
INHALTSVERZEICHNIS	4
1 EINLEITUNG	8
2 GESCHICHTLICHER ÜBERBLICK.....	9
2.1 Verpressanker.....	9
2.2 Faserverbundwerkstoffe	9
2.2.1 Glasfaserkunststoffe.....	10
2.2.2 Kohlefaserkunststoffe.....	11
3 VERANKERUNGEN IN DER GEOTECHNIK	12
3.1 Allgemein	12
3.2 Einteilung der Anker.....	13
3.2.1 Ankertypen.....	14
3.2.1.1 Freispielanker	14
3.2.1.1.1 Verbundanker.....	14
3.2.1.1.2 Druckrohranker	15
3.2.1.1.3 Anker mit aufweitbarem Verpresskörper.....	16
3.2.1.1.4 Anker mit ausbaubarem Zugglied	16
3.3 Konstruktive Ausbildung von Verpressankern	19
3.3.1 Ankerbauteile.....	19
3.3.1.1 Ankerkopf.....	19
3.3.1.2 Zugglied.....	21
3.3.1.3 Verpresskörper.....	22
3.3.1.4 Abstandshalter.....	24

3.3.2	Korrosionsschutz.....	25
3.4	Nägels und Injektionsbohranker	27
3.4.1	Herstellung der Nägel	27
4	FASERVERBUNDWERKSTOFFE.....	29
4.1	Allgemein	29
4.2	Zusammensetzung	29
4.2.1	Matrix.....	30
4.2.1.1	Polyester	30
4.2.1.2	Vinylester.....	31
4.2.1.3	Epoxide	31
4.2.2	Faser.....	31
4.2.2.1	Allgemein	31
4.2.2.2	Glasfaser.....	32
4.2.2.3	Kohlenstofffaser	33
4.2.2.4	Aramidfaser.....	33
4.3	Herstellung.....	34
4.3.1	Allgemein.....	34
4.3.2	Pultrusion	34
4.3.3	Pullbraiding	35
4.3.4	Pullwinding	35
4.4	Mechanische Eigenschaften der Verbundwerkstoffe.....	36
4.4.1	Versagensmechanismen.....	38
4.4.2	Ermüdung	39
4.4.3	Temperatur.....	39
4.4.4	Feuchtigkeit.....	40
4.4.5	Alkalität.....	40
5	EINSATZ VON CFK- UND GFK- ZUGELEMENTEN	41
5.1	Allgemein	41
5.2	GFK- Elemente	41
5.3	CFK-Elemente.....	43
6	MONITORING MIT FIBRE OPTIC TECHNIK.....	47
6.1	Allgemein	47

6.2	Grundlagen von Lichtwellenleitern	48
6.2.1	Licht	48
6.2.2	Brechung und Reflexion.....	48
6.2.3	Streuung.....	49
6.2.4	Rayleigh Streuung	49
6.2.5	Brillouin and Raman Streuung	49
6.3	Aufbau von Glasfasermesselementen.....	49
6.3.1	Single Mode Faser.....	50
6.3.2	Multi Mode Faser.....	50
6.3.3	Verbindungen von Fasern.....	50
6.3.3.1	Splice- Verbindung.....	51
6.3.3.2	Verbindungsstecker.....	51
6.4	Optische Zeitbereichsreflektometrie - Optical Time Domain Reflectometry (OTDR).....	52
6.4.1	Verteilte Brillouin Messmethode - Distributed Brillouin Sensing.....	52
6.4.2	Messmethoden nach dem Prinzip der Brillouin-Methode	53
6.4.2.1	Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR).....	54
6.4.2.2	Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA)	54
6.5	Fiber Bragg Grating– Methode	54
6.6	Geotechnische Anwendungen.....	55
6.6.1	Entwicklungen der Fiber Optic Technik.....	56
6.6.2	Kraftübertragung in den Baugrund	56
7	ENTWICKLUNG EINES ANKERS MIT INKLUDIERTEM ÜBERWACHUNGSSYSTEM	59
7.1	Allgemein	59
7.2	Ankertyp	59
7.2.1	Ankeraufbau	60
7.2.1.1	Zugglied.....	60
7.2.1.2	Ankerkopf.....	61
7.2.1.3	Verpresskörper.....	65
7.2.1.4	Monitoringsystem	67
7.3	Ankerdesign	70
7.3.1	Verbundkeilverankerung	70
7.3.2	Klebeverankerung.....	73
7.3.3	Einsatzmöglichkeiten	75
7.3.3.1	Hangsicherungen	75
7.3.3.2	Auftriebssicherungen	76

7.3.3.3	Korrosionsschutz – chemische Belastungen	77
7.3.3.4	Wiedergewinnbare Anker.....	78
7.3.3.5	Gewichtersparnis - Manipulation der Ankerprodukte.....	78
7.3.3.6	Überwachungssystem für geotechnische Strukturen.....	80
8	WIRTSCHAFTLICHKEIT DER ANKERPRODUKTE	83
8.1	Allgemein	83
8.2	Glasfaserprodukte.....	83
8.2.1	Eigenschaften	83
8.2.2	Preisvergleich.....	84
8.3	Kohlenstofffaserprodukte	85
8.3.1	Eigenschaften	85
8.3.2	Preisvergleich.....	86
8.4	Stahlprodukte	88
8.4.1	Eigenschaften	88
8.4.2	Preisvergleich.....	88
8.5	Vergleich der Produkte.....	90
8.5.1	Wiedergewinnbare Anker	91
8.5.2	Nägels und Injektionsbohranker	93
9	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	95
9.1	Zusammenfassung	95
9.2	Ausblick.....	96
10	LITERATURVERZEICHNIS	97
11	ANHANG	102
A1	Merkblatt des Magistrat 48 – Baugrubensicherung.....	102
A2	Berechnungsunterlagen zur Bodenvernagelung	102

1 Einleitung

Die in dieser Arbeit herangezogenen CFK- und GFK- Elemente gehören zu der Gruppe der Faserverbundwerkstoffe. Diese Werkstoffe sind durch die Verstärkung von Kunststoffen mit Fasern, in diesem Falle mit Karbon- [Kohlestoff] bzw. Glas- fasern, gekennzeichnet. Weitere Faser-Materialien die zur Verstärkung der Kunststoffe herangezogen werden, sind Aramidfasern, verschiedene Naturfasern sowie Basaltfasern.

Das Hauptaugenmerk in meiner Diplomarbeit liegt auf der Anwendung dieser CFK- und GFK- Verbundwerkstoffe als Anker in der Geotechnik. Diese Bodenanker sollen sowohl temporär als auch dauerhaft zum Einsatz kommen sollen.

Der hier zur Untersuchung kommende Bodenanker gehört zur Gruppe der Verpressanker. Verpressanker setzen sich aus drei Hauptbestandteilen, dem Zugglied, dem Ankerkopf und dem Verpresskörper, zusammen. Der Unterschied zu konventionellen Verpressanker liegt in der Ausbildung des Zuggliedes. Dieses wird nicht durch das klassische Material Stahl repräsentiert sondern durch CFK- bzw. GFK- Elemente. Ebenfalls in die Betrachtung mit einfließen sollen die wesentlichen Unterschiede von Stahl gegenüber von Faserverbundwerkstoffen. Hierzu zählen unter anderem das geringe Gewicht, die hohe chemische Beständigkeit sowie die hohe Festigkeit in Faser- Längsrichtung von CFK- und GFK- Materialien.

Faserverbundwerkstoffe werden bislang in den verschiedenen Bereichen des Transportwesens (Automobil, Raumfahrt und Flugzeugtechnik), der Elektrotechnik (Laptops, Chip-Träger, Mobiltelefone...), des Sportsektors (Fahrräder, Golfschläger, Tennisschläger...) sowie der Bauwirtschaft (Bauteilverstärkungen) erfolgreich eingesetzt.

Daraus wird ersichtlich, dass mit den Anwendungen dieser Verbundwerkstoffe unter den oft sehr harschen Randbedingungen des Spezialtiefbaus ein wesentlicher Unterschied zu den oben erwähnten Bereichen besteht.

Dieser Aspekt gilt vor allem auch in Bezug auf das Monitoring dieser Verbundwerkstoffe. Hierzu gibt es erste Forschungsprojekte die jedoch meist unter Laborbedingungen durchgeführt wurden. Für eine ständige Überwachung der Zugelemente bietet sich das Fiber-Optic-Sensing System an.

An dieser Stelle soll erwähnt werden dass in diesem Zusammenhang die Möglichkeit geprüft werden soll die Sensoren bereits beim Herstellungsprozess in das Element einzuarbeiten. Dadurch würde das bislang übliche nachträgliche applizieren der Messtechnik entfallen.

2 Geschichtlicher Überblick

2.1 Verpressanker

Der Begriff des Ankers stammt aus der Schifffahrt. Hierbei stellt der Anker jenes Element dar, welches das Schiff vor dem Abtreiben durch Wellen, Wind oder andere Einflüsse sichert.

Daraus abgeleitet sind auch Anker welche in der Geotechnik eingesetzt werden, Sicherungselemente, um Bauwerke vor unterschiedlichsten Einwirkungen zu schützen.

Die ersten Versuche Verpressanker einzusetzen gehen auf das Jahr 1930 bis 1940 in Frankreich zurück. Wesentliche Schwierigkeiten bereiteten damals die Ausbildung des Ankerkopfes und die Einleitung der Ankerkräfte über den Verpresskörper in den Baugrund. Die ersten Verpressanker wurden zur Ertüchtigung von Staumauern, sprich in Fels oder Massenbeton, eingesetzt.

Die Entwicklung von Verpressanker in Lockergestein geht auf den Neubau des Bayrischen Rundfunk Hauses in 1958 zurück. Dabei sollte die erste überschnittene Bohrfahlwand Deutschlands mittels Zugglieder in 10m dahinter liegenden Verankerungsbrunnen verankert werden. Durch die zum damaligen Zeitpunkt noch sehr beschränkte Bohrtechnik erreichte eine Vielzahl der Bohrungen die Verankerungsbrunnen nicht, sondern endeten im Lockergestein. Da zum Zurückziehen des Bohrgestänges Kräfte im Bereich der geplanten Ankerkräfte notwendig waren, wurde der Versuch unternommen, durch Einbringen von Zementsuspension diesen Widerstand zu erhöhen. Beim Ziehen des Bohrgestänges wurden Zugstangen in die Bohrkronen eingeschraubt und die Ersten 5 m des Bohrloches mit Zementsuspension verpresst. Nach einigen Tagen der Aushärtung konnte bei Probelastungen die Anker bis zur Fließgrenze belastet werden. [3][2][61]

2.2 Faserverbundwerkstoffe

Die Bauindustrie wurde bislang von den traditionellen Baustoffen, Stein, Holz, Beton und Stahl geprägt. Stein- und Holz- Konstruktionen haben über viele Jahrhunderte die Basis des Bauens gebildet und wurden später durch Beton, Stahl und Stahlbeton ergänzt. Da sowohl Stahl als auch Beton gewissen Alterungsprozessen unterliegt entsteht das Bedürfnis nach Neuen alterungsbeständigeren Materialien. Heutzutage werden alle Objekte nach ihren Lebenszykluskosten beurteilt, wodurch gerade den Erhaltungskosten eine wesentliche Bedeutung zukommt. Dadurch haben auch Faserverbundwerkstoffe die oft ein Vielfaches von Stahl kosten die Möglichkeit sich am Markt zu etablieren.

Diese Verbundwerkstoffe werden bereits über 50 Jahren in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt jedoch erst seit ca. 20 Jahren auch im Bereich der Bauwirtschaft. Da es eine Vielzahl an verschiedenen Faserverbundwerkstoffen gibt, soll an dieser Stelle erwähnt werden dass in dieser Arbeit auf jene, die in der Bauwirtschaft zum Einsatz kommen, Bezug genommen wird. [62]

Dabei kommen Faserverbundwerkstoffe vor allem zur Bauteilverstärkung in Form von Kohlestofflamellen zur Anwendung. Glasfaserkunststoffe werden hauptsächlich für Tankanlagen, im Rohrleitungsbau und in Sonderfällen auch zur Herstellung von Betonbewehrung verwendet.



Abb. 1: Anwendungsbeispiel von CFK- Lamellen als Deckenverstärkung und rechts ein GFK- Bewehrungskorb für Bohrpfähle aus [43][41]

Der bislang dominierende Baustoff in Zusammenhang mit Ankern stellt Stahl bzw. bei Verpressankern Spannstahl dar. Dies resultiert vor allem aus der langjährigen Erfahrung in der Handhabung mit diesem Baustoff bzw. in den vergleichsweise geringen Kosten gegenüber Faserverbundwerkstoffen. Verstärkt wird dieser Vorteil dadurch, dass alternative Materialien in Bezug auf diesen Anwendungsbereich noch nicht genug erforscht wurden. Hierzu zählen insbesondere die Faserverbundwerkstoffe in ihrer Wechselwirkung mit dem umgebenden Baugrund.

2.2.1 Glasfaserkunststoffe

In der folgenden Abbildung ist die Verwendung von GFK- Materialien nach verschiedenen Branchen dargestellt. Daraus ist ersichtlich dass 36% der Gesamtproduktion von Glasfaserverbundwerkstoffen in der Bauwirtschaft ihren Einsatz finden. In Europa liegt die voraussichtliche GFK Jahresproduktion bei 1.01 Millionen Tonnen. Das weltweit größte Wachstum mit 200.000 to/Jahr hat die Türkei zu verzeichnen. Dies ist mit Orientierung der türkischen Industrie in den Bereichen der Erzeugung von Rohren und Tankanlagen zu begründen. Ein weiterer Faktor in diesem Zusammenhang ist, dass die Türkei das zweitgrößte Wirtschaftswachstum nach der Volksrepublik China seit dem Jahre 2011 ausweist. [62]

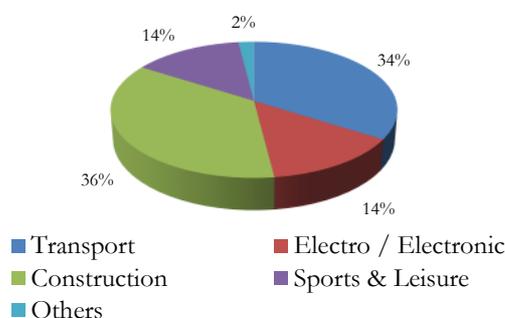


Abb. 2: Aufteilung der GFK Produktion in Europa nach Industriezweigen aus [62]

2.2.2 Kohlefaserkunststoffe

Bei CFK Materialien liegt der Anteil der direkt in die Bauindustrie fließt bei 9%, wobei in diesem Marktsegment mit einem Zuwachs von 132% bis im Jahre 2020 gerechnet wird.

Diese 9% setzen sich aus 44% Betonverstärkungen, 37% Brücken- und Tunnelanierungen, 10% Neubauten und 9% anderer Baugewerke zusammen. Derzeit größter Verbraucher von CFK-Materialien stellt die Produktion von Rotorblättern für Windkraftanlagen dar und schlägt mit 23% zu Buche. Auf die Luft- und Raumfahrt entfallen 16% wobei hier 11% dem Flugzeugbau zuzuschreiben sind. [62]

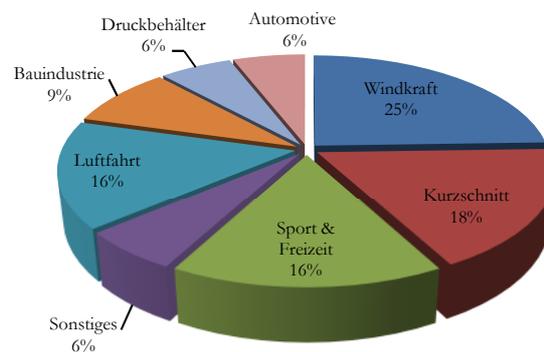


Abb. 3: Aufteilung der globalen CFK Produktion nach Industriezweigen aus [62]

Der bislang mit 6% recht niedrig scheinende Anteil der Automobilindustrie wird mit zunehmender Möglichkeit der Serienfertigung von CFK- Teilen sicherlich an Bedeutung gewinnen.

Mit 98% aller Karbonfasern geht der überwiegende Anteil in die Produktion von Verbundmaterialien. 57.000 to produzierter Karbonverbundmaterialien im Jahr 2011 repräsentieren einen Marktumsatz von 72 Mrd. Euro. Das Wachstum wird derzeit auf 6% geschätzt das 2015 einem Umsatzvolumen von 91 Mrd. Euro entspricht. [62]

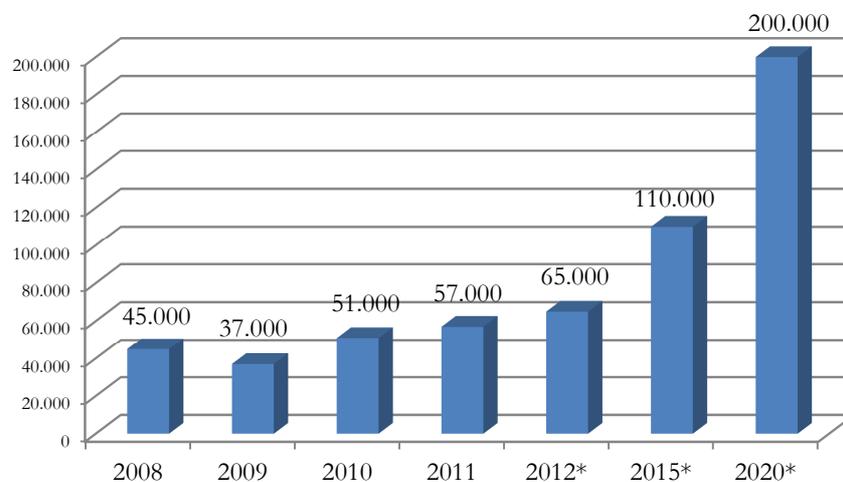


Abb. 4: Globaler CFK Bedarf in Tonnen, * Prognose lt. Experten

3 Verankerungen in der Geotechnik

3.1 Allgemein

Verankerungen in der Geotechnik werden hauptsächlich für zwei unterschiedliche Anwendungen herangezogen. Dies ist einerseits der Einsatz in Verbindung mit Geländesprüngen und andererseits im Untertagebau. In beiden Bereichen können sowohl vorgespannte Verpressanker wie auch Bodennägel, die über die gesamte Länge verpresst werden, zur Anwendung kommen. In der nachfolgenden Abbildung sind beide Varianten mit typischen Anwendungen bei Geländesprüngen angeführt.

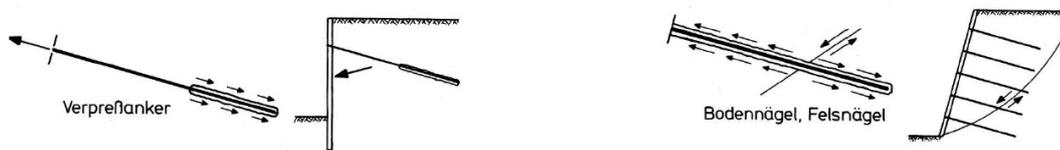


Abb. 5: Darstellung eines Verpressankers und dessen Anwendung bei einer Wandverankerung links sowie rechts: Darstellung eines Bodennagels und dessen Einsatz zur Sicherung eines Geländesprungs aus [61]

Im Untertagebau stellen die Anker ein wichtiges Sicherungselement nach der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NÖT) dar. Dabei geht es um die Stützung des Gebirges bis zum Einbau der endgültigen Tunnelschale. Es wird im Untertagebau zwischen Einzelanker und Systemanker unterschieden. Einzelanker dienen vor allem zum Schutz der Mannschaft vor absturzgefährdeten Einzelblöcken sowie zur Erhaltung der geforderten Ausbruchsgometrie. Die Systemanker sind durch den Einsatz mehrerer Anker und Ankertypen gekennzeichnet um neben einem Verdübelungseffekt auch den Aufbau eines Gebirgstragring zu gewährleisten. [1][2]

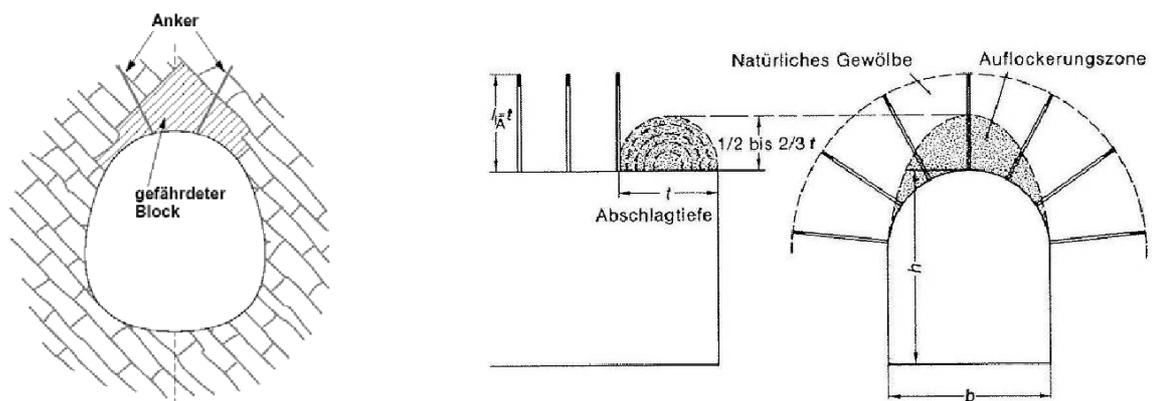


Abb. 6: Links: Einzelanker zur Sicherung absturzgefährdeter Blöcke und rechts: Entstehung des Gebirgstragring durch Systemankerung aus [1]

3.2 Einteilung der Anker

Durch die Vielzahl an verschiedenen Ankertypen und Randbedingungen in der Geotechnik gibt es ebenso viele Unterscheidungsmöglichkeiten von Ankersystemen. Die folgende Auflistung soll nur einen Auszug bzw. die gängigsten Merkmale widerspiegeln.

Einteilung nach dem Zugglied:

- Material des Zugglieds
- Einstabanker
- Litzenanker
- Bündelanker (Mehrstabanker)

Nach der Vorspannung:

- Ohne Vorspannung
- Mit Vorspannung

Nach der Haftstrecke:

- Freispielanker (Haftstrecke + Freispielstrecke)
- Blockierte Anker

Nach der Ankerlänge:

- Kurze Anker (z.B.: Nägel)
- Lange Anker (bis über 120m)

Nach der Kraftübertragung:

- Verpressanker (mit und ohne Nachverpressen)
- Klebeanker
- Reibungsanker (Swellexanker)
- Spreizanker

Nach der Einsatzdauer:

- Kurzzeitanker (< 2 Jahre)
- Daueranker (> 2 Jahre)

Nach dem Korrosionsschutz

- Einfacher Korrosionsschutz
- Doppelter Korrosionsschutz

Nach dem Verwendungszweck

- Sicherung von Stützbauwerken
- Hangsicherungen bzw. Hangstabilisierungen
- Verankerungen von Zugseilen (Seilbahnen, Hängebrücken)
- Sicherung gegen Kippen (Staumauern, Tüme)
- Sicherung gegen Aufschwimmen von Konstruktionen

3.2.1 Ankertypen

Verpressanker stellen ein bewährtes Verankerungssystem im Locker- und Festgestein dar. Die Unterscheidung der Ankertypen beruht auf den unterschiedlichen Konstruktionsmerkmalen und der Kraftübertragung vom Anker auf den Boden. Die wesentlichen Ankertypen sind wie folgt.

Ankertypen		
Unterscheidung	Typ	Charakteristika
Krafteinleitung in den Baugrund	Verbundanker	Krafteinleitung von Verpresskörper in den Baugrund von der Luftseite
	Druckrohranker	Krafteinleitung von Verpresskörper in den Baugrund von der Bergseite
	Anker mit aufweitbaren Verpresskörpern	Krafteinleitung durch Formschluss über einen Metallbalg, der mit Zementsuspension aufgeweitet wird
Art des Stahlzuggliedes	Einstabanker	Spannstähle \varnothing 20 bis 63,5mm
	Mehrstabanker (Bündelanker)	3 bis 13 Stäbe \varnothing 12mm
	Litzenanker	2 bis 22 Litzen \varnothing 0,6'' bzw. 0,62''
Einsatzzeit	bis zu 2 Jahren	Kurzzeitanker mit einfachem Korrosionsschutz
	mehr als 2 Jahre	Daueranker mit doppeltem Korrosionsschutz

Tab. 1: Bauarten von Verpressankern

3.2.1.1 Freispielanker

Es wird bei den Freispielankern zwischen Verbundankern und Druckrohrankern unterschieden. Freispielanker setzen sich aus drei wesentlichen Elementen zusammen. Dies sind die Haftstrecke, die Freispielstrecke und der Ankerkopf. In der Haftstrecke oder auch Verankerungslänge genannt kommt es zur Übertragung der Ankerkraft in den umliegenden Baugrund. Das in der Freispielstrecke frei bewegliche Stahlzugglied wird nach dem Aushärten des Verpresskörpers vorgespannt. Die dadurch erzeugte Ankerkraft wirkt somit auf das Bauteil bzw. stützt den Erdkörper. Durch den Vorspannvorgang ist im Vergleich zum Nagel keine Verschiebung vom verankerten Bauteil notwendig um die Stützkraft zu aktivieren. [1][2][3]

3.2.1.1.1 Verbundanker

Die nächste Abbildung zeigt den schematischen Aufbau eines Verbundankers in Form eines Einstabankers. Wesentliches Merkmal des Verbundankers ist, dass der Verpresskörper in der Haftstrecke das Stahlzugglied vollständig umschließt. Dabei werden die Ankerkräfte von den Zuggliedern aus geripptem Stabstahl oder verseilten Drähten in den Zementstein und dann weiter in den Baugrund abgeleitet. Dem Korrosionsschutz in der Haftstrecke gilt bei Daueranker besondere Aufmerksamkeit, da durch die Ankerkräfte und die damit zusammenhängenden Dehnungen, Querrisse im Verpresskörper verursacht werden können.

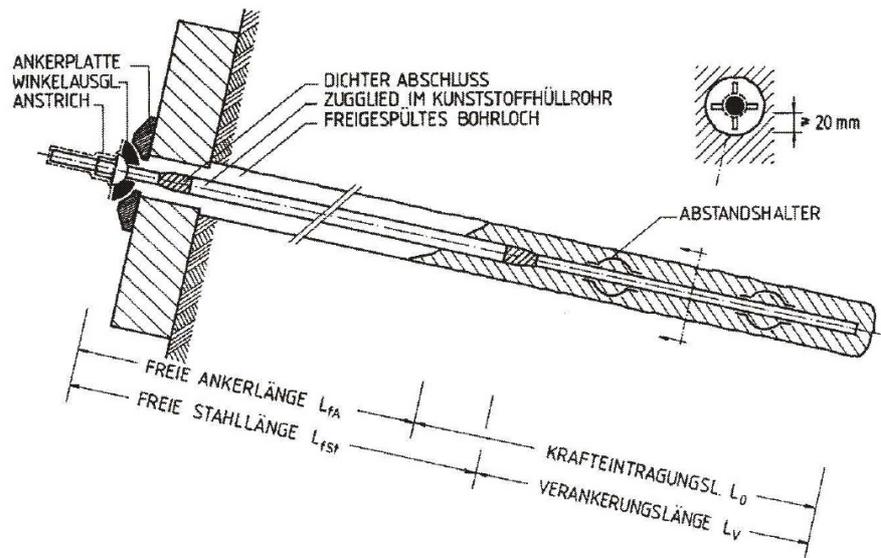


Abb. 7: Aufbau eines Verbundankers in Form eines Einstabankers aus [60]

3.2.1.1.2 Druckrohranker

Druckrohranker zeichnen sich durch den Aufbau des Ankers im Verpresskörper aus. Dabei wird das Zugglied in ein geripptes Stahlrohr, welches bergseitig in eine Bodenplatte eingeschraubt ist, eingeführt wodurch das Zugglied vom Ankerkopf bis über die gesamte Haftstrecke frei dehnbar bleibt. Durch diese Konstruktion bleibt der Verpresskörper durch die vorherrschenden Druckspannungen frei von Querrissen. Die Vermeidung dieser Querrisse ist von entscheidender Bedeutung für den Korrosionsschutz. Durch die aufwendigere Konstruktion im Vergleich mit Verbundanker werden diese hauptsächlich als Daueranker eingesetzt, da der Korrosionsschutz besser zu gewährleisten ist. Im nächsten Bild sind die Elemente eines Druckrohrankers mit dem soeben beschriebenen frei dehnbaren Zugglied zu sehen. [3][16][61]

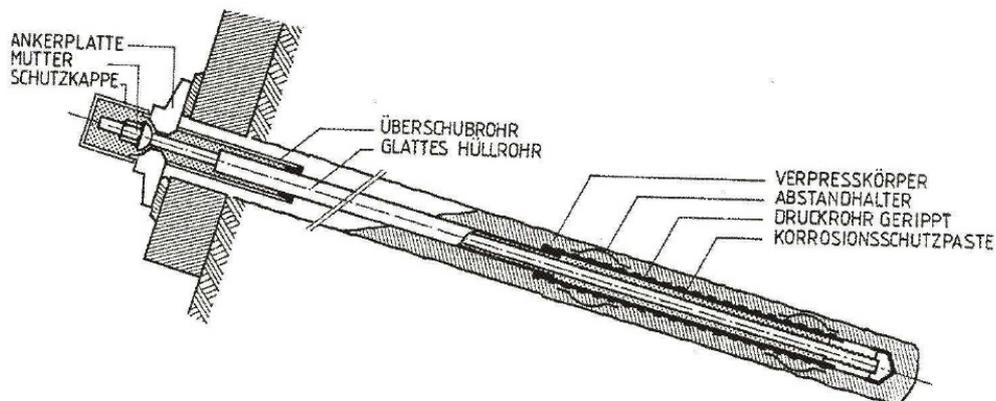


Abb. 8: Aufbau eines Druckrohrankers aus [60]

3.2.1.1.3 Anker mit aufweisbarem Verpresskörper

Dieser Ankertyp wurde von der Firma Atlas Copco entwickelt und stellt eine Sonderform der Verpressanker dar. Merkmal dieses Anker ist der aus Stahlblech gefertigte Faltenbalg, der sogenannte Expander Body. Dieser Expander Body wird entweder eingerammt oder im Schutz einer Verrohrung im Bohrloch tiefsten eingebaut und mittels Zementsuspension zu zwiebel förmigen Körper aufgeweitet. Anschließend wird in die frische Suspension ein Stahlzugglied eingebaut, das im Bereich der freien Stahllänge durch ein Hüllrohr geschützt ist. Diese Anker können bereits nach Aushärtungszeiten von 1 bis 2 Tagen belastet werden, was zum großen Vorteil dieser Anker zählt. Bislang hat sich die Anwendung dieser Anker auf sehr weiche verdrängungsfähige Böden beschränkt wodurch deren Einsatz in Österreich, aus geologischer Sicht, sehr beschränkt ist. [61]

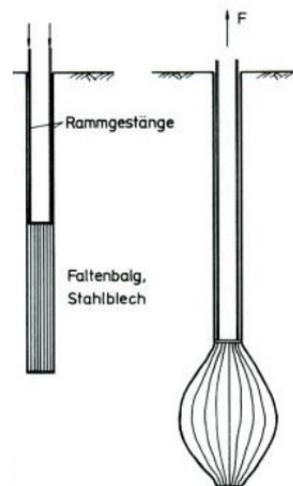


Abb. 9: Anker mit aufweisbarem Verpresskörper, links mit Rammgestänge und rechts der Expander Body im aufgeweiteten Zustand aus [61]

3.2.1.1.4 Anker mit ausbaubarem Zugglied

Diesem Ankertyp kommt in dieser Arbeit besondere Bedeutung zu, da ein solcher Anker auch aus karbonverstärktem Kunststoff entwickelt werden soll. Gerade bei temporären Anker kommt es im innerstädtischen Bereich oft vor, dass Nachbargrundstücke für die Verankerung von Baugrubenverbauungen benötigt werden. Um spätere Tiefbaumaßnahmen auf den Nachbargrundstücken durch die Ankerbauteile nicht zu behindern, wird der Rückbau sämtlicher Stahlteile vertraglich festgehalten. Um den nachträglichen Ausbau zu gewährleisten haben die Hersteller verschiedene Systeme entwickelt bei denen entweder alle Stahlelemente oder nur die wesentlichen Zugelemente ausgebaut werden können. Je nach Produkt besteht die Möglichkeit Freispielanker folgendermaßen auszubauen:

- Rückbau des Zugglieds nur im Bereich der freien Stahllänge
- Einzelne kleine Stahlteile verbleiben im Verpresskörper, Zugglied wird vollständig ausgebaut
- Vollständiger Ausbau sämtlicher Stahlteile der Ankerkonstruktion

Der nachträgliche Ausbau von Einstabanker wird zunächst durch das Abbrennen der Anker Mutter entspannt und dann durch die weich werdende Mutter gezogen. Das Lösen der Ankerkräfte ist auch

bei Litzenanker, wenn diese hinter dem Kopf eine freie Zuggliedstrecke aufweisen, durch abbrennen der Keile oder der Keilträger möglich. In den nachfolgenden Punkten werden die meist eingesetzten Verfahren kurz erläutert und die häufigsten Probleme beschrieben. [61][3]

Bei Einstab-Druckrohrankern werden die Anker durch kopfseitiges drehen aus dem Druckrohr herausgeschraubt und dann gezogen. Bei dieser Methode verbleiben das Druckrohr und der Verpresskörper im Baugrund.

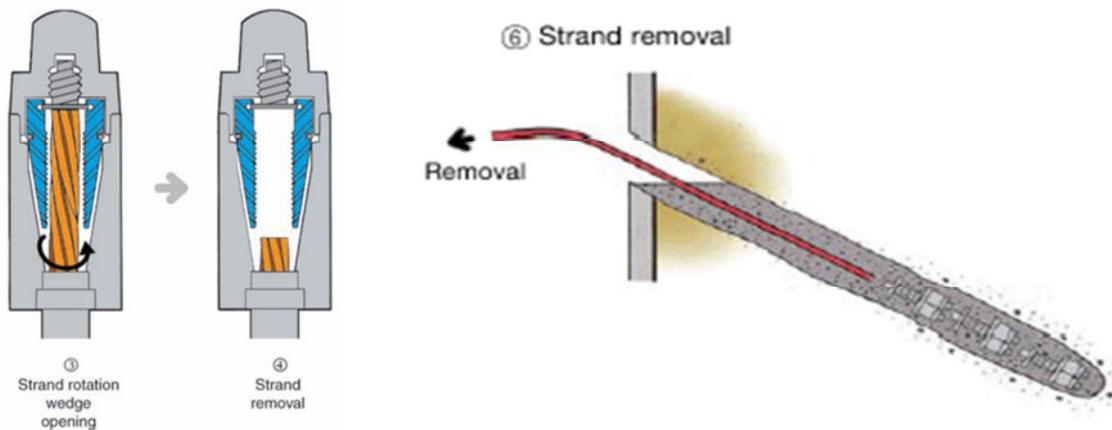


Abb. 10: Druckrohranker bei dem sich durch Drehen das Spannstahls aus der Fußmuffe löst und dann aus dem Bohrloch gezogen werden kann aus [42]

Litzenanker der Firma DSI werden mit einer Sollbruchstelle am Ende der luftseitigen Haftstrecke versehen. Dies geschieht bei der Produktion durch induktive Erwärmung an der Sollbruchstelle. Beim Ausbau werden diese dann direkt am Beginn des Verpresskörpers abgerissen. Durch die induktive Wärmebehandlung müssen die Zugfestigkeiten der Zugglieder abgemindert werden. Bei diesem Verfahren kann es durch das Abreißen der Litzen zum Verseilen der Drähte kommen, weswegen diese immer in gefetteten PE-Rohren geführt werden sollten. In der nächsten Abbildung ist der Aufbau eines Stufenankers mit Sollbruchstellen im Bereich des Verpresskörpers dargestellt.

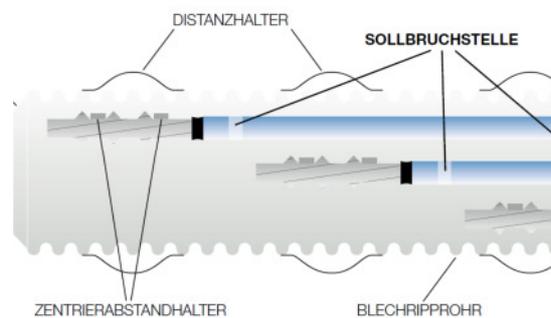


Abb. 11: Aufbau eines Stufenankers mit Sollbruchstellen zum nachträglichen Rückbau des Ankers, dabei verbleibt das Zugglied das im Verpresskörper liegt im Baugrund, aus [40]

Eine andere Möglichkeit die Anker rückzubauen wurde von der Firma Keller Grundbau GmbH entwickelt. Hierbei werden die Litzen, welche auf der gesamten Länge in PE-Rohren geführt werden,

über einen Umlenksattel am Bohrlochtiefsten wieder zurück zum Bohrlochmund gezogen. Diese Schlaufenführung ermöglicht es nach dem Lösen des Ankers das gesamte Zugglied ausziehen. Auch bei diesem System müssen die Zugfestigkeiten durch den kleinen Umlenkradius abgemindert werden.



Abb. 12: Wiedergewinnbarer Litzenanker nach dem System der Firma Keller Grundbau GmbH bei dem die Litzen über einen Umlenksattel in Schlaufen im Bohrloch eingebaut werden, aus [42]

Eine Methode bei der auch der Verpresskörper zerlegt wird arbeitet mit Sprengladungen, welche den Verbund der Zugglieder mit dem Zementstein und den Verpresskörper selbst sprengen. Die Sprengladungen werden bei der Herstellung der Anker über Rohre an den entsprechenden Stellen in der Haftstrecke positioniert und unmittelbar vor dem Ausbau gezündet. Bei dieser Methode ist auf Erschütterungen durch das Sprengen zu achten bzw. die Zündleitungen während der Bauzeit vor Beschädigungen zu schützen.

Eine andere Art des Sprengens wird bei der Methode von Bilfinger + Berger und Brückner eingesetzt. Dabei wird ein Konus durch den Verpresskörper gezogen, wodurch dieser aufgesprengt wird und die Litzen gezogen werden können. Dieser Aufbrechkonus ist an einer Litze, die im Zentrum des Ankers angeordnet ist, befestigt und wird vor dem Ausbau vom Bohrlochtiefsten bis zum Ankerkopf durchgezogen. Schwierigkeiten können durch das Verdrillen der Litzen in der freien Stahllänge entstehen, bzw. wenn der Verpresskörper durch den Konus nicht aufgesprengt werden kann. In folgender Abbildung sind Zwei Arten von Aufbrechkonen dargestellt. [60][61]

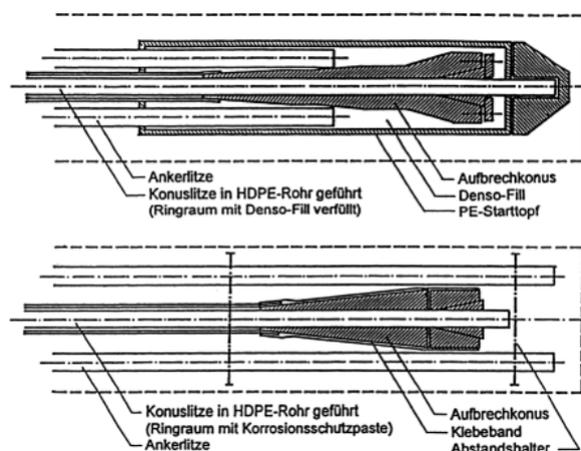


Abb. 13: Aufbrechkonen mit zentraler Zuglitze aus [60]

3.3 Konstruktive Ausbildung von Verpressankern

Wenn man von Verpressankern spricht ist es wichtig zwischen Bodennägeln, Zugpfählen und Verpressankern zu unterscheiden. Sowohl die Konstruktions- als auch die Sicherheitskonzepte unterscheiden sich bei Nägeln und vorgespannten Ankern grundlegend. Zugpfähle und Bodennägel sind über ihre gesamte Länge kraftschlüssig mit dem Baugrund verbunden, wobei Freispielanker immer auch eine frei bewegliche Zuggliedstrecke aufweisen. Dadurch teilt sich der Anker in die Freispiellänge und in die Haftstrecke, die es ermöglichen den Kräfteinleitungsbereich klar zu definieren.

Anker haben die Aufgabe, Kräfte über ihre Lebensdauer mit ausreichender Sicherheit in den Baugrund abzuleiten. Großer Bedeutung kommt dabei dem Korrosionsschutz zu um ein Versagen während der Nutzungsdauer ausschließen zu können. Sämtliche Einwirkungen auf die Anker während der Einsatzdauer müssen bei der Bemessung berücksichtigt werden um ein plötzliches Versagen durch z.B.: chemische Einwirkungen auf das Zugglied zu vermeiden.

Werden Anker als Dauer- oder Kurzzeit- Anker eingesetzt so bedarf es einer bauaufsichtlichen Zulassung der Ankerprodukte. Sollte ein Produkt diese Zulassung nicht vorweisen können, muss die Zustimmung für den Einsatz dieses Systems bei der zuständigen Baubehörde eingeholt werden.

3.3.1 Ankerbauteile

Verpressanker sämtlicher Ausführungsvarianten bestehen aus Drei Hauptbauteilen:

- Ankerkopf
- Zugglied
- Verpresskörper

In den folgenden Erläuterungen werden jene Bestandteile näher beschrieben, die für den Einsatz der Faserverbundwerkstoffe von großer Bedeutung sind. Es werden die üblich verwendeten Materialien und Konstruktionsweisen beschrieben um einen Vergleich mit den Faserverbundwerkstoffen ziehen zu können.

3.3.1.1 Ankerkopf

Der Ankerkopf ist im Allgemeinen der einzig sichtbare Bauteil eines Ankers nach dem Einbau, bzw. während der Nutzungsdauer. Je nach Ankertyp und abhängig von der Anzahl der Zugglieder gibt es unterschiedliche Konstruktionen von Ankerköpfen.

Die Aufgabe des Ankerkopfes ist es die Ankerkraft vom Zugglied in die zu verankernde Konstruktion einzuleiten. Dabei darf das Spannen des Zuggliedes sowie gegebenenfalls das Nachlassen, Entspannen und Wiederanspannen durch den Ankerkopf nicht gestört werden. Der Ankerkopf muss derart ausgebildet sein dass die auf der Baustelle durchzuführenden Ankerprüfungen, Eignungs- und Abnahme- Prüfungen problemlos durchgeführt werden können. Nach DIN EN 1537 muss der Ankerkopf 100% der charakteristischen Bruchkraft des Zuggliedes übertragen können.

Einstabanker werden über Muttern, je nach System und Stahlgüte mit Rechts- oder Linksgewinde, auf die entsprechende Ankerkraft festgelegt. Dadurch ist eine schlupfarme Übertragung der Kräfte gewährleistet und auch das Nachlassen oder Nachspannen ist einfach zu bewerkstelligen.

Die Verankerung bei Litzen und Bündelanker wird über Klemmkeile die in einem Keilträger zu sitzen kommen sichergestellt. Durch die Keile entsteht ein sogenannter Biss wodurch ein nachträgliches Entspannen und Wiederanspannen nur bedingt möglich ist. Bei dieser Verankerungsart ergibt sich ein Schlupf von bis zu 5mm, weswegen nur in Sonderfällen ohne Verkeilungseinrichtung die Keile festzulegen sind. Angaben zum Schlupf sind den jeweiligen Zulassungen zu entnehmen. In Abbildung 14 sind die soeben beschriebenen Ankerköpfe schematisch dargestellt. [61]

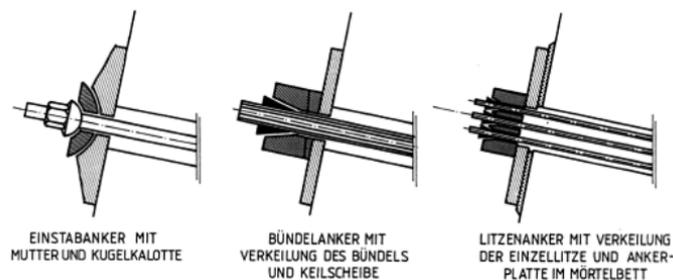


Abb. 14: Konstruktionsprinzip von Ankerköpfen aus [60]

Da diese Anker oft unter sehr rauen Bedingungen und zu allen Jahreszeiten eingebaut werden kommt es zu Ungenauigkeiten die jedoch großen Einfluss auf die Systeme haben können. Besonders sind Winkelabweichungen zwischen Ankerkopf und Zugglied zu beachten. Diese sind bei Installation des Ankerkopfes zu beheben um Nebenspannungen in den Zuggliedern zu vermeiden. Dies kann wie in den oben dargestellten Systemskizzen über Kalottenmuttern oder durch Keilscheiben erreicht werden. Der am einfachsten zu beherrschende Fall ist der senkrecht zur Auflagerfläche verlaufende Anker. Dies kann jedoch durch die örtlichen Gegebenheiten auf den Baustellen nur selten in dieser Weise hergestellt werden. Deshalb ist diesem Detail bei der Installation viel Aufmerksamkeit zu schenken da Winkelabweichungen zum Versagen der Verkeilung führen können. In Abbildung 15 sind die Gurtung einer Spundwand mit dem Ankerkopf, sowie der eingefräste Sitz des Ankerkopfs bei Bohrpfählen mit geneigtem Ankereinbau dargestellt.



Abb. 15: Links: Gurtung einer Spundwand mit aufgesetztem Ankerkopf aus [60] und rechts: durch einfräsen vorbereiteter Sitz des Ankerkopfs bei Bohrpfählen aus [42]

3.3.1.2 Zugglied

Zugglieder bestehen in den überwiegenden Fällen aus Stahl. Dabei kommen Spannstähle und Baustähle in verschiedenen Güteklassen zum Einsatz. Die Aufgabe des Zuggliedes ist es, die am Ankerkopf eingeleitete Ankerkraft in die Haftstrecke weiterzuleiten. In der nachfolgenden Tabelle sind die Zugglieder nach Ankertypen und Stahlgüten sortiert. Dies stellt nur ein kleiner Auszug aus den am Markt erhältlichen Produkten dar. Auf die Faserverbundwerkstoffe die bis dato nur bei Sonderfällen zur Anwendung kommen wird im Kapitel Einsatz von CFK- und GFK- Zugelementen näher eingegangen.

Zugglieder für Verpressanker					
Bezeichnung	Anzahl der Stäbe Litzen Bündel	Durchmesser Einzelstab Einzellitze [mm]	Stahlgüte [N/mm ²]	Zulässige Kraft nach EC 7 [kN]	Bemerkungen
Einstabanker aus Spannstahl	1	26,5	835/1030		Stahl warmgewalzt, gereckt und angelassen, mit Gewinderippen, Rechtsgewinde
		32	835/1030		
		36	835/1030		
		26,5	950/1050		
		32	950/1050		
		36	950/1050		
		40	950/1050		
		26,5	1080/1230		
Einstabanker aus Baustahl	1	32	500/550		Linksgewinde
		40	500/550		
		50	500/550		
		63,5	550/700		
Bündelanker	3 bis 12	12	1420/1570		vergüteter Spannstahl
Litzenanker	2 bis 12	0,6``	1570/1770	126 pro Litze	Litzen bestehen aus 7 kaltgezogenen runden glatten Einzeldrähten Ø 5mm
	2 bis 12	0,62``	1570/1770	135 pro Litze	
	2 bis 12	0,6``	1660/1860	133 pro Litze	
	2 bis 12	0,62``	1660/1860	143 pro Litze	

Tab. 2: Kennwerte für Zugglieder von Verpressankern in Abhängigkeit von Ankertyp und Stahlgüte aus

[60]

Wie aus dieser Tabelle ersichtlich werden für Einstabanker sowohl Spannstähle wie auch Baustähle eingesetzt. Das aufgewalzte Gewinde wird sowohl für die Verankerung am Kopf wie auch für die Übertragung der Kräfte vom Zugglied in den Verpresskörper herangezogen. Durch den Einsatz von Stabelementen kann es zu Problemen bei beengten Platzverhältnissen vor dem Bohrloch kommen bzw. den Einsatz eines anderen Zuggliedes erfordern.

Bei Litzenanker werden 2 bis 12 Litzen je aus 7 Drähten bestehend zur Kraftübertragung herangezogen. Durch die hohe Flexibilität der Litzen können diese auch unter sehr beschränkten Platzverhältnissen eingesetzt werden. Die hohen Stahlgüten und die Anzahl der Litzen sind für die in

Tabelle 3 aufgelisteten Bemessungswerte in Abhängigkeit der jeweiligen Schadensfolgeklasse verantwortlich. Diese übertragbaren Ankerkräfte sind für die Wirtschaftlichkeit der Litzenanker ausschlaggebend.

Litzenanker nach EC 7							
Nenn- durchmesser	Litzenanzahl	Stahl- querschnitt [mm ²]	Bruchlast [kN]	Kraft bei 0,1% Dehnung F _{p0,1} [kN]	Bemessungswert R _{t,d} nach EC 7		
					Schadens- folgeklasse CC 1 [kN]	Schadens- folgeklasse CC 2 [kN]	Schadens- folgeklasse CC 3 [kN]
0,62` 15,7 mm	2	300	558	492	428	389	357
	3	450	837	738	642	584	535
	4	600	1116	984	856	778	713
	5	750	1395	1230	1070	973	892
	6	900	1674	1476	1283	1166	1069
	12	1800	3348	2952	2567	2334	2139
0,60` 15,3 mm	2	280	520	458	398	362	332
	3	420	780	687	597	543	498
	4	560	1040	916	797	724	664
	5	700	1300	1145	996	905	830
	6	840	1560	1374	1195	1086	996
	12	1680	3120	2748	2390	2172	1991

Tab. 3: Bruchlasten und Bemessungswerte von Litzenanker in Abhängigkeit der Stahlgüte und der Schadenfolgeklasse nach EC 7

Bündel- bzw. Mehrstabanker können mit 3 bis 12 Einzelstäben aus Spannstahl hergestellt werden. Diesen Ankertyp findet man hauptsächlich bei älteren Ankerkonstruktionen die zur dauerhaften Stützung hergestellt wurden.

3.3.1.3 Verpresskörper

Der Verpresskörper bildet die Verbindung von Anker und Baugrund. Dadurch ist der üblicherweise zylindrische Körper auch für die Einleitung der Ankerkraft in den Boden oder das Gestein verantwortlich. Die Länge der Verpressstrecke ist stark vom Boden und von der zu übertragenden Kraft abhängig wobei die gängigen Längen bei 4 bis 10m liegen. In Abbildung 16 ist die Mantelreibung über die Länge des Verpresskörpers dargestellt. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Steigerung der Länge der Haftstrecke ab einem gewissen Maße keinen wesentlichen Einfluss auf die übertragbare Kraft hat. [1][2]

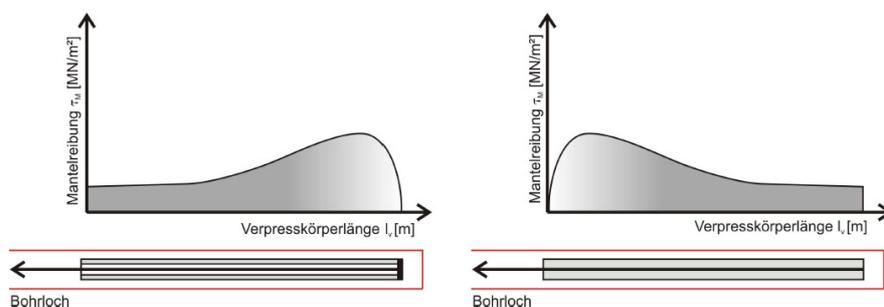


Abb. 16: Links: Spannungsverteilung entlang der Haftstrecke bei Druckrohrankern und rechts bei Verbundankern aus [1]

Die Analyse dieser Spannungsverteilung hat zur Entwicklung der SBMA-Anker (Single Bore Multiple Anchor) geführt. Dabei wird das Bohrloch durch mehrere Einzelanker mit gestaffelten Verpresskörpern ideal ausgenutzt wodurch wesentlich höhere Lasten pro Bohrloch übertragen werden können. SBMA-Anker sind vor allem bei sehr hohen Lasten, in Kombination mit geringem Platzangebot für die Anker wirtschaftlich, da dadurch zusätzliche Bohrungen eingespart werden können. Die Spannungsverteilung entlang der Haftstrecke eines SBMA-Druckrohrankers ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Aus dieser Darstellung ist die wesentlich gleichmäßigere Spannungsverteilung über die Verpresslänge ersichtlich, wodurch eine sehr effiziente Kraftübertragung ermöglicht wird.

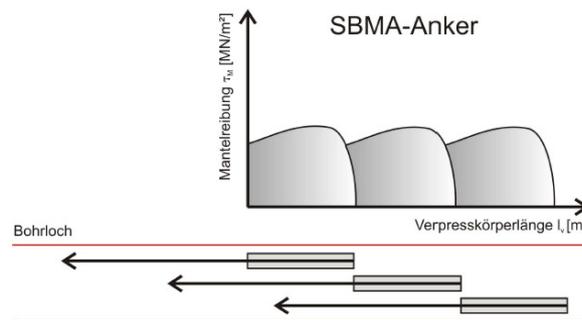


Abb. 17: Spannungsverteilung entlang der Haftstrecke in Abhängigkeit der Verpresskörperlänge eines Druckrohrankers aus [1]

Die Ankerart und somit die Einwirkung der Kräfte auf den Verpresskörper haben großen Einfluss auf den Korrosionsschutz von Daueranker. Während bei Verpressankern es durch die Dehnung des Zugliedes zu Querrissen in der Haftstrecke kommt weisen Druckrohranker, durch die Krafteinleitung vom Bohrlochtieferen aus, keine Risse infolge Zugspannungen auf.

Bei der Herstellung des Verpresskörpers wird zwischen zwei Arten des Verpressens unterschieden. Diese sind das Erstverpressen bei der Ankerherstellung und das sogenannte Nachverpressen, das zur Erhöhung der Tragfähigkeit zur Anwendung kommt. Das Verpressen an sich wird mit Zementsuspensionen welche an die örtlichen Bedingungen anzupassen sind durchgeführt. Dabei liegen die Drücke je nach Baugrund zwischen 5 und 15 bar. Bei Verpressarbeiten ist immer die tatsächliche und die theoretische Verpressmenge einander gegenüberzustellen. Ein Suspensionsverbrauch von 150 bis 200% der theoretischen Menge ist üblich wobei bei erheblichen Abweichungen die Ursachen festzustellen sind. Bei felsigem Untergrund können Wasserabpressversuche Auskunft über die möglichen Verpressmengen liefern. Das Nachverpressen kann einmalig oder auch des Öfteren erfolgen. Ziel dabei ist es, die Verspannung des Verpresskörpers durch zusätzliche Suspensionsbeigabe mit dem Baugrund zu verbessern und dadurch die Tragfähigkeit zu erhöhen. Die Drücke liegen bei 5 bis 30 bar. Besonders in bindigen Böden kann durch das Nachverpressen die Tragfähigkeit bis zu 30% erhöht werden. Die folgende Abbildung zeigt unterschiedliche Anordnungen der Nachverpressrohre und der Zuglieder. [61]

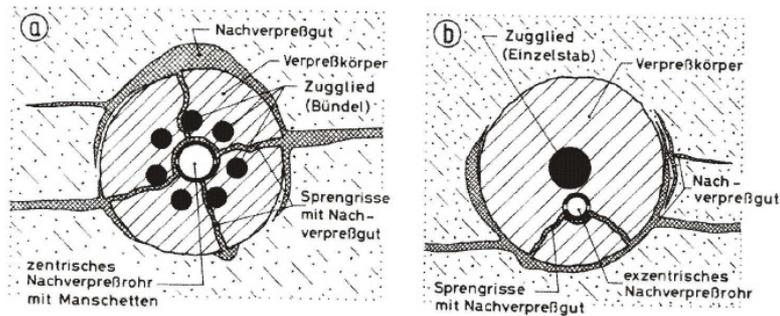


Abb. 18: Unterschiedliche Anordnung der Nachverpressrohre im Anker links mit Manschettenrohr und rechts ohne Packer, aus [1]

3.3.1.4 Abstandshalter

Abstandshalter kommt bei der Herstellung von Anker eine sehr große, jedoch oft nicht ausreichend berücksichtigte Bedeutung zu. Es sei erwähnt, dass Abstandshalter nicht direkt dem Verpresskörper oder dem Zugglied zuzuordnen sind, weswegen hier ein eigener Unterpunkt eingeführt wurde jedoch die 3 erstgenannten Punkte die Hauptbestandteile der Anker darstellen.

Die meist aus Kunststoff bestehenden Federkorb-Abstandshalter haben großen Einfluss auf die Tragfähigkeit und die Korrosionsbeständigkeit von Ankerprodukten. Sollte die Zementsteindeckung des Zuggliedes nicht oder in zu geringer Stärke hergestellt worden sein kann dies zum schlagartigen Aufreißen des Verpresskörpers unter Belastung führen. Für die Optimierung der Bohrlochdurchmesser, die einen erheblichen Kostenanteil der Gesamtankerkosten darstellen, sind die Abstandshalter in ausreichender Anzahl sehr wichtig. Das Anliegen des Zuggliedes an der Bohrlochwandung wird dadurch verhindert und eine ausreichende Umschließung mit Zementsuspension sichergestellt. Federkorbabstandshalter sind in einer Bandbreite von 10 bis 300mm Innendurchmesser erhältlich.



Abb. 19: Federkorbabstandshalter in verschiedenen Größen links und rechts Anwendungsbeispiele aus [38]

Wichtig ist es beim Einbau der Zugglieder darauf zu achten, dass die Abstandshalter gut befestigt sind um beim Einschieben der Anker die Aufteilung untereinander beizubehalten und dadurch die exakte Lage der Anker im Bohrloch zu gewährleisten.

3.3.2 Korrosionsschutz

Korrosion bei Ankerkonstruktionen ist ein immer wieder auftretendes Problem, jedoch sind in der Literatur nur sehr wenige Berichte und Analysen zu den bekannten Problemen zu finden. Diesem Thema wird in Zukunft viel Aufmerksamkeit zukommen wenn die mittlerweile über 40 Jahre alten Ankerkonstruktionen bei Inspektionen auf Korrosionsschäden untersucht werden. [16]

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln erwähnt haben verschiedenste Randbedingungen Auswirkungen auf den Korrosionsschutz des Ankers. Nach Eurocode 7 – DIN EN 1537 ist der Korrosionsschutz in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer der Anker geregelt. Dabei wird zwischen Kurzzeit- und Daueranker unterschieden. Man spricht bei Kurzzeitankern vom einfachen und bei Dauerankern vom doppelten Korrosionsschutz. Naturgemäß ist der doppelte Korrosionsschutz aufwendiger und muss gleichzeitig den Anker für die Lebensdauer eines Bauwerkes von 80 bis 100 Jahren funktionsfähig erhalten. Für diese Zeitspanne liegen noch keine Erfahrungen vor, da diese Anker erst seit ca.40 Jahren im Einsatz sind. An dieser Stelle soll erwähnt werden, dass gerade die Korrosionsbeständigkeit von karbonfaserverstärkten Kunststoffen ein großer Vorteil dieser Produkte darstellt. [16]

Da bis auf den Ankerkopf nichts mehr sichtbar bleibt muss dem Korrosionsschutz beim Einbau besondere Aufmerksamkeit zukommen. Ein Versagen von Ankerkonstruktionen kann enorme Schadensfälle verursachen und auch Todesopfer fordern. Ein vollständiges Versagen von Bauwerken aufgrund von Korrosionsschäden an Ankern ist auf wenige Einzelfälle weltweit beschränkt.



Abb. 20: Korrosionsschäden an Litzen, Rechts und Links Lochfrasskorrosion im Bereich des Ankerkopfs aus [16]

Spannungsrisskorrosion an einfach korrosionsgeschützten Ankern hat in der Vergangenheit mehrfach zu Sprödbrüchen an Ankerkonstruktionen geführt. Doppelt geschützte Anker weisen bislang einen ausreichenden Schutz gegen Korrosion auf und können mittels Widerstandsmessungen bei der alljährlichen Inspektion überprüft werden. [16]

Für das Erreichen der Korrosionsbeständigkeit werden je nach Zulassung Pasten, Korrosionsschutz-Binden und Vaselinen verwendet. Es dürfen je nach Produkt nur die in der bauaufsichtlichen Zulassung genannten Mittel zum korrosionsschützen verwendet werden.

Die folgende Tabelle stellt einen Auszug der Maßnahmen zum Korrosionsschutz für Kurzzeit und Daueranker nach DIN EN 1537 dar.

	Kurzzeitanker	Daueranker
Ankerkopf	<p>Schutzkappe aus Stahl oder aus Kunststoff</p> <p>Beschichtung mit Korrosionsschutzmasse und/oder in Kombination mit getränkten Binden</p> <p>Die Verrohrung der freien Stahllänge darf nicht an Auflagerplatte und Ankerkopf angeschlossen oder mit einem Rohrstutzen an die Auflagerplatte angeschweißt werden</p>	<p>Beschichtete und/oder eine verzinkte Schutzkappe aus Stahl mit Wandstärke >3mm oder feste Kunststoff-Schutzkappe mit einer Wandstärke >5mm</p> <p>Bei abnehmbaren Schutzkappen: Auspressen mit plastischer Korrosionsschutzmasse und Abdichtung mit einer Dichtung</p> <p>Bei nicht abnehmbaren Schutzkappen: Verfüllen mit Zementmörtel oder Kunstharz</p> <p>Zwischen Ankerkopf und freier Stahllänge beschichteter oder verpresster oder einbetonierter Rohrstutzen aus Stahl oder Kunststoff mit Korrosionsschutzmasse oder mit Zementmörtel oder Kunstharz verfüllt</p>
Freie Stahllänge	<p>Kunststoffverrohrung für jedes einzelne Zugglied mit Endabdichtung gegen Wassereintritt oder mit Korrosionsschutzmasse verfüllt oder Sammelverrohrung aus Kunststoff oder aus Stahl für alle Zugglieder mit Endabdichtung gegen Wassereintritt oder mit Korrosionsschutzmasse verfüllt</p>	<p>Kunststoffhüllrohr um jedes einzelne Zugglied mit Korrosionsschutzmasse in Kombination mit a, b, c oder d</p> <p>Kunststoffhüllrohr um jedes einzelne Zugglied mit Zementmörtel verfüllt in Kombination mit a oder b</p> <p>Kunststoffhüllrohr für Zuggliedbündel mit Zementmörtel gefüllt in Kombination mit b</p> <p>a) Kunststoffhüllrohr das mit plastischer Korrosionsschutzmasse verfüllt ist</p> <p>b) Kunststoffhüllrohr das an beiden Enden gegen das Eindringen von Wasser abgedichtet ist</p> <p>c) Kunststoffhüllrohr das mit Zementmörtel gefüllt ist</p> <p>d) Stahlhüllrohr das mit dichtem Zementmörtel gefüllt ist</p>
Verankerungs-Länge bzw. Haftstrecke	<p>Zementüberdeckung gegen die Bohrlochwand >10mm</p> <p>Und</p> <p>Bei aggressiven Baugrundbedingungen zusätzlich ein geripptes Hüllrohr um das Zugglied</p>	<p>Varianten der Umhüllung</p> <p>Ein einziges geripptes Kunststoffhüllrohr das das Zugglied oder die Zugglieder und den Zementmörtel umschließt</p> <p>Zwei konzentrische gerippte Kunststoffhüllrohre die im Kern- und Ringbereich zwischen den gerippten Hüllrohren voll mit Zement oder Kunstharz verpresst sind</p> <p>Ein einziges geripptes Kunststoffhüllrohr mit Zementmörtel vorverpresst und mit einer Zementmörtelüberdeckung zwischen Hüllrohr und Stahlstab von >5mm</p> <p>Ein einziges Manschettenrohr aus Stahl oder geripptem Kunststoff mit >3mm Dicke und einer Mörtelüberdeckung von >20mm</p> <p>Ein einziges geripptes Stahlhüllrohr (Druckrohr) um die eingefetteten Zugglieder mit einer Zementmörtelüberdeckung vom Hüllrohr und der Kunststoffkappe von >10mm</p>

Tab. 4: Auszug aus den Korrosionsschutzmaßnahmen aus DIN EN 1537

3.4 Nägel und Injektionsbohranker

Nägel unterscheiden sich im Tragverhalten und der Wirkungsweise wesentlich von vorgespannten Freispielankern. Nägel die im Boden oder Fels zur Anwendung kommen werden über ihre gesamte Länge verpresst, nicht vorgespannt und bestehen üblicherweise aus Stahl- oder Kunststoff-Zuggliedern. Diese Stabelemente sind als Voll- oder Hohl- Stäbe erhältlich. Bei der sogenannten Vernagelung des Baugrundes wird durch die kraftschlüssige Verbindung der Nägel mit dem umgebenden Boden ein standfester Verbundkörper hergestellt. Im Gegensatz zu den vorgespannten Anker sind bei Boden- und Felsnägel Verformungen notwendig um die Mantelreibungskräfte zu aktivieren. Nägel werden sehr oft zur Stabilisierung und Sicherung von Stützkonstruktionen, Hängen und im Tunnelbau eingesetzt. Durch Ihre schnelle Herstellbarkeit werden Sie auch oft als Gründungselement zur Auftriebssicherung eingesetzt. [1][2][61]

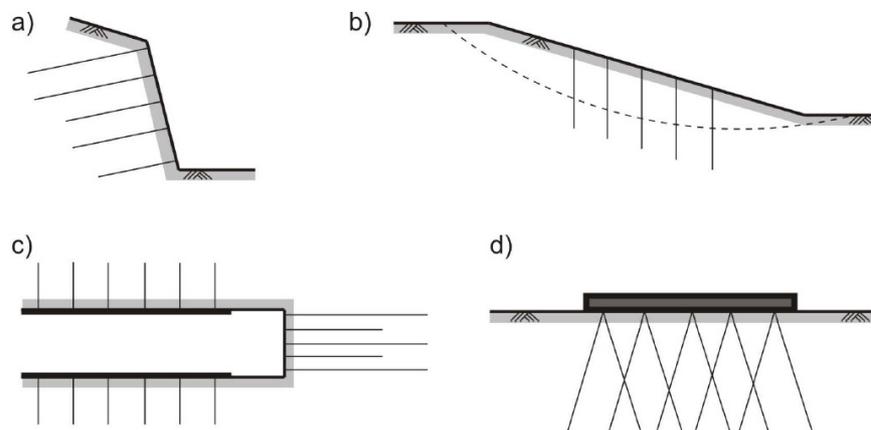


Abb. 21: Anwendungsgebiete von Boden- und Felsnägel: a) Stützkonstruktionen, b) Hangsicherungen, c) Tunnelbau, d) Gründungen aus [1]

3.4.1 Herstellung der Nägel

Auch in der Herstellung der Nägel gibt es Unterschiede in der Vorgangsweise zu den im vorigen Kapitel erläuterten Ankertypen. Nägel können gerammt, vibriert oder durch bohren in den Baugrund eingebracht werden. Die Entscheidung über das Einbringverfahren wird nach Analyse des Bodenprofils des anstehenden Baugrunds getroffen. Je nach Verfahren werden die Nägel in das bereits mit Zementsuspension gefüllte Bohrloch eingebaut oder nach Einbau des Zuggliedes verpresst. Zur Aktivierung der maximalen Tragfähigkeit der Nägel, ist das Nachverpressen eine oft angewandte Technik. [61]

Eine Sonderform der Herstellung stellen die sogenannten Injektionsbohranker dar. Diese dienen sowohl als Bohrgestänge, Zugglied und auch als Verpressleitung. Dabei wird nach dem Abbohren des Nagels durch dessen Hohlraum mit dem Verpressvorgang begonnen. Da bei dieser Anwendung nur vom Bohrlochtieferen aus verpresst werden kann kommt es zu sehr unregelmäßigen Verpresskörpern. Nach dem Aushärtungsprozess des Verpressmörtels werden auf der noch nicht vollständig abgebundenen Stützkonstruktion (meist eine Spritzbetonschale) die Kopfplatte und die Mutter fixiert, wodurch ein kraftschlüssiger Verbund hergestellt wird.

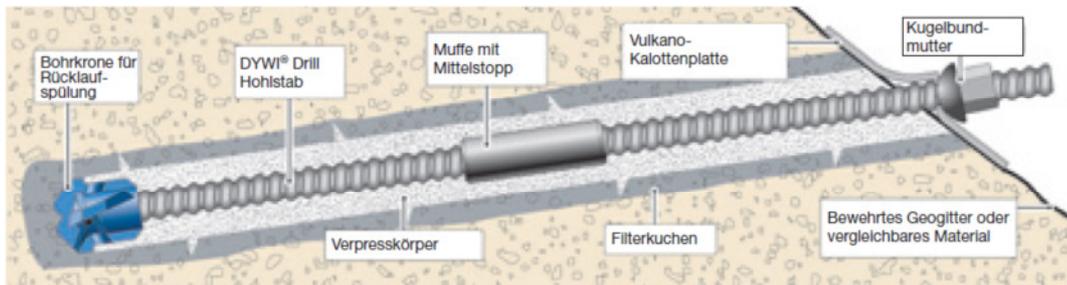


Abb. 22: Aufbau eines Injektionsbohrankers mit verlorener Bohrkronen aus [40]

Bei Nägeln wird die Unterscheidung, wie bei den zuvor beschriebenen Ankern, über die Nutzungsdauer vollzogen. Somit gibt es Temporärnägel, mit einer Einsatzzeit < 2 Jahren und Dauernägel, mit einer Nutzungsdauer > 2 Jahren. Temporärnägel müssen einen einfachen Korrosionsschutz aufweisen und werden in dieser Form oft zur Sicherung von Baugruben eingesetzt. Die Dauernägel haben als zusätzlichen Korrosionsschutz ein geripptes Hüllrohr über die gesamte Länge, wobei der Ringraum zwischen Zugglied und Hüllrohr mit Zementsuspension verfüllt sein muss.

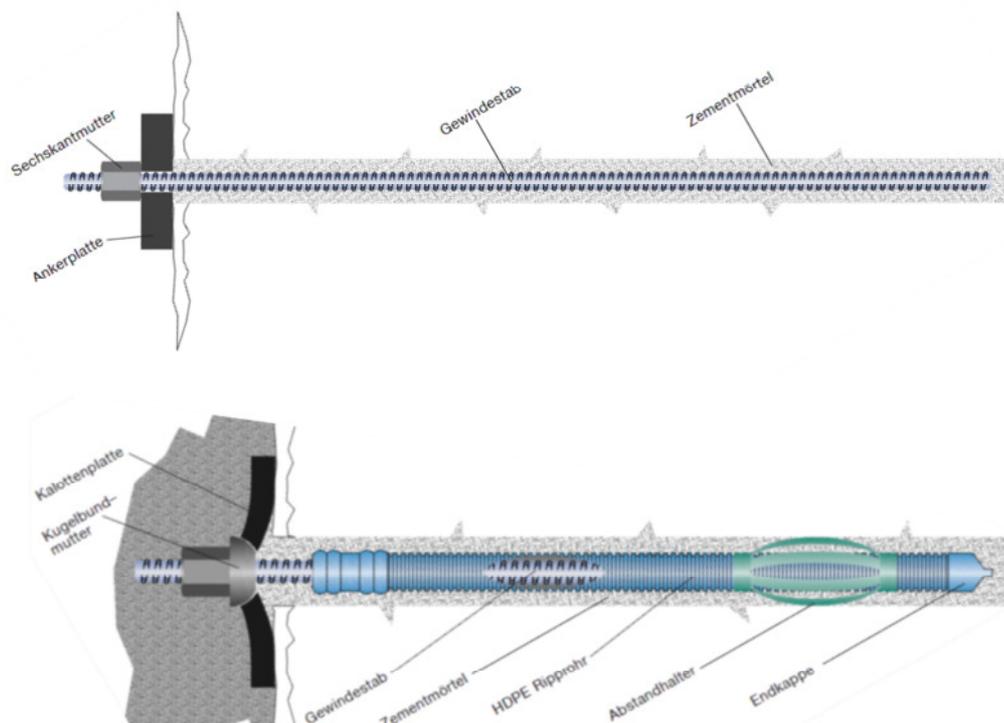


Abb. 23: Aufbau eines Temporärnagels oben und Dauernagels unten aus [40]

Nägel zeichnen sich durch die notwendigen Relativverschiebungen aus, um die Mantelreibungskräfte aktivieren zu können. Für das Tragverhalten von Nägeln sind die an die örtlichen Gegebenheiten angepassten Parameter wie, Nagellänge und Nagelraster entscheidend. Nägel erzielen eine wesentlich höhere Standsicherheit und Tragfähigkeit in der Gruppe als bei Einzelanwendung. Statisch entspricht der so hergestellte Verbundkörper aus Zugglied und Baugrund einem Fachwerkträger. Dabei bilden sich Druckstreben zwischen den Nägeln die die Zugelemente darstellen. [2] [25]

4 Faserverbundwerkstoffe

4.1 Allgemein

Verbundwerkstoffe haben den großen Vorteil durch das Zusammenfügen verschiedener Materialien auch deren Eigenschaften miteinander kombinieren zu können. Diese Kombinationen werden schon über Jahrhunderte in der Bauwirtschaft eingesetzt. Dazu gehört unter anderem Beton als Verbund von Kies, Sand und Zementsuspension mit etwaigen Zusatzmitteln oder Bewehrung.

Faserverbundwerkstoffe haben in den letzten 20 Jahren eine rasante Entwicklung im Bereich der Bauindustrie erlebt. Diese Werkstoffe sind dadurch gekennzeichnet, dass Fasern mit Bindemitteln zu einer Matrix kombiniert werden, wodurch auf eine Vielzahl verschiedener Kombinationen geschlossen werden kann. Durch die Vernetzung der Eigenschaften der Ausgangsprodukte können etliche Vorteile gegenüber etablierten Materialien bei der Produktion der Materialien erzielt werden.

Die wesentlichen Vorteile sind:

- Hohe Festigkeit bei vergleichsweise geringem Gewicht
- Hohe Chemische Beständigkeit
- Steuerung der mechanischen Eigenschaften durch Wahl und Orientierung der Fasern
- Geringe Wärmeleitfähigkeit und magnetisch neutral

Der derzeit größte Nachteil von Faserverbundwerkstoffen ist der hohe Preis der Ausgangsmaterialien aus denen diese Produkte hergestellt werden. Nichts desto trotz glaubt der Autor an eine wirtschaftliche Einsetzbarkeit dieser Produkte als Bodenanker, wenn sämtliche Lebenszykluskosten in die Betrachtung mit einbezogen werden. Eine detaillierte Betrachtung dieses Themas wird in Kapitel 8 vorgestellt. [14][15][54][65]

4.2 Zusammensetzung

Wenn man sich die Zusammensetzung von Faserverbundwerkstoffen genauer ansieht, stellt man fest, dass diese aus zwei Hauptbestandteilen zusammengesetzt sind. Dies sind die hochfesten Fasern die in einer Polymermatrix eingebettet sind.

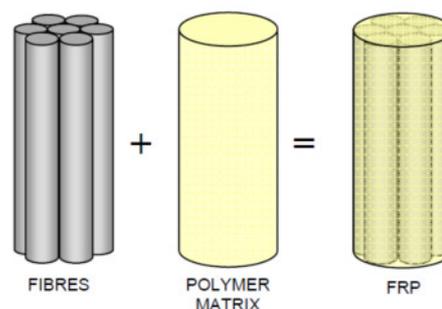


Abb. 24: Zusammensetzung von Faserverbundwerkstoffen aus [14]

Durch die Vielzahl an unterschiedlichen Fasern und Polymeren ist eine große Bandbreite an Endprodukten mit verschiedensten Materialeigenschaften erzielbar. Um diese näher beschreiben zu können muss man die einzelnen Komponenten im Detail betrachten.

4.2.1 Matrix

Der Matrix kommt bei Verbundwerkstoffen eine sehr bedeutende Rolle zu. Einige der wichtigsten Aufgaben der Matrix sind:

- Fixieren der Faser im gewünschten Querschnitt
- Bindemittel zwischen den Fasern
- Kraftübertragung von Faser zu Faser
- Schutz der Fasern vor chemischen Einwirkungen
- Gleichmäßige Verteilung der Fasern über den Querschnitt

Während die Fasern für die Festigkeit und Steifigkeit verantwortlich sind, ist die Matrix für die Kraftübertragung zwischen den einzelnen Fasern zuständig. Dies wird durch die Aktivierung von Scheerspannungen die über die Matrix von Faser zu Faser übertragen werden erreicht. Dabei wird ersichtlich, dass die Haftung der Faser in der Matrix von entscheidender Bedeutung für die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe ist.

Für die Herstellung der Matrix stehen unzählige Ausgangsstoffe in Form von Harzen zu Verfügung. In dieser Arbeit wird auf jene eingegangen, die in Bezug auf Ankersysteme in der Geotechnik von Interesse sind. Hierzu zählen die Gruppe der thermoplastischen und duroplastischen Harze.

Thermoplastische Harze sind durch langkettige Moleküle die von der Van der Waal'schen Wechselwirkung zusammengehalten werden, gekennzeichnet. Diese Harze können ohne nennenswerte Änderung der molekularen Struktur durch Temperaturunterschiede zwischen Hartem und Weichem Zustand wechseln. Duroplastischen Harzen ist dieser wiederholte Wechsel zwischen Hartem und Weichem Zustand, durch die vernetzte Molekularstruktur nicht möglich. Größtenteils werden duroplastische Harz in der Bauwirtschaft eingesetzt da eine hohe chemische Beständigkeit sowie geringes Kriech- und Relaxationsverhalten gegeben ist. Für Sonderanwendungen bei denen ein nachträgliches Biegen, wie z.B.: bei Bewehrung, erforderlich ist, werden auch thermoplastische Harze verwendet.

Die drei meistverwendeten duroplastischen Harze sind:

- Polyester
- Vinylester
- Epoxide

4.2.1.1 Polyester

Polyester sind die am meisten eingesetzten Harze. Dies kann durch den kostengünstigen Einsatz der Polyester sowie der unkomplizierten Handhabung erklärt werden. Für den unkomplizierten Umgang

mit Polyester spricht auch dass der Prozess der Aushärtung bereits bei Umgebungstemperatur stattfindet. Für die Anforderungen an die chemische Beständigkeit, Feuchtigkeitsunempfindlichkeit sowie für thermische- und Schrumpf- Eigenschaften während der Aushärtung sind eine Vielzahl von Produkten am Markt erhältlich.

4.2.1.2 Vinylester

Vinylester werden in der Praxis oft als Polyester bezeichnet, da diese dieselben Eigenschaften in der Handhabung aufweisen wie Polyester. In Bezug auf die chemische Beständigkeit weisen Vinylester eine hohe Resistenz gegenüber alkalischen Einflüssen auf. Dies ist auch die Begründung für den Einsatz von Vinylester bei der Herstellung von Bewehrungsstäben, da Beton einem sehr alkalischen Milieu zuzuordnen ist.

4.2.1.3 Epoxide

Durch ihre hohe chemische Beständigkeit (außer Säurebeständigkeit), Einsetzbarkeit bis in hohe Temperaturen sowie Ihrer hohen Festigkeitsentwicklung sind auch die deutlich höheren Preise für Epoxide zu erklären.

4.2.2 Faser

4.2.2.1 Allgemein

Die Fasern sind für die Festigkeit und die Steifigkeit der Verbundwerkstoffe von ausschlaggebender Bedeutung. Deswegen werden diese bei der Produktion je nach Anforderung ausgerichtet da die Beanspruchbarkeit in Faserrichtung wesentlich höher ist.

Anforderungen an die Faser:

- Hohe Festigkeit
- Hohe Steifigkeit
- Gute und einfache Handhabung
- Geringe Schwankungen der Festigkeit und Steifigkeit einzelner Fasern
- Gleichbleibende Querschnitte in Faser- Längsrichtung

Am Markt ist eine Vielzahl an Fasern mit unterschiedlichsten Vor-, wie auch Nachteilen erhältlich. Alle für den Einsatz in der Bauindustrie verwendeten Fasern zeichnen sich durch ein sehr großes Verhältnis von Faserlänge zu Faserdurchmesser (Langfasern bzw. Rovings) aus. Die Durchmesser liegen zwischen 5-10 Mikrometer. Dies bringt unterschiedlichste Vorteile in der Produktion wie in der Handhabung mit sich, wobei der bedeutendste Vorteil jener ist, dass im Falle des Bruchs einer einzelnen Faser der überwiegende Teil des Querschnitts davon unbeeinflusst bleibt. Für die Kraftübertragung zwischen den Fasern und somit für das Versagen des Querschnitts sind die übertragbaren Scheerspannungen der Matrix ausschlaggebend. [14][51][66]

In der Bauwirtschaft sind drei Fasertypen dominierend in der Anwendung. Dies sind Glas-, Karbon-, (Kohlestoff) und Aramidfasern. In der folgenden Abbildung sind die Spannungs-Dehnungsbeziehungen der Fasern dargestellt. Diese Darstellung bezieht sich jedoch nur auf die Faser und nicht auf die Matrix.

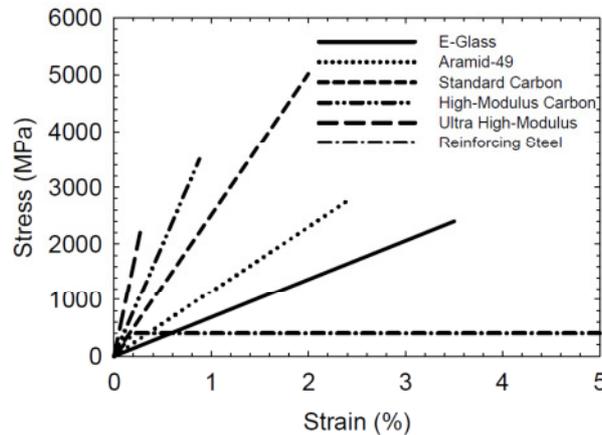


Abb. 25: Spannungs- Dehnungsdiagramm unterschiedlicher Fasertypen aus [14]

4.2.2.2 Glasfaser

Glasfasern werden in Form von Fäden aus der Glasschmelze gezogen und dann zu den unterschiedlichsten Endprodukten weiterverarbeitet. Ihre Durchmesser liegen zwischen 3 bis 25 Mikrometer und stellen die preiswertesten Fasern in diesem Vergleich dar. Glasfasern haben eine amorphe Struktur und weisen ein linear-elastisches Verhalten bis zum Bruch auf. Die wesentlichen Eigenschaften von Glasfasern sind:

- Hohe Festigkeit
- Mäßiger Elastizitätsmodul
- Geringe Dichte
- Geringe thermische Leitfähigkeit

Glasfasern werden für die Herstellung von Bewehrungsstäben verwendet da hierbei das höhere Gewicht im Vergleich mit Carbon- und Aramidfasern eine untergeordnete Rolle spielt. Große Bedeutung kommt den Glasfasern auch in der Elektrotechnik (Datenübertragung, Sensormesstechnik) sowie in der Medizin (Endoskope) zu.

Materialkennwerte von Glasfasern		
Dichte	[g/cm ³]	2,45 - 2,55
Filamentdurchmesser	[µm]	5,0 - 22,0
Zug-Festigkeit	[N/mm ²]	800 - 1500
Zug E-Modul	[Gpa]	40 - 90
Bruchdehnung	[%]	~ 4

Tab. 5: Materialkennwerte von Glasfasern

4.2.2.3 Kohlenstofffaser

Karbonfasern werden durch den Prozess der Pyrolyse von kohlenstoffhaltigem Grundmaterial in graphitartigen Kohlenstoff umgewandelt. In diesen Vorgang sind thermische Behandlungen für die Stabilisierung, Karbonatisierung sowie Oberflächenbehandlungen eingebunden. Karbonfasern weisen im allgemeinen Durchmesser von 5-8 Mikrometer auf und werden an Hand des Elastizitätsmoduls charakterisiert. Der Elastizitätsmodul liegt für Standard- Fasern bei 250-300 GPa und erreicht bei Ultra- Hohen- Fasern 550-1000 GPa. Die hier herangezogenen Fasern zeichnen sich durch die hohe Festigkeit in Kombination mit hoher Steifigkeit bei gleichzeitig geringer Bruchdehnung aus.

Karbonfasern sind in der Anschaffung teurer als Glasfasern und werden für Bauteilverstärkungen sowie für Vorspannungen im Betonbau eingesetzt. Der rasche Zuwachs an Karbonbauteilen in der Bauwirtschaft kann durch die fallenden Kosten, dem hohen Elastizitätsmodul, dem geringen Verhältnis von Gewicht zu Festigkeit und der hohen Widerstandsfähigkeit gegenüber thermischen und chemischen Beanspruchungen erklärt werden.

Materialkennwerte von Carbonfasern			
		Hochfest	Ultra-Hochfest
Dichte	[g/cm ³]	1,8	1,8
Filamentdurchmesser	[µm]	6	6
Zug-Festigkeit	[N/mm ²]	3650	5800
Zug E-Modul	[Gpa]	540	280
Bruchdehnung	[%]	1,5	1,1

Tab. 6: Materialkennwerte von Carbonfasern

4.2.2.4 Aramidfaser

Aramidfasern, auch aromatische Polyamide genannt, werden durch Polymerisation aus der sogenannten Spinnlösung gewonnen. Charakterisiert werden Aramidfasern durch die hohe Festigkeit, den moderaten Elastizitätsmodul und dem geringen Gewicht. Hauptsächlich werden diese Fasern mit E- Modulen zwischen 60 GPa und 120 GPa hergestellt.

Wesentlicher Nachteil dieser Faser ist neben der UV- Empfindlichkeit das hygroskopische Materialverhalten. [14]

An dieser Stelle sei erwähnt dass Aramidfasern nur der Vollständigkeit halber hier erwähnt wurden, da Sie eine untergeordnete Rolle in der Bauwirtschaft spielen.

Materialkennwerte von Aramidfasern			
		Niedermodul	Hochmodul
Dichte	[g/cm ³]	1,44	1,45
Filamentdurchmesser	[µm]	12	12
Zug-Festigkeit	[N/mm ²]	2800	2900
Zug E-Modul	[Gpa]	60	125
Bruchdehnung	[%]	4	1,9

Tab. 7: Materialkennwerte von Aramidfasern

4.3 Herstellung

4.3.1 Allgemein

Obwohl die Festigkeit und die Steifigkeit maßgebend durch die Fasern beeinflusst werden hat die Matrix ebenfalls großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen. Wichtige Kennwerte für Faserverbundwerkstoffe sind:

- Volumenanteil der Faser bezogen auf das Volumen des Verbundwerkstoffes
- Verteilung der Fasern über den Querschnitt
- Orientierung der Fasern innerhalb der Matrix
- Herstellungsprozess

Der Herstellungsprozess ermöglicht, im Zusammenspiel mit den Fasern und der Matrix, völlig unterschiedliche physikalische und mechanische Eigenschaften den Endprodukten zu verleihen. Größtes Augenmerk in dieser Arbeit wird auf unidirektionale Werkstoffe gelegt da diese die idealen Ausgangsparameter für die Anwendung als Zugglieder bei Anker aufweisen. Neben den unidirektionalen Faserverbundwerkstoffen, die im sogenannten Pultrusionsverfahren erzeugt werden, sollen noch das Pullbraiding-, und Pullwinding- Verfahren vorgestellt werden.

4.3.2 Pultrusion

Das Pultrusionsverfahren oder auch Strangziehverfahren wurde in den 1950´er Jahren entwickelt und wird heutzutage von über 90 Herstellern weltweit angewendet. Mit diesem Verfahren lassen sich Stäbe, Platten, Drähte, Rohre und auch Profile produzieren. Dieser Vorgang läuft vollkommen automatisch ab und stellt somit eine sehr wirtschaftliche Form der Produktion dieser Elemente dar. In der folgenden Abbildung ist eine Pultrusionsanlage wie Sie in der Praxis zur Anwendung kommt dargestellt.

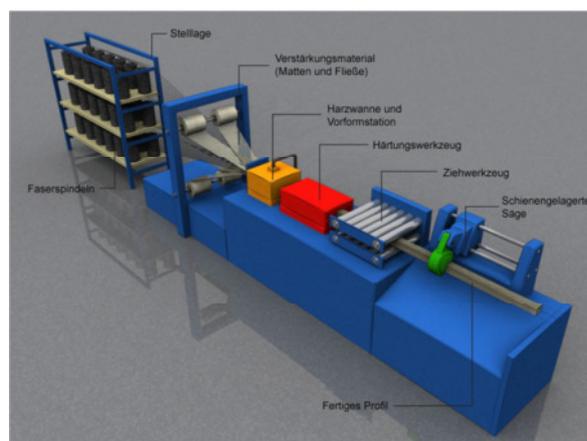


Abb. 26: Pultrusionsanlage zur Herstellung von CFK- und GFK- Elementen aus [14]

Beim Strangziehverfahren werden die einzelnen Fasern durch ein Harzbad und anschließend durch das erhitzte Formteil gezogen. Beim Durchlaufen des Formteils wird das Matrix- Fasergemisch in die gewünschte Form gebracht und der Aushärtungsprozess eingeleitet. Der Ziehvorgang und somit die

Ziehgeschwindigkeit wird über das bereits harte Werkstück gesteuert. Einer der größten Vorteile liegt in der kontinuierlich ablaufenden Produktion dieser Elemente wodurch endlose Profile hergestellt werden können. Durch das Ziehen aller Fasern in eine Richtung werden durch das Pultrusionsverfahren unidirektionale Faserverbundwerkstoffe erzeugt. Elemente die durch dieses Verfahren hergestellt werden können sind in der Abbildung 27 dargestellt.



Abb. 27: Verschiedene Formen durch Pultrusion hergestellt aus [41][43][44]

Wie in der mittleren Abbildung ersichtlich ist, können auch während des Aushärtungsprozesses zusätzliche Produktionsschritte je nach Anforderung an die Oberfläche ergänzt werden. Diese Schritte reichen von nachträglichem Schleifen für exakte Abmessungen bis hin zur Besandung der Oberfläche zur Erhöhung der Rauigkeit.

4.3.3 Pullbraiding

Das Pullbraidingverfahren entspricht einem Flechtvorgang. Bei diesem werden die Fasern einerseits um den Umfang und andererseits auch über Kreuz gewickelt. Dabei werden Profile, hauptsächlich Rohre, hergestellt. Durch dieses Verfahren kommt es zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit der Rohrquerschnitte.

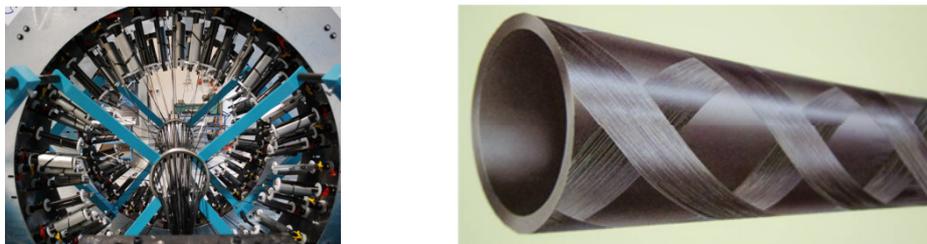


Abb. 28: Pullbraiding Verfahren und rechts ein damit hergestellter Rohrquerschnitt aus [44]

4.3.4 Pullwinding

Beim Pullwinding Verfahren, welches eine Weiterentwicklung des klassischen Pultrusionsprozess darstellt werden ausschließlich Rohrquerschnitte erzeugt. Der Unterschied zum Pultrusionsverfahren liegt darin, dass die Fasern durch Wickeleinrichtungen auf einen Dorn gewickelt werden um dann in Rohrquerschnitte gezogen zu werden. Dabei entsteht eine doppelte Verschränkung der Fasern untereinander, was in einer höheren Biegefestigkeit der Pullwinding Rohre endet. [44]

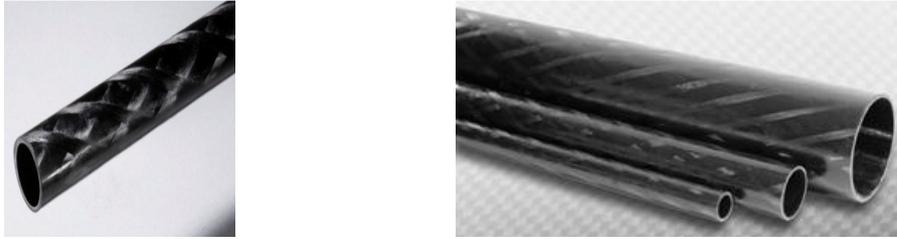


Abb. 29: Rohrquerschnitt mittels Pullwindingverfahren hergestellt aus [44]

4.4 Mechanische Eigenschaften der Verbundwerkstoffe

In diesem Abschnitt wird auf die Eigenschaften der Faserverbundwerkstoffe als Endprodukt eingegangen. Sämtliche Produkte müssen durch die mechanischen Charakteristika, einer langen Lebensdauer und Preiseffizienz auf die unterschiedlichen Anwendungsfälle der Bauindustrie angepasst werden können. Die mechanischen Eigenschaften sind maßgebend durch folgende Punkte beeinflussbar:

- Anteil von Fasern in der Matrix
- Orientierung der Fasern in der Matrix
- Mechanische Eigenschaften der Faser, Matrix und Additive
- Herstellungsverfahren

Wie aus der nächsten Abbildung hervorgehend haben Faserverbundwerkstoffe ein nahezu linearelastisches Verhalten bis zum eintretenden Bruch. Klar ersichtlich ist auch, dass in Richtung der Faser die Belastbarkeit bedeutend höher ist als normal zu dieser. Die Festigkeiten normal zur Faser, abhängig von der Matrix und dem Verbund zur Faser, liegt zwischen 4 bis 6 Prozent der Beanspruchbarkeit in Faserlängsrichtung.

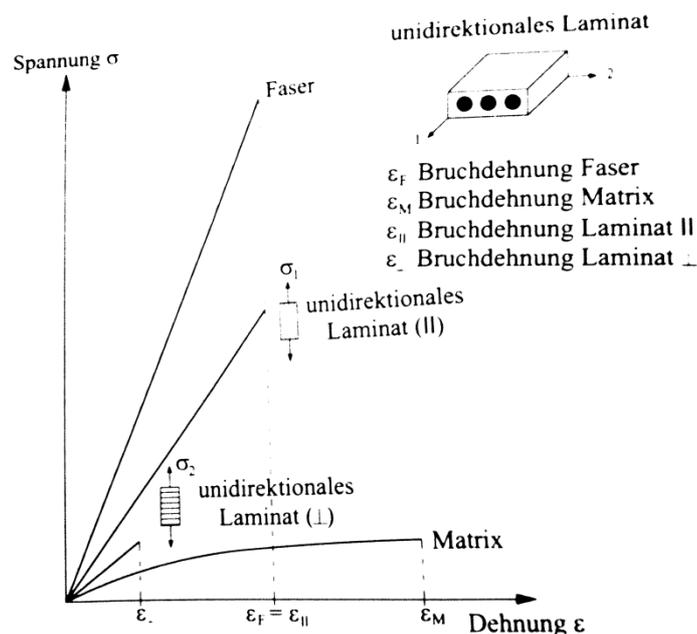


Abb. 30: Spannungs- Dehnungsdiagramm für Faserverbundwerkstoffe aus [57]

Einer der größten Vorteile von Faserverbundwerkstoffen im Hinblick auf den Einsatz in der Geotechnik stellt das Verhältnis von Eigengewicht zu Tragfähigkeit dar. Um diesen Unterschied von Verbundwerkstoffen gegenüber konventionell eingesetztem Stahl zu veranschaulichen sind in Tabelle 8 die Reißlängen unterschiedlicher Materialien angegeben.

Vergleich der Reißlängen					
		Bruch- Spannung	Wichte	Reißlänge	Referenz
		[MPa]	γ_G [kN/m ³]	l_R [m]	$l_{Ri}/l_{R \text{ Baustahl}}$ [-]
Beton Zug	f_{ctm}	3	24	108	0,0
Beton Druck	f_{cm}	33	24	1.375	0,5
Baustahl	f_y	235	78	3.013	1
Betonstahl	f_y	550	78	7.051	2
Spannstahl	f_y	1.770	75	23.600	8
GFK	f_u	1.400	21	66.667	22
CFK	f_u	3.100	16	193.750	64

Tab. 8: Vergleich der Reißlängen verschiedener Materialien aus [57]

Für Verpressanker sind Spannstahl und die CFK-Elemente von besonderem Interesse. Hier weisen die CFK-Produkte eine um das 8 fache und GFK um das 2,75 fache größere Reißlänge als Spannstahl auf. In der nachfolgenden Abbildung sind die Arbeitslinien von Stahl und verschiedenen unidirektionalen Faserverbundwerkstoffen mit Karbon-, Aramid- und Glasfasern abgebildet. Daraus ist erkennbar, dass im linear-elastischen Bereich des Bewehrungsstahls sowohl Aramid- als auch Glasfaser-Verbundwerkstoffe bedeutend kleinere Moduli aufweisen. CFK-Elemente sind in diesem Bereich vergleichbar mit Bewehrungsstahl jedoch haben diese Elemente eine um ein Vielfaches höhere Bruchfestigkeit als Stahl.

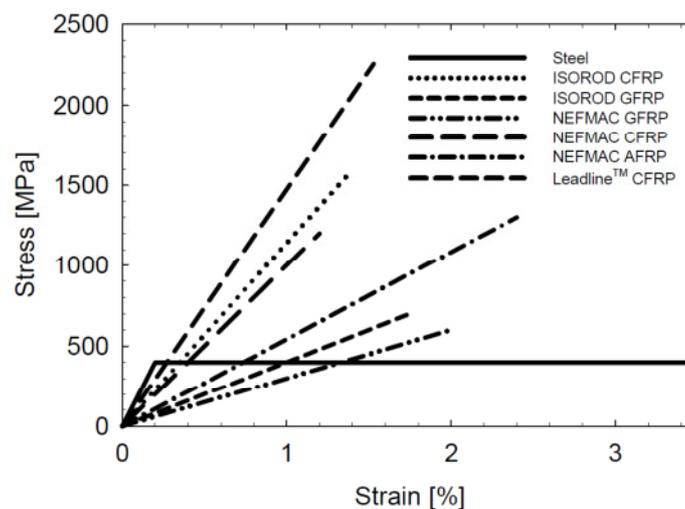


Abb. 31: Spannungs- Dehnungsdiagramm von Stahl und marktüblichen Faserverbundwerkstoffen aus [14]

Vergleich typischer Materialkennwerte						
		Bewehrungs- Stahl	Spann- Stahl	GFK- Bewehrung	CFK- Bewehrung	AFK- Bewehrung
Zug-Festigkeit	[N/mm ²]	480 - 690	1379 - 1862	517 - 1207	1200 - 2810	1200 - 2068
Fließspannung	[N/mm ²]	276 - 414	1034 - 1396	keine	keine.	keine.
Zug E-Modul	[Gpa]	200	186 - 200	30 - 55	147 - 165	50 - 74
Bruchdehnung	[%]	>10	>4	2 - 4,5	1 - 1,5	2 - 206
Druck-Festigkeit	[N/mm ²]	276 - 414	k.A.	310 - 482	k.A.	k.A.
Temperaturkoeffizient	[10 ⁻⁶ /°C]	11,7	7,9	9,9	0	-1 bis -0,5

Tab. 9: Vergleich typischer Materialkennwerte

In Tabelle 9 sind die wesentlichen Materialkennwerte einander gegenübergestellt. Durch das nahezu linearelastische Materialverhalten von CFK-, GFK-, und Aramid- Produkten bis zum Bruch sind hier keine Fließspannungen angegeben. CFK kennzeichnet sich durch die höchste Zug- Festigkeit bei gleichzeitig geringster Bruchdehnung.

4.4.1 Versagensmechanismen

Die Versagensmechanismen von Faserverbundwerkstoffen werden über die Spannungs-Dehnungs-Beziehung dargestellt. Dabei wird zwischen dem Versagen der Matrix oder der Fasern unterschieden. Liegt die Bruchdehnung der Matrix $\epsilon_{m,ult}$ unter der Bruchdehnung der Fasern $\epsilon_{f,ult}$ und ist kombiniert mit einem geringen Faseranteil V_f von 10% führt dies zum Versagen der Matrix. Dieser Fall ist in Abbildung 32 dargestellt. [14]

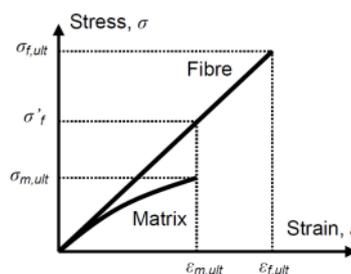


Abb. 32: Spannungs- Dehnungsdiagramm wenn die Bruchdehnung der Faser größer als die der Matrix ist aus [14]

Da für Anwendungen in der Bauwirtschaft Verbundwerkstoffe mit mindestens 50% Faseranteil eingesetzt werden ist dieses Versagens bei faserparalleler Beanspruchung nicht von Bedeutung. Für den Fall, dass die Bruchdehnung der Faser kleiner als die der Matrix ist kommt es zum Versagen der Faser wie in Abbildung 33 dargestellt. Bei dieser Zusammensetzung kann auch ein höherer Anteil an Fasern das Versagen nicht verhindern, da die Spannungsumlagerung von Faser zu Matrix zum Versagen der Matrix führt.

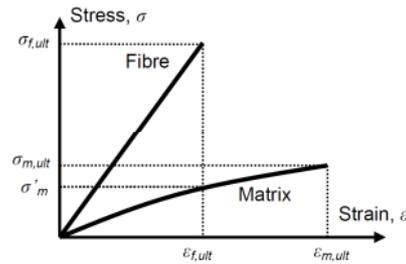


Abb. 33: Spannungs- Dehnungsdiagramm wenn die Bruchdehnung der Matrix größer als die der Faser ist aus [14]

4.4.2 Ermüdung

Ermüdung stellt eine Sonderform von Versagen dar das aus Be- und Entlastungszyklen herrührt. Faserverbundmaterialien weisen im Allgemeinen gute bis sehr gute Ermüdungseigenschaften auf da bei faserparalleler Belastung die Matrix nicht zum Versagen neigt. Hervorragendes Ermüdungsverhalten im Vergleich zu Baustahl weisen unidirektionale CFK- Elemente auf. Abbildung 34 zeigt typische Ermüdungskurven von CFK- und GFK- Produkten. [6][49][67]

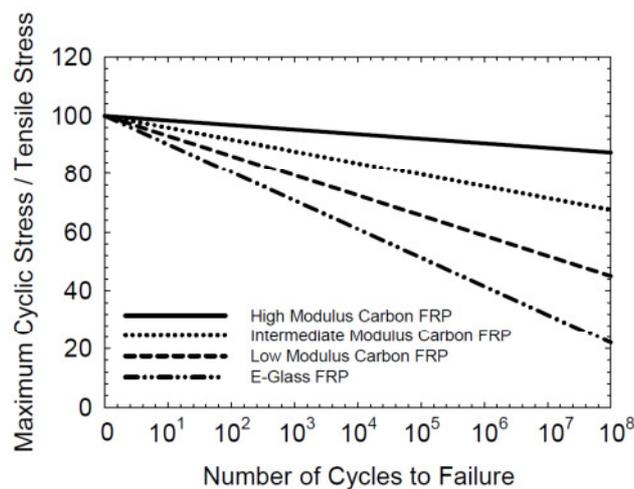


Abb. 34: Ermüdungskurven von CFK- und GFK- Produkten bei faserparallelen Belastungszyklen aus [14]

4.4.3 Temperatur

Temperatureinflüsse können beachtliche Auswirkungen auf Faserverbundwerkstoffe haben insbesondere sehr hohe Temperaturen. Da in dieser Arbeit die Anwendung der Materialien als Anker in der Geotechnik behandelt wird, ist der Brandfall nicht von Bedeutung. Alle Hersteller deren Daten in diese Arbeit eingehen haben eine Temperaturbeständigkeit bis mindestens 80°C in Ihren Unterlagen angegeben. Angaben bzw. Erfahrungen zur Verarbeitbarkeit z.B.: Einbau der Anker, bei Temperaturen unter 0°C konnten keine gefunden werden. [6][52]

4.4.4 Feuchtigkeit

Nahezu alle Verbundwerkstoffe absorbieren Wasser in feuchter Umgebung. Wesentlich beeinflusst werden kann dies durch die Zusammensetzung der Polymermatrix. Unidirektionale Werkstoffe bei welchen die Eigenschaften nur gering von der Matrix abhängig sind zeigen keinen wesentlichen Unterschied zu trockenen Querschnitten. Als feuchtigkeitsempfindlich können Aramidfasern eingestuft werden, da diese durch Volums- Zunahme zum Sprengen der Matrix führen können. Das Maximum der Wasseraufnahme ist mit der Sättigung der Matrix erreicht und kann im weiteren Verlauf die mechanischen Eigenschaften nicht weiter negativ beeinflussen. Dies stellt einen wesentlichen Unterschied zu Stahl dar, da dieser in feuchter Umgebung einem ständigen Korrosionsprozess ausgesetzt ist. [6][13]

4.4.5 Alkalität

Alkalität spielt bei der Verwendung von Faserverbundwerkstoffen als Bewehrungselemente in Beton eine wichtige Rolle. In Beton stellt sich ein pH-Wert zwischen 12 bis 13,5 ein der als hoch alkalisch definiert ist. Langzeitversuche haben gezeigt, dass durch die Verwendung entsprechender Polymermischungen kein negativer Einfluss durch die Alkalität auf die Belastbarkeit gegeben ist. [6][13][52][59][51][48]

5 Einsatz von CFK- und GFK- Zuelementen

5.1 Allgemein

Der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen in der Geotechnik ist bislang auf einige kleine Randbereiche begrenzt. Hierzu zählen die Anwendung als Manschettenrohre für die Injektionstechnik, Rohre für den Ausbau von Inklinometerbohrungen und als Bewehrung. GFK- Bewehrungen werden hauptsächlich in Zusammenhang mit dem Tunnelbau verwendet. Hier kommen zur Bewehrung des Startblocks, der von der Tunnelbohrmaschine durchfahren wird, Faserverbund-Bewehrungen zum Einsatz um ein blockieren des Schneidrades durch die Stahlbewehrung zu verhindern. Meist wird der sogenannte Startblock durch Schlitzwandlamellen oder überschnittene Bohrpfähle hergestellt welche im Bereich des Ausbruchquerschnittes mit GFK- Bewehrung belegt werden.

In diesem Abschnitt wird auf bereits durchgeführte Anwendungen und weiterführende Möglichkeiten eingegangen. [34][36][46][47][65]

5.2 GFK- Elemente

Glasfaserverstärkte Kunststoffe in der Geotechnik werden bislang in Form von Bewehrung und im Tunnelbau als Sicherungselemente eingesetzt. Der Einsatz ist jedoch meist, durch die höheren Kosten gegenüber Stahlprodukten auf Einzelanwendungen beschränkt. Durchaus öfters in Anwendung sind GFK- Produkte in Zusammenhang mit dem Tunnel- bzw. Untertagebau, da hier Vorteile gegenüber Stahl die höheren Kosten rechtfertigen. Die dabei entscheidenden Eigenschaften von Glasfaserkunststoffen sind:

- Korrosionsbeständigkeit
- Zerspanbarkeit
- Geringes Gewicht bei gleichzeitig hoher Zugfestigkeit
- Nicht magnetisch
- Kein elektrischer Leiter
- Einfache Handhabung der Einzelemente



Abb. 35: GFK-Produkte von Firep, links: Einsatz am Flughafen Zürich- stahlfreie Betonplatten zur Vermeidung elektro-magnetischer Kurzschlüsse und rechts: zerspanbare Schlitzwandlamellenbewehrung für den Tunnelbau aus [41]

Am Markt erhältliche Systeme aus glasfaserverstärktem Kunststoff sind:

- Bewehrungen (Stäbe, Matten, Bügel)
- Bewehrung für Spritzbeton in Faserform
- Voll- und Hohlstabanker
- Selbstbohranker
- Litzenartige Verpressanker
- Schalungsanker für Betonschalungen

Die folgende Tabelle zeigt einen Auszug an Anwendungen von GFK-Produkten der Firma Firep.

Anwendungen von GFK-Produkten in der Geotechnik				
Projekt	Jahr	Anker- querschnitt	Gesamt- Länge [m]	Beschreibung
Kaiser Wilhelm Tunnel - D	2011 - 2012	32	10,00	Ortsbrustsicherung
Nagra - CH	2011	25	-	Tunnelsicherung für Atommüll- Lagerstätte
Kaverne Ursy CH	2010 - 2011	32	3 - 6	Sicherung einer Kavernendecke
ZAMG - AT	2010 - 2011	32	6,00	Sicherung einer Kaverne ohne magnetische Stoffe
Linz AG - AT	2010	12	7.800 m ²	Bewehrung der Remisenfahrbahn
Misaka - JP	2009	25	2 - 3	nichtmetallisches Ankersystem für Eisenbahntunnel
Ogori - JP	2008	25	3,00	nichtmetallische Systemankerung für Straßentunnel
SMART Kuala Lumpur	2005	32	-	Bewehrung eines Start und Zielschacht für den Tunnelbau

Tab. 10: Anwendungen von GFK-Produkten in der Geotechnik aus [41]

Bei den glasfaserverstärkten Produkten sind ausschließlich Vollstab- und Hohlstab- Querschnitte in Verwendung. Wie aus Abbildung 36 ersichtlich werden bei diesen Produkten die Kräfte vom Ankerkopf über Schraubverbindungen in den Ankerstab eingeleitet. Die Stabquerschnitte erhalten bei der Produktion ein Gewinde an der Oberfläche über welches die Kräfte von der Ankerplatte über die Mutter in den Stab eingeleitet werden. Üblicherweise kommt es beim Versagen des Ankers zum Abscheren der Gewinde vom Stabquerschnitt. [63]

Bei den Selbstbohr- Injektionsankern konnte durch Versuche von der Firma Keller Grundbau GmbH nur in Lockergesteinsböden ein Erfolg erzielt werden. Bei sehr dichter Lagerung bzw. felsigem Untergrund kam es zum Abscheren der Injektionsbohranker während des Bohrvorgangs vor Erreichen der Endtiefe. Selbstbohrende Injektionsanker sind in Abbildung 36 der grüne Stabquerschnitt mit roter Bohrkronen und der schwarze GFK-Stab mit silbriger Bohrkronen.

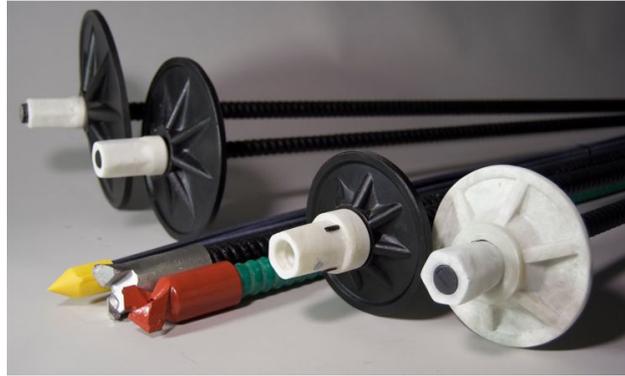


Abb. 36: GFK-Produkte der Firma Firep aus [41]

Der wesentliche Vorteil dieser Ankersysteme liegt sicherlich in der Zerspanbarkeit wodurch sie auch zur temporären Ortsbrustsicherung oft herangezogen werden. In Vergleich mit den CFK-Produkten gibt es fertige Systeme für Anker jedoch weisen CFK- Elemente eine wesentlich größere Zugfestigkeit auf.

Der Hauptmarkt für GFK-Produkte ist durch das hohe Wirtschaftswachstum und die große Anzahl an Infrastrukturprojekte der asiatische Raum. GFK-Produkte sind bislang die einzige Alternative zu Stahl wenn besondere Anforderungen an die Bewehrung wie z.B.: Zerspanbarkeit oder magnetisch neutrale Bewehrung erforderlich sind.

5.3 CFK-Elemente

Sucht man nach kohlenstoffverstärkten Kunststoffen in Zusammenhang mit geotechnischen Anwendungen sind in der Literatur nur wenige wissenschaftliche Beiträge zu finden. In der Bauwirtschaft haben die CFK-Lamellen, bei nachträglicher Bauteilverstärkung, bislang ihr Hauptanwendungsgebiet. Diesem Sektor kommt immer größere Bedeutung zu, da eine nachträgliche Nutzungsänderung oder eine gewünschte Verlängerung der Nutzungsdauer somit ohne große Rück- und Neubaumaßnahmen realisierbar ist. [7][58]

Sowohl in Bezug auf die Produktion wie auch in Hinsicht auf die Veröffentlichung wissenschaftlicher Arbeiten in Zusammenhang mit CFK-Produkten sind Nordamerika und Asien die globalen Vorreiter.

Kohlenstoffverstärkte Kunststoffelemente wurden bislang nur in Japan als Anker eingesetzt, jedoch stellen diese keine Standardanwendungen dar. Erstmaliger Einsatz von CFK-Anker war 1990 in Japan zur Sicherung eines Brückenwiderlagers. Hierfür wurden 32 Anker, 15- 20m lang, aus 9 Ø 8 mm CFK-Stäben, mit je 745 KN Vorspannkraft hergestellt. Sämtliche in der Literatur erwähnten Anwendungen beziehen sich auf die Zeitspanne von 1990 - 1996. In dieser Periode wurden 12 Projekte mit 262 CFK-Ankern und Längen von bis zu 24,5 m realisiert. Dabei wurden neben der Sicherung von Ankerwänden und der oben erwähnten Verankerung eines Brückenwiderlagers hauptsächlich rutschgefährdete Hänge stabilisiert. In der folgenden Tabelle sind die wesentlichen Projektdaten der vergangenen Anwendungen aufgelistet. Fehlende Daten gehen auf nicht publizierte Werte oder unterschiedliche Werte in der Literatur zurück. [68][66][24][6]

Anwendungen von CFK-Anker in der Geotechnik

Projekt	Jahr	Anzahl der Anker	Geologie	Ankerquerschnitt	Bruchlast P_u [kN]	Bemessungs-Last [% P_u]	Gesamt-Länge [m]	Haft-Länge [m]	Bohr-Durchmesser [mm]
Hangsicherung Hokkaido	1993	22	Fulkan-Gesteine	6 ϕ 12,5	852	0,58	20,5-24,5	7,5	115
Hangsicherung Niigata	1993	42	Granit	6 ϕ 12,5	852	0,60	10,5	6,5	115
Hangsicherung Niigata	1994	4	Tone	3 ϕ 12,5	426	0,46	16,5	3,5	115
Hangsicherung Ito,Shizuoka	1995	20	stark geklüfteter weicher Fels	4 ϕ 12,5	568	0,63	9 - 11,5	-	115
Hangsicherung Nazusa, Gifu	1995	30	stark geklüfteter weicher Fels	3 ϕ 12,5	426	0,43	7,6 - 10,6	-	115
Hangsicherung Ishikawa	1995	40	stark geklüfteter weicher Fels	6 ϕ 12,5	852	0,57	10 - 11,5	-	115
Hangsicherung Yamanashi	1996	10	stark geklüfteter weicher Fels	3 ϕ 12,5	426	0,53	7,3	-	115
Hangsicherung Kyoto	1996	10	stark geklüfteter weicher Fels	2 ϕ 12,5	284	0,66	7,3 - 17,3	-	115
Ankerwand Toyama	1993	6	Sandsein	3 ϕ 12,5	426	0,22	11 - 17,5	3,0	115
Raumgitterwand Gifu	1995	46	Lockergestein kiesig - sandig	3 ϕ 12,5	426	0,55	9,2 - 17,5	-	115
Brückenwiderlager Ibaraki	1990	32	-	9 ϕ 8	745	0,42	15 - 20	-	-
Hangsicherung Fukuchiyama	1996	-	-	2 ϕ 8	-	-	7 - 21	3,0	115

Tab. 11: Anwendungen von CFK-Anker aus [4][5][6]

Da der Einsatz dieser Faserverbundwerkstoffe einen Sonderfall darstellt gibt es bislang auch noch keine normative Regelung für diese Systeme. Wie in Tabelle 11 aufgelistet liegen die Bemessungslasten bei den bislang ausgeführten Projekten zwischen 22% und 66% der Bruchlast der Anker. An diesen Daten ist erkennbar, dass die Bemessungen nicht einer Normung folgen sondern sehr von den jeweiligen Planern abhängig zu sein scheint.

Bei den Ankerquerschnitten ist auffallend, dass ausschließlich Stabquerschnitte zur Anwendung gekommen sind und diese vom Aufbau den klassischen Litzenankern nachempfunden wurden. Wenn man sich genauer mit der Umgebung diese Anker auseinandersetzt sieht man, dass bei allen besondere chemische Einwirkungen auftreten. Diese reichen neben direkter Meerwasser- Einwirkung bis hin zu Säure- Einwirkungen in thermalen Gebieten. In diesen Fällen hat sich CFK-Material trotz der teilweisen sehr geringen Ausnutzung der Querschnitte von 22% gegenüber Stahl durchgesetzt, da Stahllitzen unter diesen Einwirkungen innerhalb weniger Jahre vollständig versagt hätten.

Die nachfolgende Abbildung zeigt zwei Projekte aus Japan bei denen CFK-Anker in direktem Kontakt mit Meerwasser bzw. in stark ätzendem Baugrund eingesetzt wurden.



Abb. 37: Einsatz von CFK-Anker in Japan. Links mit direktem Meerwasserkontakt und rechts in schwer zugänglichem Gebiet mit stark ätzenden Einwirkungen auf die Anker aus [39]

Bei kohlefaserverstärktem Kunststoff gibt es neben den Lamellen und Stabquerschnitten auch noch Runddraht- und Spirallitzen. Diese werden von Tokyo Rope, einem japanischen CFK- Hersteller, am Markt vertrieben. Diese Litzen kommen zur Vorspannung von Brückenquerschnitten, Bewehrung von Betonbauteilen, als Tragseil für Hängebrücken und in Sonderfällen auch als Anker in der Geotechnik zum Einsatz.

In der nächsten Abbildung sind die Litzen mit den zugehörigen Flechtformeln zu sehen.

Strand configuration of CFCC	Designation	Section
Rod	U	○
7-strand	1×7	 Runddrahtlitze (1+6)
19-strand	1×19	 Spirallitze (1+6+12)
37-strand	1×37	 Spirallitze (1+6+12+18)



Abb. 38: Zusammensetzung der CFK-Litzen links und rechts das Endprodukt aus [39]

Im rechten Teil der oben angeführten Abbildung sind die Litzen Querschnitte nach abgeschlossener Produktion abgebildet. Dabei ist ersichtlich, dass die Einzelstäbe um die Kernlitze gedreht werden, wobei die so entstandenen Hohlräume nicht weiter verklebt oder versiegelt werden. Der übliche Durchmesser, wenn man sich an Stahllitzenquerschnitten orientiert, liegt bei 15,3 bis 15,7mm. Diese entspricht den 0, 6“ und 0,62“ Standardlitzen aus Stahl. Diese Durchmesser können bei CFK-Querschnitten auch ohne Probleme durch einen Vollstab hergestellt werden der die beschriebenen Hohlräume zwischen den Einzelstäben nicht aufweist.

Bei Durchmesser die im Bereich von 30 bis 40mm liegen haben die Verflechtung der Einzelstäbe sicherlich ihre Vorteile gegenüber einem Vollstab. Entscheidend in dieser Betrachtung ist die Empfindlichkeit der Kohlenstofffaser bei Beanspruchungen normal zur Faserrichtung. Diese Durchmesser werden jedoch ausschließlich bei Brückentragwerken eingesetzt.

Bislang wurde bei 3 Brücken diese Kohlenstoff- Verbundwerkstoffe in Form von Spirallitzen von Tokyo Rope eingesetzt. Der Einsatz ist einerseits als Schrägseile, wie in der nächsten Abbildung dargestellt, oder andererseits als Tragseil bei Hängebrücken möglich.



Abb. 39: Erste Schrägseilbrücke in Dänemark mit karbonverstärkten Spannkabeln aus [39]

6 Monitoring mit Fibre Optic Technik

6.1 Allgemein

Die Überwachung von eingebauten Anker kann je nach gewünschter Information sehr aufwendig sein. Bei Ankerprodukten muss vor Installation der Zugglieder die entsprechenden Elemente am Anker appliziert werden um im eingebauten Zustand Informationen abfragen zu können. Ein nachträglicher Einbau der Sensoren oder Messeinrichtungen ist üblicherweise in wirtschaftlicher oder technischer Hinsicht nicht möglich. Informationen die über die Funktionalität des Ankers Auskunft geben, sind:

- Zustand des Ankerkopfes
- Veränderungen der Ankerkraft über die Nutzungsdauer
- Zustand des Korrosionsschutzes der Zugglieder

Die Überwachungsmethoden reichen von visueller Begutachtung über Abhebeversuche bis hin zum Einsatz von Optischen Sensoren. Dabei stellt die visuelle Begutachtung die Einfachste und kostengünstigste Variante dar, jedoch ist auch die Anzahl an Informationen die man daraus erhält beschränkt. Durch die visuelle Untersuchung kann im Wesentlichen nur der Ankerkopf, z.B.: Korrosionsschäden oder Litzen die durch die Verkeilung gerutscht sind, geprüft bzw. bewertet werden. Wenn Informationen von den dahinterliegenden Bauteilen gewünscht sind, müssen z.B.: Optische Sensoren oder Potentialmessungen eingesetzt werden. In diesem Kapitel wird die optische Methode im Zusammenhang mit Faseroptischen Sensoren erläutert. Beim Einsatz von faseroptischen Elementen sieht der Autor großes Potential um detaillierte Auskünfte über die noch nicht vollständig geklärten Zusammenhänge in der Geotechnik zu bekommen. [17][18][20]

Da faseroptische Sensoren in der Geotechnik erst seit einigen Jahren zum Einsatz kommen sind noch etliche Fragen zur Sensortechnik und Interpretation der Ergebnisse bislang ungeklärt. Im Allgemeinen kommen Glasfaserelemente zum Einsatz bei denen die Eigenschaften des Lichts, das durch die Glasfasern geschickt wird, analysiert werden. Die bedeutendsten Merkmale sind in diesem Zusammenhang die Wellenlänge und die Intensität des Lichts. Bei der Auswertung sind die Unterschiede von ausgesendetem und zurückkommendem Signal zu analysieren.

Bei der Interpretation von Messergebnissen in der Geotechnik die durch Fibre-Optic Systeme aufgezeichnet wurden, ist ein fundiertes Wissen an bodenmechanischen Zusammenhängen erforderlich. Darauf wird auch immer wieder in der Literatur hingewiesen, da es ansonsten zu Fehlinterpretationen führen kann. [20]

6.2 Grundlagen von Lichtwellenleitern

6.2.1 Licht

Wie bereits aus dem Namen abzulesen ist, hat das Licht eine entscheidende Rolle bei dieser Anwendung als Messsystem. Licht pflanzt sich mit einer Geschwindigkeit von $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s in der Atmosphäre fort und wird beim Übergang zwischen unterschiedlichen Medien reflektiert und/oder gebrochen. In der Physik wird Licht als elektromagnetische Wellen oder als Photonen die sich in Bewegung befinden charakterisiert. Das für den Menschen sichtbare Licht stellt dabei nur einen kleinen Ausschnitt aus dem Spektrum dar. Die Charakterisierung von elektromagnetischer Strahlung erfolgt durch die Wellenlänge, Frequenz und durch die Energie der Photonen. [17][20][8]

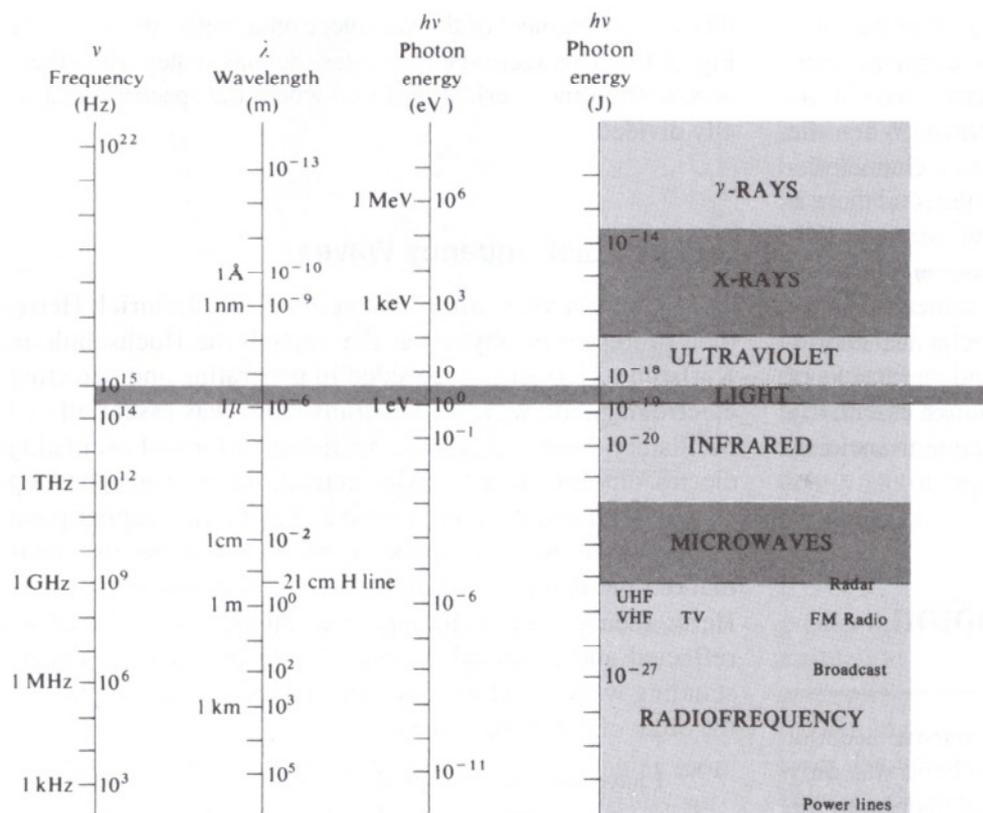


Abb. 40: Spektrum der elektromagnetischen Strahlung mit dem als Light bezeichneten Ausschnitt der für den Menschen wahrnehmbar ist aus [20]

6.2.2 Brechung und Reflexion

Je nach Verhältnis der beiden Dichten der Medien, kann es neben einer Reflexion auch zu einer Brechung an der Oberfläche der Medien kommen. Dies geschieht in Abhängigkeit des Brechungsindex n_x , n_y und kann mittels Gesetz von Snell berechnet werden.

$$n_x \cdot \cos(\Theta_i) = n_y \cdot \cos(\Theta_{ry})$$

Dennoch wird ein Teil des Lichtstrahls an der Oberfläche reflektiert. Dieser Vorgang wird als Fresnel Reflexion bezeichnet und beträgt normalerweise weniger als 4% des einfallenden Lichtstrahls.

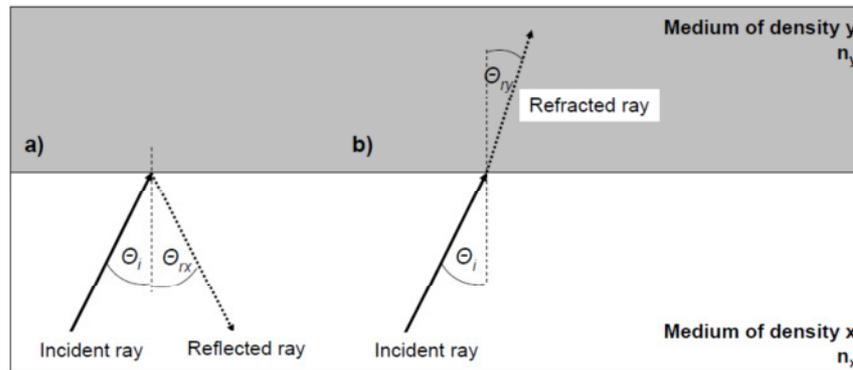


Abb. 41: Reflexion und Brechung beim Übergang zwischen 2 Medien mit $n_x < n_y$ aus [20]

Der sogenannte Critical Winkel tritt dann auf wenn der einfallende Lichtstrahl von einem Medium mit relativ hohem Brechungsindex in ein Medium mit geringem Brechungsindex übergeht. Dabei wird jener Winkel als Critical Winkel bezeichnet, bei dem in Abhängigkeit der Brechungsindizes und des Einfallswinkels des Lichtstrahls die Reflexion unter einem Winkel Θ_{ry} von 90° erfolgt.

6.2.3 Streuung

Streuung tritt infolge der Wechselwirkung des Lichtimpulses mit Materie und akustischen Wellen auf. In einem perfekt dichten und homogenen Medium kann die Licht- Streuung nur in eine Richtung auftreten. Eigenschaften die die Streuung des Lichtes im Medium beeinflussen sind z.B.: Staub, Risse und Inhomogenität im Strukturaufbau. Jener Teil der Streuung der sich entgegen der Haupt-Ausbreitungsrichtung bewegt, wird als "backscattering" bezeichnet und ist für die faseroptischen Sensoren von großer Bedeutung.

6.2.4 Rayleigh Streuung

Bei der Rayleigh Streuung handelt es sich um eine elastische Streuung der elektromagnetischen Wellen an Teilchen, welche im Vergleich zur Wellenlänge einen kleinen Durchmesser aufweisen. Dies beschreibt die Streuung von Licht an kleinen Molekülen und ist für die visuell wahrnehmbare Farbe des Himmels verantwortlich. Diese Art der Streuung ist für den überwiegenden Teil der Verluste bei optischen Fasern verantwortlich und bildet die Grundlage für die Messsysteme der sogenannten Optical Time Domain Reflectometry (OTDR).

6.2.5 Brillouin and Raman Streuung

Je nach Inhomogenität kann es durch dynamische Prozesse zu mehreren Streuungen kommen. So führen thermisch angeregte Molekülschwingungen zu Raman Streuungen und thermisch verursachte akustische Wellen zu Brillouin Streuungseffekte.

6.3 Aufbau von Glasfasermesselementen

Die Faser an sich stellt den eigentlichen Leiter für das Licht dar. Der größte Vorteil der auch bei der Datenübertragung in der Elektrotechnik zum Einsatz von Glasfaserkabeln geführt hat ist, dass im Vergleich zu Infrarot oder metallischen Leitern wesentlich größere Datenmengen in kürzerer Zeit

übertragen werden können. Des Weiteren haben elektromagnetische oder elektrostatische Effekte keinen Einfluss auf die transportierten Daten. Dies ist auf den Aufbau bzw. die Zusammensetzung der Fasern zurückzuführen. Der Aufbau kann in 3 Hauptbestandteile unterteilt werden:

- Kern
- Mantel
- Schützhülle

Um Verluste durch Brechungen zu vermeiden haben die Mantelmischungen die meist aus Silikat- Glas bestehen einen höheren Brechungsindex als der Kern wodurch der gesamte Strahl reflektiert wird. Die Schützhülle hat die Aufgabe dem Produkt mehr Festigkeit zu verleihen und vor allem vor Beschädigungen zu schützen. Bei den Fasern an sich wird zwischen Single- und Multimode Fasern unterschieden was von den Leitereigenschaften gegenüber dem Licht abhängig ist. In der folgenden Abbildung ist der Aufbau eines solchen Faserelements mit den üblichen Elementstärken dargestellt.

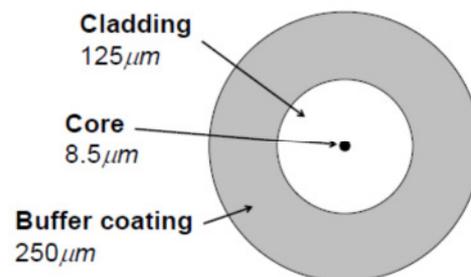


Abb. 42: Aufbau einer Singlemode Glasfaser mit Angaben zu den üblichen Durchmessern aus [20]

6.3.1 Single Mode Faser

Single Mode Fasern werden in der Telekommunikationsbranche sehr häufig eingesetzt und weisen dabei eine Wellenlänge von 1300 bis 1550 nm auf. Übliche Faserstärken liegen im Bereich von 4 bis 10 µm. Durch den Zusammenhang von Faserdurchmesser und Wellenlänge des Lichtes, kann bei Single Mode Fasern das Licht in nur einer Richtung durch die Faser geleitet werden. Single Mode Fasern stellen bis dato den überwiegenden Anteil an faseroptischen Sensoren dar die in der Geotechnik eingesetzt werden.

6.3.2 Multi Mode Faser

Bei Multi Mode Fasern liegen die Durchmesser der Fasern bei 25 bis 150 µm. Dadurch kann das Licht in unterschiedlichen Richtungen und Arten durch die Kerne geleitet werden. Die Wellenlängen befinden sich im Bereich von 800 bis 1300 nm. Diese Art der Faser wird hauptsächlich in der Netzwerktechnik eingesetzt.

6.3.3 Verbindungen von Fasern

Die Möglichkeiten Fasern miteinander zu verbinden stellt ein entscheidendes Thema für den geplanten Einsatz der Überwachung von Ankern dar. Verbindungen bei Glasfaserelementen die für die Messtechnik verwendet werden, müssen sehr exakt hergestellt werden, da wie bereits erwähnt, die kleinsten Störungen im Querschnitt zu Verlusten und Streuungen des Lichtes führen.

Es gibt temporäre und dauerhafte Verbindungsmöglichkeiten die keinen negativen Einfluss auf die transportierten Daten haben. Als temporäre Verbindung werden alle Steckverbindungen und als dauerhafte die Splice- Verbindungen bezeichnet.

Unabhängig von der Verbindungsart müssen die Fasern abisoliert und in einem exakten Winkel von 90° abgeschnitten werden. Das Abisolieren der Schutzhülle ($250\mu\text{m}$) muss dabei mit dem entsprechenden Werkzeug durchgeführt werden um den Mantel nicht zu beschädigen. Auch für den exakten Schnitt von 90° wird ein sogenannter Cleaver verwendet um zusätzliche Streuungen an der Verbindungsstelle zu vermeiden. [20]

6.3.3.1 Splice- Verbindung

Splice- Verbindungen dienen zur Verbindung zweier Einzelfasern zu einer durchgehenden Faser. Dabei wird zwischen mechanischen Verbindungen und Schmelzverbindungen unterschieden. Mechanische Splice- Verbindungen sind in Bezug auf Genauigkeit bei Dehnungsmessungen nicht anwendbar, weswegen die Schmelzverbindung hier zum Einsatz kommt. Dabei werden die Enden bei 1100°C geschmolzen und anschließend miteinander verbunden. Dabei entsteht eine Verbindung die keinerlei Einflüsse auf die Genauigkeit oder auf die Dehnungsverteilung entlang der Faser aufweist. Verluste durch Spliceverbindungen liegen bei maximal 0,1 dB. Für einen zusätzlichen Schutz dieser Verbindungsstellen können mechanische Klipps, thermische Schrumpfschläuche oder auch Splice- Gehäuse verwendet werden.



Abb. 43: Links: Schrumpfschlauch und rechts mechanischer Klipp als Schutzelemente für Splice- Verbindungen aus [20]

6.3.3.2 Verbindungsstecker

Für temporäre Verbindungen bedient man sich Verbindungssteckern wie sie sehr häufig in der Elektrotechnik verwendet werden. Je nach Steckertyp werden unterschiedlich Streuungen, Reflexionen und Verluste angegeben. Kommen bei Messsystemen Steckverbindungen zum Einsatz, so ist es wichtig dass immer nur ein Typ im gesamten System eingesetzt wird. Um die Genauigkeit bei Steckverbindungen möglichst hoch zu halten werden diese bereits bei der Produktion unter Laborbedingungen mit einem Stück Faser verbunden. Dadurch wird vor Ort nur mehr eine klassische Splice- Verbindung hergestellt wodurch die Genauigkeit auch mit Steckverbindungen sehr hoch gehalten werden kann. Verluste bei Steckverbindungen liegen im Bereich von 0 bis 1 dB.

Die Entscheidung für Splice oder Steckverbindung ist je nach Anforderung an das Messsystem zu treffen. Splice sind im Allgemeinen wirtschaftlicher und von höherer Genauigkeit, jedoch steht dem die Flexibilität von Steckverbindungen gegenüber.



Abb. 44: Steckverbinder in Form eines starren Hülsenverbinders des Typ FC und rechts der Typ E2000 der sehr hohen Schutz gegenüber mechanischen Beschädigungen aufweist aus [20]

6.4 Optische Zeitbereichsreflektometrie - Optical Time Domain Reflectometry (OTDR)

Dieses Analysesystem stellt das meist verwendete Verfahren dar, das zur Untersuchung der Informationen, Lauflänge und Reflexionscharakteristika die durch das Licht gewonnen werden können herangezogen wird. Dabei wird zunächst ein Lichtimpuls von 3ns bis 20 μ s in die Faser geschickt und anschließend das Rayleigh- Rückstreulicht über die Zeit gemessen. Das Rückstreulicht charakterisiert durch die Intensität ist abhängig von Rissen, Brüchen, Verunreinigungen oder auch von Splice-Verbindungen wodurch eine Dämpfung des Lichtwellenleiters in dB/m errechnet werden kann. Durch die Zeitabhängigkeit und die Gruppengeschwindigkeit der Wellenpakete kann somit auf den Ort der Reflexion zurückgerechnet werden. Um diese Ortsangaben weiter zu präzisieren werden die Fasern, wenn technisch möglich, von beiden Richtungen mit Impulsen bespielt wodurch es zu einer Fehlerkompensation kommt.

Diese Analysesysteme werden von mehreren Herstellern in unterschiedlichsten Konfigurationen angeboten. Ein solches Modell mit einem typischen Messergebnis ist in der nächsten Abbildung angeführt.



Abb. 45: Optical Time Domain Reflectometry – Analysegerät mit typischem Messergebnis aus [20]

6.4.1 Verteilte Brillouin Messmethode - Distributed Brillouin Sensing

Grundlage dieser verteilten Brillouin Messmethode sind die Streuungseffekte des Lichtes verursacht an verschiedensten Veränderungen der Lichtwellenleiter bzw. derer Eigenschaften. Für die geotechnischen Anwendungen von großer Bedeutung sind dabei der Einfluss der Temperatur und die Dehnungsverteilung entlang der Glasfaserkabel.

Die wesentlichen Streuungseffekte sind die Raman-, Brillouin- und Rayleigh- Streuung. Wie aus der nachfolgenden Abbildung ersichtlich ist sind die Streuungen in beiden Richtungen der Wellenlängen symmetrisch. Die Rayleighstreuung repräsentiert dabei jenen Teil der mit derselben Wellenlänge λ_0

reflektiert wird, wobei die Streuungseffekte von Brillouin und Raman veränderte Wellenlängen aufweisen. Ramanstreuungen werden durch thermisch hervorgerufene molekulare Vibrationen verursacht im Gegensatz zu Brillouinstreuungen die auf thermisch verursachte akustische Wellen zurückzuführen sind.

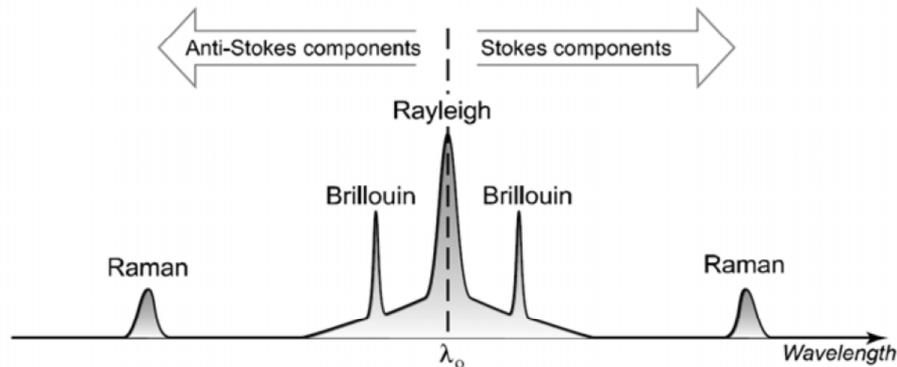


Abb. 46: Darstellung der Streuungseffekte von Licht in einem Lichtwellenleiter aus [20]

Die Position der Ramanstreuungen ist fixiert wobei die Intensität im Anti-Stokes Bereich von der Temperatur abhängig ist jedoch im Stokes Bereich diese Abhängigkeit nicht aufweist.

Im Vergleich dazu sind die Brillouinspitzen sowohl von der Temperatur wie auch von der Dehnung an der jeweiligen Position abhängig. Dies führt zu einer Verschiebung dieser Spitzen im Falle einer Änderung der Temperatur bzw. der Belastung.

Diese Abhängigkeit gegenüber der Temperatur und der Dehnungen bzw. Spannungen kann auf die unterschiedlichen Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten bei verschiedenen Materialdichten zurückgeführt werden. Die Materialdichte ist wiederum selbst von der Temperatur und der Dehnung (Verformung) abhängig wodurch diese Zusammenhänge durch lineare Beziehungen beschrieben werden können. [20][33][50]

6.4.2 Messmethoden nach dem Prinzip der Brillouin-Methode

Die Technologien sind bis dato soweit entwickelt, dass für Messstrecken von bis zu 30 km eine Auflösung vom 1m für Dehnungen im $\mu\epsilon$ Bereich messtechnisch erfasst werden können. Unter Laborbedingungen können Temperatur und Dehnungen mit einer Auflösung bis in den cm Bereich aufgezeichnet werden, jedoch sind diese Instrumente bislang lediglich in Labors einsetzbar. Die am Markt erhältlichen Systeme werden in Zwei Gruppen unterteilt. Dies sind die:

- Spontane Brillouin Streuung, die sogenannte Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR), und die
- Stimulierte Brillouin Steuerung, auch Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA) genannt.

6.4.2.1 Brillouin Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR)

Diese Technologie ist dadurch charakterisiert, dass nur ein Ende des Lichtwellenleiters zugänglich sein muss um die Messung durchführen zu können. Dabei werden die Streuungen analysiert die am selben Ende, an dem der Impuls eingeleitet wurde, durch Streuungseffekte zurückgesendet werden. Die beiden Marktführer auf diesem Gebiet sind Ando/Yokogawa und Sensomet. [20]

6.4.2.2 Brillouin Optical Time Domain Analysis (BOTDA)

Bei dieser Methode ist der Zugang zu beiden Enden des Lichtwellenleiters zur Analyse erforderlich, da hier von beiden Richtungen aus gegenläufige Lichtwellen zur Anwendung kommen. An einer Seite sitzt der sogenannte Impulsgeber (pump) und an der gegenüberliegenden Seite die sogenannte Sonde (probe). Die Stimulierte Brillouin Streuung tritt dann auf, wenn die Frequenzdifferenz von Sonde und Impulsgeber mit der Brillouin Frequenzverschiebung übereinstimmen. Dies führt zu einer Verstärkung der Streuung und somit zu stärkeren Signalen. In der Literatur wird immer wieder darauf hingewiesen, dass das aufrechterhalten einer gleichbleibenden Frequenzdifferenz das entscheidende Kriterium bei dieser Technologie darstellt. Die Firmen Omnisens, Neubrex und OZ Optics sind die meist genannten Entwickler im Bereich der BOTDA.

6.5 Fiber Bragg Grating– Methode

Wie bereits zuvor erwähnt wird bei den Sensoren zwischen Single- Mode- und Distributed Mode-Sensoren unterschieden. Die Sensoren die auf dem Prinzip der Brillouin Streuung beruhen zählen zu der Gruppe der Distributed Sensoren, bei denen die Messpunkte gleichmäßig über die Länge, bis in den Bereich von mehreren km, verteilt sind. Im Vergleich dazu liefern Single-Mode Sensoren einen Wert für die gewählte Messlänge die von mm bis mehreren Metern variiert werden kann. Der überwiegende Teil dieser Sensoren beruht auf dem Prinzip des Fiber Bragg Gratings.

Dieses Prinzip baut darauf auf, dass dem Mantel des Lichtwellenleiters durch ultraviolettes Licht eine Gitterstruktur verliehen wird, an welchem das Licht reflektiert wird. Dabei werden Wellenlängen die innerhalb dieses Interferenzfilters liegen reflektiert und alle anderen weitergeleitet. Da dieses Gitter, wie die gesamte Glasfaser, sowohl Temperatur- als auch Dehnungsabhängig ist, sind hier Sensoren zur Temperaturkompensation erforderlich. [4][9][12][18][23][28][69][70]

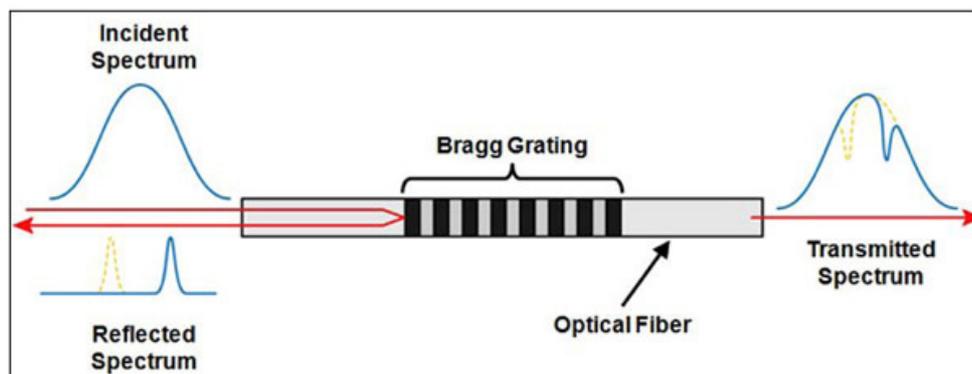


Abb. 47: Prinzip eines Fiber Bragg Gitter Sensors aus [28]

Fiber Bragg Grating Sensoren haben Längen von üblicherweise 10mm und können bis zu 16 Mal aneinandergereiht werden. Die Anzahl der Sensoren pro Faser ist dadurch begrenzt, da für jeden Wellenbereich der reflektiert werden soll eine eigene Gitterstruktur erforderlich ist.

6.6 Geotechnische Anwendungen

In diesem Abschnitt sollen bereits durchgeführte Anwendungen im Bereich der Geotechnik aufgezeigt werden. Bislang wurde die Fiber Optic Technik vor allem als Frühwarnsystem im Bereich von Pipelines, Rutschhängen und Dammbauwerken eingesetzt. Wesentlich weniger bis gar keine Einsätze sind in Bezug auf die Überwachung von Anker in der Literatur zu finden. Die folgende Tabelle soll nur einen Auszug aus den veröffentlichten Arbeiten der letzten Jahre darstellen, wobei festgehalten werden soll, dass die meisten Projekte in Zusammenarbeit mit einer Forschungsanstalt durchgeführt wurde. Die meisten Systeme sind daher nicht als Standardprodukte am Markt erhältlich, sondern wurden auf den jeweiligen Einsatz speziell abgestimmt, was auf die meist sehr harschen und ständig wechselnden Bedingungen im Spezialtiefbau zurückzuführen ist. [4][5][8][11][17]

Anwendung	Beschreibung	Quelle
Pfähle BOTDR	Überwachung von Kleinbohrpfählen während eines Belastungsversuchs – Vergleich der Ergebnisse der Fiber Optic Sensoren mit denen der Dehnmessstreifen hat eine gute Übereinstimmung ergeben.	Mohamad [20]
FBG	Dehnungsaufzeichnungen während eines Auszug-versuchs eines Micro-Pfahls durch 8 FBG's die an der Bewehrung appliziert waren.	Habel [20]
FBG	Glasfaseranker mit einer Länge von 3,6m sollten während zyklischen Belastungsversuchen die Dehnungen aufzeichnen – die Ergebnisse der einzelnen Sensoren stimmten nicht überein – die Sensoren versagten bei höheren Lasten	Zhu [20]
Pipeline BOTDA	Überwachung einer Pipeline die durch ein Rutschgebiet führt – Aufzeichnung der Dehnungsänderungen an der Pipeline durch 3 Sensoren über 500m Länge	Inaudi & Glisic [20]
Tunnel BOTDR	Überwachung einer Tunnelröhre während dem Vortrieb einer Zweiten, naheliegenden Tunnelröhre - Beobachtung der Verformungen an der Tunnelschale mittels Fiber Optic Messtechnik	Mohamad [20]
Inklinometer FBG	Zu diesem Thema gibt es mehrere Versuchsreihen. Inklinomometermessung an einem 14m tiefen Bohrloch mit 2 Fasern zu je 11 FBG's konnten erfolgreich Untergrund-bewegungen aufzeichnen	Schwaz [20] Ho [20]

Asphalt	Aufzeichnung der Dehnungen einer Straße um Rückschlüsse auf	Hu [20]
FBG	Wartungsintervalle treffen zu können. Die FBG's wurden bereits während der Asphaltierungsarbeiten ohne Beeinträchtigung der Sensoren in das heiße Asphaltmischgut eingelegt.	

Tab. 12: Anwendungen von Fiber Optic Messsystemen in der Geotechnik aus [20]

6.6.1 Entwicklungen der Fiber Optic Technik

Die Fiber Optic Technologie hat im letzten Jahrzehnt einen enormen Sprung in der Entwicklung gemacht. In dieser Zeit wurden auch die ersten Versuche im Zusammenhang mit geotechnischen Anwendungen gemacht, wobei in der Literatur immer wieder auf fehlende Forschungsarbeiten in bestimmten Bereichen hingewiesen wird.

Zu den wesentlichen Vorteilen der Entwicklung zählen:

- große Anzahl an Informationen die über bislang unvorstellbare Distanzen von mehreren Kilometern transportiert werden können
- Rasche Abfrage der Informationen über längere Zeiträume (life cycle monitoring)
- Kleine Abmessungen erleichtern die Applikation an den zu untersuchenden Elementen
- Beständigkeit gegenüber chemischen Einwirkungen und keine Explosionsgefahr durch die Informationsabfrage (Pipeline- Überwachung)
- Geringere Mess- und Sensorkosten

Trotz der raschen Entwicklung gibt es besonders im Hinblick auf den Einsatz in der Geotechnik Eigenschaften die die Handhabung wesentlich beeinflussen werden. Einige Punkte die in Zukunft von Interesse sein werden, sind:

- Schutz des Lichtwellenleiters für den Einsatz in der Geotechnik sowohl innerhalb der zu überwachenden Elemente wie auch im Übergangsbereich zur Umgebung (z.B.: Ankerkopf)
- Geregelte Verfahren zur Applikation der Messsensoren an der Mess-Struktur
- Bruch der Faser durch Biegung und Dehnung (1% bis 4% je nach Kabel)
- Verluste innerhalb der Sensorkabel durch enge Biegeradien (nicht kleiner als $10 \times \varnothing$)
- Temperaturbeständigkeit der Kabel

6.6.2 Kraftübertragung in den Baugrund

Wesentlich für eine wirtschaftliche Dimensionierung von Ankern ist das Verständnis über die mechanischen Vorgänge die bei Belastung im Anker selbst und in den umliegenden Strukturen hervorgerufen werden. Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Tragfähigkeit maßgebend durch die Kraftübertragung von Anker in den Baugrund, sprich von den übertragbaren Schubspannungen in der Kontaktfläche von Verpresskörper und Boden, beeinflusst wird. Anker stellen ein in der Geotechnik sehr oft verwendetes Element dar das in Hinblick auf die Kraftübertragung von Ankern in den Baugrund noch nicht restlos erforscht wurde. In der Literatur gibt es eine Vielzahl an Untersuchungen

dieses Problems jedoch waren die Aufzeichnungsmöglichkeiten entlang des Verpresskörpers bislang sehr beschränkt. Meist wurden lt. Literatur 8 bis 12 Dehnmessstreifen entlang der Zugglieder appliziert umso Rückschlüsse auf die Kraftübertragung in den Baugrund zu treffen. Durch die beschränkte Anzahl an Sensoren war es bislang nicht möglich ein Zugglied über die vollständige Verankerungslänge zu analysieren, wodurch genau Angaben zu den Versagensmechanismen fehlen.

Bislang wurden hauptsächlich Dehnmessstreifen zur Analyse der Kraftübertragung herangezogen, wobei mit der Entwicklung der Faseroptik auch Fiber Bragg Grating- Sensoren bei wissenschaftlichen Untersuchungen zum Einsatz gekommen sind. In der Literatur findet man den Einsatz von Optischen Sensoren in der Geotechnik seit 2007 in Zusammenhang mit der Analyse des Krafteinleitungsbereiches. In der Publikation von Zhu [20] und Yin [20] wurden zunächst große Abweichungen zwischen den optischen und elektrischen Dehnungssensoren festgestellt. Zusätzlich sind optische Sensoren während den Belastungszyklen ausgefallen was aus heutiger Sicht auf die verwendeten Sensoren zurückzuführen ist. Bei Habel [20] und Dietz [20] wurden Anker mittels 9 200 mm langen FBG Dehnungssensoren, die in der Haftstrecke appliziert wurden, erfolgreich während den Zugversuchen überwacht. In der Veröffentlichung von Iten [20] wurde ein Gewindestabanker durch verschiedene Sensorkabel während des Spannvorgangs analysiert. Die folgende Abbildung zeigt im rechten Teil die Ergebnisse eines Testankers von Zhang [68] und Benmokrane [68]. Im Linken Bereich sieht man die Auswertung von Habel und Dietz aus [20], die wie im Versuch von Iten [20] die Sensorkabel in einen Gewindestabanker (Gewi) seitlich eingeschlizt haben um die Verformungen am Zugglied zu überwachen. [4][5][6][16][18][19][22][68]

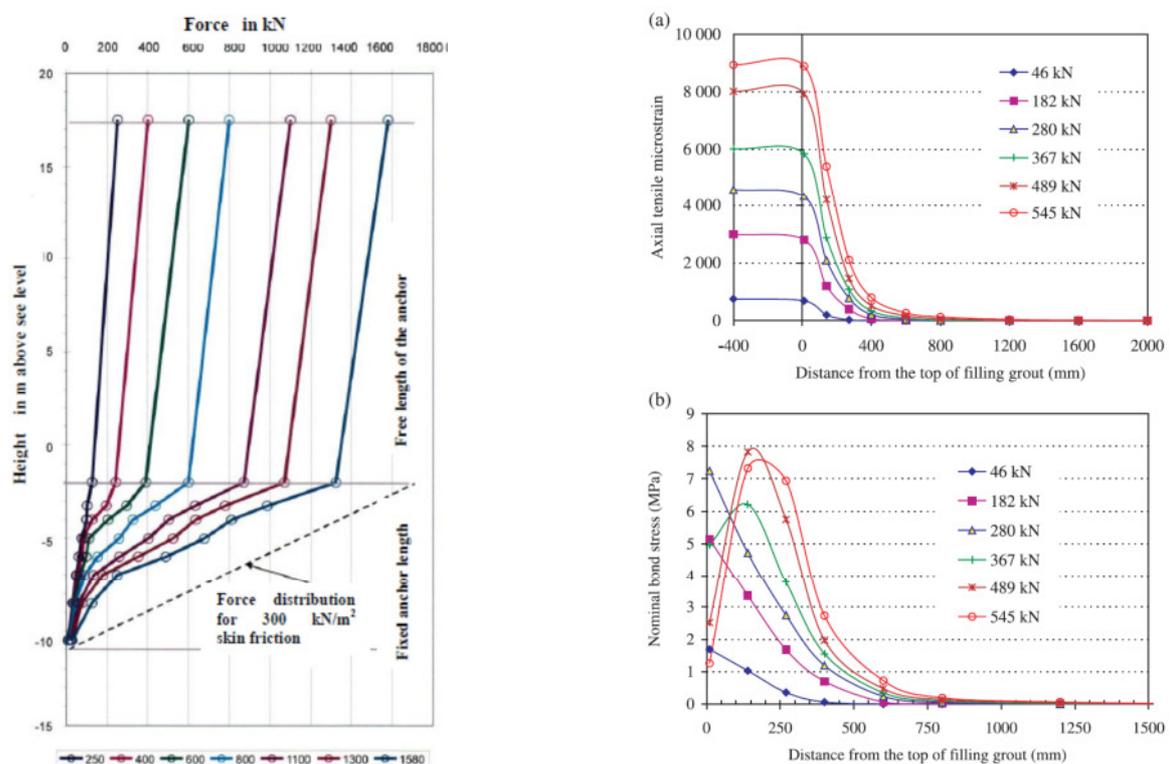


Abb. 48: Links: Auswertung eines Zugversuchs mittels 9 FBG Sensoren die über die 10 m lange Haftstrecke verteilt appliziert wurden aus [20]; rechts: aus [68] –Auswertung eines Zugversuchs mittels FBG Sensoren in a) Verteilung der Dehnungen im Verpresskörper und b) Verbundspannungen an der Oberfläche der Zugglieder aus Faserverbundwerkstoffen

Im Versuch von Zhang und Benmokrane wurden sowohl Dehnmessstreifen wie auch faseroptische Sensoren eingesetzt. Dadurch konnte nach deren Auswertung ein Vergleich der Daten vorgenommen werden der in der nachfolgenden Abbildung dargestellt ist.

In diesem Spannungs- Dehnungsdiagramm ist die gute Übereinstimmung der verwendeten Sensoren, bei der Überwachung eines Bodenankers unter Laborbedingungen zu sehen. Dieser erfolgreiche Versuch lässt auf die Vielzahl an Möglichkeiten schließen, die durch die Weiterentwicklungen im Bereich der faseroptischen Messtechnik, in Hinblick auf Bauwerksüberwachungen sich ergeben.

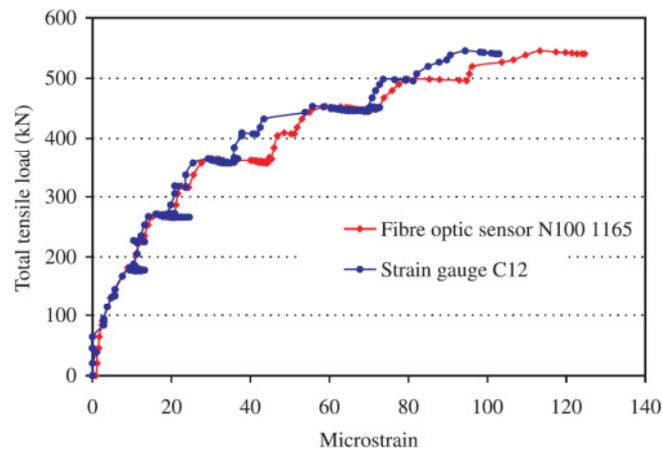


Abb. 49: Vergleich der Messergebnisse aus elektrischen und faseroptischen Messreihen an einem Versuchsanker mit 3m Haftstrecke aus [68]

In weiterer Folge sind diese Entwicklungen auch in Feldversuchen zu testen um die Handhabung dieser Produkte unter den Einflüssen des Spezialtiefbaus zu prüfen. Versuche basierend auf dem Brillouin Prinzip, sprich BOTDR oder BOTDA, werden eine noch genauere Aufzeichnung der Dehnungen entlang der Haftstrecke ermöglichen und somit neue Rückschlüsse auf die Kraftübertragung von Anker in den Baugrund ermöglichen.

7 Entwicklung eines Ankers mit inkludiertem Überwachungssystem

7.1 Allgemein

In diesem Abschnitt wird ein Anker aus Faserverbundwerkstoffen entwickelt, der auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Kapitel aufbaut. Dabei ist das Ziel die Vorteile dieser Elemente so zu kombinieren, dass ein möglichst universell einsetzbarer Anker entsteht. Da eine gute und effiziente Überwachung von Anker zum einen für das bessere Verständnis der Vorgänge zwischen Anker und Baugrund und zum anderen für die Gewährleistung gewisser Sicherheitsanforderungen erforderlich ist soll auch dieser Aspekt in die Entwicklung miteinfließen. Die Wirtschaftlichkeit ist ein entscheidender Faktor weshalb im Anschluss ein Vergleich dieser Produkte auf den bereits gewonnenen Erkenntnissen erstellt wird.

7.2 Ankertyp

Durch die Vielzahl an verschiedenen Anwendungen von Verpressankern wird auch dieser Anker aus Faserverbundwerkstoff als Verpressanker entwickelt. Hauptaugenmerk wird dabei auf die sogenannten vorspannbaren Verpressanker gelegt, wobei auch der Einsatz in Form von Bodennägeln möglich ist. Wie in Kapitel 3- Verankerungen in der Geotechnik beschrieben wurde zählen diese vorspannbaren Verpressanker zu den Verbundankern. Dieser ist durch die Hauptbestandteile, Ankerkopf, freie Zuggliedstrecke und Haftstrecke, sprich Verankerungskörper, gekennzeichnet. Auf die Eigenschaften der Faserverbundwerkstoffe ist zurückzuführen, dass diese Anker immer als hochbelastete Zugelemente zum Einsatz kommen und nicht zum Abtragen von Druckkräften herangezogen werden. Im Weiteren werden die wesentlichen Bestandteile näher beschrieben und die verschiedenen Ausführungsmöglichkeiten erläutert.

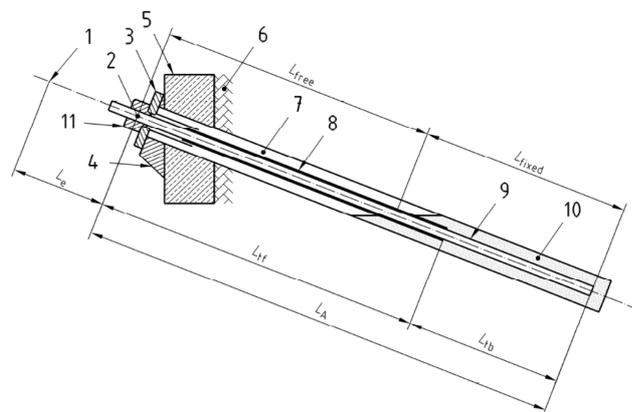


Abb. 50: Schematischer Aufbau eines Verpressankers nach DIN EN 1537, 1-Verankerungspunkt an der Spannvorrichtung während des Spanns; 2-Verankerungspunkt am Ankerkopf im Gebrauchszustand; 3-Auflagerplatte; 4-Auflager; 5-verankertes Bauteil; 6-Baugrund; 7-Bohrloch; 8-Hüllrohr; 9-Zugglied; 10-Verpresskörper; 11-Verankerungselement; L_A -Ankerlänge; L_{free} -freie Ankerlänge; L_{fixed} -Krafteinleitungslänge; L_{tf} -freie Zuggliedlänge; L_{tb} -Verankerungslänge des Zuggliedes aus DIN EN 1537:2009

7.2.1 Ankeraufbau

In der oben angeführten Abbildung ist der Aufbau eines Verpressankers nach DIN EN 1537-2009 dargestellt. Dieser wird als Grundlage für die Entwicklung eines Faserverbundankers herangezogen und auf die Anforderungen die sich durch den Einsatz von Verbundwerkstoffen ergeben angepasst.

7.2.1.1 Zugglied

Für die Wahl des Materials des Zuggliedes haben sich zwei Möglichkeiten herauskristallisiert. Einerseits sind das Glasfaser- und andererseits Kohlenstofffaser- Verbundwerkstoffe. In Kapitel 4 wurden die Eigenschaften beider Materialien getrennt für die Faser und die Matrix beschrieben. Dabei haben sich wesentliche Vorteile bei der Verwendung von Kohlenstofffasern gezeigt die jedoch einem höherem Preis in der Anschaffung gegenüberstehen. Da diese Anker auch als Daueranker mit einer Nutzungsdauer >2 Jahren in chemisch stark belasteten Böden zum Einsatz kommen sollen haben die Karbonelemente entscheidende Merkmale die deren Einsatz erklären. Die folgenden Bewertungen der Eigenschaften haben die Entscheidung zwischen Glasfaser und Kohlenstofffaser in Richtung der Karbonfaserprodukte beeinflusst:

Eigenschaft	Kohlenstofffaser	Glasfaser
Zugfestigkeit	Hervorragend	Sehr gut
E-Modul	Sehr gut	gut
Langzeitverhalten	Sehr gut	Befriedigend
Ermüdungseigenschaft	Hervorragend	Gut
Beständigkeit gegen Alkalität	Sehr gut	befriedigend
Gewicht	Sehr gut	Sehr gut
Preis	Gut	Sehr gut

Tab. 13: Bewertung der Materialeigenschaften der Endprodukte nach folgenden ansteigenden Bewertungsklassen, befriedigend, gut, sehr gut, hervorragend

Ausgehend von dieser Bewertung der Faserverbundwerkstoffe werden im Weiteren bei der Entwicklung die Kohlenstofffaserelemente verwendet. Wesentlichen Einfluss auf sämtliche nachfolgenden Ankerbestandteile hat die Querschnittsform der Zugglieder. Der klassische Litzenancker wie er bislang eingesetzt wurde setzt sich aus 2 bis 12 Stahllitzen zusammen. Für Karbonfasern sind neben Kreis- und Rechteckquerschnitte auch zusammengesetzte Elemente erhältlich. Grundsätzlich ist nahezu jede Form durch das Pultrusionsverfahren herstellbar, jedoch sind nicht standardmäßig gefertigte Querschnitte erst ab einer Bestellmengen von 5.000 Meter erhältlich da der gesamte Produktionsablauf auf die Form abgestimmt werden muss. Sonderformen liegen auch in Bezug auf den Preis deutlich über jenem von Standardprodukten weswegen man sich im Weiteren auf Kreis- und Rechteckquerschnitte konzentriert. In Kapitel 8- Wirtschaftlichkeit der Ankerprodukte werden die Querschnitte in Abhängigkeit der Materialien und der Abmessungen bewertet und miteinander verglichen. Wesentliche Einflussfaktoren auf die Abmessungen der verwendeten Querschnitte sind:

- Bohrlochdurchmesser
- Verankerungsart am Ankerkopf
- Zusätzliche Einbauten im Bohrloch (z.B.: Sensoren)

Die Wahl der Oberflächenbeschaffenheit hat vor allem auf den Verbund von Zugglied und Verpresskörper Einfluss. In der nächsten Abbildung sind die üblichen Gestaltungen der Oberfläche dargestellt. Je nach Hersteller sind auch noch weitere Arten der Oberflächen erhältlich. [15][6]

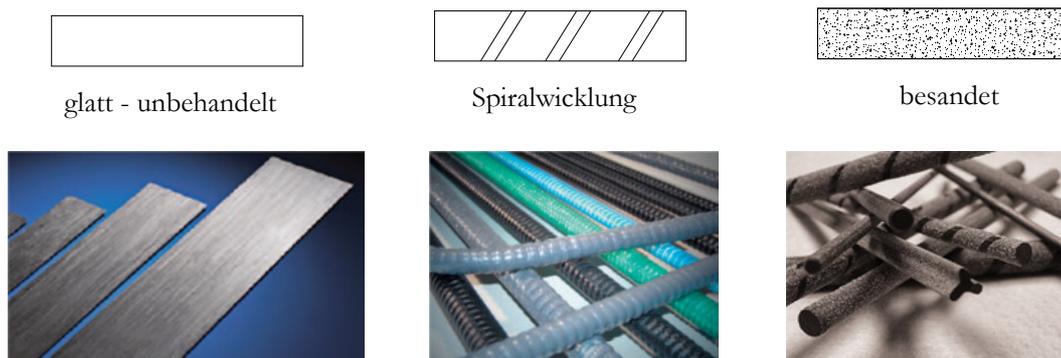


Abb. 51: Oberflächen von Karbonfaserelementen aus [43][41][68]

7.2.1.2 Ankerkopf

Der Ankerkopf hat die Aufgabe die Ankerkraft welche beim Spannen auf das Zugglied aufgebracht wurde sicher in das Bauteil weiterzuleiten.

Das zuvor beschriebene Zugglied hat erheblichen Einfluss auf den Ankerkopf da die Karbonelemente sehr empfindlich auf Beanspruchungen quer zur Faserrichtung sind. Daraus resultiert, dass bei diesen Produkten keine reinen Stahlkeile wie bei Stahlhitzen zur Verankerung zum Einsatz kommen können, da diese ein sofortiges Versagen an der Klemmstelle zur Folge hätten. [7]

Bislang gibt es Zwei Arten der Verankerung von Faserverbundwerkstoffen. Dies sind die:

- Verbundkeil- Verankerungen
- Klebe- Verankerungen

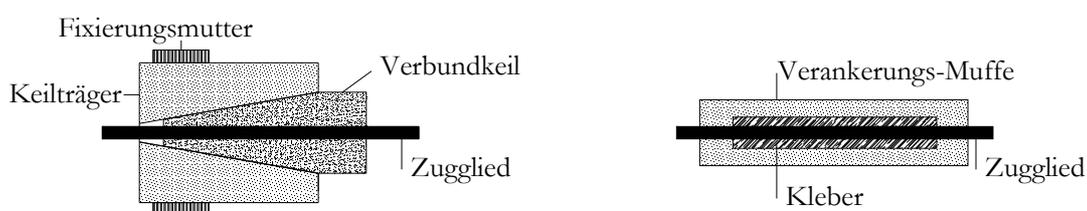


Abb. 52: Schematische Darstellung der Verbundkeilverankerung links und der Klebeverankerung rechts

Diese beiden Verankerungsmethoden stellen den Stand der Technik im Bereich der Verankerung von Faserverbundwerkstoffen dar. Bei der Keil- Verankerung war bislang das größte Problem, dass durch

die Empfindlichkeit gegenüber Schubbeanspruchungen quer zur Faserrichtung nicht die volle Kraft des Zuggliedes vom Ankerkopf übertragen werden konnte. Diese Art der Fixierung des Zuggliedes kommt aus dem Betonbau, bei dem CFK-Lamellen zur nachträglichen Bauteilverstärkung verwendet werden. Durch Veränderungen des Keilaufbaus ist es nun gelungen 100% der Zugkräfte die das Zugglied übertragen kann auch über den Ankerkopf ableiten zu können. Dies bedeutet dass die Effizienz dieser Verankerung enorm gesteigert werden konnte da nun nicht mehr der Ankerkopf das maßgebende Bauteil darstellt. In den folgenden Abbildungen sind die unterschiedlichen Spannungsverteilungen von klassischen Stahl-Keilverankerung und der neu entwickelten Verankerung zu sehen. [7][58]

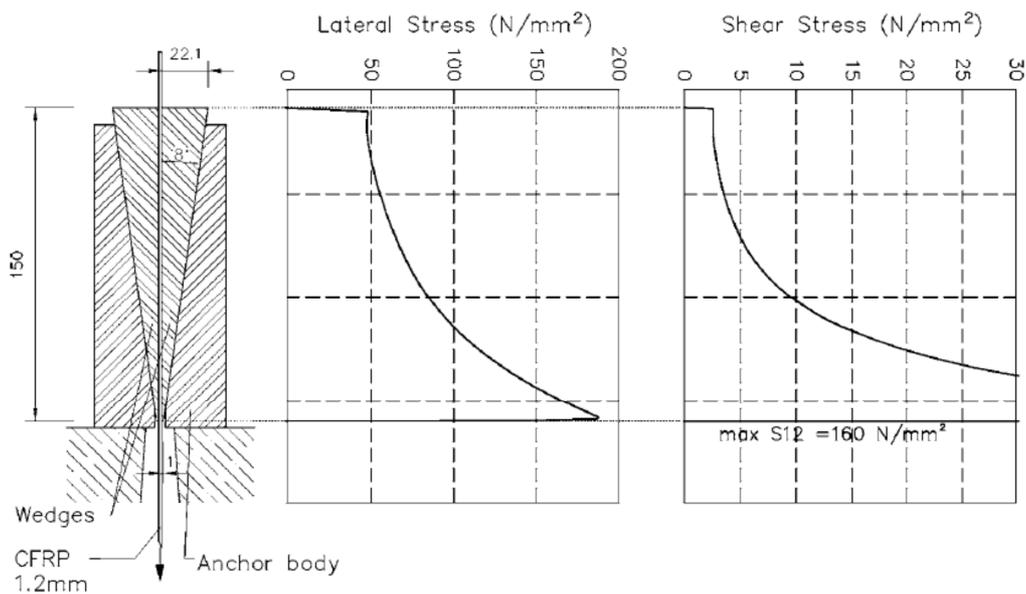


Abb. 53: Spannungsverteilung an einer CFK-Lamelle bei einer Stahlkeilverankerung aus [7]

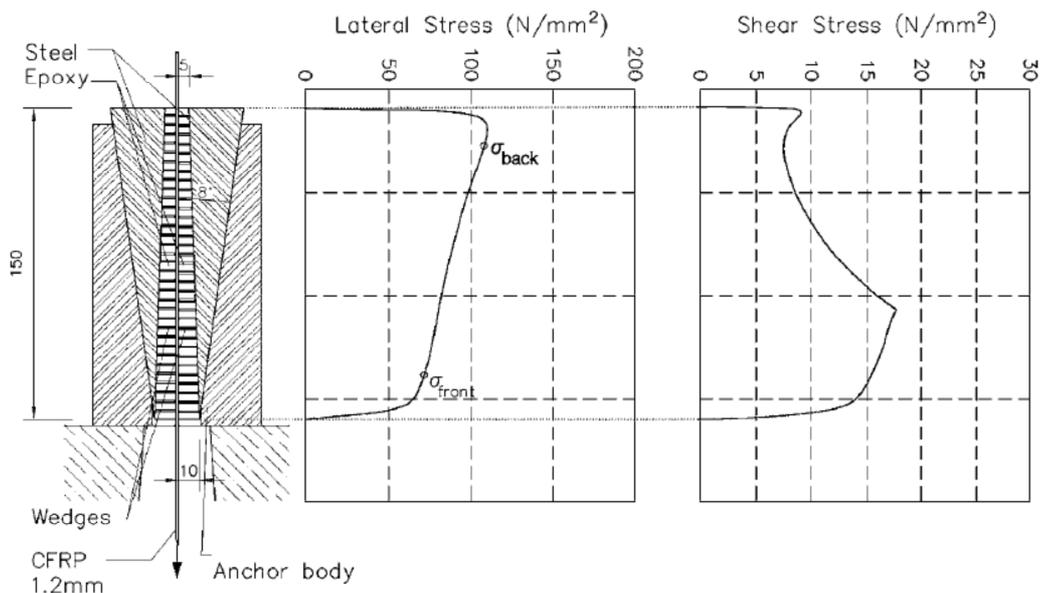


Abb. 54: Spannungsverteilung der neu entwickelten Verbundkeilverankerung mit deutlich reduzierten Spannungsspitzen aus [7]

Entscheidenden Einfluss auf die Spannungsverteilungen hat die Zusammensetzung der Keile, die aus Epoxy- und Stahlkomponenten bestehen. Die Epoxyschichtstärke verringert sich über die Länge des Keils von Vorder- zur Rückseite. Das Epoxymaterial weist einen wesentlich geringeren E Modul im Vergleich zu Stahl auf wodurch die Steifigkeit des Verbundkeils durch die Epoxyschicht gesteuert werden kann. Durch die deutliche Reduktion der Spannungsspitzen kann ein vorzeitiges Versagen der Lamellen in Klemmbereich verhindert werden. Die Abstimmung von Epoxyschicht und Stahlkeil auf die Geometrie der verwendeten Lamelle, ermöglicht es 100% der Lamellenzugkraft über diese Art der Verankerung abzutragen. [7]

Wie bereits erwähnt wurde diese Verankerung für nachträgliche Bauteilverstärkungen im Betonbau entwickelt wodurch die Abmessungen wie in der nachfolgenden Abbildung dargestellt zu erklären sind.

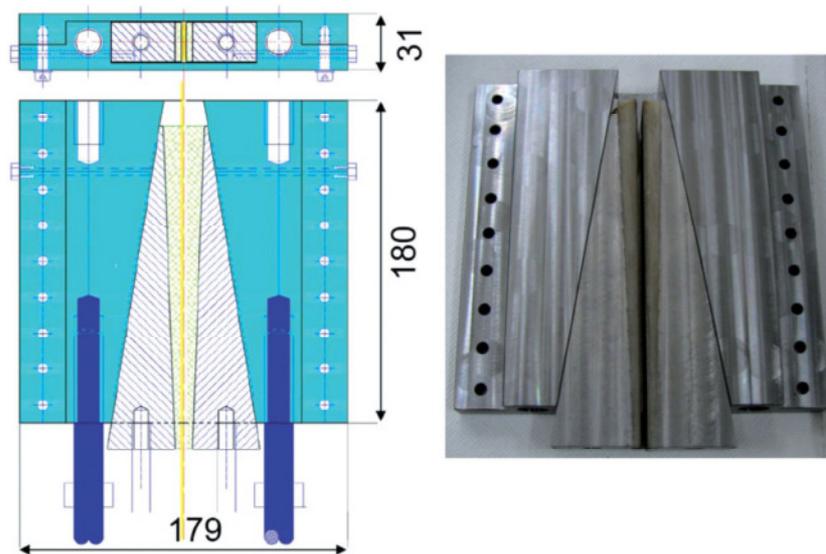


Abb. 55: Darstellung der Verbundkeilverankerung aus [7]

Diese Verankerung ist auch für den geotechnischen Einsatz von großem Interesse, da wie in der Literatur gezeigt wurde, diese Verbundkeile mehrmals zum Einsatz kommen können. Für den Einsatz in der Geotechnik sind folgende Adaptierungen notwendig und in Feldversuchen zu prüfen:

- Abmessungen der Verankerung an die geotechnischen Randbedingungen anpassen
- Möglichkeit der Verankerung mehrerer Lamellen an einem Ankerkopf
- Möglichkeit der Verankerung von Rundquerschnitten
- Spannvorgang wenn mehrere Querschnitte zu verankern sind
- Lösen der Verankerung beim Rückbau der Anker
- Durchführungen für Fiber Optik Sensoren erforderlich

Die augenscheinlichsten Vorteile dieser Verankerung aus derzeitigem Standpunkt sind:

- mehrfache Verwendbarkeit – Einmalige Produktionskosten
- Flexibilität, da keine fixe Vormontage des Ankerkopfs am Anker erforderlich ist
- 100% Kraftübertragung – Lamelle kann voll ausgenutzt werden
- Sofortige Kraftübertragung möglich – keine Aushärtungsprozesse am Ankerkopf

Im Gegensatz zur Verbundkeilverankerung wurde bei den bereits eingesetzten Faserverbund- Anker bislang immer die Klebeverankerung eingesetzt. Dies ist hauptsächlich darauf zurück zu führen, dass es bis vor kurzem noch nicht möglich war die Querschnitte bei Keilverankerung voll auszunutzen. Die Klebeverankerung ist in der nun vorgestellten Version eine Entwicklung von Benmokrane und Zhang aus 2004 wobei auch zuvor Klebeverankerungen in abgewandelter Form zum Einsatz kamen. Dieser Verankerungstyp wurde für Rundquerschnitte entwickelt wobei eine Adaptierung für Lamellenquerschnitte in den Augen des Autors auch möglich sein wird. Der Gedanke hinter dieser Verankerung liegt darin die Art der Kraftübertragung aus der Haftstrecke in den Ankerkopf zu übernehmen. Die Ableitung der Kräfte in der Haftstrecke, von Zugglied auf Verpresskörper, wird über den Verbund zwischen diesen beiden Elementen sichergestellt. Der Verpresskörper wird in den meisten Anwendungsfällen durch Injektionen von Zementsuspension hergestellt. Da auf diesem Gebiet viele Erfahrungen mit dem Verpressgut vorliegen wollte man auch im Ankerkopfbereich diese Art des Verbundes zur Ableitung der Kräfte verwenden. Für das Verpressen des Ankerkopfes werden neben den Zementmörteln auch diverse Harze eingesetzt über welche jedoch keine genaueren Angaben in der Literatur gemacht werden.

In der nächsten Abbildung ist die Klebeverankerung von Zhang und Benmokrane zu sehen, die für Rundstäbe entwickelt wurde. [68]

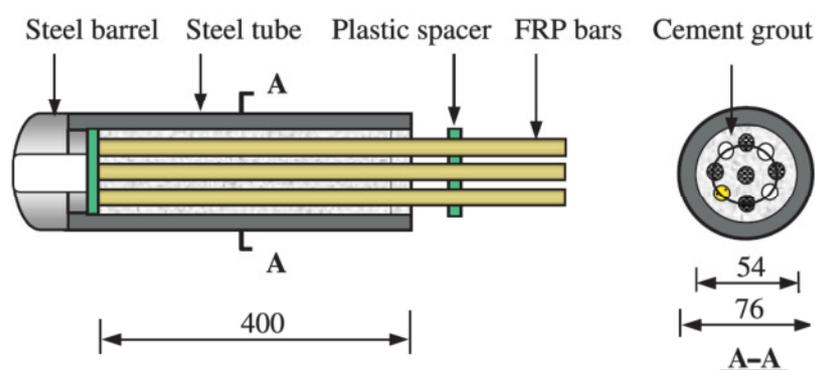


Abb. 56: Schematische Darstellung der Klebeverankerung für den Kopfbereich, alle Maße in mm aus [68]

Darin ist ein Ankerkopf mit 9 Stäben zusehen die jeweils einen Durchmesser von 7,9mm aufweisen und durch die grün dargestellten Abstandshalter in Position gehalten werden. Dadurch ist ein gleichmäßiges Umschließen der Zugglieder durch Zementsuspension gewährleistet. Außen befindet sich ein Stahlzylinder in den die Zugglieder 400mm eingeschoben werden um dann den Hohlraum mit Zementsuspension zu verfüllen. Das Stahlrohr bietet die Möglichkeit eines Außengewindes über welches mit einer Mutter die Ankerkraft auf das zu verankernde Bauteil abgeleitet werden kann. Für den Spannvorgang ist an der Vorderseite eine Muffe mit Innengewinde angeschweißt über welche die Spannvorrichtung die Ankerkraft auf den Anker überträgt. In der Literatur sind vereinzelt Angaben über die tatsächlich übertragbare Kraft durch diese Art der Verankerung zu finden, jedoch sind diese verwendeten Systeme nicht näher beschrieben. Teilweise konnten bis zu 100% der Spanngliedkraft übertragen werden wobei jegliche Erläuterungen zum Spannglied und der Verankerung fehlen.

Die wesentlichen Merkmale die diese Verankerung charakterisieren, wobei diese sowohl positiven wie auch negativen Einfluss auf die Verwendbarkeit haben können, sind:

- Vorgefertigte Anker werden mit Ankerkopf auf die Baustelle geliefert
- Eingeschränkte Flexibilität durch fixe Ankerlänge
- Nachspannen und Lösen der Verankerung einfach durchzuführen
- Durchführungen für Fiber Optik Sensoren erforderlich
- Detaillierte Angaben zum Verpressmörtel sind erforderlich



Abb. 57: Klebeverankerung für Stabquerschnitte links, Mitte: Vorderseite mit Stahlmuffe für den Spannvorgang, Rechts: Rückseite der Klebeverankerung aus [68]

Bei diesem System hat das Verpressmaterial sehr großen Einfluss auf die übertragbare Ankerkraft. Neben den Harzen stellen Zementsuspensionen das standardmäßig verwendete Verpressmittel dar. Diese expansiven Suspensionen setzen sich aus Portlandzement, Expansionsmitteln und stabilisierenden Additiven zusammen. Die verwendeten Expansionsmittel führen durch die Reaktion mit Wasser zur Bildung von Ettringit wodurch es zu einer Druckbeanspruchung der Zugglieder und somit zur Erhöhung der Haftzugfestigkeit kommt. In der Literatur sind Druckspannungen von 25 bis 39 MPa die auf die Spannglieder wirken angegeben. [5][6]

7.2.1.3 Verpresskörper

Der Verpresskörper ist für die Einleitung der Ankerkraft in den umliegenden Baugrund verantwortlich. Grundlage dafür ist, dass die Kraft vom Zugglied in den Zementstein übertragen werden kann. Entscheidend dabei ist der Verbund zwischen Zugglied und Verpressgut welcher durch die Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst werden kann. Je nach Hersteller werden verschiedene Oberflächen die nach dem Pultrusionsverfahren dem Element durch weitere Bearbeitungsschritte verliehen werden angeboten. Die Verbundwirkung dieser Elemente mit dem Zementstein muss durch Auszugsversuche beurteilt werden. In der nächsten Tabelle sind Ergebnisse für verschiedene Materialien und Oberflächen angegeben die nach einer Aushärtungszeit von 28 Tagen erreicht wurden. Die Haftzugfestigkeiten stellen dabei Mittelwerte aus mindestens 3 Versuchen der jeweiligen Oberflächen dar.

Vergleich der Haftzugfestigkeit					
Fasertyp	Oberfläche	Durchmesser	Verbundlänge	Bruchlast	Haftzugfestigkeit
		[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
Aramid	besandet	7,9	100	19	7,7
CFK	spiral	7,9	100	31	12,2
CFK	ringförmig	8,0	100	33	13,0
Stahllitze*	blank	15,6	100	63	6,6
Stahllitze*	Epoxy- beschichtung	15,6	100	68	7,1

* Litze aus 7 Drähten ST 1670/1860

Tab. 14: Vergleich der Haftzugfestigkeit verschiedener Materialien und Oberflächen, Bruchlast und Haftzugfestigkeit sind Mittelwerte aus mindestens 3 Versuchen aus [6]

Aus dieser Tabelle ist ersichtlich, dass die besandeten Aramidstäbe ungefähr die gleiche Haftzugfestigkeit wie die Stahllitzen aufweisen. Im Vergleich dazu ergeben die Versuche bei Karbonfaserstäben das 1,7 bis 2,0 fache der Haftzugfestigkeit von Stahllitzen.

An dieser Stelle werden noch die wichtigsten Parameter des Verpressmörtels angegeben, wobei hier die Erfahrungen der Firmen das entscheidende Kriterium darstellen. Die normative Grundlage für Zementsuspensionen die das Zugglied berühren liegt in der DIN EN 447: Einpressmörtel für Spannglieder – Allgemeine Anforderungen. Aufgrund der oft wechselnden Baugrundverhältnisse gibt es keine Standardrezeptur für Verpressmörtel da diese Mischungen immer auf den angetroffenen Boden abgestimmt werden muss. Der w/z- Faktor liegt zwischen 0,35 und 0,70 wobei Werte über 0,50 nur in nichtbindigen Böden anzuwenden sind, da hier eine Filterwirkung des Bodens beim Verpressen gegeben sein muss. Werte um 0,40 führen bei bindigen Böden und felsigem Untergrund üblicherweise zu guten Ergebnissen wobei es zu Problemen mit der Mörtel- Förderung kommen kann wenn zu geringe w/z- Faktoren verwendet werden. [61][68]

Im Verpresskörper ist durch eine ausreichende Anzahl an Abstandhaltern sicherzustellen, dass sämtliche Zugglieder vollständig mit Verpressmörtel umgeben sind. Dafür ist in der Literatur ein Abstand von Zugglied zu Zugglied von mindestens 5mm angegeben. Bei den bislang ausgeführten Faserverbundankern liegt das Verhältnis von theoretischer Verpressfläche, beschränkt durch den Bohrlochdurchmesser, zum Zuggliedquerschnitt zwischen 3 und 12%. [6][68]

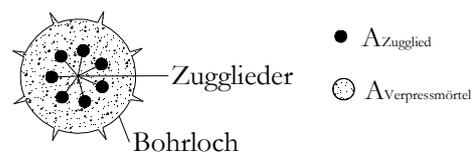


Abb. 58: Querschnitt eines Bohrlochs mit der Darstellung der Flächen von Zugglied zu Verpressmörtel

7.2.1.4 Monitoringsystem

Die Überwachung von geotechnischen Ankern gewinnt immer mehr an Bedeutung, da neben den Sicherheitsaspekten auch weitere Erkenntnisse über die Anker dadurch gewonnen werden können. In der DIN EN 1537-2009: Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) – Verpressanker sind unter Punkt 9: Bauüberwachung, Prüfungen und Kontrollen, allgemeine Angaben dazu getroffen. Neben der Untersuchungs-, Eignungs- und Abnahmeprüfung die bei der Produktion bzw. bei der Herstellung der Anker am Bauwerk durchzuführen sind, gibt es auch Vorgaben zu weiterführenden Überwachungen während der Nutzungsdauer der Anker. Ob eine solche Überwachung sinnvoll und in welchem Ausmaß notwendig ist sollte lt. DIN EN 1537-2009 vom technischen Bauherrenvertreter festgelegt werden. Über die Anzahl der zu überwachenden Anker wird als Richtwert mindestens 5% der Gesamtankeranzahl angegeben.

In dieser Arbeit werden zur Überwachung der Anker die faseroptischen Messsysteme verwendet. Wie bereits in Kapitel 6 beschrieben sind noch nicht alle Messsysteme voll baustellentauglich was sich jedoch in naher Zukunft durch die rege Forschungsarbeit auf diesem Gebiet ändern sollte.

Die Überlegung liegt darin eine Glasfaser bereits bei der Pultrusion der CFK-Elemente miteinzuziehen um dadurch bereits in jedem Zugglied die Sensoren integriert zu haben. Durch diese Art des Einbaus der Sensoren in die Matrix sind folgende Vorteile gegenüber der klassischen Applikation gegeben:

- Schutz der faseroptischen Sensoren über die gesamte Ankerlänge
- Exakte Positionierung der Sensoren im Bohrloch
- Platzsparend da keine zusätzlichen Kabel benötigt werden
- Keine aufwendigen Kabeldurchführungen am Ankerkopf erforderlich
- Durch das Pultrusionsverfahren vollständiger Verbund mit dem Zugglied
- Keine zusätzlichen Arbeitsschritte zur Applizierung der Sensoren
- Mehrere Glasfasern können in einem Querschnitt untergebracht werden

Die nachteiligen Eigenschaften die dieses Verfahren mit sich bringt sind:

- Faser kann nur in einer Richtung und nicht in Schleifen in die Matrix eingelegt werden
- Produktion muss umgestellt werden – große Abnahmemenge erforderlich
- Verbindung der Glasfaser mit dem Analysemodul schwierig

In der folgenden Abbildung ist schematisch der Pultrusionsvorgang für die Einbindung der faseroptischen Sensoren abgebildet. In der Literatur [22] gibt es einen erfolgreichen Versuch die Sensoren in die Matrix einzubetten und dann damit die Struktur zu überwachen, jedoch sind keine detaillierten Angaben zur Matrix oder der Messtechnik vorhanden.

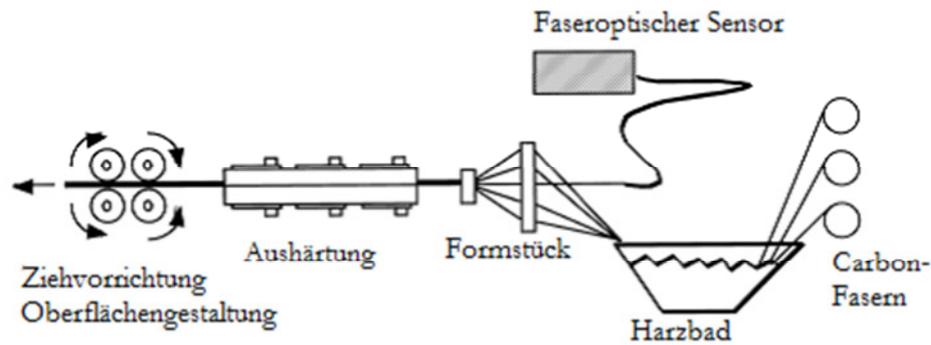


Abb. 59: Schematische Darstellung des Pultrusionsverfahren mit faseroptischen Sensoren die in die Matrix eingelegt werden sollen

Beim oben erwähnten Versuch von Kalamkarov im Jahr 2000 wurden Fabry Perot Sensoren verwendet da damals diese den Stand der Technik repräsentierten. Da die in Kapitel 6 beschriebenen Brillouin Sensoren die höchste Auflösung und Exaktheit aller verfügbaren Sensoren aufweisen sollten für den Einsatz bei Anker diese zur Anwendung kommen. [22][23]

Bei diversen Gesprächen mit Herstellern von CFK-Produkten hat sich herausgestellt dass alle von der Machbarkeit, den Sensor in der Matrix zu platzieren, überzeugt sind. Für die Entwicklung des Überwachungssystems ist somit der Grundstein gelegt wobei diese Produkte natürlich noch in Feldversuchen zu untersuchen sind. Diese durch die Matrix geschützten Sensoren bieten natürlich auch die Möglichkeit für den Einsatz bei anderen geotechnischen Untersuchungen wie z.B.: Inklinometer-, Extensometer- oder auch Korrosionsschutz- Untersuchungen. [4][9][45]

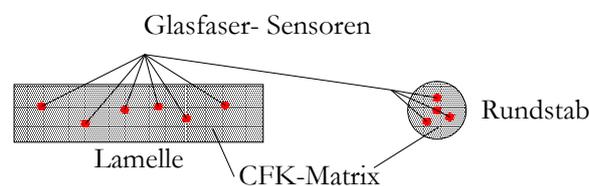


Abb. 60: Schematische Darstellung der Sensoren in der Matrix, Sensoren sind nicht im Maßstab dargestellt, Anordnung und Anzahl sind nur zur Veranschaulichung so gewählt

Werden die Sensoren nicht über den Pultrusionsvorgang in die Matrix eingebettet so bleibt trotzdem die Möglichkeit der Applikation in klassischer Form. Dabei werden Glasfasern zu deren Schutz in Kabel eingezogen die nach der Produktion der Anker auf den zu überwachenden Elementen positioniert werden. Bei dieser Art der Sensorinstallation können die Sensoren auch in Schleifen verlegt werden, wodurch der Sensor von beiden Richtungen ausgehend verwendet werden kann. Dies bringt jenen Vorteil dass bei einem Bruch des Sensors an einer Stelle dieser funktionsfähig bleibt. Durch die Informationen die von beiden Richtungen vor und hinter dem Bruch erhalten werden kann der Bruch lokalisiert und der restliche Sensor weiter zur Überwachung verwendet werden. Aus diesem Grund sollen in die Matrix mehrere Sensoren eingelegt werden um im Falle des Versagens eines Sensors weitere Sensoren zu Verfügung zu haben. Sollten alle Sensoren gebrochen sein so müsste die gesamte Matrix versagt haben was zum schlagartigen Versagen des Ankers führen würde. [11][12][69]

Die Fixierung der Sensorkabel an den Ankerelementen stellt ein noch nicht vollständig gelöstes Problem dar, da je nach verwendeten Fixierungsprodukten die Ergebnisse große Abweichungen aufweisen.

Die folgende Abbildung zeigt Zwei Anwendungen von Sensorkabeln zur Überwachung von sensiblen Strukturen in der Geotechnik. Einerseits zur Überwachung von Setzungen während eines Tunnelvortriebs über ein Bohrloch um die darüber liegenden Häuser vor schädlichen Setzungen zu schützen und andererseits zur Analyse der Betonspannungen in einem Bohrpfahl. [19]



Abb. 61: Sensorkabel (blau) zur Überwachung eines Bohrlochs z.B.: für Setzungsmessungen links und rechts
Sensorkabel an der Bewehrung eines Bohrpfahls fixiert aus [19]

Für diese externe Sensorapplikation sind Durchführungen an den Ankerköpfen erforderlich und auch der Schutz der Sensorkabel während der Manipulation auf der Baustelle kann zu Schäden führen. Bei der nachträglichen Installation der Sensoren können diese genau auf die jeweilige Situation abgestimmt werden und bieten daher eine größere Flexibilität.

Wenn an dieser Stelle die Anker im Baugrund eingebaut sind, der entsprechende Ankerkopf gefunden und nach dem Spannen fixiert wurde, steht ein noch nicht restlos geklärter Vorgang bevor. Dabei handelt es sich um die Verbindung der Glasfaser mit den Analyseinstrumenten. Als erster Schritt muss der Sensor in der Matrix gefunden und freigelegt werden ohne diesen dabei zu beschädigen, was bis dato noch kein standardisierter Vorgang ist. Im Anschluss daran kann je nach Erfordernis eine Splicebox oder auch eine Steckverbindung angebracht werden um die Daten abzufragen. Beim Einsatz von externen Sensorkabeln werden diese normalerweise auf eine bestimmte Länge mit bereits montierten Steckverbindern bestellt. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit die Verbindungen direkt am Ankerkopf herzustellen wie es bei den Sensoren die in der Matrix eingelegt sind durchgeführt wird. Hierfür sind jedoch standardisierte Werkzeuge erhältlich die das Splicen erheblich erleichtern.

Die nächste Abbildung zeigt die Analyseeinheit wobei aus dem rechten Bild sehr schnell ersichtlich wird, dass in diesem Bereich baustellenfreundlichere Geräte benötigt werden. Da Ankerkonstruktionen oft im recht unwegsamen Gelände sind sollten die Instrumente die für die Datenabfrage benötigt werden von einer Person einfach transportiert werden können. Es besteht natürlich auch die Möglichkeit über Fernabfragen mittels Datenlogger, die evtl. über ein Solarpanel betrieben werden, die Daten direkt abzurufen. Dabei soll jedoch festgehalten werden dass auch die visuelle Inspektion des Ankerkopfes und des umliegenden Geländes oft sehr wichtige Informationen liefert, welche über Fernabfragetools verborgen bleiben.

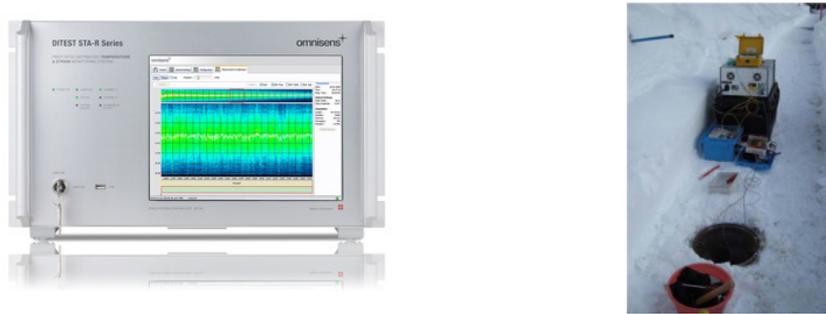


Abb. 62: Analyseeinheit eines BOTDA Systems von Omnisens rechts aus [20]) und links die noch recht unhandliche Einheit beim Baustelleneinsatz in der Schweiz aus [20]

7.3 Ankerdesign

Die soeben beschriebenen Ankerbauteile werden im Weiteren zu einer Einheit zusammengefügt um die erläuterten Vorteile nutzen zu können. Aufbauend auf den klassischen Litzenankersystemen wird sowohl für die Klebe- wie auch für die Verbundkeil-Verankerung ein Anker dargestellt und verschiedene Detailpunkte genauer beschrieben. Sämtliche Systeme müssen in Felduntersuchungen überprüft und analysiert werden um genaue Aussagen zu den vorgeschlagenen Lösungsansätzen treffen zu können.

7.3.1 Verbundkeilverankerung

Die Verbundkeilverankerung für Lamellen- und Stabquerschnitte wurde in der Geotechnik noch nie eingesetzt. Durch die Verbundkeile ist es nun möglich 100% der Zuggliedkraft in den Ankerkopf zu übertragen wodurch diese Verankerung wesentlich wirtschaftlicher eingesetzt werden kann.

Aufgrund der Ankerkraft und dem Zuggliedquerschnitt gibt es Mindestabmessungen der Keile um die Kräfte übertragen zu können. Diese Abmessungen der Keile werden auch die Anzahl der Lamellen in einem Anker und somit die Ankerkraft begrenzen. Bislang wurde diese Art der Verankerung nur für Lamellen getestet jedoch noch nie für Stabquerschnitte. Um genauere Aussagen darüber treffen zu können sind Versuche mit Verbundkeilen für Stabquerschnitte durchzuführen. Um die Kräfte aus dem Zugglied in die den Ankerkopf übertragen zu können ist die Keillänge so zu wählen dass die Spannungen möglichst ohne große Spitzen abgebaut werden. Für diesen Fall wurde in der folgenden Darstellung die Möglichkeit in Betracht gezogen den Ankerkopf ein gewisses Maß in das Bohrloch zu schieben. Dies kann bei Anwendungen mit beengten Platzverhältnissen durchaus von entscheidender Bedeutung sein. [7][58]

Die zweite dargestellte Möglichkeit ist die Ausbildung eines sogenannten 'Trompetenhalses' um die Zugglieder im Bereich des Ankerkopfes voneinander zu trennen. Dadurch wird genügend Platz gewonnen um zwei Lamellen zu verankern. Durch eine entsprechende Gestaltung des Übergangs zum verankerten Bauteil kann diese 'Trompetenhals'-Lösung auch Großteils im Bohrloch platziert werden. Dies führt zu einer platzsparenden Variante die jedoch auf dem Ersten Meter ein größeres Bohrloch erfordert.

In Bezug auf die Durchleitung der Sensoren durch den Ankerkopf für das Monitoring können die Sensoren nach der Verbundkeilverankerung offengelegt und mit den Analysemodulen verbunden werden. Dabei ist auf die in Kapitel 6 beschriebenen Vorkehrungen zu achten und die Sensorkabel dementsprechend zu schützen. Dies gilt insbesondere auch für den Zeitraum in dem die Messsysteme tatsächlich in Verwendung sind. Für eine nachträgliche Applikation von Sensoren können die Kabel durch den Steg zwischen den Verbundkeilen geführt werden. Hierfür sind Bohrungen notwendig die auf die jeweilige Situation angepasst werden können.

Für den Einsatz bei rückbaubaren Ankerkonstruktionen, wie es im innerstädtischen Bereich sehr oft der Fall ist, kommt neben der Ankerinstallation auch noch der Rückbau hinzu. Dabei kann durch die Anwendung von Faserverbundmaterialien der Ausbau der Zugglieder entfallen. Um den Ankerkopf möglichst schnell lösen zu können wurden seitlich Vier Schrauben in den Ankerkopf eingesetzt wodurch dieser in 2 Teile zerlegbar ist. Bei diesem Vorgang löst sich die Vorspannung allmählich durch das Lösen der Schrauben und die Verbundkeile können anschließend aus dem Keilträger entnommen werden. Durch diesen Vorgang wird der Ankerkopf nicht beschädigt und kann samt den Verbundkeilen wieder eingesetzt werden. In den folgenden Abbildungen sind die soeben beschriebenen Details abgebildet.

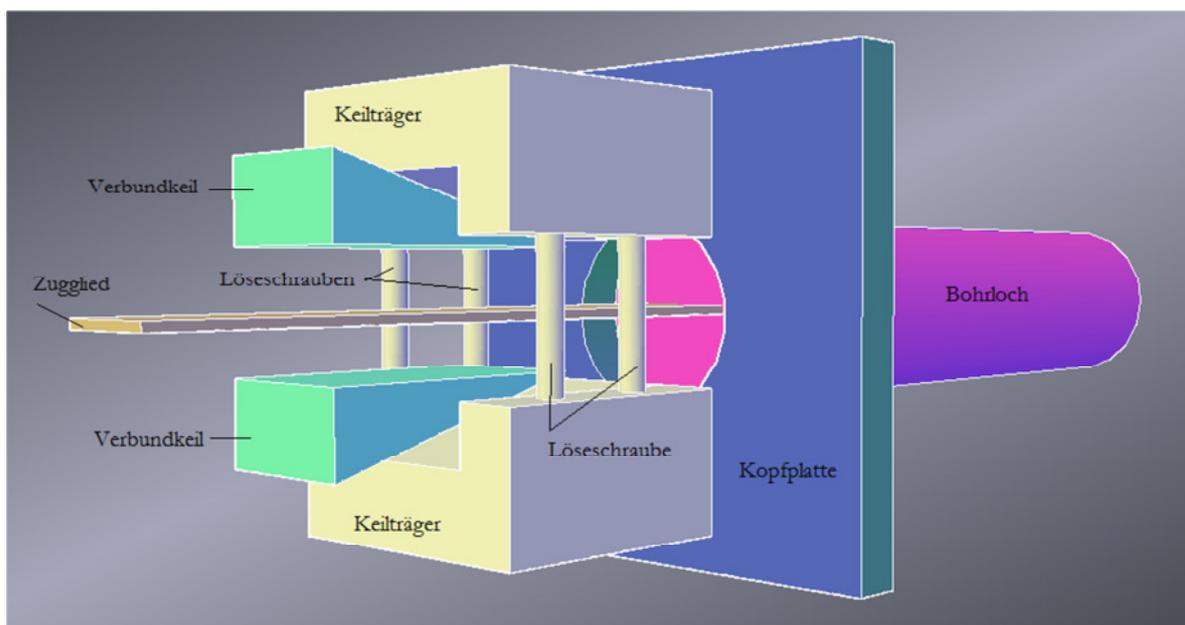
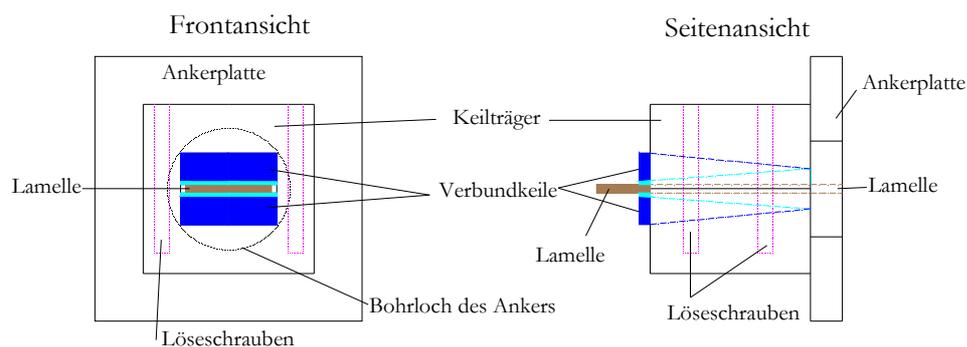
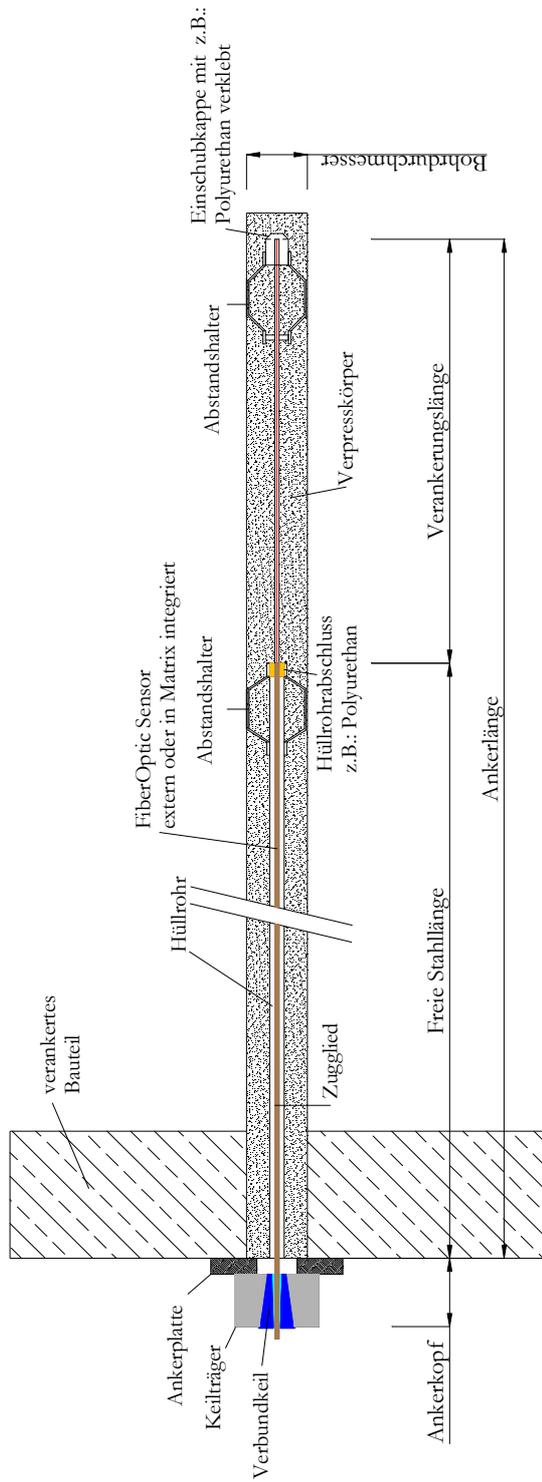


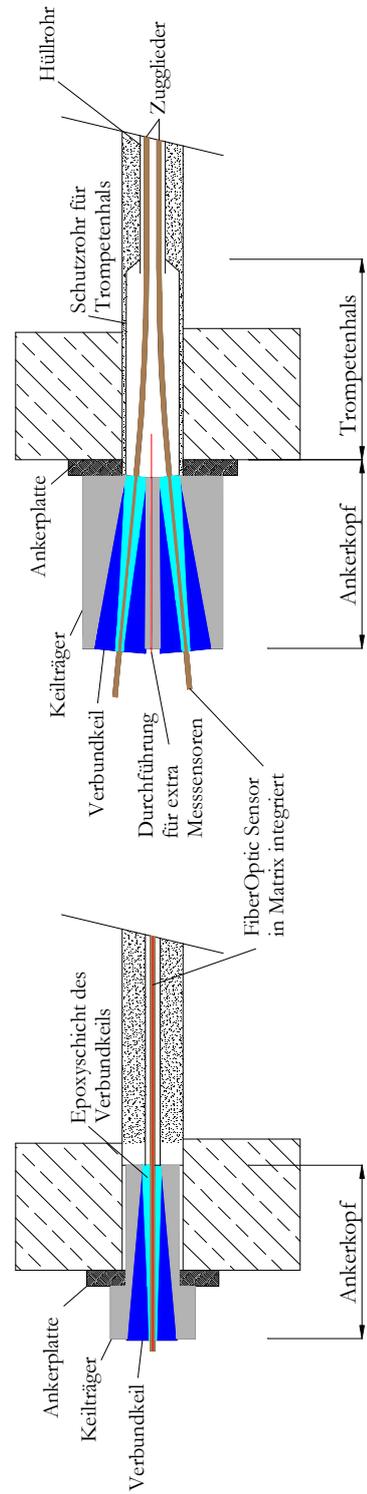
Abb. 63: Darstellung der Verbundkeilverankerung in 2d und 3d mit Lamellenquerschnitt und Loseschrauben

Verbundkeil-Verankerung für Lamellen



Ankerkopfausbildungen

Trompetenhalbs - für 2 Lamellen



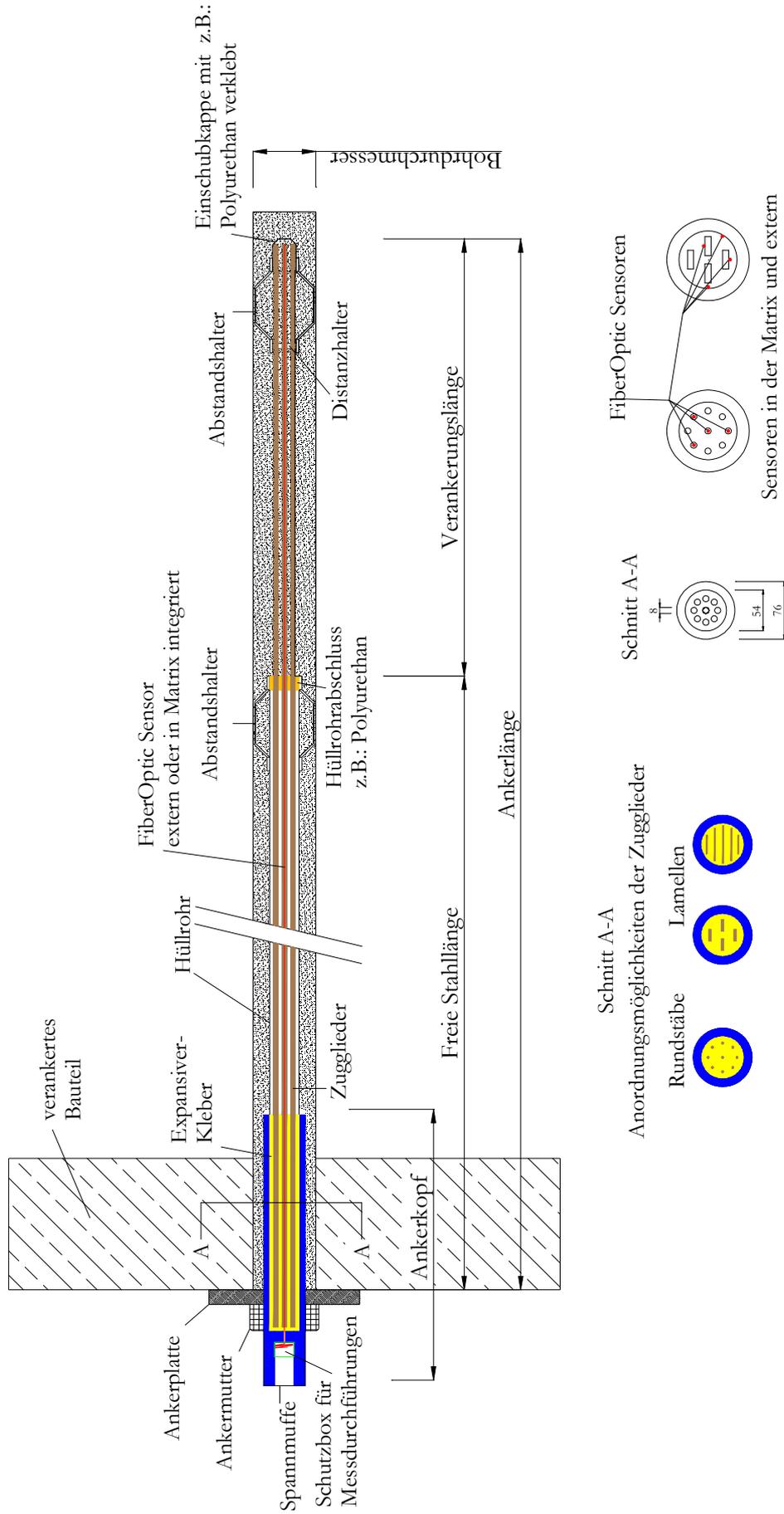
7.3.2 Klebeverankerung

Bei der Klebeverankerung wurden bereits erfolgreich durchgeführte Versuche in den folgenden Schritten und Abbildungen berücksichtigt. Im Vordergrund stand eine möglichst praxisnahe Lösung der Details zu finden.

Für den Ankerkopf wurde ein Stahlrohr mit Außengewinde gewählt um eine möglichst einfache und schnelle Verankerung durch die Anker Mutter zu erzielen. Die am Kopfteil aufgeschweißte Spannmuffe die zunächst nur für den Spannvorgang gedacht war wurde verlängert um im hinteren Teil eine Schutzbox für die Messsensoren zu integrieren. Dadurch wird gewährleistet, dass bereits bei der Ankerkopfmontage im Werk die Sensoren entsprechend durch den Ankerkopf durchgeführt werden. Nach dem Spannen kann dieser Schutz entfernt und die Sensoren mit den Messeinheiten verbunden werden. Sollten Messergebnisse bereits während des Spannvorganges gewünscht werden, kann dies durch die Verwendung eines Hohlgewindestabes erreicht werden. Dabei werden die Sensorkabel durch den Hohlgewindestab der die Spannkraft von der Presse auf den Ankerkopf überträgt durchgezogen. Durch diese Art der Durchführung sind keinerlei Erschwernisse bei der Ankerinstallation oder beim Spannen für das Personal gegeben. Dieses System kann sowohl für Sensoren die in der Matrix eingebettet oder auf andere Art am Anker appliziert wurden zur Anwendung kommen.

Bei den verschiedenen Anordnungsmöglichkeiten der Zugglieder im Anker wurde die Austeilung der Rundstäbe bereits erfolgreich getestet wobei für Lamellenquerschnitte bislang keine Versuche durchgeführt wurden. Das Hüllrohr ist für die freie Beweglichkeit der CFK-Zugglieder im Bereich der freien Stahllänge zuständig und muss gegen das Eindringen von Zementsuspension beim Verpressvorgang z.B.: mit Polyurethan verschlossen werden. An dieser Stelle soll festgehalten werden dass die Abstandshalter nur schematisch eingezeichnet wurden und diese je nach Ankerlänge und Ankerquerschnitt in Anzahl und Durchmesser darauf abzustimmen sind. Für eine Erleichterung beim Einführen des Ankers in das Bohrloch soll die am Ankerende angebrachte Einschubkappe sorgen.

Klebeverankerung für Rundstäbe und Lamellen



Die nächste Abbildung zeigt den Spannvorgang für den Anker mit geklebtem Ankerkopf wobei dieser in abgewandelter Form auch bei klassischen Ankersystemen eingesetzt werden kann.

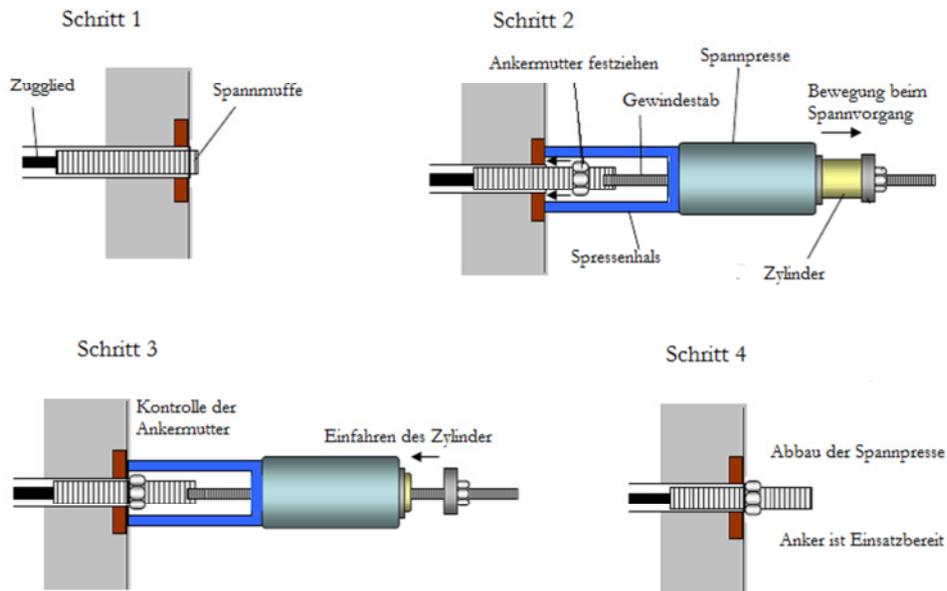


Abb. 64: Abbildung des Spannvorgangs bei einer Klebeverankerung unabhängig von den verwendeten Zuggliedern oder dem Monitoring nach [39]

7.3.3 Einsatzmöglichkeiten

Die Bereiche in denen die Faserverbundanker zum Einsatz kommen können orientieren sich stark an den klassischen Anwendungen von Stahl- Litzanker. Durch die Eigenschaften der Materialien, wie z.B.: die hohe Beständigkeit gegenüber chemischen Einwirkungen führt dies zu weiteren Einsatzbereichen bzw. zu erheblichen Erleichterungen in der Produktion und Installation dieser Anker. Hierzu zählen der aufwendige Korrosionsschutz für Daueranker oder die Erleichterungen beim Einbau durch die enorme Einsparung an Gewicht durch die CFK-Zugglieder.

7.3.3.1 Hangsicherungen

Bei Hangsicherungen und Sanierungen von Rutschhängen haben CFK-Anker mit integriertem Monitoringsystem entscheidende Vorteile gegenüber den klassischen Ankersystemen. Wenn man von Hangsicherungen und Rutschhängen spricht sind die Stützbauwerke die für das Einhalten der normativ geregelten Sicherheitsfaktoren erforderlich wären oft technisch und wirtschaftlich nicht vertretbar bzw. umsetzbar. Daher ist bei solchen Projekten eine auf die örtlichen Gegebenheiten abgestimmte möglichst flexible Stützstruktur erforderlich. Durch Überwachungssysteme kann somit auf eventuelle Änderungen reagiert werden. Diese semi-empirischen Bemessungsweise baut auf den Ergebnissen der ständigen Überwachung dieser Konstruktionen und Hangbewegungen auf. Hierfür sind neben hydrologischen und geodätischen Messungen auch die klassischen geotechnischen Verfahren der Ankerkraft-, Inclinometer- und Extensometermessung im Einsatz.

Wie bereits beschrieben können die faseroptischen Sensoren auch für die Überwachung von Rutschhängen zur Lokalisierung von Gleitflächen herangezogen werden. Hierfür können die Sensoren in Inklinometer- und Extensometerbohrungen installiert werden oder wie zuvor erwähnt auch zur Überwachung der Ankerkraft herangezogen werden.

Diese Sicherungsarbeiten finden oft in sehr schwer zugänglichem Gebiet statt, sodass die Vorteile von CFK-Produkten, wie z.B.: geringes Gewicht bei gleichzeitig hohen Zugkräften hier stark zu tragen kommen. Auch die Dauerhaftigkeit bei solchen Anwendungen spielt eine große Rolle da solch aufwendige Sicherungsmaßnahmen meist mit hochrangigen Verkehrsflächen in Zusammenhang stehen und somit eine langfristige Planung erforderlich ist.

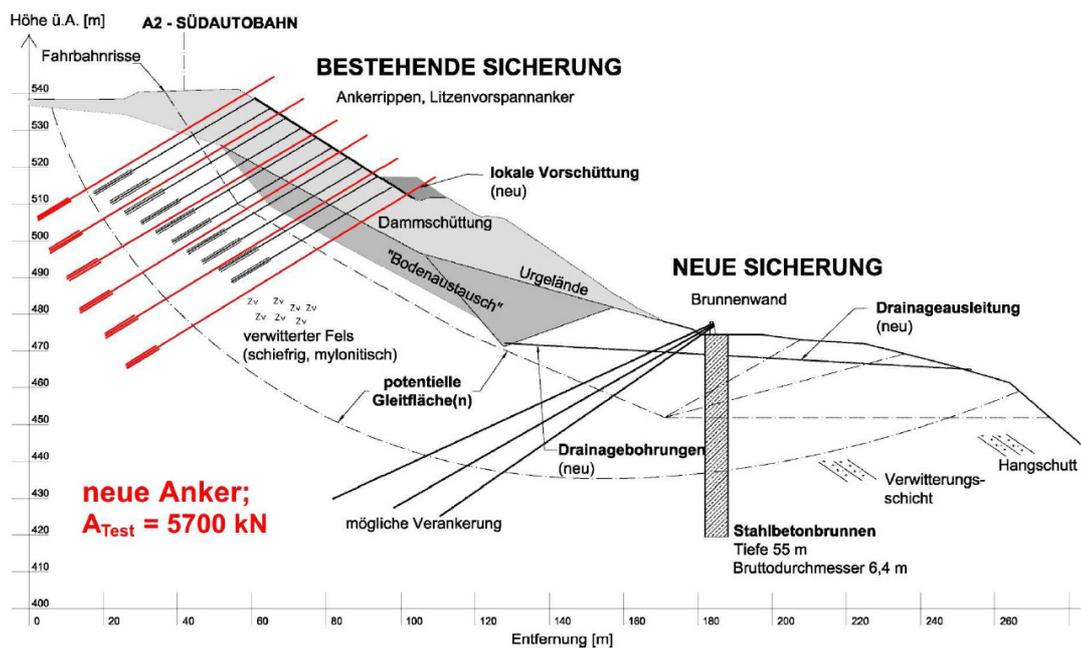


Abb. 65: Stabilisierungsmaßnahmen eines Rutschhanges an der A2- Südautobahn nach der semiempirischen Bauweise, da eine völlige Beruhigung des Hangs wirtschaftlich und technisch nicht realisierbar ist; Im Vorfeld und mittlerweile immer noch werden Inklinometermessungen und geodätische Vermessungen parallel durchgeführt um potenzielle Gleitflächen und die Hangbewegungen zu dokumentieren aus [1]

7.3.3.2 Auftriebssicherungen

Bei der Anwendung von CFK- Anker als Auftriebssicherung hat die Ausbildung des Kopfdetails wiederum große Bedeutung. Bislang werden hierfür meist Gewindestäbe verwendet bei welchen über eine Kontermutter mit Kopfplatte die Kräfte in das Bauteil übertragen werden. Dies stellt eine sehr einfache Art der Kräfteinleitung mit geringer Bauhöhe dar. Dies kann je nach Ankerkopf auch mit annähernd geringer Baulänge bei Faserverbundwerkstoffen erzielt werden, da hier die großen Betondeckungen für den Korrosionsschutz entfallen. Die Baulänge ist hier die Länge von Oberkannte Anker Mutter bis Unterkannte der Kontermutter, sprich Anker Mutter + Ankerplatte + Kontermutter. Auftriebssicherungen werden oft bei Tankanlagen verwendet um ein Aufschwimmen der Behälter im Leeren Zustand zu vermeiden. Dieser Lastfall tritt jedoch nur sehr selten auf sodass es infolge einer beschädigten Auftriebssicherung, z.B.: durch chemische Belastungen im Baugrund zu einer

Schiefstellung der Tankanlage beim Entleervorgang kommen kann. Hebeinjektionen verbunden mit einer neuen Auftriebssicherung stellen hier oft die einzige Möglichkeit dar diese Anlage wieder in Betrieb nehmen zu können wodurch erhebliche Sanierungskosten entstehen.



Abb. 66: Links: Kopfdetail eines Gewindestabs für Auftriebssicherungen aus [40] und rechts Auftriebssicherung mit Gewindestäben für die Fundierung aus [42]

7.3.3.3 Korrosionsschutz – chemische Belastungen

Dem Korrosionsschutz kommt eine immer größer werdende Bedeutung zu, da man bislang glaubte diesen durch die getroffenen Maßnahmen sehr gut im Griff zu haben jedoch häufen sich in den vergangenen Jahren die Schadens- bzw. Sanierungsfälle verursacht durch Korrosion. Oft sind diese Sanierungsarbeiten sehr schwierig durchzuführen da aus Planungs- und Platzgründen keine Neuen oder zusätzlichen Anker installiert werden können. Die Möglichkeit der Überwachung der Zugglieder aus CFK in Bezug auf den chemischen Angriff und somit auch auf Korrosion durch die faseroptische Messmethode ist ein enormer Vorteil gegenüber den Stahlprodukten. Stahlelemente können zwar theoretisch durch Potentialmessungen oder durch reflektometrische Impulsmessungen auf Korrosion untersucht werden, jedoch haben sich diese Verfahren in der Ankertechnik nie durchgesetzt und kommen nur sehr selten zur Anwendung.

Immer wieder sind Baugrundverhältnisse anzutreffen bei denen aufgrund von Altlasten, Nutzungsgegebenheiten oder natürlich bedingten Vorgängen erhebliche chemische Belastungen auf die Anker einwirken. Hier ist auf die Vielfalt an Möglichkeiten der Zusammensetzung der Polymer-Matrix zu verweisen, wodurch sehr gute Widerstandseigenschaften gegenüber diesen Einwirkungen erzielt werden können.



Abb. 67: Korrosion an einer Stahllitze nach 3 Jahren in stark alkalischem Baugrund, Anker musste komplett erneuert werden aus [39]

7.3.3.4 Wiedergewinnbare Anker

Aufgrund der beengten Platzverhältnisse im innerstädtischen Bereich ist es oft unvermeidbar Baugrubensicherungen auf benachbarten Grundstücken zu verankern. Hierfür gibt es je nach Stadt verschiedene Möglichkeiten der Verankerung jedoch müssen alle nach den Bautätigkeiten wieder rückgebaut werden. Ausnahmeregelungen für Ankerelemente die im Baugrund verbleiben dürfen sind GFK- und CFK-Produkte da diese als zerspanbar gelten und nachträgliche Bauarbeiten auf dem Nachbargrundstück nicht negativ beeinflussen. Wiederausbaubare Stahllitzenanker sind grundsätzlich auch erlaubt.

Im Anhang ist das Merkblatt des Magistrat 48 aus Wien zu finden in dem die Baugrubensicherungen geregelt sind. Daraus ist zu entnehmen dass für jeden Meter Stahllitze bzw. Anker in Abhängigkeit der Lage der Anker zur Geländeoberfläche sogenannte Abstandszahlungen in einer Höhe von bis zu € 100/m Anker zu leisten sind wenn der Rückbau der Baugrubensicherung nicht möglich ist. Aufgrund der Zerspanbarkeit von CFK-Ankern können diese im Baugrund verbleiben und führen zu keinerlei zusätzlichen Kosten.

Da von den Firmen diese Abstandszahlungen naturgemäß nicht eingeplant werden, es jedoch öfters vorkommt dass Anker nicht wieder ausgebaut werden können, kann dies bei Baustellen mit mehreren Tausend Meter Anker zu erheblichen wirtschaftliche Verlusten bei Baugrubensicherungsarbeiten führen.

7.3.3.5 Gewichtersparnis - Manipulation der Ankerprodukte

Das Gewicht von Ankerprodukten hat einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtkosten der Anker. Besondere Auswirkungen hat das Gewicht wenn zusätzliches Personal und extra Hebegeräte zum Einbau auf der Baustelle erforderlich sind. Dies kann durch örtliche Gegebenheiten wie Steilheit, Unzugänglichkeiten im Alpinen Gelände oder auch durch beengte Platzverhältnisse der Fall sein.

Vergleich der Materialkennwerte		
Material	Dichte [g/cm ³]	Faktor zu Carbon
Carbon	1,8	1,0
Aramid	1,45	0,8
Glasfaser	2,55	1,4
Stahl	7,85	4,4

Tab. 15: Vergleich der Dichte der Materialien

Aus diesem Vergleich ist ersichtlich dass Stahl das 4,4 fache Gewicht und Glasfasern ein um 40% höheres Gewicht als Karbon aufweisen. Durch den Einsatz von CFK-Zuggliedern kann das Gesamtgewicht der Anker wesentlich reduziert werden. In der nächsten Tabelle sind die Werte in Abhängigkeit der Zugfestigkeit und der Querschnittsabmessungen angegeben wodurch sich dieser Unterschied noch deutlicher abzeichnet.

Vergleich der Materialkennwerte				
Material	kg/kN/lfm		Faktor zu Carbon	
	Min	Max	Min	Max
Carbon Lamellen/Runstäbe	0,000500	0,000969	1	1
GFK Rundstäbe	0,001428	0,007500	2,9	7,7
Stahlritze	0,006120	0,006120	12,2	6,3
Gewi	0,014200	0,019900	28,4	20,5
WGL	0,006620	0,006620	13,2	6,8
IBO	0,014300	0,018890	28,6	19,5

Tab. 16: Vergleich des Materialgewichts bezogen auf die Zugfestigkeit und die Querschnittsabmessungen

Diese enorme Einsparung an Gewicht hat nicht nur Auswirkung auf sämtliche Kosten die mit der Manipulation zusammenhängen sondern verändert auch die Belastung der Arbeit während des Ankereinbaus für die Arbeiter entsprechend. Je nach örtlichen Gegebenheiten kann auch die Herstellung an Ankern und somit die Produktivität auf der Baustelle gesteigert werden wenn diese durch die Manipulation der Materialien stark beeinflusst ist.

Anhand des Ankers als Gesamtelement wird in der nächsten Tabelle das Potenzial aufgezeigt Gewicht bei Ankerkonstruktionen einzusparen. Der hier herangezogene CFK-Anker besteht aus 9 \varnothing 7,9mm CFK-Rundstäben mit einer garantierten Bruchkraft von 906 kN. Dieser Anker repräsentiert einen Testanker zur Prüfung der zuvor beschriebenen Klebeverankerung von Benmokrane der mit 60% der Bruchlast, 453 kN, verankert wurde. Alle Ankertypen entsprechen somit der gleichen Designlast und können anhand der folgenden Daten miteinander verglichen werden.

Vergleich der Ankergewichte					
Ankertyp: 15m - 450 kN [10m (frei) +5m (fix)]	Gewicht			Prozent-	
	Litzen	Kopf	Kleinmaterial	Gesamt	Mehrgewicht
Wiedergewinnbare Anker*	70,3	18	13,7	102	138
Bauzeitanker**	54	23	5	82	92
Daueranker**	54	25	17	96	124
CFK-Anker	9,8	25	8	42,8	-

* WGL-Anker: 0,52": 0,781 kg/m

** Bauzeit- und Daueranker: 0,62": 1,17 kg/m

Tab. 17: Vergleich der Gewichte der Gesamtankerelemente unterschieden nach Ankertyp

Bei den wiedergewinnbaren Ankern wurde das System der Firma Keller Grundbau GmbH gewählt welches bereits in Kapitel 3 beschrieben wurde. Durch die Umlenksattel im Verpresskörper und den daraus resultierenden Schlaufen der Stahlritzen ist das höhere Litzengewicht bei WGL-Anker zu erklären. Die CFK-Zugglieder sind 5,5 Mal leichter als vergleichbare Stahlritzen bei Bauzeit- oder Dauerankern. Der Kopf hat eine relativ neutrale Stellung ohne große Schwankungen wobei die Unterschiede im Kleinmaterial vor allem auf den einfachen- (Bauzeitanker) bzw. doppelten- (Daueranker) Korrosionsschutz zurückzuführen ist. Bei den WGL-Ankern wiederum schlagen an dieser Stelle die Umlenksattel zu Buche. Diese Analyse hat gezeigt, dass durch CFK-Anker ein Einsparungspotenzial von Durchschnittlich 100% gegeben ist.

7.3.3.6 Überwachungssystem für geotechnische Strukturen

Für die Überwachung von geotechnischen Strukturen werden oft Extensometer und Inklinometer verwendet. Der Extensometer wird wie der Inklinometer zu Verformungsmessungen herangezogen. Deren Unterschied besteht darin dass der Inklinometer Verformungen quer zur Bohrlachse und der Extensometer diese in Bohrlachslängsrichtung aufzeichnet.

Inklinometer zeichnen Neigungsänderungen entlang des Bohrloches auf um mit Hilfe der Erdbeschleunigung auf die Verformungen quer zur Bohrachse schließen zu können. Bei der Anwendung als Inklinometer gibt es noch keine vergleichbaren faseroptischen Systeme, da hier vor allem die Installation, durch das Zusammenstecken der Messrohre, erhebliche Schwierigkeiten bereitet. Auch die exakte Bestimmung der Orientierung in x- und y-Richtung der ausgelesenen Daten stellt ein noch ungelöstes Problem dar.

Das Prinzip des Extensometers besteht darin die Relativverschiebung zwischen zwei Fixpunkten zu ermitteln. Diese werden durch den sogenannten Anker und den Messkopf gebildet wodurch der Zusammenhang mit den zuvor beschriebenen Faserverbundwerkstoff-Ankern gegeben ist. Die nächste Abbildung zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Extensometers um die Parallelitäten zu den CFK- Ankern aufzuzeigen.

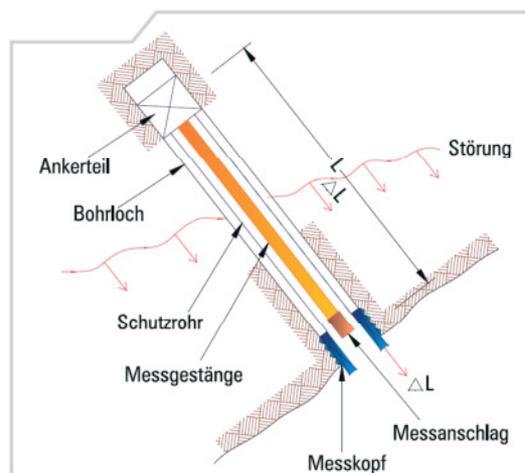


Abb. 68: Schematischer Aufbau eines Extensometers aus [42]

Großes Potenzial liegt sicherlich auch darin, dass bereits hergestellt jedoch aus verschiedensten Gründen nicht mehr funktionierende Messstellen durch faseroptische Sensoren wieder reaktiviert werden können. Besonders bei Inklinometermessungen kann es durch große Verformungen dazu führen, dass die Inklinometersonde stecken bleibt und nicht mehr bis zum Bohrlochtieftsten abgelassen werden kann. In diesem Fall kann die Messstelle ohne dafür eine Neue Bohrung abteufen zu müssen durch das Einführen eines faseroptischen Sensorkabels wieder verwendet werden. Da die Außen Durchmesser dieser Kabel nur wenige mm betragen, können diese sehr schnell mit Hilfe einer Lotspitze in das Bohrloch abgelassen werden. Somit können erhebliche Kosten für die Bohrung und deren Ausbau zu einer Messstelle eingespart werden. Um einen kraftschlüssigen Verbund im Bohrloch

zu gewährleisten ist nach dem Einführen des Sensorkabels das Bohrloch durch eine Zement-Bentonit-Suspension aufzufüllen.

Die folgende Abbildung zeigt eine Inklinometermessstelle die durch faseroptische Sensoren wieder in Betrieb genommen werden konnte.



Abb. 69: Widerinstandsetzung einer Inklinometermessstelle durch faseroptische Sensoren; links: die Installation der Sensoren und rechts: Verfüllung mit Zement-Bentonit-Suspension aus [20]

Aufgrund der Lage dieser Messstelle konnten die Ergebnisse mit den zuvor erhobenen Daten abgeglichen werden und zeigten eine sehr gute Übereinstimmung. Eine in der Nähe liegende Kernbohrung wurde ebenfalls auf Gleitflächen untersucht und die Ergebnisse in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. [20]

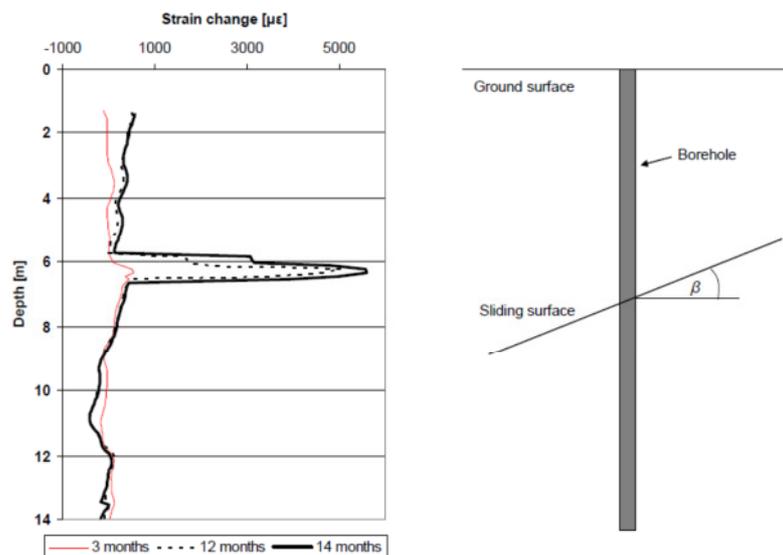


Abb. 70: Messergebnis aus dem reaktivierten Inklinometerbohrloch mit Dehnungen von über 5000 $\mu\epsilon$ im Bereich von 5,8 bis 6,8m rechts und auf der linken Seite ist die Analyse der Kernbohrung zu sehen aus [20]

Bei Installation der CFK-Elemente mit integrierten Fiber-Optic-Sensoren können diese direkt zur Überwachung der Ankerkraft und den auftretenden Dehnungen herangezogen werden. Zusätzliche Applikationen von Sensoren die Aussagen über die Alkalität bzw. Temperatur liefern sind ebenfalls möglich. Bislang wurde die Überwachung der Ankerkraft mit Kraftmessdosen sichergestellt. In Abbildung 71 ist der schematische Aufbau eines Ankerkopfes mit einer Kraftmessdose abgebildet. [61]

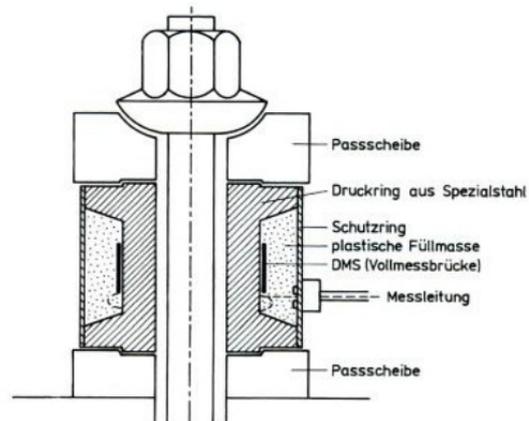


Abb. 71: Schematischer Aufbau des Ankerkopfes eines Einstabankers mit Kraftmessdose zur Überwachung der Ankerkraft aus [60]

Die größte Entwicklungsarbeit wird darin liegen möglichst handliche und unempfindliche Messmodule zu entwickeln um den breiten Einsatz dieser fortschrittlichen Technologie zu ermöglichen. Die Interpretation der Ergebnisse aus faseroptischen Messungen muss von erfahrenen Geotechnikern durchgeführt werden um die Vielzahl an Einflussfaktoren entsprechend bewerten und berücksichtigen zu können.

8 Wirtschaftlichkeit der Ankerprodukte

8.1 Allgemein

In diesem Abschnitt wird auf die im Zuge dieser Arbeit erhobenen Marktpreise eingegangen und abschließend das Verhältnis zu Stahlprodukten dargestellt. Diese Marktpreise beziehen sich rein auf das Material und nicht auf gesamte Ankersysteme. Es werden zum Beispiel Spannlitzen mit CFK-Lamellen oder Einstabanker aus Baustahl mit GFK- Rohrquerschnitten verglichen.

Für den Einsatz als Anker in der Geotechnik empfehlen sich sowohl Glasfaser- wie auch Karbonfaser-Elemente weshalb im Weiteren dies Produkte im Fokus der Betrachtung stehen.

In die Preisanalyse gehen neben Lamellen- und Stabquerschnitten auch Rohre mit ein. Bei den CFK-Elementen wurden auch am Markt erhältliche Litzen in der Analyse berücksichtigt. Abschließend werden mögliche Einsparungspotenziale der Faserverbundanker am Beispiel des in Kapitel 7 entwickelten CFK-Ankers gegenüber klassischen Litzenankern aufgezeigt.

8.2 Glasfaserprodukte

8.2.1 Eigenschaften

In der folgenden Tabelle sind die Materialeigenschaften der verschiedenen Produkte aufgelistet. Bei der Auswahl der Produkte wurde darauf geachtet dass diese einen Mindestgehalt an Fasern von 60% haben. Der Geltungsbereich dieser Kennwerte wird von den Herstellern in einem Temperaturbereich von -20°C bis +60°C gewährleistet.

Materialkennwerte von GFK- Produkten						
Hersteller	Bezeichnung	Typ	Abmessungen [mm]	Gewicht [kg/m]	E-Modul [Gpa]	Bruchlast* [KN]
FIBERLINE	Flachprofil	Rechteck	100x10	1,8	17	240
FIBERLINE	Flachprofil	Rechteck	100x6	1,08	17	144
FIBERLINE	Flachprofil	Rechteck	50x6	0,54	17	72
FiReP	Cablex	Vollstab	D6x6	0,3	40	210
FiReP	Cablex	Vollstab	D6x12	0,6	40	420
FiReP	Cablex	Vollstab	D6x20	1	40	700
FiReP	Injectionbolt	Hohlstab	D28/(12)	0,92	50	350
FiReP	Injectionbolt	Hohlstab	D25/(12)	0,63	50	230
FiReP	Rockbolt	Vollstab	D32	1,5	50	560
FiReP	Rockbolt	Vollstab	D27	1,04	50	400
FiReP	Rockbolt	Vollstab	D25	0,9	50	350
FiReP	Rockbolt	Vollstab	D38	2,1	50	750
FiReP	Rockbolt	Vollstab	D22	0,69	50	250
FiReP	Rockbolt	Vollstab	D20	0,56	50	200
FiReP	Spinmax	Hohlstab	R32-L	0,95	45	365

* Angaben der Hersteller

Tab. 18: Materialkennwerte von GFK-Produkten lt. Herstellerangaben

Für die Produkte der Firma Firep soll an dieser Stelle festgehalten werden, dass sich die Bruchlast auf das Einzel- Element bezieht und nicht die Bruchlast der Anker widerspiegelt. Die Bruchlast dieser GFK- Anker ist im Allgemeinen durch die Bruchlast des Anker-Kopfs charakterisiert, die bei 30 – 65% des Einzel-Elements liegt.

8.2.2 Preisvergleich

Die Basis der hier angegebenen Preise liegt bei einer Bestellmenge von 500 lfm ohne spezielle Behandlung der Oberfläche. Dieser Wert entspricht der Länge an Spannlitzen die im Mittel auf Baustellen eingesetzt werden. Nachlässe bei größeren Bestellmengen ab 2.000 lfm liegen je nach Hersteller zwischen 20% und 30%. In der folgenden Abbildung sind die Preise nach Produkttypen und €/lfm GFK-Element dargestellt.

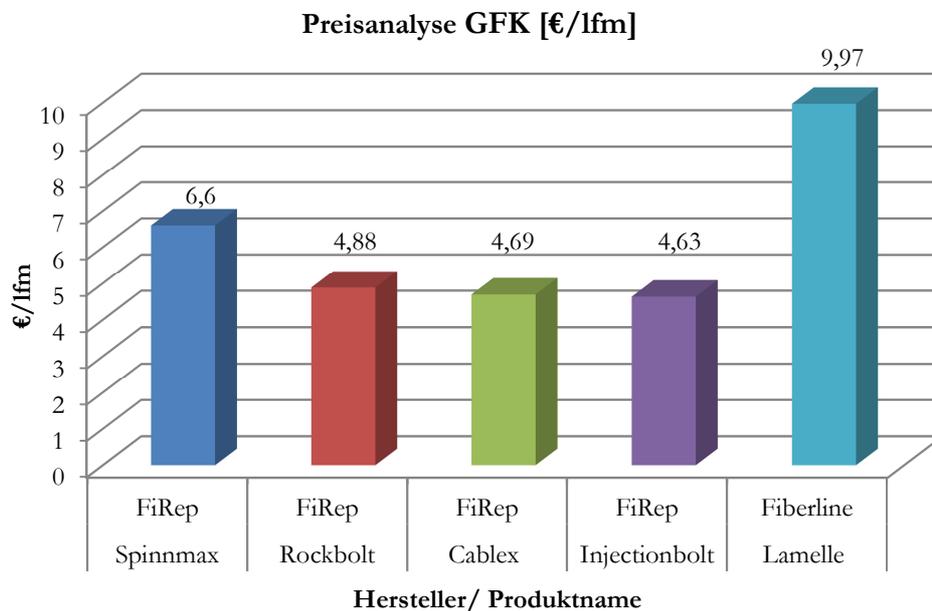


Abb. 72: GFK- Preisanalyse für je 500 lfm: Preise/lfm nach Hersteller und Produkten getrennt

Die hier beschriebenen Produkte der Firma Firep sind speziell für geotechnische Anwendungen entwickelt worden. Spinnmax stellt dabei einen Selbstbohr-Injektionsanker dar, Rockbolt ist ein klassischer Verpressanker, Cablex ist ein aus 12 oder 20 6mm Durchmesser bestehender Anker und die Injectionbolts sind Selbstbohr-Injektionsbohranker für besonders hohe Drücke bis zu 2400 bar. Die Lamellen von Fiberline sind Rechteckquerschnitte die üblicherweise für Konstruktionen in der Windenergie oder im Brückenbau verwendet werden.

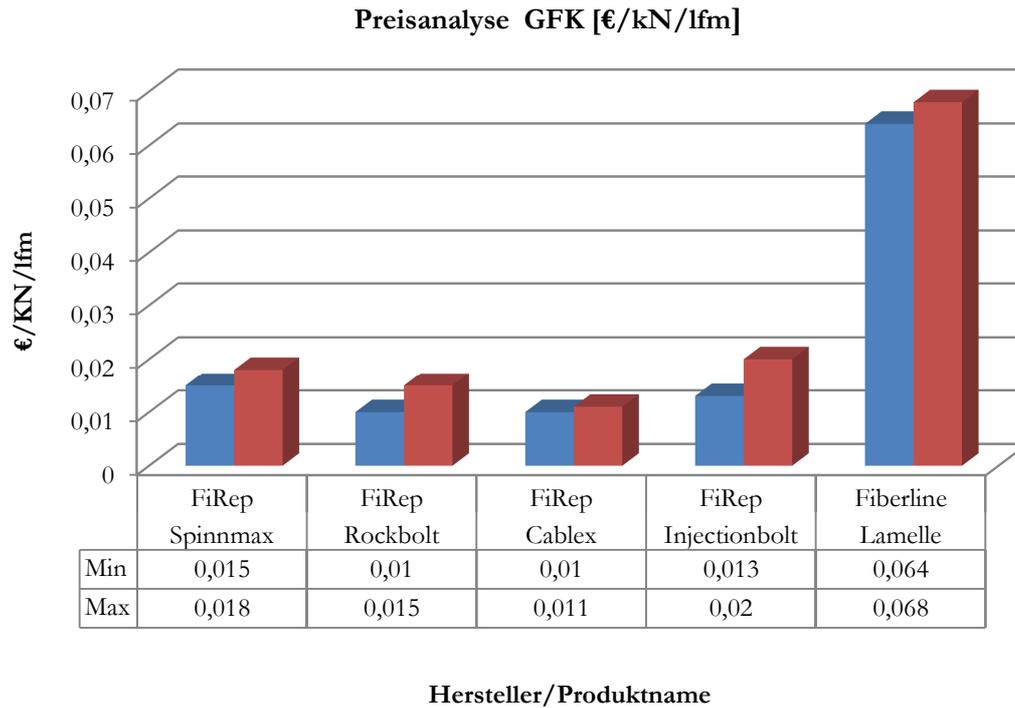


Abb. 73: Preisanalyse GFK: Preise in Abhängigkeit der Zugfestigkeit bei Faserparalleler Beanspruchung

Diese Preisanalyse zeigt sehr gut, dass die bereits etablierten Produkte wesentlich wirtschaftlicher einsetzbar sind. Die Einsetzbarkeit von Lamellenquerschnitten auf glasfaserverstärkten Kunststoffen wird in dieser Arbeit nicht weiter untersucht, da GFK- Stabprodukte wesentliche Vorteile bieten.

8.3 Kohlenstofffaserprodukte

8.3.1 Eigenschaften

In der folgenden Tabelle ist ein Auszug aus der Produktpalette der CFK-Hersteller die im Rahmen dieser Arbeit bereit waren Ihre Produkte anzubieten. Kohlenstoffverstärkte Kunststoffe werden üblicherweise nicht als Stangenware, wie es bei Glasfaserprodukten der Fall ist, transportiert, sondern in Form von Rollen mit 500m Länge. Wie aus der Tabelle zu entnehmen ist wird im Wesentlichen zwischen Zwei E-Module, 160/165 und 210 GPa unterschieden. Sämtliche Produkte weisen einen lt. Hersteller garantierten Faseranteil von > 68% auf und sind bis 150°C temperaturbeständig. Diese Beständigkeit bezieht sich jedoch auf das Produkt an sich und nicht auf die Verarbeitungstemperaturen. Aufgrund der Anwendung dieser Produkte als nachträgliche applizierte Bauteilverstärkung im Betonbau wurden die Angaben zur Verarbeitungstemperatur nicht angeführt, da diese von den verwendeten Klebstoffen abhängig sind.

Die tatsächlichen Eigenschaften in der Handhabung dieser Produkte werden in einem Feldversuch, der gezielt auf die Wintermonate fallen wird, untersucht. Dabei ist vor allem der Umgang mit den CFK-Lamellen bzw. Stäben bei Temperaturen um den Gefrierpunkt von Interesse. Die Auswertung dieser Versuche werden in weiterer Folge in Form von eigenen Arbeiten publiziert werden.

Materialkennwerte von CFK- Produkten						
Hersteller	Bezeichnung	Typ	Abmessungen [mm]	Gewicht [kg/m]	E-Modul [GPa]	Bruchlast* [kN]
SIKA	CFK Carbo Dur	Rechteck	100x1,4	0,22	165	434,0
SIKA	CFK Carbo Dur	Rechteck	60x1,4	0,13	165	260,4
SIKA	CFK Carbo Dur	Rechteck	20x2,5	0,08	165	155,0
SIKA	CFK Carbo Dur	Rechteck	60x1,4	0,13	210	268,8
SIKA	CFK Carbo Dur	Rechteck	100x1,4	0,22	210	448,0
SGL	CFK Sigrafil	Rechteck	50x1,4	0,11	160	164,5
SGL	CFK Sigrafil	Rechteck	80x1,4	0,18	160	263,2
SGL	CFK Sigrafil	Rechteck	20x2,0	0,06	160	94,0
SGL	CFK Sigrafil	Vollstab	D6	0,05	160	66,3
SGL	CFK Sigrafil	Vollstab	D8	0,08	160	117,7
S&P	CFK-Lamellen	Rechteck	120x1,4	0,27	165	277,2
S&P	CFK-Lamellen	Rechteck	100x1,4	0,22	165	231,0
S&P	CFK-Lamellen	Rechteck	90x1,4	0,20	165	207,9
S&P	CFK-Lamellen	Rechteck	80x1,4	0,18	165	184,8
S&P	CFK-Lamellen	Rechteck	50x1,4	0,11	165	115,5
S&P	CFK-Lamellen	Rechteck	60x1,4	0,13	165	138,6
S&P	CFK-Lamellen	Rechteck	100x1,4	0,22	210	287,0
S&P	CFK-Lamellen	Rechteck	120x1,4	0,27	210	344,4
S&P	CFK-Lamellen	Rechteck	90x1,4	0,20	210	258,3
S&P	CFK-Lamellen	Rechteck	80x1,4	0,18	210	229,6
S&P	CFK-Lamellen	Rechteck	60x1,4	0,13	210	172,2
S&P	CFK-Lamellen	Rechteck	20x1,4	0,04	165	46,2
S&P	CFK-Lamellen	Rechteck	50x1,4	0,11	210	143,5
S&P	CFK-Lamellen	Rechteck	20x1,4	0,04	210	57,4
Schütze Stäbe	CFK-Stäbe	Vollstab	D6	0,05	190	58,0
Tokyo Rope	CFK-Litze	7xVollstab	D12,5	0,15	160	184

* Angaben der Hersteller

Tab. 19: Materialkennwerte von CFK-Produkten lt. Herstellerangaben

8.3.2 Preisvergleich

Die hier angegebenen Preise basieren wie bei den GFK-Produkten auf einer Bestellmenge von 500 lfm. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass bei CFK-Produkten keine Anker als fertig einsetzbares System in die Preisanalyse eingeflossen sind. Dies liegt darin begründet dass diese Anwendung noch nicht am Markt etabliert ist und somit nicht als komplette Einheit erhältlich ist. Sämtliche Produkte sind Standardprodukte die durch ihre Eigenschaften für den Einsatz als Zugglied bei Anker in der Geotechnik geeignet sind.

Bei den nachfolgenden Firmen handelt es sich einerseits um Firmen (Sika, S&P) die CFK-Produkte vertreiben jedoch nicht selbst herstellen und andererseits um Hersteller von CFK-Produkten (SGL, Schütze, Tokyo Rope).

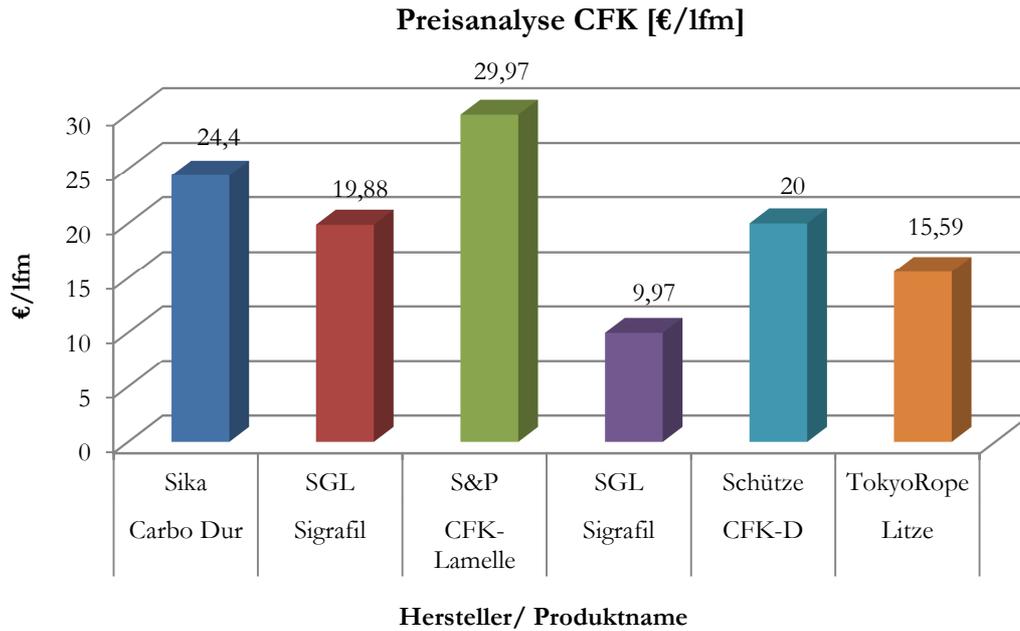


Abb. 74: CFK- Preisanalyse für je 500 lfm: Preise/lfm nach Hersteller und Produkten getrennt

In Tabelle 19 sind sämtliche Produkte mit Materialeigenschaften die in diese Analyse eingegangen sind aufgelistet. Die Preise sind als Mittelwerte aller in die Analyse eingehender Produkte zu verstehen.

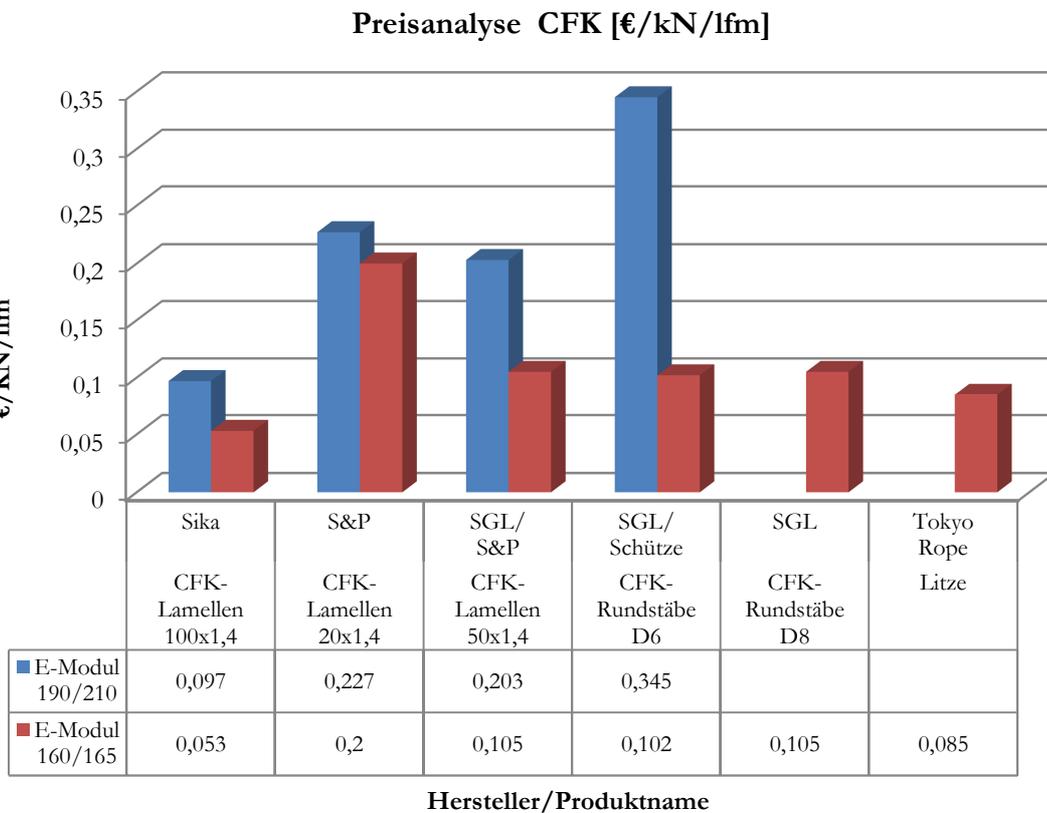


Abb. 75: Preisanalyse CFK: Preise in Abhängigkeit der Zugfestigkeit bei Faserparalleler Beanspruchung

8.4 Stahlprodukte

Stahl ist das mit Abstand meist eingesetzte Material im Zusammenhang mit Zuggliedern bei Anker in der Geotechnik. Dies ist vor allem auf die große Erfahrung im Umgang mit diesem Material sowie auf die vergleichsweise geringen Kosten von Stahlprodukten zurückzuführen.

8.4.1 Eigenschaften

Bei den hier angeführten Produkten handelt es sich um Ausführungen die für die Anwendung als Anker entwickelt wurden und den derzeitigen Stand der Technik auf diesem Segment des Spezialtiefbaus darstellen. Es wurden sowohl Litzen- wie auch Einstabanker in die Analyse mit einbezogen.

Materialkennwerte von Stahl- Produkten						
Hersteller	Bezeichnung	Typ	Abmessungen [mm]	Gewicht [kg/m]	E-Modul [Gpa]	Bruchlast* [KN]
Keller	Bauzeitanker	Stahlitzen	3x15,7 [0,62"]	3,93	195	642
Keller	Daueranker	Stahlitzen	3x15,7 [0,62"]	3,93	195	642
Keller	WGL-1670/1860	Stahlitzen	6x13,2 [0,52"]	5,67	195	856
Annahütte	Gewi 500/550	Gewindestab	32	8	21	402
Annahütte	Gewi 500/553	Gewindestab	63,5	24,9	21	1758
Annahütte	Gewi 500/552	Gewindestab	50	15,4	21	982
Annahütte	Gewi 500/551	Gewindestab	40	9,9	21	628
DSI	IBO-R51N	Hohlbohrstab	51-30,5	9	21	630
DSI	IBO-R51L	Hohlbohrstab	51-38	8,5	21	450
DSI	IBO-R32N	Hohlbohrstab	32-18	3,9	21	230
DSI	IBO-R32S	Hohlbohrstab	32-16,5	4,9	21	280
DSI	IBO-R38N	Hohlbohrstab	38-21	7,1	21	400
DSI	IBO-R32L	Hohlbohrstab	32-19,7	3,2	21	180

* Angaben der Hersteller

Abb. 76: Materialkennwerte lt. Herstellerangaben

8.4.2 Preisvergleich

An dieser Stelle soll nochmals angemerkt werden, dass es sich hier um reine Materialkosten für die Zugglieder handelt, weswegen Dauer- und Bauzeitanker die gleichen Preise aufweisen da die Kosten des Korrosionsschutzes nicht in diese Betrachtung einfließen. Bei widergewinnbaren Ankern nach dem Verfahren der Firma Keller werden die Litzen wie bereits in Kapitel 3 näher beschrieben in Schlaufen verlegt um beim Rückbau wieder ausgezogen werden zu können. Dieser Mehrverbrauch an Litzenmaterial ist auch die Begründung für die höheren Kosten des WGL-Ankers im Vergleich mit den Dauer- oder Bauzeitankern.

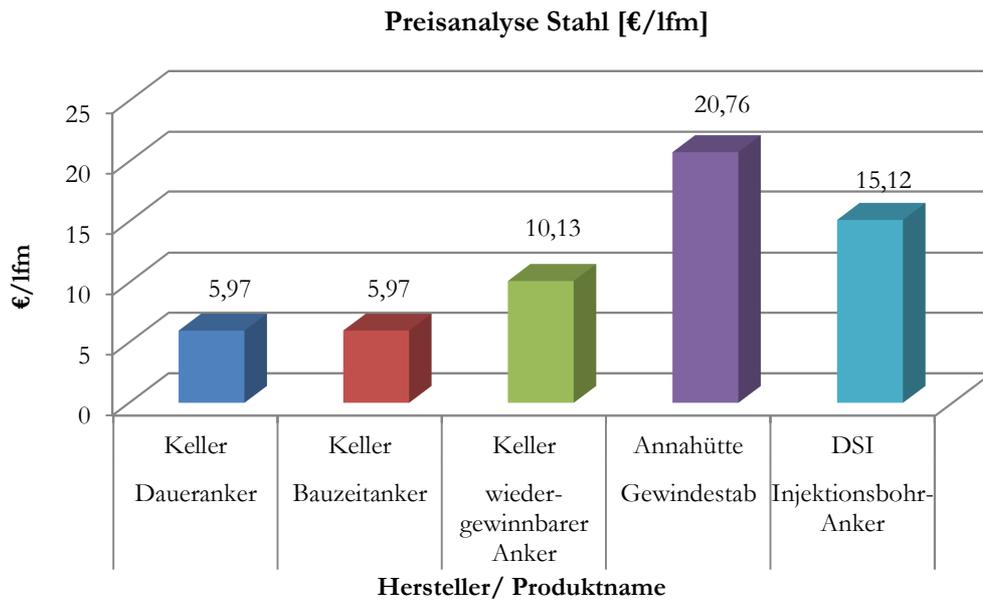


Abb. 77: Stahl-Preisanalyse

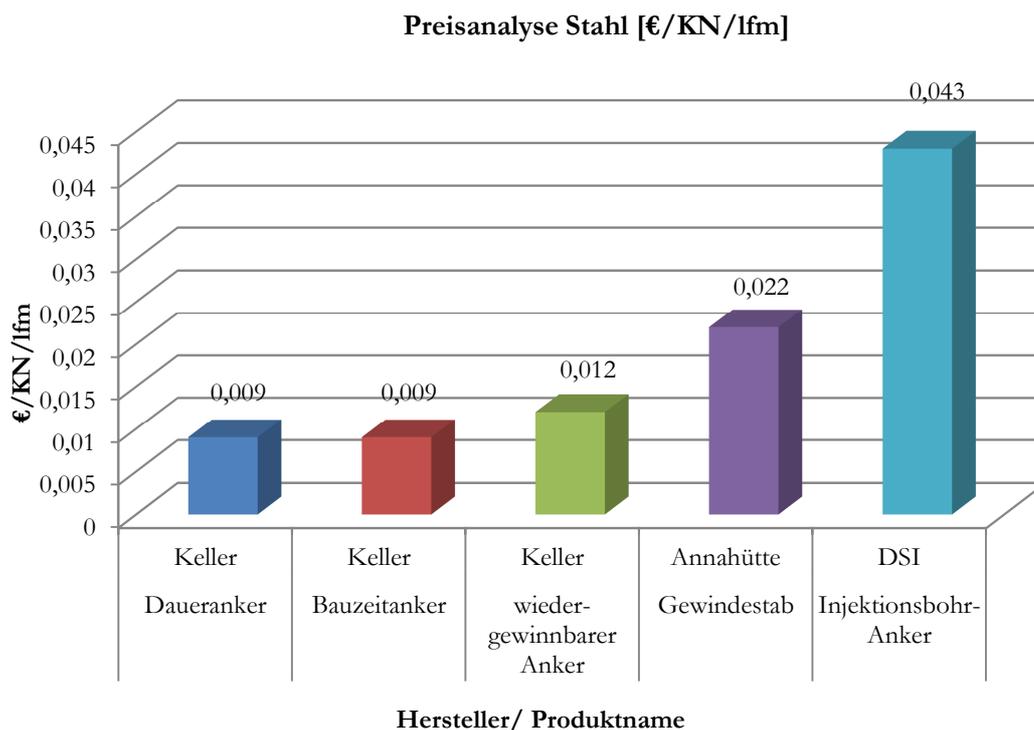


Abb. 78: Preisanalyse der handelsüblichen Stahlprodukte

Aus der oben angeführten Abbildung ist ersichtlich, dass die Materialkosten von Dauer- und Bauzeitankern bei ungefähr 1 Cent/KN übertragbarer Kraft liegen. Wiedergewinnbare Anker haben durch Ihr Konstruktionsprinzip (Schlaufenführung der Stahllitzen), wie von der Firma Keller Grundbau GmbH hier in Anwendung ist, automatisch höhere Kosten durch den höheren Bedarf an Stahllitzen und liegen im Bereich von 12 Cent/KN. In weiterer Reihenfolge liegt der Gewindestab mit

22 Cent/KN vor dem Injektionsbohranker mit 43 Cent/KN ungeachtet sämtlicher Kosten die außer den Zuggliedkosten bei der Herstellung von Ankern entstehen.

8.5 Vergleich der Produkte

Um verschiedene Materialien miteinander vergleichen zu können werden diese in Abhängigkeit der Zugfestigkeit einander gegenübergestellt. Dabei werden Mehrkostenfaktoren errechnet, die sich aus der Analyse der aktuellen Preisanfragen ergeben haben. Die Faserverbundwerkstoffe wurden mit den Stahllitzen und den Gewindestäbe verglichen und das Ergebnis in den folgenden Abbildungen dargestellt. Dabei bilden die Stahllitzen und die Gewindestäbe die Berechnungsbasis für die Kostenfaktoren. Somit ist dieser Faktor als $x \cdot$ Kosten der Berechnungsbasis zu verstehen.

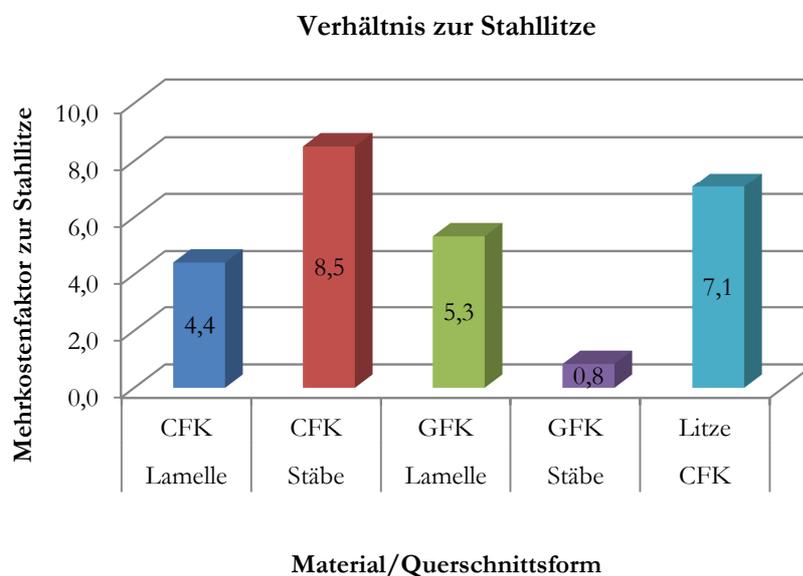


Abb. 79: Vergleich der Materialkosten von Faserverbundwerkstoffen mit Stahllitzen

Wie durch die oben angeführte Abbildung ersichtlich, haben die CFK- Stäbe einen um das doppelt höheren Faktor als CFK- Lamellen. Hier liegt der Grund nach Ansicht des Autors darin, dass Lamellen derzeit einen wesentlich höheren Absatz am Markt erzielen als Stäbe. In Zukunft wird sich der Mehrkostenfaktor der Stabelemente in der Größenordnung der Lamellen bewegen, wobei durch die Produktionsunterschiede, Stäbe stets etwas höher liegen werden. Die Litzen aus Karbon liegen zwischen den Stäben und den Lamellen aus CFK. Hier sind trotz höherem Aufwand bei der Produktion die Kosten geringer als bei Stäben.

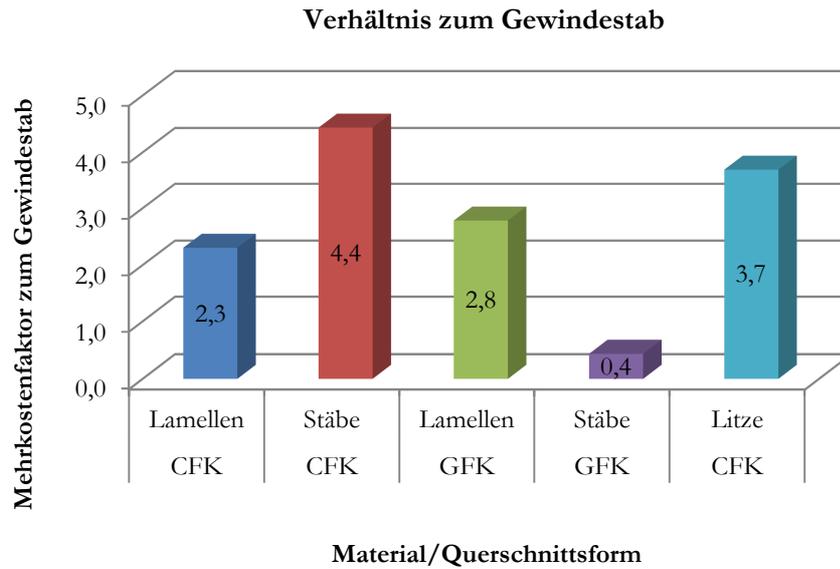


Abb. 80: Vergleich der Materialkosten von Faserverbundwerkstoffen mit Gewindestäben

Die hier ermittelten Faktoren spiegeln das gleiche Ergebnis wie bei Stahlлитzen ab. Der Unterschied von Stahlлитzen zu Gewindestäben mit dem Faktor 2 liegt in den höheren Herstellungskosten der Gewindestäbe begründet.

Da für Anker, wie für alle anderen Materialien die in der Bauwirtschaft eingesetzt werden, die Wirtschaftlichkeit das entscheidende Kriterium ist, müssen die Anker als Gesamtelement mit einander verglichen werden. Im Weiteren sind auch die Randbedingungen in diese Betrachtung mit einzubeziehen, da hier wesentlich Vorteile durch den Einsatz von Faserverbundwerkstoffen zu erwarten sind.

8.5.1 Wiedergewinnbare Anker

Bei wiedergewinnbaren Ankern soll anhand einer Gegenüberstellung die Wirtschaftlichkeit der CFK-Anker beurteilt werden. Hierfür wurde als Ausgangsbasis ein 15m langer Anker mit 10m freier Stahllänge und 5m Verankerungslänge und einer Ankerkraft von 450kN gewählt. Dem gegenüber steht ein CFK-Rundstab Anker mit 9 \varnothing 7,9 mm Stäben der eine Bruchlast von 906kN aufweist. Aufgrund einer fehlenden Normung für die Anwendung von CFK-Ankern in der Geotechnik werden die in der Literatur angegebenen Richtwerte zur Bemessung herangezogen. Dies bedeutet dass die CFK-Elemente maximal bis zu 60% der Bruchlast belastet sind.

In die folgende Aufstellung der Kosten sind die Baustelleneinrichtung sowie die Herstellungskosten für die Bohrung nicht mit eingeflossen, da diese unabhängig vom Ankertyp festgelegt wurden und somit zu keinem Unterschied führen.

Vom heutigen Standpunkt aus ist die mögliche Reduktion der Bohrlochdurchmesser bei CFK-Ankern nicht entscheidender wirtschaftlicher Wirkung.

Kostenaufstellung WGL-Anker			
Bezeichnung	Anzahl	EP [€]	Gesamtpreis [€]
Spannstahllitze 0,52" mit Fett	90	1,00	90
Injektionsschlauch	45	0,25	11,25
Umlenkkauschen	3	17,00	51
Kleinmaterial	1	20,00	20
Fertigungskosten Litze	90	1,00	90
Fertigungskosten Anker	1	30,00	30
			€ 292,25
Ankerplatte 6-litzig	1	40	40
Ankerkeile 0,52"	6	1,5	9
Unterlegsplatte	1	20	20
			69
		<u>Kosten gesamt</u>	<u>€ 361,25</u>
Kosten für Rückbau des Ankers			
Bezeichnung	Anzahl	EP [€]	Gesamtpreis [€]
Leistungsansatz: 0,4h / Schleife - 1,2h / Anker			
Arbeitskraft 2 Mann	2,4	40,0	96,0
Spannpresse, Winde,ect.	1	4,3	4,3
Fahrzeug	1	10,0	10,0
		<u>Kosten gesamt</u>	<u>110,3</u>
		<u>WGL-Kosten mit Rückbau</u>	<u>€ 471,54</u>

Tab. 20: Kostenaufstellung für einen rückbaubaren Anker

Kostenaufstellung CFK-Anker					
Bezeichnung	Anzahl	EP [€]	Gesamtpreis [€]	Variante	
				EP [€]	Gesamtpreis [€]
CFK-Stab ø 7,9mm	90	6,75	607,5	4,60	414
Injektionsschlauch	45	0,25	11,25	0,25	11,25
Kleinmaterial	1	20,00	20	20,00	20
Fertigungskosten Anker	1	30,00	30	30,00	30
		<u>Kosten gesamt</u>	<u>€ 668,75</u>	<u>Kosten gesamt</u>	<u>€ 475,25</u>

Tab. 21: Kostenaufstellung eines CFK-Anker

Wie aus dieser Kalkulation hervorgeht sind mit Kosten von € 470,- pro WGL-Anker zu rechnen. Dem stehen mit den heute vorliegenden Preisen der CFK-Anker mit € 670,- gegenüber. Diese erheblichen Mehrkosten von 57% sind ausschließlich mit den Materialkosten für die CFK-Elemente zu begründen. In dieser Kalkulation wurden keine eventuellen Probleme beim Rückbau berücksichtigt. Sollten

einzelne Schleifen nicht wieder ausgezogen werden können, so sind wie bereits erwähnt bis zu € 100/lfm Abstandszahlung zu leisten.

Wenn wie von den Herstellern erwartet die Kosten für CFK-Produkte weiterhin sinken können ab einem Preis von € 4,60/lfm CFK- und Stahllitzenanker zum gleichen Preis hergestellt werden. An dieser Stelle solle erwähnt werden, dass mit den vorliegenden Preisen der Lamellenquerschnitte diese Grenze bereits unterschritten wurde, jedoch der Ankerkopf noch nicht in Feldversuchen getestet wurde.

Um den Einsatz von Lamellen oder Rundstäben aus Kohlenstoffverbundmaterialien für rückbaubare Anker tatsächlich beurteilen zu können sind in den Augen des Autors genaue Risikoanalysen erforderlich. Es gibt jedoch wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben etliche Anwendungsgebiete bei denen CFK-Anker wesentliche Erleichterungen im Einbau bzw. in der Überwachung der Anker mit sich bringen.

8.5.2 Nägel und Injektionsbohranker

Faserverbundwerkstoffe können auch in Form von Nägeln in der Geotechnik zum Einsatz kommen. Um einen Vergleich von Stahlnägeln mit Faserverbundnägeln ziehen zu können wird ein Geländesprung der durch eine Bodenvernagelung gesichert werden soll herangezogen.

Dieses Beispiel wurde vom Verfasser frei gewählt und simuliert einen 7 Meter hohen Geländesprung der dieser Berechnung zugrunde gelegt wurde.

Die Berechnung basiert auf dem Eurocode 7 mit den Teilsicherheitsbeiwerten aus dem nationalen Anhang für eine Bemessungssituation BS 1 und einer Schadensfolgeklasse CC 1. In dieser Berechnung wurde eine Auflast von 5 kN/m auf Höhe des Urgeländes berücksichtigt. Der Bodenaufbau gliedert sich in 2 Bereiche. Die obere Bodenschicht stellt eine 0,8m starke Auffüllung dar die auf dem gewachsenen Boden zu liegen kommt. Die Bodenkennwerte wurden einem geotechnischen Bericht der eine solche Situation beschreibt entnommen.

Die Nagelwand besteht aus einer 0,2 m dicken bewehrten Spritzbetonschale mit 4 Nagelreihen und einem horizontalen Nagelabstand von 2,0 m. Im Laufe der Optimierung der Nagelwand in Bezug auf Nagelabstand und Nagellänge wurde eine Länge von 6,0 m für alle 4 Nagelreihen festgelegt. Die Nagelwand wurde auf die Innere- und Äußere- Standsicherheit sowie auf die verschiedenen Bauzustände untersucht. Sämtliche Berechnungsunterlagen sind im Anhang angeführt.

Aus der Berechnung geht eine maximale Nagelkraft von 87,06 kN hervor. Nägel werden hauptsächlich mittels selbstbohrenden Injektionsbohrankern hergestellt. Je nach Baugrund und Einflüssen aus dem Baustellenablauf kommen auch verrohrte Bohrungen mit Gewindestäben zum Einsatz. Es werden nun die verschiedenen Produkte auf Basis der Berechnungsergebnisse einander gegenübergestellt.

Vergleich von Bodennägeln				
Bezeichnung	Material	Übertragbare Kraft [kN]	Preis [€/m]	Bemerkung
R25N - Dywi Drill	Stahl	130,4	8,20	selbstbohrend
R32L Dywi Drill	Stahl	156,5	8,52	selbstbohrend - Standardprodukt
GEWI - 20mm	Stahl	136,5	8,10	verrohrte Bohrung erforderlich
Sigrafil D8	CFK	102,0	12,38	verrohrte Bohrung erforderlich
Lamelle 50x1,4	CFK	100,4	15,33	verrohrte Bohrung erforderlich
Lamelle 60x1,4	CFK	120,5	20,09	verrohrte Bohrung erforderlich
Spinmax R32	GFK	104,4	6,60	Alkalibeständigkeit problematisch
Powerthread K60-25	GFK	156,5	3,87	Alkalibeständigkeit problematisch

Tab. 22: Vergleich der Nagelprodukte anhand einer Bodenvernagelung lt. Anhang A2

Aus der oben geführten Gegenüberstellung der am Markt verfügbaren Produkte aus Stahl und Faserverbundwerkstoffen ist klar ersichtlich, dass mit derzeitiger Preislage die CFK-Nägeln mindestens 50% teurer als Stahlnägeln sind. Hinzu kommen die Mehrkosten die auf eine verrohrte Bohrung und zusätzliche Injektionsleitungen zurückzuführen sind. Die besseren Verbundeigenschaften dieser Nägel, auf dieser Herstellungsart basierend, können die Mehrkosten nur geringfügig reduzieren. GFK-Produkte sind aufgrund der Problematik mit der chemischen Beständigkeit bislang nicht zur Anwendung gekommen. Des Weiteren wurden große Probleme mit den selbstbohrenden Nägeln, Spinmax R32, beim Bohren festgestellt. Dies äußerte sich durch das Versagen des Nagels während des Bohrvorgangs. Für CFK- Nägel wurde in der Literatur nur eine Anwendung in England, zur Sicherung eines Bahndammes, gefunden. Hierfür war neben den besonderen chemischen Einwirkungen auf die Nägel auch die Anforderung, elektromagnetische Kurzschlüsse durch das Nagelmaterial zu verhindern. Daraus ist ersichtlich, dass eine wirtschaftliche Anwendung dieser Nagelprodukte derzeit auf Spezialgebiete unter besonderen örtlichen Gegebenheiten beschränkt ist.

9 Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit ging es um die Anwendungsmöglichkeiten von Faserverbundwerkstoffen mit integriertem Monitoring in der Geotechnik. Dabei wurden einerseits die verschiedenen für die Geotechnik von Interesse scheinenden Faserverbundwerkstoffe und andererseits die Möglichkeiten des Monitorings mittels Fiber Optic Sensing diskutiert. Im Zuge der Literaturstudie wurde sehr schnell klar, dass Faserverbundwerkstoffe hauptsächlich in der Automobilbranche und der Luftfahrttechnik zum Einsatz kommen. In der Bautechnik spielen sie in Form von nachträglichen Bauteilverstärkungen im Betonbau eine immer wichtiger Rolle wurden jedoch im Zusammenhang mit der Geotechnik nur in Einzelfällen eingesetzt.

Durch den direkten Kontakt mit den Herstellern sowohl von Faserverbundwerkstoffen wie auch von faseroptischen Messsystemen wurde schnell die Komplexität dieses Themas bekannt. Durch die Analyse der Materialeigenschaften konnten bereits Erste Materialien genauer analysiert werden. Neben Kohlenstofffasern stellten sich auch Glasfasern als besonders geeignet heraus woraufhin detaillierter auf diese beiden Stoffe eingegangen wurde. Der Zweite große Teil beschäftigt sich mit dem Monitoring dieser Anker. Dabei wurden Lösungsansätze entwickelt wie die Fiber Optic Sensoren direkt über die Matrix der Verbundwerkstoffe die Anker überwachen können. Diese relativ neue Art des Monitoring kann einen wesentlichen Beitrag für noch ungeklärte Fragen in der Geotechnik liefern. Hierfür ist die Möglichkeit der sehr schnellen Übermittlung enormer Datenmengen in Lichtwellenleitern verantwortlich.

Im nächsten Schritt wurde ein CFK-Anker entwickelt der auch die Möglichkeit der Überwachung der Zugglieder bieten sollte. Hierfür wurde ein Modell für einen Klebekopf- und einen Verbundkeil-Anker entwickelt. Bei beiden Ankerkopfarten wurde darauf geachtet dass Messkabel und Sensoren ohne große Aufwendungen durch den Ankerkopf durchgezogen werden können. Die Verbundkeilverankerung stellt eine sehr wirtschaftliche Variante der Verankerung dar, da sämtliche Elemente des Ankerkopfes mehrmals verwendet werden können.

Durch die Analyse der einzelnen Komponenten der Anker wurden Vorschläge für die effizientesten Einsatzmöglichkeiten von Anker und Fiber Optic Messtechnik beschrieben.

Abschließend konnte in der Wirtschaftlichkeitsanalyse gezeigt werden dass diese Produkte unter bestimmten Voraussetzungen wirtschaftlich mit Stahlprodukten konkurrieren können. Besonders in Bezug auf Korrosion und chemische Belastungen der Zugglieder haben Faserverbundwerkstoffe, insbesondere CFK-Elemente große Vorteile gegenüber klassischen Stahldrahtlitzen.

9.2 Ausblick

Sowohl im Bereich der Faserverbundwerkstoffe wie auch speziell im Fiber Optic Sensing liegt großes Potenzial für Anwendungen in der Geotechnik. Bei den CFK-Ankern sind Feldversuche für die Zugglieder erforderlich um die Handhabung dieser Produkte besser beurteilen zu können. Auch im Bereich der Ausbildung des Ankerkopfs gibt es Fragen die durch Versuche mit der Verbundkeilverankerung für Lamellen bzw. Rundstäbe zu untersuchen sind.

Das Fiber Optic Sensing trifft in der Geotechnik auf einen Bereich der auf diese Art und Weise bislang überhaupt nicht untersucht werden konnte. Für einen breiten Einsatz an faseroptischen Messsystemen in der Geotechnik bedarf es sicherlich handlicheren und robusteren Messmodulen um dem Einsatz auf Baustellen gerecht zu werden. An höheren Auflösungen und somit mehr Messpunkten über die mehreren Kilometer langen Sensoren wird bereits geforscht, jedoch sind diese Systeme bislang nur unter Laborbedingungen verwendbar.

Der Einsatz von CFK-Ankern mit integrierten Sensoren wird hauptsächlich von den örtlichen Gegebenheiten und primär von den Kosten abhängig sein. CFK-Anker stellen eine wichtige alternative zu Stahllitzenankern dar, jedoch bedarf es gewissen Einwirkungen und Umständen, dass CFK-Anker wirtschaftlich eingesetzt werden können. Um diesen Bedarf abdecken zu können sind die oben genannten Punkte weitere zu untersuchen umso die CFK- Anker weiterentwickeln zu können.

10 Literaturverzeichnis

- [1] ADAM, D.: Fels- und Tunnelbau. Studienunterlagen zur Vorlesung, Kapitel 2: Felsbau, 2. Auflage, Institut für Geotechnik, Technische Universität Wien, November 2010
- [2] ADAM, D.: Grund- und Bodenmechanik. Studienunterlagen zur Vorlesung, 2. Auflage, Institut für Geotechnik, Technische Universität Wien, 2010
- [3] BARLEY, A.D., WINDSOR, CH.R.: Recent advances in ground anchor and ground reinforcement technology with reference to the development of the art, London, 2001
- [4] BENMOKRANE, B., RAHAM, A.H., MUKHOPADHYAYA, P., MASMOUDI, R., ZHANG, B., LORD, I., TADROS, G.: Fibre-optic sensors monitor FRP – reinforced bridge, Concrete International 23: 33 - 38, 2001
- [5] BENMOKRANE, B., RAHAM, H., MUKHOPADHYAYA, P., MASMOUDI, R., CHEKIREL, M., NICOLE, J-F., EL-SAFETY, A.: Use of fibre reinforced polymer reinforcement integrated with fibre optic sensors for concrete bridge deck slab construction, Canadian Journal of Civil Engineering Vol. 27: 928 - 940, 2000
- [6] BENMOKRANE, B., XU, H., NISHIZAKI, I.: Aramid and carbon fibre-reinforced plastic prestressed ground anchors and their field applications, Canadian Journal of Civil Engineering 24: 968 – 985, 1997
- [7] BURTSCHER, S. L.: Wedge Anchorage for CFRP Strips, Journal of Composites for Construction: 446 - 453, July/August 2008
- [8] CASANOVA, N.: Verformungsmessungen mit optischen Glasfasersensoren, Weiterbildungskurs ETH- Zürich, 1997
- [9] CHAMBERS, A.R., MOWLEM, M.C., DOKOS, L.: Evaluating impact damage in CFRP using fibre optic sensors, Composites Science and Technology Vol. 67: 1235 - 1242, 2007
- [10] CHEN, P-CH., LIN, M-L., WU, Y-H.: Axial performance of various strengthening methods applied on full- scale rectangular RC-columns, National Taiwan University, 2010
- [11] CSIPKES, A., FERGUSON, S., GRAVER, T.W., HABER, C.T., Méndez, A., MILLER, J.W., The maturing of optical sensing technology for commercial applications, Micron optics Inc. Atlanta – Georgia, USA
- [12] DELEPINE-LESOILLE, S., MERLIOT, E., GAUTIER, Y.: Optical fiber strain sensors for use in civil engineering: State of the art, industrial applications and outlook, BLPC No.272: 123 - 140, Paris, 2008
- [13] FICO, R., ACIERNO, D., PROTA, A.: Limit states design of concrete structures reinforced with FRP Bars, University of Naples Federico II, 2007
- [14] FITZWILLIAM, J.: An introduction to FRP composites for construction, ISIS Educational Modul 2, 2006

- [15] GUADAGNINI, M., CIUPALA, M-A., PILAKOUTAS, K.: Fibre reinforced polymers in concrete structures, Ovidius University Annals Series: Civil Engineering Volume 1, No. 5: 149 - 154, 2003
- [16] HUNKELER, F.: Spannglieder, Schrägseile und Anker – Beschreibung der Systeme und Erkenntnisse aus Korrosionsschäden, Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation/ Bundesamt für Strassen, Wildeg, 2005
- [17] INAUDI, D., CASANOVA, N.: Deformationsmessungen mit Glasfasersensoren – Anwendungen von Lichtwellenleitsensoren zur Überwachung von Bauwerken, TFB – Veranstaltung, Wildeg, 1999
- [18] INAUDI, D., GLISIC, B.: Application of distributed fibre optic sensory for Structural Health Monitoring (SHM), 2nd International Conference on Structural Health Monitoring of intelligent infrastructure, Shenzhen – China, 2005
- [19] ITEN, M., FISCHLI, F.: Fibre optic sensors for piles and boreholes, Marmota Engineering AG, Zürich, 2010
- [20] ITEN, M.: Novel applications of distributed Fibre-optic sensing in geotechnical engineering, Dissertation ETH- Zürich, 2011
- [21] JOHANSSON, S., FARHADIROUSHAN, M.: Distributed Strain Measurement for Embankment Dams – Laboratory Tests, Installation, and Initial Monitoring Experiences, Sensornet London & HydroResearch Stockholm, Rapport 03:19, 2004
- [22] KALAMKAROV, A.L., FITZGERALD, S. B., Mc DONALD, D. O., GEORGIADES, A.V.: The mechanical performance of pultruded composite rods with embedded fiber- optic sensors, Composites Science and Technology Vol. 60: 1161 - 1169, 2000
- [23] KALAMKAROV, A.L., Mc DONALD, D.O., FITZGERALD, S.B., GEORGIADES, A.V.: Reliability assessment of pultruded FRP reinforcements with embedded fiber optic sensors, Composite Structures Vol. 50: 69 - 78, 2000
- [24] KARBHARI, V.M.: Use of composite materials in civil infrastructure in Japan, International Technology Research Institute, Baltimore – Maryland, 1998
- [25] Katalog der Firma BACHY SOLETANCHE: Carbon Fibre soil nails, Sunderland – England, 2001
- [26] KLUTH, R.J., WATLEY, D.A., FARHADIROUSHAN, M., PARK, D.S., LEE, S.U., KIM, J.Y., KIM, Y.S.: Case Studies on Distributed Temperature and Strain Sensing (DTSS) by using optic fiber, Sensornet London & Korea Electric Power, 2006
- [27] KLUTH, R.J., WATLEY, D.A.: Utilising Dam Monitoring Technology for Monitoring Structural Behaviour of Foundations, Sensornet Ltd., London, 2006
- [28] KREUZER. M.: Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors, HBM Darmstadt, 2007
- [29] Magistrat der Stadt Wien: Merkblatt Baugrubensicherung, Abteilung 28, Wien, 2011

- [30] MAISSEN, A.: Vorgespannter Beton: Spannglieder aus kohlenstoffverstärktem Kunststoff im Vergleich mit Stahllitzen, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Dübendorf, 1997
- [31] MICELLI, F., NANNI, A.: Durability of FRP rods for concrete structures, *Construction and Building Materials* Vol. 18: 491 - 503, 2004
- [32] MICELLI, F., NANNI, A.: Issues related to Durability of FRP reinforcement for RC Structures exposed to accelerated ageing, ASC 16th Annual Conference – Virginia Tech. Blacksburg, 2001
- [33] MICRON, OPTICS: Optical Fiber Sensors Guide – Fundamentals & Applications, Atlanta, 2007
- [34] MOTAVALLI, M.: Fibre composites in structural engineering, Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research, Dübendorf, 2011
- [35] NANNI, A., BAKIS, CH.E., O'NEIL, E.F., DIXON, T.O.: Performance of FRP tendon-anchor systems for prestressed concrete structures, *PCI- Journal*, January – February: 34 -44, 1996
- [36] ORTIGAO, J.A.R.: FRP applications in geotechnical engineering, ASCE 4th Materials Conference, 1996
- [37] Produktdatenblatt CarboDur Lamellen, der Firma Sika GmbH, Bludenz-Bings, 2012
- [38] Produktkatalog Anker-technik der Firma G. Baumann UG, Wangen, 2012
- [39] Produktkatalog CFCC von Tokyo Rope MFG. CO. LTD., Japan, 2012
- [40] Produktkatalog Dywidag- Geotechnische Systeme der Firma Dywidag Systems International GmbH, Linz, 2012
- [41] Produktkatalog Firma Firep International AG, Rapperswil, 2012
- [42] Produktkatalog Keller Veröffentlichungen 2011 der Firma Keller Grundbau GmbH, Wien, 2011
- [43] Produktkatalog Sigrafil Lamellen/Profile, der Firma SGL Technologies GmbH, Wiesbaden, 2012
- [44] Produktliste Firma Secar- Technologie GmbH, Hönigsberg, 2012
- [45] PUZERIN, A.M., ITEN, M., HAUSWIRTH, D.: Advanced Geotechnical applications of distributed Fiber Optic Sensing, *Geotechnical Instrumentation News*, Dezember 2010
- [46] RIZKALLA, S.H.: A new generation of civil engineering structures and bridges, ISIS Canada – The university of Manitoba, Winnipeg – Manitoba, 1999
- [47] RIZKALLA, S.H.: FRP for innovativ structures, ISIS Canada – The university of Manitoba, Winnipeg – Manitoba, 1999
- [48] ROIZARD, X., WERY, M., KIRMANN, J.: Effects of alkaline etching on the surface roughness of a fibre- reinforced epoxy composite, *Composite Structures* Vol. 56: 223 - 228, 2002
- [49] ROSENBOOM, O., HASSAN, T.K., RIZKALLA, S.: Flexural behavior of aged prestressed concrete grids strengthened with various FRP systems, *Construction and Building Materials* 21: 764 - 776, 2006

- [50] SENSORNET: Produktdatenblatt – DTSS: Distributed Temperatur & Strain Sensor – Specifications, Hertfordshire – England, 2006
- [51] SENTRY, M., BOUZZA, A., AL-MAHAIDI, R., CARRIGAN, L., LOIDL, D., BLUFF, Ch.: Tensile capacity of stressed CFRP strand exposed to extreme aggressive groundwater environments, FRPRCS-9 Sydney- Australia, 2009
- [52] SENTRY, M., BOUZZA, A., AL-MAHAIDI, R., COLLINS, F., CARRIGAN, L., LOIDL, D., BLUFF, Ch.: Durability of carbon fibre reinforced polymer (CFRP) strand for use in high capacity permanent ground anchors, Monash University – Australia, Geotech Pty Ltd. Tullamarine – Australia, 2008
- [53] SENTRY, M., BOUZZA, A., AL-MAHAIDI, R., LOIDL, D., BLUFF, Ch., CARRIGAN, L.: Advancements in ground anchors: Carbon fibre reinforced polymer (CFRP) strands, Monash University – Australia, Geotech Pty Ltd. – Australia, 2007
- [54] SENTRY, M., BOUZZA, A., AL-MAHAIDI, R., LOIDL, D., CARRIGAN, L.: Developments in ground anchor technology: Carbon fibre reinforced polymer (CFRP), Monash University – Australia, Geotechnical Engineering – Tullamarine – Australia, 2006
- [55] UEDA, T.: FRP for construction in Japan, Hokkaido University – Japan, 2004
- [56] UEDA, T.: Notable research activity, FRP - International, Singapore, Spring 2002
- [57] VORWAGNER, A.: Entwicklung eines effizienten und dauerhaften Verankerungssystems für vorgespannte eingeschlitzte Kohlefaserlamellen zur Bauteilverstärkung, Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen, Technische Universität Wien, 2011
- [58] VORWAGNER, A., BURTSCHER, S., L., GRASS, G., KOLLEGGER, J.: Verstärkung mit vorgespannten eingeschlitzten Lamellen, Beton und Stahlbeton 105 Heft 1: 9 - 18, 2010
- [59] WICHTER, L., GENSHOFER, S.: Recent developments in ground anchors, tension piles and soil nails, University of Cottbus, 2002
- [60] WICHTER, L., MEININGER, W.: Verankerungen und Vernagelungen im Grundbau, Ernst & Sohn, Verlag für Arch. und technische Wissenschaft GmbH & Co. KG, Berlin, 2000
- [61] WITT, K.J.: Grundbau – Taschenbuch, 7. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, 2009
- [62] WITTEN, E., JAHN, B., KARL, D.: Composites- Marktbericht 2012, Oktober 2012
- [63] WON, J.P., YOON, Y.N., HONG, B.T., CHOI, T.J., LEE, S.J.: Durability characteristics of nano- GFRP composite reinforcing bars for concrete structures in moist and alkaline environments, Composite Structures Vol. 94: 1236 - 1242, 2012
- [64] YANG, N.: Messen mit Glasfasersensoren – Vorteile gegenüber herkömmlichen elektrischen Sensormessungen, Sensor Report 1: 21 - 24, 2011
- [65] YOUSIF, B.F., LEONG, O.B., ONG, L.K., WONG, K.J.: The effect of treatment on tribo-performance of CFRP Composites, Recent Patents on Materials Science 2009/2: 67 - 74, 2009
- [66] ZHAN, B., BENMOKRANE, B., EBEL, U.A.A.: Design and Evaluation of Fibre- reinforced polymer bond- type anchorages and ground anchors, International Journal of Geomechanics 2006 May/June: 166 - 175, 2006

-
- [67] ZHANG, B., BENMOKRANE, B., MUKHOPADHYAYA, Ph., EL-SAFTY, A.: Tensile behavior of FRP tendons for prestressed ground anchors, *Journal of Composites for Construction* May 2001: 88 - 93, 2001
- [68] ZHANG, B., BENMOKRANE, B.: Large model test of prestressed carbon fibre reinforced polymer ground anchors, *Canadian Journal of Civil Engineering* 32: 1064 – 1074, 2005
- [69] ZHOU, Z., GRAVER, T.W., HSU, L., OU, Jp.: Techniques of advanced FBG sensors: fabrication, demodulation, encapsulation and their application in the structural health monitoring of bridges, *Pacific Science Review* vol. 5: 116 - 121, 2003
- [70] ZHOU, Z., WANG, O., WANG, B.: Smart FRP-OFGB bars and their application in reinforced concrete beams, China, 2004

11 Anhang

A1 - Merkblatt des Magistrat 48 – Baugrubensicherung

Merkblatt zu Baugrubensicherungen im Zusammenhang mit widergewinnbaren Ankern vom Magistrat 48 aus Wien.

A2 - Berechnungsunterlagen zur Bodenvernagelung

Im Folgenden sind die Berechnungsunterlagen zu der jeweils maßgebenden Bemessungssituation angeführt.

- Bauzustand
- Äußere Tragfähigkeit nach Bishop
- Innere Tragfähigkeit nach der Blockgleittheorie

A1 - Merkblatt des Magistrat 48 – Baugrubensicherung

Merkblatt zu Baugrubensicherungen im Zusammenhang mit widergewinnbaren Ankern vom Magistrat 48 aus Wien.



Baugrubensicherung

Auf, in bzw. unter einer öffentlichen Verkehrsfläche, die im Eigentum oder der Verwaltung der Stadt Wien (MA 28) steht

Magistrat der Stadt Wien
Magistratsabteilung 28
Straßenverwaltung und Straßenbau
Lienfeldergasse 96
A-1171 Wien
Tel.: +43/1/4000-DW
Fax: +43/1/4000-99-49610
E-Mail: post@ma28.wien.gv.at
www.strassen.wien.at
DVR: 0000191
UID-Nr. ATU 36801500

Merkblatt

für die Einreichung um privatrechtliche Zustimmung für Aufgrabungen im Zusammenhang mit einer Baugrubensicherung

Für Aufgrabungen, Bohrungen oder sonstige die Straßenkonstruktion beeinträchtigende Maßnahmen, die im Zusammenhang mit einer Baugrubensicherung durchgeführt werden, ist bei der MA 28 – Aufgrabung und Kundenzentrum die Zustimmung mittels des Formulars „Ersuchen um privatrechtliche Einzelvereinbarung“ zu beantragen.

Dieses Ersuchen um Abschluss einer privatrechtlichen Einzelvereinbarung ist unter www.strassen.wien.at - Amtswege und Formulare erhältlich, ordnungsgemäß auszufüllen und vom Bauwerber und Bauführer firmenmäßig zu unterfertigen und mindestens vier Wochen vor dem beabsichtigten Baubeginn der Baugrubensicherung bei der MA 28 – Kundenzentrum einzureichen.

Vor Abschluss der privatrechtlichen Einzelvereinbarung durch die MA 28 darf mit den Arbeiten nicht begonnen werden! Bei Zuwiderhandlung behält sich die MA 28 die Einleitung rechtlicher Schritte vor. Ebenso hat vor Arbeitsbeginn die schriftliche Nennung des hierfür zuständigen Prüfeningenieurs (Geotechnischer Fachmann) zu erfolgen.

Für diese Zustimmung legen der Bauführer des Hochbaus und der Bauführer der Baugrubensicherung nachgenannte Unterlagen der MA 28 – Aufgrabung und der MA 29 – Grundbauabteilung zur Beurteilung vor:

Die Zustimmungserklärung seitens der MA 28 zu den geplanten Arbeiten, die im Zusammenhang mit einer Baugrubensicherung durchgeführt werden, kann erst nach Erhalt einer positiven Stellungnahme der MA29 - Grundbauabteilung erteilt werden.

Allgemeine Hinweise zur Zustimmungserklärung der MA 28:

Einer Baulinienüberschreitung von bis zu 20 cm kann seitens der MA 28 gemäß § 83 der Bauordnung für Wien zugestimmt werden.

Einer Überschreitung der Baulinie von mehr als 20 cm kann seitens der MA 28 „nur“ in Ausnahmefällen zugestimmt werden (wie z.B.: beim Düsenstrahlverfahren im Zuge einer Fundamentunterfangung der Feuermauer des Nachbargebäude, wobei die letzte DSV-Säule die

Baulinie aus statischen Gründen überschreiten muss. Einer Längssicherung entlang der Baulinie kann „nur“ bis zu 20 cm Baulinienüberschreitung zugestimmt werden).

Allgemeine Angaben:

Firmenbezeichnung Bauführer Hochbau (laut Baubewilligung)
Firmenbezeichnung Bauführer Baugrubensicherung
Grundbautechnischer Sachverständiger

Beilagen:

Lageplan
Waag- und Lotschnitt der Baugrubensicherung (mit Baulinie, Lage der Einbauten und Grundwasserhorizont)
Geotechnisches Gutachten
Technischer Bericht
Statische Berechnung
Erforderlichenfalls Ankerasteilungsplan
Einbautenerhebung

Notwendige Angaben zur Beurteilung der geplanten Baugrubensicherung:

Angaben bei Bohrfahlwänden:

Ausführende Firma
Bohrpfahlgerät (eventuell Zustimmung der Einbautenbetreiber)
Bohrpfahldurchmesser, Spannweite, Leerbohrstrecke, Bohrfahlrost

bei aufgelösten Bohrfahlwänden:

Regelabstand, Spritzbetonschale, Hinterfüllung Spritzbeton – Kellerwand

bei auskragenden Bohrfahlwänden:

freitragend oder Auflast aus den OG im Rohbau – Endzustand

beim **Berliner Verbau** u.ä. Stützmaßnahmen wird eine Stützschalung aus Holz (Bohlen, Pfosten, Schaltafeln) zwischen den senkrechten Stützelementen (Bohrträger u.ä.) untersagt. Diese aussteifenden Flächen sind als bewehrter Spritzbeton auszubilden.

Bohrpfähle (bewehrt oder unbewehrt) **sind** grundsätzlich nur **auf Eigengrund zu errichten** bzw. innerhalb des Toleranzmaßes von 20 cm Baulinienüberschreitung. Ausnahmen hierzu sind nur nach Rücksprache mit der MA 28 zulässig. Für eventuell verbleibende Betonkörper (auch in größerer Tiefe, z.B. unter 1,80 m unter GOK) ist eine entsprechende Abstandszahlung zu leisten.

Angaben zum Düsenstrahlverfahren:

Ausführende Firma
Verwendete Geräte

Baugrubensicherungselemente in Form von **DSV-Körper sind grundsätzlich nur auf Eigengrund zulässig**. Die Situierung der Säulen hat entsprechend dem vorzulegenden Säulenausteilungsplan derart zu erfolgen bzw. sind diese soweit von der Baulinie nach innen abzurücken, dass das **herstellungsbedingte Säulenübermaß** (= praxisbezogener Schätzwert in Abhängigkeit der vorh. Bodenschichtung; z.B. in lockeren Anschüttungen oder sandarmen rolligen Donauschottern mit Gefahr von „Überprofilen“ durchaus im dm- bis Meterbereich möglich; strichlierte Säulenumrissdarstellung erforderlich!) jedenfalls **noch verlässlich auf Eigengrund** (bzw. innerhalb des Toleranzmaßes von 20 cm entlang der Baulinie) **zu liegen kommt**.

Angaben bei Schlitzwänden:

Ausführende Firma

Schlitzwandgerät (eventuell Zustimmung der Einbauten)

Schlitzwanddicke, Einspannlängen

Wasserdichtheit gegen das Grundwasser erforderlich?

auskragende Schlitzwand: mit oder ohne Auflasten im Endzustand des Rohbaus

Schlitzwandelemente (bewehrt oder unbewehrt) **sind** grundsätzlich nur **auf Eigengrund zu errichten** bzw. innerhalb des Toleranzmaßes von 20 cm Baulinienüberschreitung. Ausnahmen hierzu sind nur nach Rücksprache mit der MA 28 zulässig. Für eventuell verbleibende Betonkörper (auch in größerer Tiefe, z.B. unter 1,80 m unter GOK) ist eine entsprechende Abstandszahlung zu leisten. Die Herstellung von Leitwänden auf ÖG ist möglich, sofern diese nach der Schlitzwandherstellung zur Gänze entfernt werden.

Angaben bei temporären Verankerungen:

Ausführende Firma

Art der Anker

Zustimmung der Einbautenträger

Hinsichtlich beabsichtigter **Rückverankerungen** von BGS erteilt die MA 28 **nur** die Zustimmung, falls es sich um **glasfaserverstärkte Kunststoffzugglieder** (z.B. GFK-Anker, GFK-Nägeln) **oder wiederausbaubare Stahlzugglieder** (z.B. ausfädelbare Litzenanker mittels Umlenkrolle, etc.) handelt.

Vermörtelte bzw. verpresste Stahlspieße oder Stahlstäbe (Nagelwand) werden **grundsätzlich abgelehnt**.

Für eventuell verbleibende Ankerteile ist ein Lageplan inkl. Schnittzeichnungen anzufertigen und der MA 28 zu übermitteln.

Für eventuell verbleibende Ankerteile ist eine Abstandszahlung zu leisten.

Spundwände, Dielenverbau:

Ausführende Firma

Verwendete Dielenart, Einspannlänge

Art der Ramm- und Ziehgeräte

Abstand von den nächsten Einbauten

Zustimmung der Einbautenbetreiber zum Rammen und Ziehen aufgrund der Geräteart.

Die Spundwände, Dielenverbauten und Anker sind immer zu entfernen. Dies ist durch einen Sachverständigen zu bestätigen.

Für eventuell verbleibende Stahlteile und/oder Ankerteile ist ein Lageplan inkl.

Schnittzeichnungen anzufertigen und der MA 28 zu übermitteln.

Für eventuell verbleibende Stahlteile und/oder Ankerteile ist eine Abstandszahlung zu leisten.

Frei geböschte Baugruben im ÖG:

sind zwar grundsätzlich möglich, jedoch immer äußerst kritisch zu betrachten (u.a. meist gestörte Baugrundverhältnisse zufolge nahegelegener Künettenverfüllungen). Sie bedürfen immer eines entsprechenden Erosionsschutzes sowie zumindest im obersten Bereich (zur GOK) einer den erdstatischen Erfordernissen entsprechenden Ertüchtigung (zufolge Baustellenverkehr, Kranfundierung, etc.).

Einbautenerhebung

Die Zustimmung der Einbautenbetreiber zu den Maßnahmen zur Baugrubensicherung (insbesondere bei Verankerungen) ist einzuholen.

Benützungsentgelt / Kostenbeitrag / Abstandszahlungen:

Vom Bauwerber/Bauführer ist als Kautions für die Standsicherheit der öffentlichen Verkehrsfläche im Gefährdungsbereich der Baugrubensicherung und für die ordnungsgemäße Wiederherstellung der Straßenkonstruktion nach den Aufgrabungen ein von der MA 28 festgelegter Betrag mittels Zahlschein (wird von der zuständigen Buchhaltungsabteilung der Stadt Wien übermittelt) einzubezahlen bzw. eine Bankgarantie bei der MA 28 zu hinterlegen. (Haftbriefenddatum = Baustellenende des Hochbaues bzw. durch die MA 28 erfolgter Konstatierungsbescheid des Gehsteiges bzw. erfolgter Gehsteigbefund).

Für die Abdeckung des administrativen Aufwands hat der Bauwerber/Bauführer einen tarifmäßig festgesetzten Kostenbeitrag von € 40,- zu zahlen.

Für die Benützung des Straßengrundes ist ein von der MA 28 festgelegtes, einmaliges Benützungsentgelt nach Übermittlung einer Zahlungsaufforderung seitens der zuständigen Buchhaltungsabteilung der Stadt Wien zu entrichten.

Abstandszahlung für verbleibende Anker, Erdnägel oder gleichwertige Verankerungen.

Verlegungstiefe bis 4 m	100,- EUR pro m Ankerlänge
Verlegungstiefe von 4 m bis 8 m	75,- EUR pro m Ankerlänge
Verlegungstiefe über 8 m	50,- EUR pro m Ankerlänge

Abstandszahlung für verbleibende Bauwerkskörper im Öffentlichen Gut, auch wenn diese bis 1,80 m unter Gehsteigniveau zurückgebaut werden müssen.

Niveau- Horizont bis 4 m	250,- EUR pro m ³ (z.B.: Mauerwerk).
Niveau- Horizont von 4 m bis 8 m	190,- EUR pro m ³
Niveau- Horizont über 8 m	125,- EUR pro m ³ <u>oder</u>
Niveau- Horizont bis 4 m	500,- EUR pro m ³ (z.B.: Stahlbetonmauerwerk).
Niveau- Horizont von 4 m bis 8 m	375,- EUR pro m ³
Niveau- Horizont über 8 m	250,- EUR pro m ³

Für den Abteilungsleiter:
Ing. Robert Ertl e.h.

A2 - Berechnungsunterlagen zur Bodenvernagelung

Im Folgenden sind die Berechnungsunterlagen zu der jeweils maßgebenden Bemessungssituation angeführt.

- Bauzustand
- Äußere Tragfähigkeit nach Bishop
- Innere Tragfähigkeit nach der Blockgleittheorie

16

14

12

10

8

6

4

2

0

-2

-4

-6

-8

-10

-12

-15

-10

-5

0

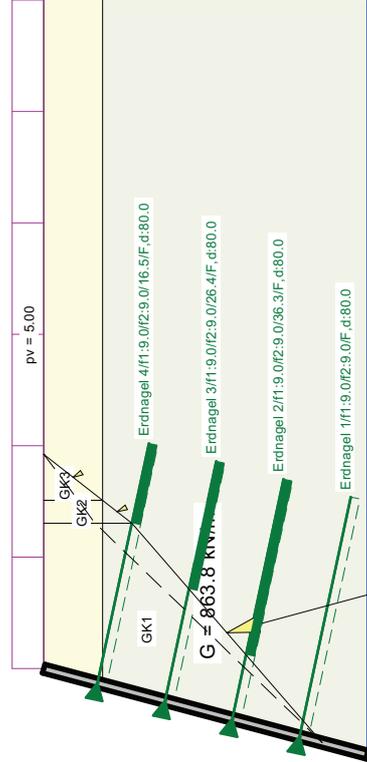
5

10

15

20

Legende Wand
 ABMESSUNGEN
 unten: $x = 0,000$ m $y = 0,000$ m
 Länge = 7,454 m Neigung = 74,99°
 Dicke der Betonschale = 0,200 m
 Horizontaler Nagelabstand = 2,000 m
 Bauzustände
 GRUNDGEGEN
 $H_{1,0/9,0} / H_{1,0,0} =$ Erddruck (mit e) = 111,27 / 101,98 kN/m
 Neigung Hinterkante Wand = 76,05°
 Abmind. Erddruck wg. Neigung Hinterkante Wand = 0,733
 $V_{A,0/9,0} / V_{A,0,0} = 863,83 / 835,63$ kN/m
 Momente um Mittelpunkt Wandschle:
 $M_{A,0/9,0} / M_{A,0,0}$ (aus H-Kräften) = 267,04 / 244,75 kN·m/m
 $M_{B,0/9,0} / M_{B,0,0}$ (aus V-Kräften) = -820,24 / -767,81 kN·m/m
 $b = 5,76$ m
 $\varphi_{s,0} = 29,0$ °
 Teilsicherheiten (GZ 1B):
 γ_{ϕ} (Ständige Einw.) = 1,25
 γ_{ψ} (Veränderliche Einw.) = 1,30
 GLEITEN
 $\gamma_{\text{Gleit}} = 1,10$
 $H_{G,0/9,0} / H_{G,0,0}$ (Gleit) = 0,30 / 0,28
 KIPPSICHERHEIT
 Exzentrizität $e_{\text{pr,0}} / e_{\text{st,0}} = -0,640 / -0,626$ m
 zu Exzentrizität = 0,964 m = b/6
 Kippsicherheit $\eta_{\text{GZ,0}}$ erfüllt
 Kippsicherheit $\eta_{\text{GZ,0}}$ erfüllt
 GRUNDBRUCH für ebenes Gelände
 $c_{\text{sk}} = 5,0$ kN/m²
 $\gamma_{\text{sk}} = 20,5$ kN/m³
 $\gamma_{\text{GZ,0}} = 1,30$
 $H_{G,0/9,0} / H_{G,0,0}$ (Grundbruch) = 0,32 / 0,30
 DURCHSTANZNACHWEIS
 Bemessung mit Nagelkraft $Q_{d,0} = 87,06$ kN
 Erddruck $e_{d,0} = 18,66$ kN/m²
 Breite = Höhe (Nagelplatte) = 0,20 m
 Beton: C 25/30 / Stahl: BSt 500
 Dicke der Betonschale = 0,200 m
 Vorhandene Biegebewehrung = 2,57 cm²/m
 Nutzbare Höhe = 0,170 m
 Bemessungskraft = 36,23 kN/m
 Bemessungswiderstand = 74,14 kN/m
 Keine Schubbewehrung erforderlich



Erdnägel										
Nr.	Tiefe [m]	L [m]	lt [m]	ltz [m]	Fg [kN]	Fg [kN]	GWS-Nr.	ii	Fa	Fa
					[kN/m]	[kN/m]			[kN]	[kN]
4	6,00	5,90	9,00	9,00	59,84	1,20	31	74,45	74,45	100,00
3	4,50	5,90	9,00	9,00	58,84	1,12	29	69,04	69,04	100,00
2	3,00	5,90	9,00	9,00	71,45	1,12	29	69,04	71,45	100,00
1	1,50	5,90	9,00	9,00						100,00

Fa = Kraft aus Erddruck auf Außenhaut
 Fg = Kraft aus Bruchmechanismus (durch 1-gesamt) (ii = 1,1 m/s)
 Horizontaler Nagelabstand = 2,000 m

Boden	$\phi_{s,k}$ [°]	$c_{s,k}$ [kN/m²]	$\gamma_{s,k}$ [kN/m³]	Bezeichnung
	27,00	5,00	19,50	HB-A
	29,00	5,00	20,50	HB-B

Berechnungsgrundlagen
 Teilsicherheiten:
 $-\gamma_{\phi}$ = 1,10
 $-\gamma_{\psi}$ = 1,10
 $-\gamma_{\psi}$ = 1,20
 $-\gamma_{\text{Gleit}}$ = 1,10
 $-\gamma_{\text{Ständige Einw.}}$ = 1,00
 $-\gamma_{\text{Veränderliche Einw.}}$ = 1,50
 Gleitkörper Nr. 53: $\mu = 0,94$
 mit Scherfestigkeit in den Lamellenseiten

16

14

12

10

8

6

4

2

0

-2

-4

-6

-8

-10

-12

-15

-10

-5

0

5

10

15

20

Böschungsberechnung nach EC 7
mit Blockgleitmethode

Parameterliste

phi [°] = Reibungswinkel
c [kN/m²] = Kohäsion
gamma [kN/m³] = Wichte
max psi(A) [°] = Winkel zwischen der Gleitrichtung des Bruchmechanismus und dem Zugglied
mue [-] = Ausnutzungsgrad
dTh [kN/mm] = erforderliche horizontale Zusatzkraft, um für "eta bzw mue = 1.0" das Krafteck zu schliessen

Teilsicherheiten: (GEO-3)

- gam(phi) = 1.10
- gam(c') = 1.10
- gam(cu) = 1.20
- gam(Wichten) = 1.00
- gam(Ständige Einw.) = 1.00
- gam(Veränderliche Einw.) = 1.50 (GEO-2)

Bewegungsrichtung des Gleitkörpers nach links

Koordinaten der Geländepunkte

Nr.	x	y	Nr.	x	y	Nr.	x	y	Nr.	x	y
[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]
1	-15.000	0.000	2	0.000	0.000	3	1.930	7.200	4	16.950	7.200

Scherfestigkeit in den Lamellenseiten berücksichtigt.

Charakteristische Bodenkennwerte

Boden	φ _k	c _k	γ _k	max psi(A)	dräniert	Bezeichnung
[-]	[°]	[kN/m ²]	[kN/m ³]	[°]		
1	27.00	5.00	19.50	90.00	ja	HB-A
2	29.00	5.00	20.50	90.00	ja	HB-B

Bemessungs-Bodenkennwerte

Boden	φ _d	c _d	γ _d	dräniert	Bezeichnung
[-]	[°]	[kN/m ²]	[kN/m ³]		
1	24.85	4.55	19.50	ja	HB-A
2	26.74	4.55	20.50	ja	HB-B

Koordinaten der Schichten und Bodennummern

Nr.	x(links)	y(links)	x(rechts)	y(rechts)	Boden-Nr.
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	
1	1.579	5.890	16.950	5.890	1
2	-15.000	-10.000	16.950	-10.000	2

Koordinaten des Porenwasserdruck-Polygonzuges

Nr.	x	y	Nr.	x	y
[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]
1	-15.000	0.000	2	16.950	0.000

Verkehrslasten

Nr.	Größe(links)	Größe(rechts)	x(links)	x(rechts)	y
[-]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[m]	[m]	[m]
1	5.00	5.00	1.93	16.95	7.20

Erdnägel

f1,d [kN/m/m] = Bemessungswert der Mantelreibung am Kopf

f2,d [kN/m/m] = Bemessungswert der Mantelreibung am Fuß

berechnet aus Mantelreibung [kN/m²] / gamma(Herausziehen) · Umfang Verpresskörper [m] / Erdnagelabstand [m]

F,d [kN/m] = aufnehmbare Bemessungskraft

Nr.	x1	y1	x2	y2	f1,d	f2,d	F,d
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kN/m/m]	[kN/m/m]	[kN/m/m]
1	0.40	1.50	5.78	0.36	9.00	9.00	80.00
2	0.80	3.00	6.18	1.86	9.00	9.00	80.00
3	1.21	4.50	6.59	3.36	9.00	9.00	80.00
4	1.61	6.00	6.99	4.86	9.00	9.00	80.00

Wasserstand vor der Böschung links [m] = -5.00

Wasserstand vor der Böschung rechts [m] = -5.00

gamma Wasser [kN/m³] = 10.000

Wand

Abmessungen

unten: $x = 0.000$ $y = 0.000$ m
Länge = 7.454 m Neigung = 74.99 °
Dicke der Betonschale = 0.200 m
Horizontaler Nagelabstand = 2.000 m
Bauzustände

Grunddaten

H,k,g+q = Erddruck = 111.27 kN/m
H,k,g = Erddruck = 101.98 kN/m
Neigung Hinterkante Wand = 76.05 °
Abminderung Erddruck infolge Neigung Hinterkante Wand = 0.733
V,k,g+q = 863.83 kN/m
V,k,g = 835.63 kN/m
Momente um Mittelpunkt Wandsohle:
M,k,g+q (aus H-Kräften) = 267.04 kN*m/m
M,k,g (aus H-Kräften) = 244.75 kN*m/m
M,k,g+q (aus V-Kräften) = -820.24 kN*m/m
M,k,g (aus V-Kräften) = -767.81 kN*m/m
b = 5.78 m
 $\phi_{k} = 29.0$ °

Gleitsicherheit

$\gamma(\text{Gleit}) = 1.10$
 $\mu_{e,g+q}(\text{Gleit}) = 0.30$
 $\mu_{e,g}(\text{Gleit}) = 0.28$

Kippsicherheit

Exzentrizität $e_{g+q} / e_g = -0.640 / -0.626$ m
zul Exzentrizität = 0.964 m = b/6
Kippsicherheit,g+q erfüllt
Kippsicherheit,g erfüllt

Grundbruchsicherheit

für ebenes Gelände
 $\phi_{k} = 29.0$ °
 $c_k = 5.0$ kN/m²
 $\gamma_{a2,k} = 20.5$ kN/m³
 $\gamma(\text{Grundbruch}) = 1.30$
 $\mu_{e,g+q}(\text{Grundbruch}) = 0.32$
 $\mu_{e,g}(\text{Grundbruch}) = 0.30$

Maximale Kräfte: Erdnägel

Nr	Tiefe	L	f1,d	f2,d	Fg	eta	GK-Nr	Fa	cal.F	F,d
[-]	[m]	[m]	[kN/m/m]	[kN/m/m]	[kN]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]
4	6.00	5.50	9.00	9.00	50.94	1.20	31	75.45	75.45	160.00
3	4.50	5.50	9.00	9.00	58.84	1.12	29	58.04	58.84	160.00
2	3.00	5.50	9.00	9.00	71.45	1.12	29	58.04	71.45	160.00
1	1.50	5.50	9.00	9.00						

Fa = Kraft aus Erddruck auf Außenhaut

Fg = Kraft aus Bruchmechanismus (durch eta geteilt)

Horizontaler Nagelabstand = 2.00 m

Durchstanznachweis

Bemessung mit Nagelkraft $Q_d = 87.06$ kN
 $E_{k,g+q}(\text{ohne } c) = 130.49$ kN/m
 $E_{k,g}(\text{ohne } c) = 120.73$ kN/m
Erddruck e_d [kN/m²] = $0.85 \cdot (1.250 \cdot 120.73 + 1.300 \cdot 9.76) / 7.45$
Erddruck $e_d = 18.66$ kN/m²
aus $0.85 \cdot E$ (ohne c) berechnet.
Breite = Höhe (Nagelplatte) = 0.20 m
Beton: C 25/30
Stahl: BSt 500
Dicke der Betonschale = 0.200 m
Vorhandene Biegebewehrung = 2.57 cm²/m
Nutzbare Höhe = 0.170 m
Umfang = 2.40 m
Bemessungskraft = 36.23 kN/m
Bemessungswiderstand = 74.14 kN/m

Keine Schubbewehrung erforderlich

Ergebnisse

Nr	mue	dTh(mue = 1.0)	Lamellen
[-]	[-]	[kN*m/m]	[-]
1	0.737	83.161	24
2	0.707	86.658	31
3	0.655	96.644	30
4	0.580	111.858	34
5	0.644	168.008	31
6	0.644	161.530	30
7	0.632	162.245	33
8	0.606	168.665	30
9	0.811	60.051	23
10	0.782	67.200	25
11	0.754	72.972	29
12	0.709	83.310	27
13	0.930	14.446	23
14	0.919	15.398	23
15	0.878	21.966	20
16	0.809	33.042	24
17	0.613	84.394	34
18	0.587	85.096	33
19	0.544	89.941	36
20	0.482	98.110	40
21	0.772	79.180	27
22	0.777	74.773	23
23	0.770	74.939	23
24	0.753	78.733	27
25	0.904	23.866	25
26	0.907	22.153	23
27	0.895	24.184	25
28	0.869	29.200	20
29	0.891	17.175	22
30	0.872	19.410	24
31	0.835	24.404	27
32	0.550	151.028	36
33	0.549	147.133	38
34	0.537	147.281	37
35	0.516	150.634	39
36	0.668	74.227	28
37	0.661	72.719	30
38	0.642	74.506	30
39	0.610	78.922	31
40	0.785	29.884	26
41	0.779	28.799	22
42	0.753	30.795	24
43	0.707	35.254	28
44	0.495	66.641	37
45	0.477	65.837	43
46	0.446	67.315	45
47	0.401	70.617	47
48	0.867	37.632	25
49	0.872	35.332	23
50	0.871	35.200	22
51	0.863	36.790	24
52	0.933	13.367	20
53	0.941	11.424	20
54	0.941	11.260	22
55	0.933	12.512	23
56	0.760	33.440	25
57	0.750	34.407	24
58	0.654	83.289	31
59	0.655	81.166	32
60	0.650	81.044	29
61	0.639	82.511	31
62	0.759	40.536	26
63	0.764	38.735	26
64	0.760	38.583	25
65	0.749	39.743	25
66	0.733	28.373	28
67	0.729	28.206	30

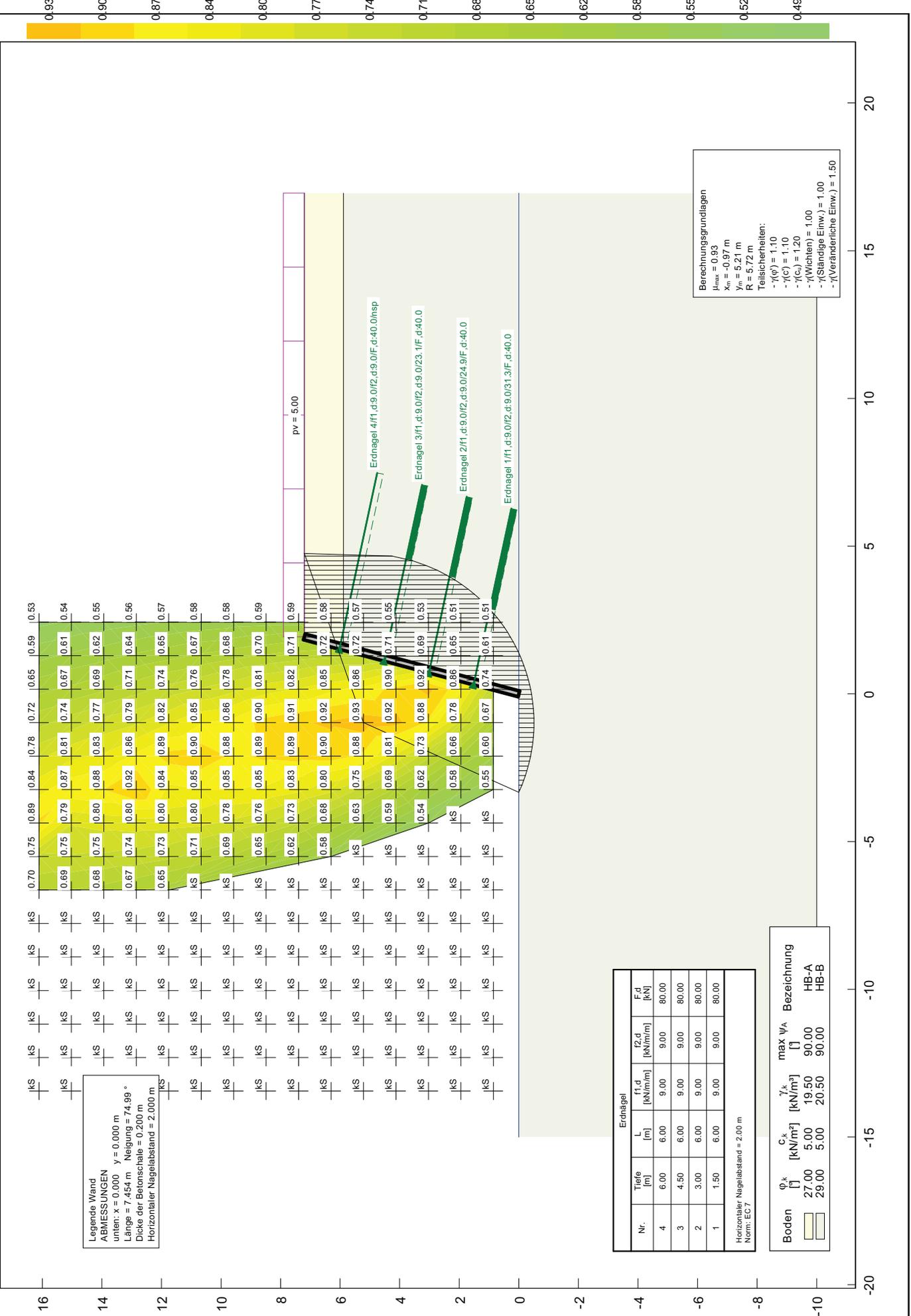
68	0.715	29.119	26
69	0.438	118.852	49
70	0.435	117.182	45
71	0.427	117.074	44
72	0.412	118.374	51
73	0.537	62.457	37
74	0.537	60.867	40
75	0.529	60.733	38
76	0.513	61.757	35
77	0.664	26.572	29
78	0.668	25.212	31
79	0.660	25.062	30
80	0.641	25.880	30
81	0.490	29.909	44
82	0.488	28.891	41
83	0.474	28.779	36
84	0.448	29.391	43

Ungünstigster Gleitkörper 53

Nr	mue	dTh(mue = 1.0)	Lamellen
[-]	[-]	[kN*m/m]	[-]
53	0.941	11.424	20

Koordinaten (Gleitkörper 53)

Nr	x[m]	y[m]	Nr	x[m]	y[m]	Nr	x[m]	y[m]
1	0.268	1.000	2	5.195	5.238	3	6.747	7.200



Legende Wand
 ABMESSUNGEN
 unten: $x = 0,000$ $y = 0,000$ m
 Länge = 7,454 m Neigung = 74,99°
 Dicke der Betonschale = 0,200 m
 Horizontaler Nagelabstand = 2,000 m

Erdnagel					
Nr.	Tiefe [m]	L [m]	$f_{1,d}$ [kN/m/m]	$f_{2,d}$ [kN/m/m]	F_d [kN]
4	6,00	6,00	9,00	9,00	80,00
3	4,50	6,00	9,00	9,00	80,00
2	3,00	6,00	9,00	9,00	80,00
1	1,50	6,00	9,00	9,00	80,00

Horizontaler Nagelabstand = 2,00 m
 Norm: EC7

Boden			Bezeichnung		
ϕ_k [°]	c_k [kN/m²]	γ_k [kN/m³]	$\max w_A$ [%]	I_f [%]	
27,00	5,00	19,50	90,00	90,00	HB-A
29,00	5,00	20,50	90,00	90,00	HB-B

Berechnungsgrundlagen
 $I_{max} = 0,93$
 $x_m = -0,97$ m
 $y_m = 5,21$ m
 $R = 5,72$ m
 Teilsicherheiten:
 $\gamma(\phi) = 1,10$
 $\gamma(c) = 1,10$
 $\gamma(\gamma_s) = 1,20$
 $\gamma(\text{Wichten}) = 1,00$
 $\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1,00$
 $\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1,50$

0,93 0,90 0,87 0,84 0,80 0,77 0,74 0,71 0,68 0,65 0,62 0,58 0,55 0,52 0,49

16 14 12 10 8 6 4 2 0 -2 -4 -6 -8 -10 -15 -20

0 5 10 15 20

**Böschungsberechnung nach EC 7
mit Kreisgleitflächen**

Parameterliste

phi [°] = Reibungswinkel
 c [kN/m²] = Kohäsion
 gamma [kN/m³] = Wichte
 max psi(A) [°] = Winkel zwischen der Gleitrichtung des Bruchmechanismus und dem Zugglied
 mue [-] = Ausnutzungsgrad
 xm,ym [m] = x,y-Wert des Gleitkreismittelpunktes
 rad [m] = Radius des Gleitkreises

Teilsicherheiten: (GEO-3)

- gam(phi) = 1.10
- gam(c') = 1.10
- gam(cu) = 1.20
- gam(Wichten) = 1.00
- gam(Ständige Einw.) = 1.00
- gam(Veränderliche Einw.) = 1.50 (GEO-2)

Bewegungsrichtung des Gleitkörpers nach links

Koordinaten der Geländepunkte

Nr.	x	y	Nr.	x	y	Nr.	x	y	Nr.	x	y
[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]
1	-15.000	0.000	2	0.000	0.000	3	1.930	7.200	4	16.950	7.200

Charakteristische Bodenkennwerte

Boden	φ _k	c _k	γ _k	max psi(A)	dräniert	Bezeichnung
[-]	[°]	[kN/m ²]	[kN/m ³]	[°]		
1	27.00	5.00	19.50	90.00	ja	HB-A
2	29.00	5.00	20.50	90.00	ja	HB-B

Bemessungs-Bodenkennwerte

Boden	φ _d	c _d	γ _d	dräniert	Bezeichnung
[-]	[°]	[kN/m ²]	[kN/m ³]		
1	24.85	4.55	19.50	ja	HB-A
2	26.74	4.55	20.50	ja	HB-B

Koordinaten der Schichten und Bodennummern

Nr.	x(links)	y(links)	x(rechts)	y(rechts)	Boden-Nr.
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	
1	1.579	5.890	16.950	5.890	1
2	-15.000	-10.000	16.950	-10.000	2

Koordinaten des Porenwasserdruck-Polygonzuges

Nr.	x	y	Nr.	x	y
[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]
1	-15.000	0.000	2	16.950	0.000

Verkehrslasten

Nr.	Größe(links)	Größe(rechts)	x(links)	x(rechts)	y
[-]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[m]	[m]	[m]
1	5.00	5.00	1.93	16.95	7.20

Erdnägel

f1,d [kN/m/m] = Bemessungswert der Mantelreibung am Kopf

f2,d [kN/m/m] = Bemessungswert der Mantelreibung am Fuß

berechnet aus Mantelreibung [kN/m²] / gamma(Herausziehen) · Umfang Verpresskörper [m] / Erdnagelabstand [m]

F,d [kN/m] = aufnehmbare Bemessungskraft

Nr.	x1	y1	x2	y2	f1,d	f2,d	F,d
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kN/m/m]	[kN/m/m]	[kN/m/m]
1	0.40	1.50	6.27	0.25	9.00	9.00	40.00
2	0.80	3.00	6.67	1.75	9.00	9.00	40.00
3	1.21	4.50	7.08	3.25	9.00	9.00	40.00
4	1.61	6.00	7.48	4.75	9.00	9.00	40.00

Wasserstand vor der Böschung links [m] = -5.00

Wasserstand vor der Böschung rechts [m] = -5.00

gamma Wasser [kN/m³] = 10.000

53	-10.0407	8.4830	Kein Schnitt mit Gelände										
54	-10.0407	7.3934	Kein Schnitt mit Gelände										
55	-10.0407	6.3037	Kein Schnitt mit Gelände										
56	-10.0407	5.2141	Kein Schnitt mit Gelände										
57	-10.0407	4.1244	Kein Schnitt mit Gelände										
58	-10.0407	3.0347	Kein Schnitt mit Gelände										
59	-10.0407	1.9451	Kein Schnitt mit Gelände										
60	-10.0407	0.8554	Kein Schnitt mit Gelände										
61	-8.9074	16.1106	Kein Schnitt mit Gelände										
62	-8.9074	15.0209	Kein Schnitt mit Gelände										
63	-8.9074	13.9313	Kein Schnitt mit Gelände										
64	-8.9074	12.8416	Kein Schnitt mit Gelände										
65	-8.9074	11.7520	Kein Schnitt mit Gelände										
66	-8.9074	10.6623	Kein Schnitt mit Gelände										
67	-8.9074	9.5727	Kein Schnitt mit Gelände										
68	-8.9074	8.4830	Kein Schnitt mit Gelände										
69	-8.9074	7.3934	Kein Schnitt mit Gelände										
70	-8.9074	6.3037	Kein Schnitt mit Gelände										
71	-8.9074	5.2141	Kein Schnitt mit Gelände										
72	-8.9074	4.1244	Kein Schnitt mit Gelände										
73	-8.9074	3.0347	Kein Schnitt mit Gelände										
74	-8.9074	1.9451	Kein Schnitt mit Gelände										
75	-8.9074	0.8554	Kein Schnitt mit Gelände										
76	-7.7740	16.1106	Kein Schnitt mit Gelände										
77	-7.7740	15.0209	Kein Schnitt mit Gelände										
78	-7.7740	13.9313	Kein Schnitt mit Gelände										
79	-7.7740	12.8416	Kein Schnitt mit Gelände										
80	-7.7740	11.7520	Kein Schnitt mit Gelände										
81	-7.7740	10.6623	Kein Schnitt mit Gelände										
82	-7.7740	9.5727	Kein Schnitt mit Gelände										
83	-7.7740	8.4830	Kein Schnitt mit Gelände										
84	-7.7740	7.3934	Kein Schnitt mit Gelände										
85	-7.7740	6.3037	Kein Schnitt mit Gelände										
86	-7.7740	5.2141	Kein Schnitt mit Gelände										
87	-7.7740	4.1244	Kein Schnitt mit Gelände										
88	-7.7740	3.0347	Kein Schnitt mit Gelände										
89	-7.7740	1.9451	Kein Schnitt mit Gelände										
90	-7.7740	0.8554	Kein Schnitt mit Gelände										
91	-6.6407	16.1106		17.7623	50	0.7005	7635.625	10900.781	10900.8	0.0	7635.6	0.0	
92	-6.6407	15.0209		16.8683	50	0.6937	7227.855	10418.944	10418.9	0.0	7227.9	0.0	
93	-6.6407	13.9313		15.9986	50	0.6832	6829.069	9996.254	9996.3	0.0	6829.1	0.0	
94	-6.6407	12.8416		15.1573	50	0.6672	6441.769	9654.344	9654.3	0.0	6441.8	0.0	
95	-6.6407	11.7520		14.3495	51	0.6479	6060.365	9354.304	9354.3	0.0	6060.4	0.0	
96	-6.6407	10.6623	Kein Schnitt mit Gelände										
97	-6.6407	9.5727	Kein Schnitt mit Gelände										
98	-6.6407	8.4830	Kein Schnitt mit Gelände										
99	-6.6407	7.3934	Kein Schnitt mit Gelände										
100	-6.6407	6.3037	Kein Schnitt mit Gelände										
101	-6.6407	5.2141	Kein Schnitt mit Gelände										
102	-6.6407	4.1244	Kein Schnitt mit Gelände										
103	-6.6407	3.0347	Kein Schnitt mit Gelände										
104	-6.6407	1.9451	Kein Schnitt mit Gelände										
105	-6.6407	0.8554	Kein Schnitt mit Gelände										
106	-5.5073	16.1106		17.1569	50	0.7533	7235.519	9605.264	9605.3	0.0	7235.5	0.0	
107	-5.5073	15.0209		16.2295	50	0.7548	6842.061	9064.603	9064.6	0.0	6842.1	0.0	
108	-5.5073	13.9313		15.3236	50	0.7519	6436.696	8560.844	8560.8	0.0	6436.7	0.0	
109	-5.5073	12.8416		14.4430	50	0.7450	6037.606	8104.401	8104.4	0.0	6037.6	0.0	
110	-5.5073	11.7520		13.5928	50	0.7327	5639.162	7696.375	7696.4	0.0	5639.2	0.0	
111	-5.5073	10.6623		12.7790	51	0.7124	5243.913	7361.008	7361.0	0.0	5243.9	0.0	
112	-5.5073	9.5727		12.0090	51	0.6894	4858.588	7047.981	7048.0	0.0	4858.6	0.0	
113	-5.5073	8.4830		11.2917	51	0.6547	4478.414	6840.752	6840.8	0.0	4478.4	0.0	
114	-5.5073	7.3934		10.6379	52	0.6239	4140.395	6636.511	6636.5	0.0	4140.4	0.0	
115	-5.5073	6.3037		10.2981	54	0.5826	4199.016	7207.021	7207.0	0.0	4199.0	0.0	
116	-5.5073	5.2141	Kein Schnitt mit Gelände										
117	-5.5073	4.1244	Kein Schnitt mit Gelände										
118	-5.5073	3.0347	Kein Schnitt mit Gelände										
119	-5.5073	1.9451	Kein Schnitt mit Gelände										
120	-5.5073	0.8554	Kein Schnitt mit Gelände										
121	-4.3740	16.1106		16.6068	50	0.8899	6789.493	7629.438	7629.4	0.0	6789.5	0.0	
122	-4.3740	15.0209		15.6469	50	0.7922	6406.700	8086.827	8086.8	0.0	6406.7	0.0	
123	-4.3740	13.9313		14.7050	50	0.8005	6025.968	7528.141	7528.1	0.0	6026.0	0.0	
124	-4.3740	12.8416		13.7850	50	0.8047	5646.629	7017.270	7017.3	0.0	5646.6	0.0	

125	-4.3740	11.7520	12.8915	50	0.8027	5251.940	6543.012	6543.0	0.0	5251.9	0.0
126	-4.3740	10.6623	12.0303	50	0.7963	4848.587	6088.603	6088.6	0.0	4848.6	0.0
127	-4.3740	9.5727	11.2090	50	0.7789	4444.858	5706.217	5706.2	0.0	4444.9	0.0
128	-4.3740	8.4830	10.4369	51	0.7565	4054.446	5359.517	5359.5	0.0	4054.4	0.0
129	-4.3740	7.3934	9.7258	51	0.7256	3668.692	5056.205	5056.2	0.0	3668.7	0.0
130	-4.3740	6.3037	9.0900	52	0.6796	3301.235	4857.912	4857.9	0.0	3301.2	0.0
131	-4.3740	5.2141	8.7836	54	0.6307	3321.538	5266.073	5266.1	0.0	3321.5	0.0
132	-4.3740	4.1244	8.8134	56	0.5875	3773.737	6423.458	6423.5	0.0	3773.7	0.0
133	-4.3740	3.0347	8.0369	60	0.5391	2959.072	5488.977	5489.0	0.0	2959.1	0.0
134	-4.3740	1.9451									
135	-4.3740	0.8554									
136	-3.2407	16.1106	16.3432	50	0.8421	6913.886	8210.676	8210.7	0.0	6913.9	0.0
137	-3.2407	15.0209	15.3544	50	0.8739	6515.670	7456.024	7456.0	0.0	6515.7	0.0
138	-3.2407	13.9313	14.1504	50	0.8837	5606.146	6344.194	6344.2	0.0	5606.1	0.0
139	-3.2407	12.8416	13.1917	50	0.9181	5226.570	5692.652	5692.7	0.0	5226.6	0.0
140	-3.2407	11.7520	12.4893	50	0.8436	5283.560	6263.400	6263.4	0.0	5283.6	0.0
141	-3.2407	10.6623	11.3457	50	0.8515	4452.212	5228.380	5228.4	0.0	4452.2	0.0
142	-3.2407	9.5727	10.4708	50	0.8528	4056.641	4756.991	4757.0	0.0	4056.6	0.0
143	-3.2407	8.4830	9.6397	50	0.8468	3657.224	4318.944	4318.9	0.0	3657.2	0.0
144	-3.2407	7.3934	8.8649	51	0.8284	3256.834	3931.378	3931.4	0.0	3256.8	0.0
145	-3.2407	6.3037	8.1623	51	0.7982	2863.013	3586.763	3586.8	0.0	2863.0	0.0
146	-3.2407	5.2141	7.5522	52	0.7462	2511.384	3365.730	3365.7	0.0	2511.4	0.0
147	-3.2407	4.1244	7.0584	54	0.6883	2230.483	3240.442	3240.4	0.0	2230.5	0.0
148	-3.2407	3.0347	6.9372	58	0.6173	2323.677	3764.417	3764.4	0.0	2323.7	0.0
149	-3.2407	1.9451	7.4089	62	0.5760	3093.841	5371.402	5371.4	0.0	3093.8	0.0
150	-3.2407	0.8554	6.7247	68	0.5496	2440.468	4440.299	4440.3	0.0	2440.5	0.0
151	-2.1073	16.1106	16.1373	50	0.7820	7008.817	8962.627	8962.6	0.0	7008.8	0.0
152	-2.1073	15.0209	15.1225	50	0.8126	6571.430	8087.313	8087.3	0.0	6571.4	0.0
153	-2.1073	13.9313	13.8931	50	0.8261	5667.336	6860.332	6860.3	0.0	5667.3	0.0
154	-2.1073	12.8416	12.9004	50	0.8591	5250.988	6112.190	6112.2	0.0	5251.0	0.0
155	-2.1073	11.7520	11.9247	50	0.8948	4836.153	5404.883	5404.9	0.0	4836.2	0.0
156	-2.1073	10.6623	10.7372	50	0.9031	4035.561	4468.674	4468.7	0.0	4035.6	0.0
157	-2.1073	9.5727	9.8082	50	0.8773	3651.950	4162.578	4162.6	0.0	3651.9	0.0
158	-2.1073	8.4830	8.9156	50	0.8894	3262.125	3667.781	3667.8	0.0	3262.1	0.0
159	-2.1073	7.3934	8.0716	50	0.8943	2861.777	3199.915	3199.9	0.0	2861.8	0.0
160	-2.1073	6.3037	7.2930	50	0.8968	2466.023	2749.863	2749.9	0.0	2466.0	0.0
161	-2.1073	5.2141	6.6030	51	0.8771	2100.921	2395.348	2395.3	0.0	2100.9	0.0
162	-2.1073	4.1244	6.0321	52	0.8114	1796.173	2213.692	2213.7	0.0	1796.2	0.0
163	-2.1073	3.0347	5.6166	56	0.7322	1583.664	2162.923	2162.9	0.0	1583.7	0.0
164	-2.1073	1.9451	5.3928	60	0.6570	1501.117	2284.953	2285.0	0.0	1501.1	0.0
165	-2.1073	0.8554	5.8109	67	0.6018	1983.522	3296.145	3296.1	0.0	1983.5	0.0
166	-0.9740	16.1106	15.9920	50	0.7163	7075.881	9877.749	9877.7	0.0	7075.9	0.0
167	-0.9740	15.0209	14.9548	50	0.7420	6611.290	8910.580	8910.6	0.0	6611.3	0.0
168	-0.9740	13.9313	13.9253	50	0.7692	6135.469	7976.477	7976.5	0.0	6135.5	0.0
169	-0.9740	12.8416	12.6822	50	0.7854	5237.489	6668.882	6668.9	0.0	5237.5	0.0
170	-0.9740	11.7520	11.6716	50	0.8172	4794.086	5866.329	5866.3	0.0	4794.1	0.0
171	-0.9740	10.6623	10.6762	50	0.8503	4350.374	5116.333	5116.3	0.0	4350.4	0.0
172	-0.9740	9.5727	9.4693	50	0.8620	3567.973	4139.367	4139.4	0.0	3568.0	0.0
173	-0.9740	8.4830	8.5184	50	0.8965	3148.670	3512.170	3512.2	0.0	3148.7	0.0
174	-0.9740	7.3934	7.3678	50	0.9117	2459.676	2697.767	2697.8	0.0	2459.7	0.0
175	-0.9740	6.3037	6.5054	50	0.9195	2072.436	2253.885	2253.9	0.0	2072.4	0.0
176	-0.9740	5.2141	5.7212	50	0.9310	1707.245	1833.779	1833.8	0.0	1707.2	0.0
177	-0.9740	4.1244	5.0516	51	0.9244	1396.995	1511.299	1511.3	0.0	1397.0	0.0
178	-0.9740	3.0347	4.5475	53	0.8781	1168.799	1331.044	1331.0	0.0	1168.8	0.0
179	-0.9740	1.9451	4.2680	58	0.7800	1053.063	1350.013	1350.0	0.0	1053.1	0.0
180	-0.9740	0.8554	4.2574	65	0.6710	1084.690	1616.449	1616.4	0.0	1084.7	0.0
181	0.1594	16.1106	16.1189	50	0.6530	7603.687	11644.021	11644.0	0.0	7603.7	0.0
182	0.1594	15.0209	15.0659	50	0.6708	7090.926	10570.218	10570.2	0.0	7090.9	0.0
183	0.1594	13.9313	14.0179	50	0.6908	6567.719	9507.220	9507.2	0.0	6567.7	0.0
184	0.1594	12.8416	12.7594	50	0.7138	5616.278	7868.197	7868.2	0.0	5616.3	0.0
185	0.1594	11.7520	11.7226	50	0.7384	5109.291	6919.828	6919.8	0.0	5109.3	0.0
186	0.1594	10.6623	10.6956	50	0.7594	4606.120	6065.408	6065.4	0.0	4606.1	0.0
187	0.1594	9.5727	9.6815	50	0.7813	4100.355	5248.414	5248.4	0.0	4100.4	0.0
188	0.1594	8.4830	8.4555	50	0.8074	3294.560	4080.351	4080.4	0.0	3294.6	0.0
189	0.1594	7.3934	7.4803	50	0.8219	2813.521	3423.031	3423.0	0.0	2813.5	0.0
190	0.1594	6.3037	6.3056	50	0.8451	2103.864	2489.456	2489.5	0.0	2103.9	0.0
191	0.1594	5.2141	5.1822	50	0.8623	1492.390	1730.659	1730.7	0.0	1492.4	0.0
192	0.1594	4.1244	4.1498	50	0.8952	1002.931	1120.311	1120.3	0.0	1002.9	0.0
193	0.1594	3.0347	3.5188	50	0.9242	776.159	839.839	839.8	0.0	776.2	0.0
194	0.1594	1.9451	3.1492	54	0.8581	656.932	765.528	765.5	0.0	656.9	0.0
195	0.1594	0.8554	3.1349	63	0.7375	672.879	912.325	912.3	0.0	672.9	0.0
196	1.2927	16.1106	16.6997	50	0.5908	9100.852	15404.447	15404.4	0.0	9100.9	0.0

197	1.2927	15.0209	15.6399	50	0.6057	8464.585	13975.309	13975.3	0.0	8464.6	0.0
198	1.2927	13.9313	14.5835	50	0.6204	7825.909	12615.260	12615.3	0.0	7825.9	0.0
199	1.2927	12.8416	13.5313	50	0.6365	7199.927	11312.033	11312.0	0.0	7199.9	0.0
200	1.2927	11.7520	12.4843	50	0.6522	6555.368	10051.720	10051.7	0.0	6555.4	0.0
201	1.2927	10.6623	11.4436	50	0.6683	5907.977	8839.724	8839.7	0.0	5908.0	0.0
202	1.2927	9.5727	10.1925	50	0.6836	4915.865	7191.546	7191.5	0.0	4915.9	0.0
203	1.2927	8.4830	8.9444	50	0.6985	3983.272	5702.713	5702.7	0.0	3983.3	0.0
204	1.2927	7.3934	7.9285	50	0.7106	3377.235	4752.441	4752.4	0.0	3377.2	0.0
205	1.2927	6.3037	6.9327	50	0.7179	2773.222	3863.103	3863.1	0.0	2773.2	0.0
206	1.2927	5.2141	5.9685	50	0.7166	2197.027	3065.977	3066.0	0.0	2197.0	0.0
207	1.2927	4.1244	4.8216	50	0.7074	1500.257	2120.710	2120.7	0.0	1500.3	0.0
208	1.2927	3.0347	4.0222	50	0.6920	1108.304	1601.623	1601.6	0.0	1108.3	0.0
209	1.2927	1.9451	2.9939	51	0.6546	630.069	962.529	962.5	0.0	630.1	0.0
210	1.2927	0.8554	2.9128	59	0.6064	627.715	1035.143	1035.1	0.0	627.7	0.0
211	2.4260	16.1106	16.9074	50	0.5287	9470.931	17914.701	17914.7	0.0	9470.9	0.0
212	2.4260	15.0209	16.2318	50	0.5410	9755.054	18031.761	18031.8	0.0	9755.1	0.0
213	2.4260	13.9313	15.1713	50	0.5506	9010.891	16364.995	16365.0	0.0	9010.9	0.0
214	2.4260	12.8416	14.1139	50	0.5605	8281.755	14776.033	14776.0	0.0	8281.8	0.0
215	2.4260	11.7520	12.8577	50	0.5694	7124.065	12511.734	12511.7	0.0	7124.1	0.0
216	2.4260	10.6623	11.6003	50	0.5780	6037.543	10446.170	10446.2	0.0	6037.5	0.0
217	2.4260	9.5727	10.5504	50	0.5846	5332.564	9121.780	9121.8	0.0	5332.6	0.0
218	2.4260	8.4830	9.5062	50	0.5891	4623.638	7848.926	7848.9	0.0	4623.6	0.0
219	2.4260	7.3934	8.4693	50	0.5886	3901.590	6628.073	6628.1	0.0	3901.6	0.0
220	2.4260	6.3037	7.6627	50	0.5831	3441.859	5902.703	5902.7	0.0	3441.9	0.0
221	2.4260	5.2141	7.1052	50	0.5700	3200.065	5614.402	5614.4	0.0	3200.1	0.0
222	2.4260	4.1244	6.3596	51	0.5508	2702.945	4907.029	4907.0	0.0	2702.9	0.0
223	2.4260	3.0347	6.6154	52	0.5300	3215.625	6066.724	6066.7	0.0	3215.6	0.0
224	2.4260	1.9451	6.7834	53	0.5128	3612.627	7045.539	7045.5	0.0	3612.6	0.0
225	2.4260	0.8554	7.2646	58	0.5086	4450.607	8751.502	8751.5	0.0	4450.6	0.0

Ungünstigster Gleitkreis

Nr	xm	ym	Radius	Lamellen	mue	Zähler	Nenner	M(Ti)	M(R)	M(Gi)	M(S)
[-]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[kN*m/m]	[kN*m/m]	[kN*m/m]	[kN*m/m]	[kN*m/m]	[kN*m/m]
176	-0.9740	5.2141	5.7212	50	0.9310	1707.245	1833.779	1833.8	0.0	1707.2	0.0

Legende Wand
ABMESSUNGEN
 unten: $x = 0,000$ m $y = 0,000$ m
 Länge = 7,454 m Neigung = 74,99 °
 Dicke der Betonschale = 0,200 m
 Horizontaler Nagelabstand = 2,000 m
GRUNDDATEN
 $H_{1,0/9,0} / H_{1,0/0} =$ Erddruck (mit $\phi = 111,27 / 101,98$ kN/m
 Neigung Hinterkante Wand = 76,05 °
 Abmind. Erddruck wg. Neigung Hinterkante Wand = 0,733
 $V_{0,0/1,0} / V_{1,0/0} = 863,83 / 835,63$ kN/m
 Momente um Mittelpunkt Wandschle: $M_{0,0/1,0} / M_{1,0/0} = 267,04 / 244,75$ kN·m/m
 $M_{0,0/1,0} / M_{1,0/0} = 267,04 / 244,75$ (aus H-Kräften)
 $M_{0,0/1,0} / M_{1,0/0} = -820,24 / -767,81$ kN·m/m
 $b = 5,78$ m
 $\phi_{1,0} = 29,0$ °
 Teilsicherheiten (GZ 1B):
 γ_{ϕ} (Ständige Einw.) = 1,25
 γ_{ϕ} (Veränderliche Einw.) = 1,30
GLEITEN
 $\gamma(Gleit) = 1,10$
 $U_{0,0/1,0} / U_{1,0/0} (Gleit) = 0,30 / 0,28$
KIPPSICHERHEIT
 Exzentrizität $e_{0,0/1,0} / e_{1,0/0} = -0,640 / -0,626$ m
 zu Exzentrizität = 0,964 m = b/6
 Kippsicherheitszahl erfüllt
 Kippsicherheitszahl erfüllt
GRUNDBRUCH für ebenes Gelände
 $c_k = 5,0$ kN/m²
 $\gamma_{1,k} = 20,5$ kN/m³
 $\gamma(Grundbruch) = 1,30$
 $U_{0,0/1,0} / U_{1,0/0} (Grundbruch) = 0,32 / 0,30$
DURCHSTANZNACHWEIS
 Bemessung mit Nagelkraft $O_{0,d} = 87,06$ kN
 Erddruck $e_{0,d} = 18,66$ kN/m²
 Breite = Höhe (Nagelplatte) = 0,20 m
 Beton: C 25/30 / Stahl: BSt 500
 Dicke der Betonschale = 0,200 m
 Vorhandene Biegebewehrung = 2,57 cm²/m
 Nutzbare Höhe = 0,170 m
 Bemessungskraft = 36,23 kN/m
 Bemessungswiderstand = 74,14 kN/m
 Keine Schubbewehrung erforderlich

Erdröhgel										
Nr.	Tiefe [m]	L [m]	lt [m]	lt ₀ [m]	lt ₁ [m]	lt ₂ [m]	lt ₃ [m]	lt ₄ [m]	lt ₅ [m]	lt ₆ [m]
4	0,00	5,00	9,00	48,88	1,25	37	74,45	74,45	100,00	100,00
3	4,50	5,00	9,00	56,05	1,20	36	89,04	89,04	100,00	100,00
2	3,00	5,00	9,00	64,23	1,03	39	89,04	84,23	100,00	100,00
1	1,50	5,00	9,00	80,29	1,03	39	87,06	87,06	100,00	100,00

F_a = Kraft aus Erddruck auf Außenhaut
 F_b = Kraft aus Bruchmechanismus (durch 1,geleilt) ($\phi = 1,1$ mäß)
 Horizontaler Nagelabstand = 2,00 m

Boden	ϕ_k [°]	c_k [kN/m ²]	γ_k [kN/m ³]	Bezeichnung
	27,00	5,00	19,50	HB-A
	29,00	5,00	20,50	HB-B

16

14

12

10

8

6

4

2

0

-2

-4

-6

-8

-10

-15

-20



Berechnungsgrundlagen
 Teilsicherheiten:
 $-\gamma(\phi) = 1,10$
 $-\gamma(C) = 1,10$
 $-\gamma(G) = 1,20$
 $-\gamma(\text{Wichten}) = 1,00$
 $-\gamma(\text{Ständige Einw.}) = 1,00$
 $-\gamma(\text{Veränderliche Einw.}) = 1,50$
 Gleitkörper Nr. 33; $\mu = 0,98$
 mit Scherfestigkeit in den Lamellenseiten

20

15

10

5

0

-5

-10

-15

-20

Böschungsberechnung nach EC 7
mit Blockgleitmethode

Parameterliste

phi [°] = Reibungswinkel

c [kN/m²] = Kohäsion

gamma [kN/m³] = Wichte

max psi(A) [°] = Winkel zwischen der Gleitrichtung des Bruchmechanismus und dem Zugglied

mue [-] = Ausnutzungsgrad

dTh [kN/mm] = erforderliche horizontale Zusatzkraft, um für "eta bzw mue = 1.0" das Krafteck zu schliessen

Teilsicherheiten: (GEO-3)

- gam(phi) = 1.10

- gam(c') = 1.10

- gam(cu) = 1.20

- gam(Wichten) = 1.00

- gam(Ständige Einw.) = 1.00

- gam(Veränderliche Einw.) = 1.50 (GEO-2)

Bewegungsrichtung des Gleitkörpers nach links

Koordinaten der Geländepunkte

Nr.	x	y	Nr.	x	y	Nr.	x	y	Nr.	x	y
[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]
1	-15.000	0.000	2	0.000	0.000	3	1.930	7.200	4	16.950	7.200

Scherfestigkeit in den Lamellenseiten berücksichtigt.

Charakteristische Bodenkennwerte

Boden	φ _k	c _k	γ _k	max psi(A)	dräniert	Bezeichnung
[-]	[°]	[kN/m ²]	[kN/m ³]	[°]		
1	27.00	5.00	19.50	90.00	ja	HB-A
2	29.00	5.00	20.50	90.00	ja	HB-B

Bemessungs-Bodenkennwerte

Boden	φ _d	c _d	γ _d	dräniert	Bezeichnung
[-]	[°]	[kN/m ²]	[kN/m ³]		
1	24.85	4.55	19.50	ja	HB-A
2	26.74	4.55	20.50	ja	HB-B

Koordinaten der Schichten und Bodennummern

Nr.	x(links)	y(links)	x(rechts)	y(rechts)	Boden-Nr.
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	
1	1.579	5.890	16.950	5.890	1
2	-15.000	-10.000	16.950	-10.000	2

Koordinaten des Porenwasserdruck-Polygonzuges

Nr.	x	y	Nr.	x	y
[-]	[m]	[m]	[-]	[m]	[m]
1	-15.000	0.000	2	16.950	0.000

Verkehrslasten

Nr.	Größe(links)	Größe(rechts)	x(links)	x(rechts)	y
[-]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[m]	[m]	[m]
1	5.00	5.00	1.93	16.95	7.20

Erdnägel

f1,d [kN/m/m] = Bemessungswert der Mantelreibung am Kopf

f2,d [kN/m/m] = Bemessungswert der Mantelreibung am Fuß

berechnet aus Mantelreibung [kN/m²] / gamma(Herausziehen) · Umfang Verpresskörper [m] / Erdnagelabstand [m]

F,d [kN/m] = aufnehmbare Bemessungskraft

Nr.	x1	y1	x2	y2	f1,d	f2,d	F,d
[-]	[m]	[m]	[m]	[m]	[kN/m/m]	[kN/m/m]	[kN/m/m]
1	0.40	1.50	5.78	0.36	9.00	9.00	80.00
2	0.80	3.00	6.18	1.86	9.00	9.00	80.00
3	1.21	4.50	6.59	3.36	9.00	9.00	80.00
4	1.61	6.00	6.99	4.86	9.00	9.00	80.00

Wasserstand vor der Böschung links [m] = -5.00

Wasserstand vor der Böschung rechts [m] = -5.00

gamma Wasser [kN/m³] = 10.000

Wand

Abmessungen

unten: $x = 0.000$ $y = 0.000$ m
Länge = 7.454 m Neigung = 74.99 °
Dicke der Betonschale = 0.200 m
Horizontaler Nagelabstand = 2.000 m

Grunddaten

H,k,g+q = Erddruck = 111.27 kN/m
H,k,g = Erddruck = 101.98 kN/m
Neigung Hinterkante Wand = 76.05 °
Abminderung Erddruck infolge Neigung Hinterkante Wand = 0.733
V,k,g+q = 863.83 kN/m
V,k,g = 835.63 kN/m
Momente um Mittelpunkt Wandsohle:
M,k,g+q (aus H-Kräften) = 267.04 kN*m/m
M,k,g (aus H-Kräften) = 244.75 kN*m/m
M,k,g+q (aus V-Kräften) = -820.24 kN*m/m
M,k,g (aus V-Kräften) = -767.81 kN*m/m
b = 5.78 m
 $\phi_{i,k} = 29.0$ °

Gleitsicherheit

$\gamma_{\text{Gleit}} = 1.10$
 $\mu_{e,g+q} \text{ (Gleit)} = 0.30$
 $\mu_{e,g} \text{ (Gleit)} = 0.28$

Kippsicherheit

Exzentrizität e,g+q / e,g = -0.640 / -0.626 m
zul Exzentrizität = 0.964 m = b/6
Kippsicherheit,g+q erfüllt
Kippsicherheit,g erfüllt

Grundbruchsicherheit für ebenes Gelände

$\phi_{i,k} = 29.0$ °
c,k = 5.0 kN/m²
 $\gamma_{2,k} = 20.5$ kN/m³
 $\gamma_{\text{Grundbruch}} = 1.30$
 $\mu_{e,g+q} \text{ (Grundbruch)} = 0.32$
 $\mu_{e,g} \text{ (Grundbruch)} = 0.30$

Maximale Kräfte: Erdnägel

Nr	Tiefe	L	f1,d	f2,d	Fg	eta	GK-Nr	Fa	cal.F	F,d
[-]	[m]	[m]	[kN/m/m]	[kN/m/m]	[kN]	[-]	[-]	[kN]	[kN]	[kN]
4	6.00	5.50	9.00	9.00	48.88	1.25	37	75.45	75.45	160.00
3	4.50	5.50	9.00	9.00	55.05	1.20	36	58.04	58.04	160.00
2	3.00	5.50	9.00	9.00	64.23	1.03	59	58.04	64.23	160.00
1	1.50	5.50	9.00	9.00	80.29	1.03	59	87.06	87.06	160.00

Fa = Kraft aus Erddruck auf Außenhaut

Fg = Kraft aus Bruchmechanismus (durch eta geteilt)

Horizontaler Nagelabstand = 2.00 m

Durchstanznachweis

Bemessung mit Nagelkraft Q,d = 87.06 kN
E,k,g+q (ohne c) = 130.49 kN/m
E,k,g (ohne c) = 120.73 kN/m
Erddruck e,d [kN/m²] = $0.85 \cdot (1.250 \cdot 120.73 + 1.300 \cdot 9.76) / 7.45$
Erddruck e,d = 18.66 kN/m²
aus $0.85 \cdot E$ (ohne c) berechnet.
Breite = Höhe (Nagelplatte) = 0.20 m
Beton: C 25/30
Stahl: BSt 500
Dicke der Betonschale = 0.200 m
Vorhandene Biegebewehrung = 2.57 cm²/m
Nutzbare Höhe = 0.170 m
Umfang = 2.40 m
Bemessungskraft = 36.23 kN/m
Bemessungswiderstand = 74.14 kN/m
Keine Schubbewehrung erforderlich

Ergebnisse

Nr	mue	dTh(mue = 1.0)	Lamellen
[-]	[-]	[kN*m/m]	[-]
1	0.638	230.003	32
2	0.638	220.912	33
3	0.623	222.417	30
4	0.593	232.329	30
5	0.811	82.301	26
6	0.790	88.016	26
7	0.733	109.611	29
8	0.677	127.229	31
9	0.945	15.773	22
10	0.924	20.222	22
11	0.868	32.928	19
12	0.780	52.287	25
13	0.773	106.443	23
14	0.779	99.360	23
15	0.770	100.141	27
16	0.746	107.161	27
17	0.936	21.248	24
18	0.919	25.817	21
19	0.895	32.155	24
20	0.853	43.507	27
21	0.957	9.087	18
22	0.919	16.238	21
23	0.854	28.297	26
24	0.485	119.619	39
25	0.456	120.321	45
26	0.413	125.166	47
27	0.357	133.335	55
28	0.882	44.808	24
29	0.890	40.140	23
30	0.887	40.316	24
31	0.873	44.336	22
32	0.978	5.846	20
33	0.984	4.037	21
34	0.975	6.182	21
35	0.953	11.483	20
36	0.834	30.168	19
37	0.801	35.382	25
38	0.453	189.927	42
39	0.449	186.032	43
40	0.437	186.179	44
41	0.416	189.532	48
42	0.514	116.094	41
43	0.504	114.586	40
44	0.483	116.373	39
45	0.453	120.789	41
46	0.533	72.934	35
47	0.517	71.849	38
48	0.488	73.845	40
49	0.446	78.304	45
50	0.299	101.866	63
51	0.279	101.062	71
52	0.252	102.540	77
53	0.217	105.842	91
54	0.952	14.937	22
55	0.959	12.542	23
56	0.958	12.405	20
57	0.952	14.060	20
58	0.973	6.056	19
59	0.973	5.886	18
60	0.967	7.184	17
61	0.697	51.754	32
62	0.510	125.763	39
63	0.509	123.641	39
64	0.503	123.519	41
65	0.491	124.986	40
66	0.544	83.623	36
67	0.544	81.822	36
68	0.538	81.670	38

69	0.525	82.830	34
70	0.443	70.518	43
71	0.436	70.352	49
72	0.423	71.264	43
73	0.288	157.750	69
74	0.285	156.081	70
75	0.277	155.972	69
76	0.265	157.273	75
77	0.307	104.324	65
78	0.303	102.734	65
79	0.295	102.600	65
80	0.281	103.625	70
81	0.272	69.622	73
82	0.268	68.261	79
83	0.259	68.112	76
84	0.244	68.930	79
85	0.081	65.135	245
86	0.078	64.116	255
87	0.072	64.004	268
88	0.064	64.616	304

Ungünstigster Gleitkörper 33

Nr	mue	dTh(mue = 1.0)	Lamellen
[-]	[-]	[kN*m/m]	[-]
33	0.984	4.037	21

Koordinaten (Gleitkörper 33)

Nr	x[m]	y[m]	Nr	x[m]	y[m]	Nr	x[m]	y[m]
1	0.000	0.000	2	4.793	3.738	3	7.531	7.200