



# DIPLOMARBEIT

## Master Thesis

### **Untersuchungen zur Materialfestigkeit zementgebundener Holzfa- serplatten in Abhängigkeit der Materialfeuchte**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kolbitsch

E206-4

Institut für Hochbau und Technologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Christian Hanisch

0625263/505

Zeillergasse 37/5

A-1170 Wien

Wien, am 29.09.2014



## **Danksagung**

In erster Linie möchte ich Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas KOLBITSCH danken, der es uns ermöglicht hat, diese Diplomarbeit an dem Institut für Hochbau und Technologie gemeinsam zu verfassen.

Mein ganz besonderer Dank gilt hier unseren Betreuern und Freunden Dipl.-Ing. Aleksandar Milkov RADOEVSKI und Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael JAMEK für ihre Unterstützung und Zusammenarbeit schon während der vorangehenden Projektarbeit, während der gesamten Durchführung der Labortätigkeiten im Zuge diese Diplomarbeit und der hervorragenden Betreuung und Korrektur der Diplomarbeit, sowie, dass sie uns stets mit Rat und Tat zur Seite standen.

Des Weiteren geht ein Dankeschön an all meine Freunde, Kollegen und all jene Personen, die mir durch ihre Hilfestellung das Studium erleichtert und zur Erarbeitung diese Diplomarbeit beigetragen haben.

Anschließend mochte ich noch meiner Familie für ihre Unterstützung während meines gesamten Weges hier her danken, ohne sie wäre vieles nicht möglich gewesen. Ein besonderes Dankeschön gilt auch meiner guten Freundin Mia M., die mich immer wieder motiviert und ermutigt hat, sowie Julia, Ruth und Dina.

## Kurzfassung

In kaum einem anderen Gewerbe ist der Konkurrenzkampf derart groß wie im Baugewerbe. Das Bestreben, das günstigste Angebot legen zu können, steht oft im Gegensatz zu dem wirtschaftlichen Erfolg, der für ein langfristiges Gelingen einer Unternehmung von zentraler Bedeutung ist. Um daher wettbewerbsfähig bleiben zu können und dabei eine gleichbleibende Qualität zu garantieren, müssen immer neuere Bauverfahren, Distributionswege und Materialien gefunden werden. Vor allem bei der Suche nach neuen Baustoffen wird auf die Nachhaltigkeit der Ressourcen heutzutage besonders Wert gelegt und ist mittlerweile, da man sich zwangsläufig mit dem Versiegen konventioneller Energieträger abfinden muss, auch oftmals Bestandteil der Ausschreibungen.

Die zementgebundene Holzfaserplatte, welche zu einem Großteil aus dem nachwachsenden und CO<sub>2</sub>-neutralen natürlichen Rohstoff Holz besteht, erfüllt viele der oben genannten Kriterien und stellt somit einen zukunftsweisenden Baustoff in vielen Bereichen der Bauindustrie dar. Diese Platten werden aus Zement, Holz, Wasser und nur einem geringen Anteil an chemischen Zusätzen (< 2%) hergestellt, weisen hohe Festigkeiten bei hoher Flexibilität und gute Wetterbeständigkeit auf und eignen sich aus diesem Grund für den Einsatz als "verlorene Schalelemente" im Hochbau. Bei dem Konzept, das auf "verlorener Schalung" beruht, werden diese als formgebende Elemente vorgefertigt und vor Ort auf der Baustelle nach dem Positionieren nur noch mit Beton verfüllt. Diese Elemente verbleiben nach dem Erstarren des Frischbetons am Bauteil in einem dauerhaften Verbund mit dem Betonkern und bilden nach außen hin eine weiterverarbeitbare Oberfläche.

Die Ihnen hier vorliegende Diplomarbeit hat es sich zum Ziel gesetzt, Ursachen prozessbedingter Schadensfälle zu ergründen und Lösungen für den Einsatz der zementgebundenen Holzfaserplatte zu finden. Dabei wurde die Materialfestigkeit unter dem Einfluss der Plattenfeuchte mit Hilfe von bruchmechanischen Kenngrößen untersucht. Dies erfolgte mittels der in der ÖNORM B 3592 beschriebenen Keilspaltmethode anhand von Würfelproben. Die zementgebundene Holzfaserplatte wurde jeweils so in diese Versuchskörper mit einer Kantenlänge von 15 cm verbaut, dass sowohl der Verbund zwischen Beton und Platte, als auch die Plattenfestigkeit selbst untersucht werden konnte. Nach den Versuchen wurden die Werte für die Verbundrate, die Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  und die spezifische Bruchenergie  $G_F$  berechnet. Die untersuchten Proben wurden in die Gruppen "Normal" und "Wassersättigung" eingeteilt, um die Extremfälle der Plattenfeuchtigkeit zu erhalten. Anhand der bruchmechanischen Werte konnten Erkenntnisse gewonnen werden, die den Einfluss der Plattenfeuchtigkeit auf die Materialfestigkeit und dann weiter auf den Verbund bestätigen konnten.

Weiter wurden Versuche durchgeführt, die den Einfluss unterschiedlicher Verteilung des hydrostatischen Druckes, wie sie durch unterschiedlich hohe Betonierhorizonte entstehen kann, auf die Verbundqualität zeigten. Hierzu wurden unterschiedlich hohe Betonproben präpariert, wobei der Beton einen Verbund mit der zementgebundenen Holzfaserplatte einging. Nach dem Aushärten wurden diese Proben in einem Zugversuch bis zum Versagen beansprucht.

Alle Ergebnisse wiesen eine gewisse Streuung auf, was nicht zuletzt auf die Inhomogenität der zementgebundenen Holzfaserplatte zurückzuführen ist. Dennoch war zu erkennen, dass auf Grund des Vergleiches der bruchmechanischen Kennwerte früherer Versuche und Unterschiede in der Plattenfarbe eine Veränderung der Platte selbst von Charge zu Charge existieren musste. Diese Vermutung konnte mittels des gewählten Verfahrens für die Zementgehaltsanalysen leider weder bestätigt noch widerlegt werden.

## Abstract

In hardly any other profession competition is as high as in construction industry. Pursuance to provide favorable offers is often contrary to economic success, which has crucial importance for a long-term successful outcome of a company. In order to keep up with economic competition and to guarantee consistent quality: new construction methods, distribution channels and materials have to be provided. Nowadays in search of new materials are particularly valued ones that are the most sustainable. Taking to consideration inevitable fact that sources of conventional energy are running low makes sustainable resources even more valuable.

The cement-bonded particleboard which is consistent in major part of renewable CO<sub>2</sub>-neutral raw wood material, fulfills many of the criteria above and by that represents a pioneering building material in many areas of the construction industry. This boards are composed of cement, wood, water and insignificant share of chemical additives (< 2%). They are very flexible, have good weather resistance, and therefore are used as "permanent formwork" in construction. In the approach based on "permanent formwork" this shaping elements are being prefabricated and after being placed as planned at the construction site, they are simply filled with concrete. These elements remain after solidification of the fresh concrete to the component in a permanent bound with the concrete core and form an outwardly further processible surface.

Here presented master thesis has set itself a goal to fathom the causes of cases of damage, and to find a solution in the process of using cement-bonded particleboards. The material strength was examined under the influence of humidity and with a help of consumption mechanical characteristics. This was accomplished by using procedure described in ÖNORM B 3592 Wedge Splitting Test based on cube samples. The cement-bonded particleboard was in each cases installed in this experimental body with an edge length of 15 cm, so that the compound between concrete and plate as well as residents of the plate itself can be examined. According to the experiments, the values of the composite rate notched ultimate tensile strength, and the specific fracture energy were calculated. The investigated samples were divided in "normal" and "water saturation" groups to obtain the extreme cases of the plate moisture. Findings that could confirm the influence of the strength of the plates on the materials strength and composite could be based on fracture mechanics values.

When filling formworks with concrete different dispersions of hydrostatic pressure emerge. To measure the influence of these dispersions on the composite quality several tests were carried out. Therefore different concrete samples, which were varying in height, were produced. Each of them then created a composite with a cement based wood particle board. After that the hardened concrete samples were pulled until their failure. The tests results differed quite highly. This can be affiliated to the inhomogeneity of the cement bonded wood particle boards. However, it was also assumed that there might be differences between the plates of the single cement sample series. The assumption was made based on the comparison with former results of fracture mechanic tests and the different color of the single plates. Analysis of the cement content wasn't able to confirm or disprove this assumption.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Danksagung</b> .....	<b>I</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>III</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Überblick zu den bisher durchgeführten Untersuchungen.....	1
1.3 Ziel der Arbeit.....	2
1.4 Einleitung zum 1. Teil.....	3
<b>2 Die CETRIS-Platte [6]</b> .....	<b>5</b>
2.1 Bestandteile der Cetris-Platte.....	5
2.2 Herstellung der Cetris-Platte.....	6
<b>3 Schalungen [6]</b> .....	<b>10</b>
3.1 Entwicklung der Schalungen .....	10
3.1.1 Schalträger .....	11
3.1.2 Schalplatten .....	11
3.1.3 Trennmittel .....	11
3.1.4 Ankerung .....	12
3.2 Verlorene Schalung.....	13
3.3 Das Schalungssystem mittels <i>Cetris</i> ®-Platten .....	14
<b>4 Selbstverdichtender Beton [6]</b> .....	<b>16</b>
<b>5 Keilspaltversuch - Wedge Splitting Test</b> .....	<b>19</b>
<b>6 Untersuchung des Einflusses des hydrostatischen Druckes</b> .....	<b>24</b>
6.1 Versuchsaufbau.....	24
6.2 Vorbereitung der Proben.....	25
6.3 Herstellen der Proben.....	26
6.4 Feuchtemessung und Erhebung der Plattenfarbe .....	28
6.4.1 Plattenfarbe .....	28
6.4.2 Plattenfeuchte .....	29
6.5 Testdurchführung – Zugversuch .....	30
6.6 Ergebnisse des Zugversuchs .....	31
6.7 Plattenfestigkeit – Keilspaltversuch.....	32
6.7.1 Anbringen des Messequipments .....	32
6.7.2 Versuchsdurchführung.....	32
6.7.3 Auswertung.....	34

6.8	Fazit.....	37
6.8.1	Zugversuch .....	37
6.8.2	Plattenfestigkeit .....	38
6.8.3	Plattenfärbung.....	39
6.8.4	Feuchtigkeit .....	40
<b>7</b>	<b>Normal/Wassersättigung-Probenstatistik.....</b>	<b>42</b>
7.1	Herstellung der Versuchskörper .....	43
7.1.1	Vorbereitung der Platten.....	43
7.1.2	Probenaufbau - Plattenfestigkeit.....	44
7.1.3	Probenaufbau - Verbundfestigkeit.....	44
7.1.3.1	Anbringen der Folie .....	45
7.1.3.2	Mischen des SCC.....	46
7.1.3.3	Vorbereitung der Schalungen und der Betonvorgänge.....	46
7.1.3.4	Ausschalen mittels Pressluft .....	48
7.1.3.5	Beschriftung und Lagerung der Proben .....	48
7.2	Prüfung der Würfelproben – Plattenfestigkeit .....	49
7.3	Prüfung der Würfelproben - Verbund.....	49
7.3.1	Phase 1 nach 14 Tagen .....	49
7.3.2	Phase 2 nach 16 Tagen .....	50
7.3.2.1	Schneiden der Starterkerbe .....	50
7.3.2.2	Aufkleben der Marmorprismen.....	51
7.3.2.3	Wasserlagerung.....	51
7.3.3	Phase 3 nach 31 Tagen – Keilspaltversuch (Wedge Splitting Test).....	51
7.4	Auswertung der Versuche.....	52
7.4.1	Keilspaltversuch - Plattenfestigkeit.....	52
7.4.2	Keilspaltversuch - Verbundfestigkeit .....	55
7.5	Fazit.....	57
7.5.1	Plattenfestigkeit .....	57
7.5.2	Verbundfestigkeit .....	58
<b>8</b>	<b>Zementgehaltsanalyse anhand von Festbetonproben .....</b>	<b>59</b>
8.1	Verfahren nach Dorner, H. W.....	60
8.2	Vorversuche mittels bekannter Betonzusammensetzung.....	62
8.3	Zementgehaltsanalyse zementgebundener Holzspanplatten.....	64
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>67</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>70</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>71</b>
	<b>Anhang A.....</b>	<b>72</b>

<b>Anhang B.....</b>	<b>74</b>
<b>Anhang C.....</b>	<b>78</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Im Zuge der Projektarbeit am Institut "Hochbau und Technologie" an der Technischen Universität Wien wurden wir - Dominik Sigmund und Christian Hanisch - auf eine neuartige Schalungstechnik basierend auf dem System der verlorenen Schalungen mittels Platten aus Holz-Zement aufmerksam gemacht. Hierbei handelt es sich um zementgebundene Holzfaserplatten, die dem Beton als formgebende Schalung dienen und später am Betonbauteil verbleiben. Da es bei der praktischen Anwendung des Systems immer noch zu Fehlern im Verbund zwischen den zementgebundenen Holzfaserplatten und dem selbstverdichtenden Beton kam, sollte die Projektarbeit mit dem Titel "*Verbunduntersuchungsstudie zum Einsatz von zementgebundenen Holzfaserplatten als verlorene Schalung in Kombination mit selbstverdichtendem Beton*" sich mit der Suche nach Lösungsmöglichkeiten und einer genauen Analyse der Einflussfaktoren auf die Verbundqualität befassen.

Wir begannen uns intensiv mit der Problematik und diesem Schalungssystem auseinanderzusetzen und erkannten das enorme Potential, welches sich in diesem Bauverfahren verbirgt. Die vielseitige Einsatzmöglichkeit und Flexibilität, sowie der hohe Grad an werkseitiger Vorfertigung der Schalungen aus der zementgebundenen Holzfaserplatte erlauben es damit in kürzester Zeit, kostengünstig Wände, Decken und Treppen herzustellen. In der Verkürzung der Bauzeit liegt die Effizienz dieses Schalverfahrens, da dadurch der größte Teil der Kosten - die Lohnkosten - reduziert werden können. Neben der Kostenreduktion wurde auch das Thema Nachhaltigkeit zum zweiten wesentlichen Punkt im harten Konkurrenzkampf der Bauunternehmen. Der Holzanteil von bis zu 60% der Schalplatten kommt nicht nur dem Ruf nach erneuerbaren Baustoffen nach, sondern ist zudem auch noch äußerst gut recycelbar und nutzt zudem auch viele positiven Einflüsse des Werkstoffes Holz im Allgemeinen.

Da es sich jedoch um ein sehr neuartiges Verfahren handelt, ist dieses innovative Verfahren leider noch nicht gänzlich frei von Fehlern und immer wieder auftretenden Schadensfällen. Um die Hinter den Schäden stehenden Mechanismen und materialspezifischen Abläufe verstehen und lösen zu können, wurden an der technischen Universität Wien unter der Führung von Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Andreas Kolbitsch weitere Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt, welche in dieser Diplomarbeit beschrieben, protokolliert und bewertet wurden, um die Mechanismen zu analysieren und diesem vielseitigen Baustoff der Zukunft weiter zu verbessern.

## 1.2 Überblick zu den bisher durchgeführten Untersuchungen

Um den Verbund zwischen den 150x150x24 mm großen Plättchen und dem selbstverdichtenden Beton bestimmen zu können, wurde eine Reihe von unterschiedlichen Messvariationen angelegt. Diese unterschieden sich sowohl in der Vorbehandlung der Platten als auch in der Lagerung während der 28 Tage der Aushärtung bis zum Test. Hierbei wurde vor allem der Einfluss der Feuchtigkeit untersucht. Insgesamt wurden 84 Proben in 7 unterschiedlichen Messchargen zu je zweimal sechs Proben hergestellt. Neben Vorbehandlungen, wie Trocknen, Tiefkühlen oder Wassersättigen der Platten, wurden auch eine veränderte Betonrezeptur und eine Kontrollgruppe aus unbehandelten Plättchen getestet.

Die Herstellung aller Proben der verschiedenen Messchargen erfolgte in einem "Präparationsraum", der immer ähnliche klimatische Bedingungen aufwies. Um den Einfluss von Temperatur und Luftfeuchtigkeit während der Aushärtung erheben zu können, wurden sechs Proben einer Charge jeweils in einem Raum mit höherer Luftfeuchtigkeit und weitere sechs Proben derselben Charge in einem Raum mit niedrigerer Luftfeuchtigkeit gelagert. Nach Ablauf der 28 Tage wurden die Proben entsprechend vorbereitet und mittels Keilspaltverfahren, welches später im Kapitel 5 "*Keilspaltversuch - Wedge Splitting Test*" genauer beschrieben wird, getestet. Als Ergebnis erhielten wir 2 bruchmechanische Werte: Kerbzugfestigkeit und spezifische Bruchenergie. Aus diesen Messwerten und einer quantitativen Beurteilung der Bruchflächen ließen sich Rückschlüsse auf die Qualität des Verbundes schließen.

Alle Proben wurden auf dieselbe Art und Weise getestet und anschließend vermessen und dokumentiert. Die im Keilspaltversuch gemessenen Werte von Bruchenergie und Kerbzugfestigkeit wurden in eine „feuchte“ und eine „trockene“ Gruppe gegliedert. Hier wurden als Ausgangspunkt die Ergebnisse der Standardproben herangezogen. Die besten Ergebnisse erzielten die Platten, die mittels der Betonvariation – einem geringeren Anteil an Fluamix C und damit um einen 0,60% höheren Zementanteil – hergestellt wurden. Auch die von der Firma *CETRIS*® gelieferten Plättchen mit der veränderten Oberfläche konnten sowohl in der Gruppe „feucht“ als auch in der Gruppe „trocken“ ähnlich gute Werte erzielen, wiesen dabei aber eine wesentlich geringere Streuung auf als die Ergebnisse der Standardproben. Eindeutige Ergebnisse lieferten die Varianten der Chargen, die vorbehandelt wurden. Sowohl eine Trocknung der Platten als auch eine Wassersättigung bzw. Abkühlung auf  $-20\text{ °C}$  erreichten nur sehr schlechte Verbundwerte. Da diese Verfahren in der Praxis nur schwer bei der Herstellung anwendbar sind und wie gezeigt werden konnte, keinen positiven Einfluss auf den Verbund erzielen würden, scheidet diese für weitere Untersuchungen aus. In der Unterscheidung der Lagerung hingegen zeigte sich, dass die Gruppe der „feucht“ gelagerten Proben einen – wenn auch nur geringfügig – besseren Verbund aufwiesen als die vergleichbaren Proben der „trockenen“ Lagerung.

Die enorme Streuung der Ergebnisse und die unerwartet guten Ergebnisse der Betonvariation waren ausschlaggebend, weitere Untersuchungen in diese Richtung anzustellen. Da hierbei die Einflussfaktoren noch nicht gänzlich geklärt werden konnten und es sich um ein sehr umfangreiches Forschungsgebiet handelt, arbeiten wir - Dominik Sigmund und Christian Harnisch - gemeinsam im Zuge zweier Diplomarbeiten weiter an der Lösung dieses Problems.

Die Gesamte Arbeit gliedert sich in zwei Abschnitte:

- Teil 1: *Untersuchungen zur Materialfestigkeit zementgebundener Holzfaserplatten in Abhängigkeit der Materialfeuchte*
- Teil 2: *Untersuchungen zur Verbundfestigkeit zementgebundener Holzfaserplatten in Abhängigkeit der Materialfeuchte*

### **1.3 Ziel der Arbeit**

Im Zuge dieser Diplomarbeit soll die Frage beantwortet werden, wie sich ein Kompositwerkstoff, bestehend aus Holz und Zement, unter dem Einfluss der Feuchtigkeit verhält. Für die Beurteilung werden bruchmechanische Kennwerte wie die Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$

und die spezifischen Bruchenergie  $G_F$  herangezogen. Die Ermittlung dieser Kenngrößen erfolgt mittels des Keilspaltverfahrens nach ÖNORM B 3592, womit sowohl eine Untersuchung des Verbunds zwischen der zementgebundenen Holzfaserplatte und des Betons, also auch die Materialfestigkeit selbst erfolgen kann. Auch die Plattenfarbe wird in diese Versuche mit einbezogen, da vermutet wird, dass sich daraus Rückschlüsse auf den Zementgehalt der zementgebundenen Holzfaserplatte ziehen lassen. Um den Einfluss der Materialfeuchte zu ermitteln, werden während der Aushärtung zwei unterschiedliche Lagerungsbedingungen geschaffen, die "normale" Bedingungen und den Extremfall der Wassersättigung simulieren sollen.

Im zweiten Teil der Untersuchung werden Gravimetrieversuche auf Basis von Essigsäure durchgeführt, die zeigen sollen, dass der Zementgehalt der zementgebundenen Holzfaserplatten von Charge zu Charge variiert und sich dadurch unterschiedliche Material- und Verbundfestigkeiten ergeben können.

Diese Arbeit soll helfen Parameter aufzuzeigen, die die Materialfestigkeit positiv als auch negativ beeinflussen und helfen bauverfahrenstechnischen Möglichkeiten zu entwickeln, die den bekannten Schadensbildern bei dem Einsatz der zementgebundenen Holzfaserplatte als "verlorene Schalung" und somit einem wirtschaftlichen Schaden entgegenwirken.

Abschließend soll die Wiederholung der bereits vor einiger Zeit an der technischen Universität Wien durchgeführten hydrostatischen Druckversuche klären, wie sich die Betonierhöhe innerhalb eines Abschnittes auf den Verbund auswirkt. Der Versuchsaufbau sieht hier unterschiedlich hohe Betonzylinder vor, die den Zustand am Fußpunkt der Schalung simulieren soll. Die Auswertung erfolgt auch hier mittels der beiden bruchmechanischen Kennwerte der Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  und der spezifischen Bruchenergie  $G_F$ , sowie der von der Prüfmaschine gemessenen Zugkraft, die schließlich zum Versagen des Verbundes führt.

## 1.4 Einleitung zum 1. Teil

Durch die Projektarbeit „*Verbunduntersuchungsstudie zum Einsatz von zementgebundenen Holzfaserplatten als verlorene Schalung in Kombination mit selbstverdichtendem Beton*“ konnte ich einige Einblicke in eine, meiner Meinung nach sehr innovative und zukunftsweisende Herstellungsmethode mittels verlorener Schalungen für den Hochbau erhalten.

Für die Herstellung der meisten Hochbauten kommen im Allgemeinen Schalungen aus Holz zum Einsatz, die nach dem Erreichen der Frühfestigkeit des Betons wieder entfernt werden und für einen weiteren Einsatz gesäubert und vorbereitet werden müssen. Schalungen in Kombination mit dem Massenbaustoff Beton sind in der heutigen Zeit aus dem modernen Hoch- und Tiefbau nicht mehr wegzudenken. Dies ist nicht zuletzt der Grund weshalb viele Firmen auf dem Gebiet der Schalungstechnik nach Innovationen suchen.

Bei der Herstellung von Hoch- und Tiefbauten entfällt ein wesentlicher Teil der Baukosten auf die Löhne der Arbeiter. Um auf einem Gebiet mit hohem Konkurrenzdruck bestehen zu können, ist es notwendig die Kosten mittels neuartiger Produktionsverfahren bei gleichbleibender Qualität auf ein möglichst niedriges Niveau zu senken, um sich damit einen Vorteil im freien Wettbewerb verschaffen zu können. Im Hochbau beträgt der Lohnanteil bei der Herstellung mit konventionellen Schalungen ungefähr 80%. Aus diesem Grund wird auf Alternativen wie "verlorene Schalungselemente", bei welchen der Aufwand für das Ausschalen und das Reinigen der Elemente entfällt und somit eine Zeitersparnis mit sich bringt, zurückgegriffen. Ein wirtschaftlicher Erfolg lässt sich genau dann erzielen, wenn die Materialkosten

der Alternativvariante geringer sind als die Herstellungskosten mittels konventionellen Schalungen. Die zu Grunde liegende Funktionsweise aller sich derzeit am Markt befindlichen Systeme, die auf "verlorene" Schalelemente basieren, ist das Verbleiben der für den Beton formgebenden Elemente als Teil des Bauteils, ein sich zu diesen nichttragenden Elementen bildender Verbund und mit der Außenseite der Elemente eine ohne weitere Maßnahmen weiterverarbeitbare Oberfläche gegeben ist. [6]

Neben dem auf der zementgebundenen Holzfaserplatte der Firma *CETRIS*<sup>®</sup> basierenden System befinden sich noch etliche andere Produkte, wie z.B. Polystyrolschalsteine auf dem Markt. Die Anforderungen, die an Baustoffe im Allgemeinen gestellt werden, haben sich in den letzten Jahren stark in die Richtung der erneuerbaren Werkstoffe und nachhaltiger Produktionsmethoden hin entwickelt. Da die Firma *CETRIS*<sup>®</sup> bei der Herstellung der Platten zum größten Teil Holzabfälle weiter verarbeitet, erfüllt sie diese Anforderungen und könnte sich, nicht zuletzt wegen ihrer Flexibilität und Vielseitigkeit, zu einer zukunftsweisenden Alternative zu der Verwendung herkömmlicher Schalungssysteme entwickeln.

Durch die aus dieser Arbeit vorangegangenen Projektarbeit erlangten Erkenntnisse war es nun möglich, weitere Messprogramme und Untersuchungen zu erstellen, die noch offene Fragen klären und damit helfen konnten, die in Zusammenhang mit dem Einsatz der zementgebundenen Holzspanplatten als verlorene Schalungselemente auftretenden Schadensfälle in Zukunft zu vermeiden.

Im 1. Teil der hier verfassten Diplomarbeit mit dem Titel "*Untersuchungen zur Materialfestigkeit zementgebundener Holzfaserplatten in Abhängigkeit der Materialfeuchte*" wird daher die Aufmerksamkeit auf den Zementgehalt der zementgebundenen Holzfaserplatten und deren Verhalten bei zunehmender Plattenfeuchte während der Aushärtung, Lagerung und im Endzustand gelegt.

## 2 Die CETRIS-Platte [6]

Durch die hohe Konkurrenz am Bausektor ist es im Zuge der Angebotsabgabe enorm wichtig, die geforderte Leistung in entsprechender Qualität zu liefern. Da die Lohnkosten in den vergangenen Jahren stetig gestiegen sind, muss an alternativen Werkstoffen und Produktionsvarianten geforscht werden. Vor allem in den letzten 10 bis 20 Jahren rückten die Punkte „Nachhaltigkeit“ und „saubere Energie“ im Bewusstsein der Menschen immer mehr in den Mittelpunkt. Viele Ausschreibungen, vor allem im öffentlichen Bereich, fordern die Einhaltung ökologischer Richtlinien, geringe Emissionen und den Einsatz erneuerbarer Baustoffe, um schlussendlich die Belastung durch Abfälle und Baustoffrestmassen auf Dauer zu reduzieren. Diesem Grundsatz hat sich die Firma *CETRIS*<sup>®</sup> mit ihrem Werk in der Tschechischen Republik gewidmet und stellt eine extrem vielseitig einsetzbare Platte aus zementgebundenen Holzspänen her.

### 2.1 Bestandteile der Cetriss-Platte

Die Idee den mineralischen Zusatzstoff durch einen lichterem organischen Stoff zu ersetzen, der neben einer Kostenreduktion auch eine Gewichtsersparnis mit sich bringt, ist nicht neu. Bereits während des Zweiten Weltkrieges wurde an einem Werkstoff bestehend aus Holzspänen und Zement geforscht. Die Entwicklung dieses Baustoffes erfolgte aus der Not heraus, da zu dieser Zeit Zement in zu geringen Mengen verfügbar war und man nach alternativen Zuschlagsstoffen suchen musste. Dennoch gelang es den Forschern von damals nicht eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen eindringende Feuchtigkeit zu erreichen, was wiederum nur zu einer geringen Lebensdauer der Bauwerke führte. Heute wird die Weiterentwicklung dieses Baustoffes als besonders nachhaltig und zukunftsfruchtig angesehen.

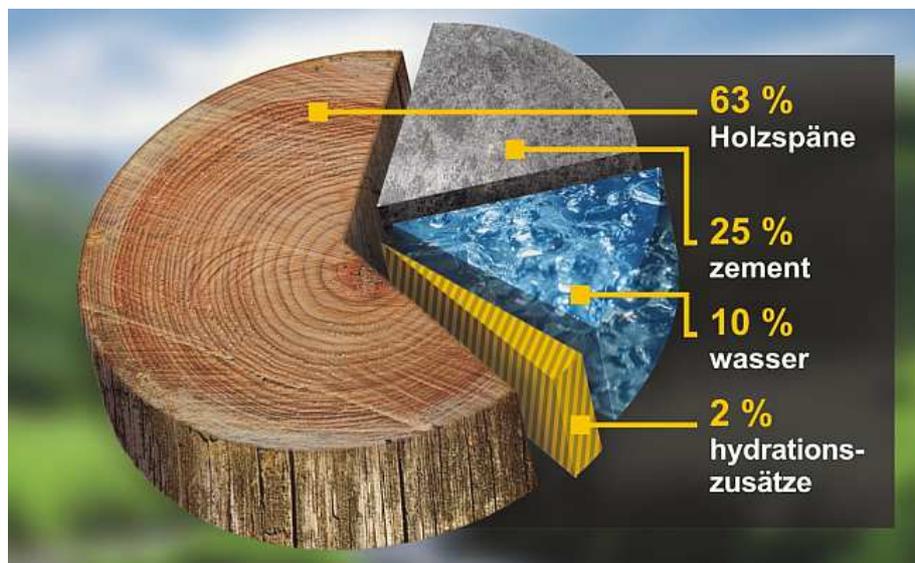


Abbildung 2.1: Zusammensetzung der Cetriss-Platte [2]

Die zementgebundene Spanplatte der Firma *CETRIS*<sup>®</sup> versucht nun die Vorteile der Werkstoffe Holz und Beton zu kombinieren. Durch den hohen Holzanteil der Platte von 63% und den nur geringen Mengen an für die Hydratation und den Verbund erforderlichen chemischen Zusätzen von lediglich 2% gilt diese zementgebundene Platte als sehr umweltfreundlich.

Nicht zuletzt weil neben dem erneuerbaren Stoff Holz auch keine gesundheitsgefährdenden Stoffe wie z.B. Asbest zum Einsatz kommen. Im Vergleich zu reinen Grobspanplatten, auch als OSB (orientedstrandboard) bezeichnet, besitzen zementgebundene Spanplatten eine wesentlich höhere Festigkeit. Die Rohdichte der CETRIS<sup>®</sup>- Platte liegt somit mit 1.250 kg/m<sup>3</sup> deutlich über der der OSB mit 700 kg/m<sup>3</sup>. Durch das höhere spezifische Gewicht der zementgebundenen Spanplatte wirkt diese im Vergleich auch zusätzlich schalldämmend.

Der Zementanteil von 25% an der Zusammensetzung der CETRIS<sup>®</sup>- Platte macht diese besonders widerstandsfähig gegen das Eindringen von Feuchtigkeit und erhöht zudem die Festigkeit der Platte. Dies ermöglicht den Einsatz der CETRIS<sup>®</sup>- Platte als Schalungselement für Außenbereiche, als Außenwandschale und in Räumen mit hoher Feuchtigkeit bei der geplanten Endnutzung, wie zum Beispiel Bäder, Waschräume, etc. Da nur begrenzt Feuchtigkeit in die Platten eindringen kann, erfolgt so gut wie keine Beschädigung durch die sich bildenden und wachsenden Eiskristalle bei häufigen Frost-Tau-Wechseln. Für den Einsatz spricht weiter das niedrige Gewicht und die gute Verarbeitbarkeit der Platten. Diese letzten zwei Punkte beziehen sich vor allem auf die Vorfertigung der Schalungselemente im Werk und den Einbau sowie das Ausbetonieren auf der Baustelle. Obwohl der Hauptbestandteil der CETRIS<sup>®</sup>- Platte Holz ist, gilt sie als feuerfest und ist nach europäischer Norm als „nicht brennbar“ einzustufen.

## 2.2 Herstellung der Cetriss-Platte

Die Herstellung dieser Platte erfolgt seit mehr als 20 Jahren durch die Firma CETRIS<sup>®</sup> im eigenen Werk. Für die Produktion der Platten werden vor allem widerstandsfähige Fichten- und Tannenhölzer verwendet. Diese erhält die Firma von Sägewerken und anderen holzverarbeitenden Firmen in Form von Verschnitt und Produktionsabfällen, die diese nicht weiter verarbeiten können aber dennoch eine gute Qualität aufweisen. Nach der Anlieferung erfolgt die Lagerung in sogenannten Spansilos, wo die Feuchte der Holzmasse gemessen und überwacht wird. Eine weitere Zerspannung auf die für die Produktion erforderliche Größe erfolgt durch eigene Maschinen im Werk. Für die Weiterverarbeitung zu zementgebundenen Spanplatten werden im Wesentlichen die unterschiedlichen Größen an Holzspänen benötigt:

- Grobspäne
- Feinspäne
- Sägemehl

Bei den **Grobspänen**, wie in Abbildung 2.2: Grobspäne dargestellt, handelt es sich um Späne mit Längen bis zu ungefähr 4 cm. Diese werden gemahlen und zu den weiteren Bestandteilen verarbeitet. Um eine geschlossene Struktur und eine glatte Oberfläche schaffen zu können, werden diese in einem speziell entwickelten Verfahren so aufgetragen, dass die **Feinspäne**, wie sie die folgende Abbildung 2.3: Feinspäne zeigt, den Kern der Platten bilden. Durch die Feianteile in Form von **Sägemehl**, zu sehen in Abbildung 2.4: Sägemehl, wird eine glatte Oberfläche geschaffen.

Die maximale Größe der Feinspäne beträgt, wie in nachfolgender Abbildung zu sehen ist, nur mehr 1 cm.



Abbildung 2.2: Grobspäne [10]



Abbildung 2.3: Feinspäne [10]

Der anteilmäßig zweitgrößte Ausgangstoff ist qualitativ hochwertiger **Portlandzement** der Klasse CEM II 42,5 mit einer Druckfestigkeit von  $42,5 \text{ kN/cm}^2$  nach einer Aushärtungsdauer von 28 Tagen. In einer Mischanlage wird dieser mit den Holzspänen verschiedener Größe vermischt und anschließend Wasser hinzugegeben. Die Menge an Wasser variiert und ist abhängig von der Holzfeuchte und muss daher an diese angepasst werden, um eine gleichbleibende Qualität zu gewährleisten.

Wie im Kapitel 2.1 "*Bestandteile der Cetriss-Platte*" bereits erwähnt, besteht die zementgebundene CETRIS®-Spanplatte aus 63% Holzspänen, 25% Zement, 10% Wasser und 2% an für die Hydratation erforderlichen Zusätzen. In der Mischanlage kommen nun auch die 2% an Zusätzen zum Einsatz. Es handelt sich vorwiegend um **Aluminiumsulfat**. Diese auch in der Natur vorkommende chemische Aluminiumverbindung, hier in der Form eines farblosen Pulvers, wird der Mischung beigemischt, um den Verbund zwischen Holz und Beton zu verbessern. Dies ist dadurch möglich, da Aluminiumsulfat auch als Festigungsmittel oder Stabilisator bezeichnet wird, der unter anderem mit organischen Substanzen, in diesem Fall Holz, feste Verbindungen eingeht.



Abbildung 2.4: Sägemehl [10]

Zusätzlich wird, um weitere Ressourcen zu sparen, den Holzangangsstoffen noch ein aufbereitetes, in Abbildung 2.5 zu sehendes, **Recyclat** beigemischt. Dieses besteht vorwiegend aus dem Abfall, der durch den Produktionsausschuss, Verschnitt und die Bearbeitung entsteht. Hierbei handelt es sich um bereits mit Zement und Zusatzstoffen behandelte Holzspäne der sich in der fertigen Platte befindlichen Spangrößen.



Abbildung 2.5: Recyclat [10]

Aus der vollautomatischen Mischanlage gelangt das Holzzementgemisch in eine Streueinrichtung und wird anschließend auf vorbereiteten Stahlplatten gleichmäßig verteilt. Diese werden mit Trennölen vorbehandelt, damit das Gemenge nach dem Pressen wieder leicht von den Stahlplatten gelöst werden kann, ohne die Oberfläche zu beschädigen. Durch getrennte Kammern in der Streueinrichtung ist es möglich, die Deck- und Mittelschicht der Platte in einem Arbeitsgang herzustellen. Die feineren mit Zement umhüllten Holzspäne werden dabei beidseitig auf die aus gröberen Spänen bestehende Mittelschicht aufgetragen, so dass die CETRIS®- Platte im Endzustand eine glatte Oberfläche aufweist. Die einzelnen Stahlplatten werden übereinander gestapelt und mit hohem Druck gepresst. Die weitere Lagerung erfolgt gemeinsam mit dem frisch aufgetragenen Plattengemisch in Öfen bei 70 °C für acht Stunden, um den Aushärtungsprozess zu beschleunigen. Nach dem Entfernen der Stahlplatten erfolgt eine weitere mindestens siebentägige Lagerung bevordie Platten auf einen Feuchtegehalt von ungefähr neun Gewichtsprozent getrocknet werden. Mit dem Abschluss der Trocknung ist die Platte für die weitere Verarbeitung bereit. Die Lagerung bis zur Weiterverarbeitung erfolgt dabei liegend auf Holzpaletten.

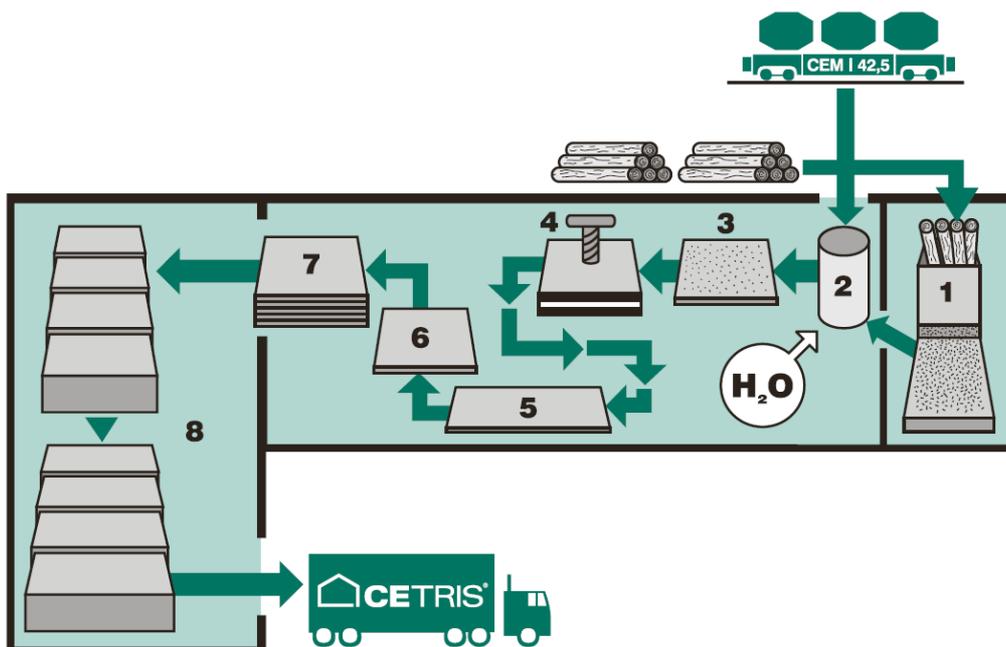


Abbildung 2.6 : Herstellungsschema [2]

(1 Zerspanung, 2 Mischung, 3 Plattenbestreuung und Schichtung, 4 Pressen, 5 Trocknung, 6 Formatierung, 7 Lagerung, 8 Versand/Transport)

### 3 Schalungen [6]

Als "Schalung" wird im Hoch- und Tiefbau eine Art Gussform bezeichnet, welche für die Herstellung von Wänden, Stützen, Treppen und Decken aus Holz angepasst und mit Frischbeton vor Ort verfüllt wird. Die Schalung, meist aus Holz, wird nachdem Erreichen der Frühfestigkeit des Betons wieder entfernt und bildet somit das Negativ zum entstehenden Bauteil.

Mit dem Beginn der Herstellung der ersten Bauwerke mittels Beton in der Antike waren Schalungen erforderlich. Bereits die Römer verwendeten vor ungefähr 2000 Jahren ein erhärtendes Mörtelgemisch, um ein druckfestes konglomeratähnliches Gestein zu erhalten. Dies wurde als "opuscaementicium" bezeichnet und wurde zur Herstellung von Gussmauerwerken verwendet. Diese Substanz gilt als einer der ersten Vorläufer des sich heute in Verwendung befindlichen Betons und war diesem auch sehr ähnlich. Das Anwendungsgebiet beschränkte sich nicht nur auf die Herstellung von Wänden und Stützen sondern "opuscaementicium" wurde auch zum Auskleiden von Aquädukten herangezogen, um diese abzudichten. Zu jener Zeit entstand auch eines der noch heute wohl bekanntesten Bauwerke in Rom, das Pantheon, welches mit seinem Kuppeldurchmesser von 43,45 m und einer Schalendicke von 1,35 m bis Anfang des 18. Jahrhunderts das größte seiner Art darstellte. Eine derartige Ingenieurleistung wäre ohne den Einsatz von Schalungen und dem "neuartigen" Werkstoff Beton nicht möglich gewesen.

#### 3.1 Entwicklung der Schalungen

Die ersten Schalmauerwerke entstanden im Römischen Reich aus sauber gemauerten Innen- und Außenschalen aus Ziegeln und ersetzten damit Schalungen aus Naturstein sowie die Natursteinbauweise fast völlig. Dies bedeutete eine erhebliche Arbeitserleichterung, da die Suche nach passgenauen bzw. die mühsame Bearbeitung von Natursteinen zur Gänze entfallen konnte. Obwohl diese Art der Herstellung von Massivbauteilen im Mittelalter eher in Vergessenheit geriet und erst um das Jahr 1700 wieder Einzug in das Bauwesen fand, änderte sich an der Herstellung nichts. Erst ab dem 18. Jahrhundert erkannte man wieder dessen Bedeutung und Potential und so kam es zu einer ständigen Weiterentwicklung. Heute ist die Herstellung von Bauwerken mittels in Schalungen gegossenen Beton nicht mehr wegzudenken.

Bis in die Mitte des 20. Jahrhunderts bestanden Schalungen ausschließlich aus Holz. Dies ist auch heute noch größtenteils so, jedoch werden sie nicht mehr aus groben Brettern und Kanthölzern zimmermannsmäßig sondern aus glatten mehrschichtigen Holzplatten hergestellt. In Verwendung sind heutzutage Systemschalungen, die auf Grund der hohen Wiederverwendbarkeit weniger Holzabfall verursachen und damit nicht nur einen Kostenvorteil sondern auch einen ökologischen Vorteil bieten. Neben der Formgebung hat die Schalung noch weitere Aufgaben; so muss sie zum Beispiel in der Lage sein, die Lasten des Frischbetons, der Bewehrung und weiterer Belastungen, wie Wind aufzunehmen und abzuleiten. Wichtig ist eine Sicherung der Lage gegen seitliches Verschieben.

Neben holzbasierenden Schalsystemen sind mehr und mehr bausteinartige Systeme am Markt verfügbar, die auf Styropor-Schalungssteine setzen, die nach dem Aufbau mit Beton ausgegossen werden. Eines dieser Systeme stammt von der Firma *ARGISOL*<sup>®</sup>. Diese Bauweise beschränkt sich bisweilen auf die Errichtung von hochwärmedämmten Einfamilienhäusern und anderen kleineren Projekten.

Im Wesentlichen bestehen diese Schalungssysteme aus folgenden Bestandteilen:

- Schalträger
- Schalhaut
- Unterstützung
- Anker
- Trennmittel

### 3.1.1 Schalträger

Heute bestehen Schalträger meist aus I-Träger aus Massivholz oder auch bei sehr hohen Lasten bei Wandschalungen aus Doppel-C-Aluminiumprofilen. Durch seine Höhe ist der I-Träger in der Lage große Biegemomente aufzunehmen und die Lasten weiter zu leiten. Weiter dienen die Schalträger zur Aufnahme der Schalhaut.

### 3.1.2 Schalplatten

Früher bestand die Schalhaut aus groben Brettern, die stumpf gestoßen und von Kanthölzern getragen wurden. Auf Grund der unbehandelten Oberfläche der Bretter waren diese durch die Verschmutzung kaum wieder zu verwenden und deren Maserung war auf dem fertigen Beton zu sehen. Moderne Schalhäute bestehen aus Sperrholzplatten, deren Oberfläche zusätzlich noch beschichtet werden kann, um die hohen Anforderungen für Sichtbetonoberflächen zu erfüllen. Die Hauptaufgabe der Schalhaut hinsichtlich der Lastableitung ist es die Lasten aus Frischbeton, Bewehrung und weiteren Belastungen gleichmäßig auf die Schalträger zu verteilen. Die Beschaffenheit der Schalhaut ist maßgebend für die Qualität der sichtbaren Betonoberfläche. Gerade bei Sichtbetonoberflächen muss sichergestellt werden, dass die Schalhäute gründlich gereinigt und mit dem passenden Trennmittel versehen werden, um Fehlstellen zu vermeiden.

### 3.1.3 Trennmittel

Die Beschichtung der Schalhaut mit Trennmitteln reduziert die Haftung des Betons an der Schalhaut. Dies kann mit Hilfe von folgenden Arten von Trennmitteln erfolgen:

- mineralische Öle
- biologische Öle
- Emulsionen
- Wachse
- Lacke
- Pasten

Diese Mittel bilden einen hydrophoben, das heißt einen wasserabweisenden Film und erzeugen damit eine Oberfläche, mit der sich der Beton beim Aushärten nur schwer verbinden kann. Reicht dieser Effekt nicht aus, können die Schalhäute zusätzlich mit einem Mittel überzogen werden, welches in einer Zone direkt an der Schalhaut die Hydratation des Zements durch einen chemischen Prozess gezielt stört. Der Einsatz des richtigen Trennmittels ist für die geforderte Oberflächenqualität entscheidend. Die Auswahl ist abhängig vom Schalungstyp, denn nicht jede Schalhaut ist auch für jedes Trennmittel geeignet. Daher sollten Herstellerangaben eingehalten und die Trennmittel auf den jeweiligen Schalungstyp abgestimmt werden. Die Trennmittel sind richtig zu dosieren, sodass die gesamte Schalhaut gleichmäßig mit einem dünnen Film überzogen ist. Dabei ist zu beachten, dass das Saugverhalten vom Alter der

Schalplatte abhängig ist und dadurch die zu verwendende Menge an Trennmittel variieren kann.

Weiter muss das Trennmittel folgende Anforderungen erfüllen:

- Einerseits muss es die Haftung der Schalhaut zum Beton hin ausreichend reduzieren, auf der anderen Seite darf es aber die Tragfähigkeit und Betonqualität des fertigen Bauteils nicht beeinträchtigen.
- Es dürfen auch keine Rückstände auf der Betonoberfläche zurückbleiben, die entweder zu einer Minderung der optischen Qualität der Sichtbetonoberfläche oder zu einer Beeinträchtigung der Haftung von später aufzubringenden Putzen, Farben oder anderen Baustoffen führen können.

### 3.1.4 Ankerung

Wandschalungen bestehen aus vertikalen Schalelementen, die auf Grund der hohen Frischbetondrücke gegeneinander zu verankern sind. Die Belastung von Wandschalungen ist wesentlich höher als bei Deckenschalungen, da hier nicht die Dicke sondern die Höhe maßgebend ist. Am Fußpunkt der Schalung ist der Frischbetondruck mit dem hydrostatischen Druck  $p = \gamma * h$  anzusetzen. Das bedeutet, der Druck  $p$  in  $[\text{kN}/\text{m}^2]$  ergibt sich aus der Multiplikation der Höhe  $h$  [m] mit der Dichte des Betons in  $[\text{kN}/\text{m}^3]$ . Diese Annahme ist vor allem bei der Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SCC) zutreffend, da dieser eine flüssige Konsistenz besitzt. Bei modernen Rahmenschalungen werden diese Drücke durch Anker und seitliche Abstützungen aufgenommen. Bestehen die Schalträger aus Doppel-C-Profilen können die Anker durch deren Öffnung zwischen den beiden C-Profilen durch die Schalträger und durch das Bauteil geführt werden, sind keine Schalträger erforderlich werden die Anker wie in Abbildung 3.1 dargestellt, nur durch Bohrungen in der Schalplatte geführt. Zur Anwendung kommen hier Gewindestäbe aus Stahl, die in Hüllrohren verlaufen und im Zuge des Ausschalens wieder entfernt werden.

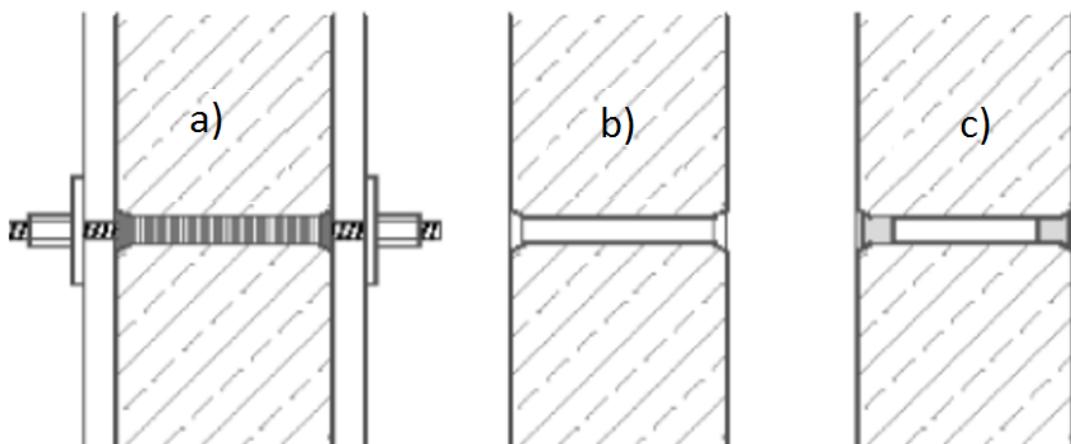


Abbildung 3.1: Funktion eines Ankers bei Wandschalungen

- a) Anker nimmt den Druck des Frischbetons auf; b) leeres Hüllrohr nach dem Entfernen des Ankers;  
c) Verschließen der Öffnung

### 3.2 Verlorene Schalung

Die wesentliche Funktion der „verlorenen Schalung“ ist exakt die gleiche wie die der konventionellen Schalungen. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass die nichttragenden Schalenelemente nach dem Aushärten des Betons nicht mehr entfernt werden bzw. in schwer zugänglichen Bereichen nicht mehr entfernt werden können. Dadurch entfallen vor allem Arbeitsstunden für Ausschalen und Reinigung der Elemente. Auf Grund der steigenden Lohnkosten und des hohen Lohnkostenanteils der Schalung im Allgemeinen liegt hier das wesentlichste Einsparungspotential „verlorener Schalungen“ im Vergleich zu konventionellen Schalsystemen, wobei auf die meist höheren Kosten der Schalungselemente zu achten ist. [6]

Neben den konstruktiven und wirtschaftlichen Vorteilen sind auch einige der dabei immer wieder auftretenden Probleme zu beachten. Ein großer und wohl der entscheidendste Nachteil von am Bauteil verbleibender Schalelemente ist, dass keine Prüfung der Betonoberfläche hinter der Schalung vorgenommen werden kann. Durch den hohen hydrostatischen Druck kann es durch unzureichende Lagesicherung zu einem Aufschwimmen der Schalung kommen. Ein anderer häufiger Schadensfall, neben dem Versagen durch Aufschwimmen der Elemente, ist ein Versagen durch Eindrücken der Elemente, ebenfalls verursacht durch den hohen hydrostatischen Druck in Abhängigkeit der Bauteilhöhe.

Vor- u. Nachteile verlorener Schalungen gegenüber konventioneller Schalungen:

#### Vorteile:

- keine Ausschalungskosten
- Zeitersparnis im Baubetrieb
- Vorfertigung im Werk und dadurch eine Qualitätssicherung möglich
- keine Entsorgungskosten
- Strukturierung der Oberfläche möglich
- erhöhter Schallschutz
- ggf. Integrierung von Leitungen möglich

#### Nachteile:

- höhere Produktionskosten
- kein Zugang zur Betonoberfläche
- Verlust von Nutzfläche durch die nichttragenden Schalungselemente
- keine Wiederverwendung (= Materialverlust)

Der Termindruck ist ein für den Erfolg eines Projektes im Bauwesen nicht außer Acht zu lassender Faktor und nicht zuletzt Ursache für deutliche Mehrkosten. Ist es nun möglich, Elemente in einer Art und Weise herzustellen, die aus einer rein wirtschaftlichen Betrachtung günstiger sind als der Prozess des Ein- und Ausschalens von Betonbauteilen mit konventionellen Schalungen. Die Vorteile liegen deutlich auf der Hand; dennoch gibt es Bauvorhaben, wo das Verlangen nach Sicherheit und Prüfbarkeit die Kosten- und Zeitersparnis überwiegt. Daher konnten sich "verlorene Schalungen" im Brückenbau, einem Gebiet mit dem höchsten Sicherheitsniveau, nicht durchsetzen.

### 3.3 Das Schalungssystem mittels *Cetris*<sup>®</sup>-Platten

Wie schon eingangs erwähnt ist die zementgebundene Holzspanplatte der Firma CETRIS<sup>®</sup> auf Grund des geringen Gewichts, der hohen Flexibilität und der enormen Widerstandsfähigkeit vielseitig einsetzbar. Diese Eigenschaften macht sich der Schalungshersteller zu Nutze, um eine große Palette an Einsatzmöglichkeiten der zementgebundenen Holzspanplatte als verlorene Schalungselemente anbieten zu können.

Die Platten werden nach der Anlieferung in das Werk des Schalungsherstellers zu Elementen zugeschnitten. Der Zuschnitt erfolgt größtenteils automatisch und nur kleine Details werden händisch nachgearbeitet. Da die Elemente bei Wandschalungen jeweils eine Innen- und Außenplatte aufweisen, erfolgt der Zuschnitt in doppelter Ausführung. Sind die Platten auf die später daraus entstehenden Elemente zugeschnitten, gelangen sie zur Montage. In der Montagehalle werden die zwei gleichen Elemente immer parallel von einem Montageteam bearbeitet. Im ersten Schritt der Vormontage werden im Abstand von ca. 20 cm die Halterungen verschraubt. Hierbei handelt es sich um Spezialteile aus Stahl, die sobald die zwei Seiten zusammengesetzt werden sich miteinander verbinden. In den weiteren Arbeitsschritten wird von den Montagearbeitern die Bewehrung verlegt. Dadurch, dass die Elemente noch nicht verbunden sind, kann die Bewehrung leicht und unkompliziert verlegt werden. Es muss nur Rücksicht auf die Verbindungselemente genommen werden. Nachstehende Abbildung 3.2 zeigt ein Wandelement mit den Verbindungsstücken und bereits verlegter Bewehrung. Wie bei herkömmlichen Hochbauteilen wird die Anschlussbewehrung ebenfalls einfach über den Rand des Elements hinaus verlegt. Sind nun alle Arbeiten abgeschlossen, werden die beiden Platten, die sich während der Montage auf Rollwagen befinden, zueinander geschoben und aneinander gedrückt. Dadurch rasten die Verbindungsstücke auch in den Öffnungen des gegenüberliegenden Winkels ein und die Platten sind fest miteinander verbunden.



Abbildung 3.2: Montage der Elemente im Werk

Ein wesentlicher Vorteil dieser Systemschalung ist die leichte Zugänglichkeit, welche nicht nur das leichte Verlegen der Bewehrung sondern auch das werkseitige Verlegen von Installationsschächten und Anschlussdosen ermöglicht. Die folgende Abbildung 3.3 zeigt zwei für den Transport vorbereitete, fertige Wandelemente.

Da sich der selbstverdichtende Beton wie eine Flüssigkeit verhält, ist nicht die Dicke der Elemente, sondern deren Höhe maßgebend. Am Fußpunkt der Schalung entspricht der Frischbetondruck genau dem hydrostatischen Druck mit  $p = \gamma * h$ . Dadurch ergibt sich die relativ dichte Verteilung der Verbindungsstücke, die diese Kräfte aufnehmen müssen. Auf den Ein-

satz von Ankern, die in Hüllrohren durch die Schalung geführt werden, wie es bei konventionellen Schalungen der Fall ist, wird bei diesem System komplett verzichtet.

Da viele der ausgeführten Schalelemente größere Abmessungen aufweisen als die von der Firma *CETRIS*<sup>®</sup> gelieferten Platten, müssen diese gestoßen werden. Diese Verbindungen werden als geklebte Nut-Feder-Verbindungen oder bei maschineller Verarbeitung von Wandelementen mittels Stumpfstoß ausgeführt. Als Kleber dient bei stumpf gestoßenen Platten *Purocol*, einEinkomponentenkleber auf Polyurethanbasis, beziehungsweise ein Einkomponenten-Massivholzkleber bei der Ausführung von Nut-Feder-Verbindungen.



Abbildung 3.3: Wandelemente

Neben Wand- und Deckenschalungen können auch Treppenelemente hergestellt werden. Auf Grund der Lage bestehen Deckenschalungen nur aus einem Element. Die Platten werden, wie auch bei den Wandschalungen werkseitig vorbereitet und auf die Baustelle transportiert. Auf Wunsch des Kunden ist es bei der Verwendung der Systemwandschalungen möglich, diese in der Planung der Decken zu berücksichtigen. Das bedeutet, die äußere Schale der Außenwand wird bis an die Oberkante der Decke gefertigt und stellt somit auch gleichzeitig die Deckenrandabschalung dar. Eine zeitaufwendige Fertigung dieser Abschalungen auf der Baustelle entfällt somit.

## 4 Selbstverdichtender Beton [6]

Bei selbstverdichtendem Beton, im internationalen Sprachgebrauch auch als „selfcompacting concrete“ oder kurz als SCC bezeichnet, handelt es sich um einen Beton, der in der Lage ist, sich auf Grund der Schwerkraft von selbst zu verdichten. Die Möglichkeit, sich selbst zu entlüften, erhält der Beton entweder durch einen hohen Mehlkornanteil oder durch die Zugabe chemischer Verflüssiger bzw. einer Kombination aus beidem. Unabhängig vom SCC-Typ ist die Zugabe von hochwirksamen Fließmitteln auf Basis von Polycarboxylatether (PCE) unverzichtbar. Da keine äußere Verdichtungsenergie zugeführt werden muss, eignet sich diese Art von Beton für eine Vielfalt an Bauteilformen mit unterschiedlicher Oberflächenqualität.

Die selbstverdichtende Wirkung erhält der Beton vor allem durch die Zugabe von Hochleistungsverflüssigern, die ihre Wirkung sowohl am Zement als auch dem Feinstoffanteil entfalten, indem sie vor allem die innere Reibung zwischen den einzelnen Partikeln durch den Abbau der Oberflächenspannung des Wassers reduzieren. Dies geschieht auf molekularer Ebene und führt zu einer Verringerung der elektrischen Bindung und damit zu einer Reduktion der erforderlichen Mischwassermenge. Die Menge an Wasser ist zur Vermeidung späterer Schwindverformungen gering zu halten.

Selbstverdichtender Beton besteht im Vergleich zu Normalbeton aus einem höheren Mehlkornanteil, dessen Korngröße einen maximalen Durchmesser von 0,125 mm aufweist. Bei den Zuschlagstoffen kommen sandreiche Kornzusammensetzungen zum Einsatz, deren Größtkorn (GK) auf 16 mm im Durchmesser zu beschränken ist. Da sich SCC wie eine Flüssigkeit verhält sind stabile und tragfähige Schalungen zu verwenden. Beim Betonieren einer Wand wirkt am Fußpunkt der Schalung der gesamte hydrostatische Druck, der von der Schalung und deren Stützung aufzunehmen und in angrenzende Bauteile bzw. den Baugrund abzuleiten ist. Neben den Eigenschaften der einzelnen Komponenten sind für die Qualität des SCCs auch Mischungsverhältnis und Mischzeit maßgebend. Um beim Einbau ein Entmischen des Betons zu verhindern, sind die Schalungen wie bei Unterwasserbetonierarbeiten mittels Schlauch von unten zu befüllen, sodass der Beton von unten in der Schalung nach oben steigt, ohne dabei zu fallen. Diese Art des Betonierens wird im Baubetrieb als "Kontraktorverfahren" bezeichnet.

Schon nach der Entwicklung von SCC Ende der 80er Jahre galt dieser als revolutionär, denn bei herkömmlichem Beton entsteht erst durch das sorgfältige Verdichten mittels Rüttlern ein dichtes Gefüge. Sowohl bei der Herstellung als auch im Baubetrieb bietet selbstverdichtender Beton einige Vorteile. Auf Grund seiner weichen honigähnlichen Konsistenz und seiner Fließfähigkeit ist es möglich, mit SCC eine hohe Einbauleistung und damit höhere Produktivität im Vergleich zu Normalbeton zu erzielen. Auch durch den Verzicht auf Rüttler und der damit verbundenen Begrenzung der Schütthöhe auf 50 cm entsteht neben dem Entfall an Gerätemieten für Rüttler auch eine Kostenreduktion durch den Zeitgewinn im Arbeitsablauf. Ferner sinkt die Lärmbelastung für Arbeiter und Anrainer.

Durch den Einsatz von SCC ist es möglich, schwer zugängliche Stellen und komplexe Schalungsgeometrien zu verfüllen. Auch Bauteile mit einem hohen Bewehrungsgrad können mittels fließfähigem Beton wie „leichtverdichtenden Beton“, kurz LVB, welcher nur eine geringe Rüttelenergie erfordert, oder SCC verfüllt werden, ohne dass sich zwischen Schalung und Bewehrung oder zwischen den Bewehrungselementen Hohlräume bilden. Neben den bautechnischen bietet die Verwendung von SCC auch optische und umweltrelevante Vorteile. Mittels SCC lassen sich optisch anspruchsvolle Sichtbetonoberflächen herstellen und bieten dazu noch die Möglichkeit gewünschte Strukturen zu erzeugen. Diese ideale Sichtbetonoberfläche lässt sich durch das dichte Gefüge verwirklichen, welches auch zu einer erhöhten Dau-

erhaftigkeit des Betons führt. Wird bei der Herstellung keine verlorene Schalung verwendet, wie es bei herkömmlichem Betonierarbeiten der Fall ist, wird das Bauteil nach dem Erreichen der Frühfestigkeit ausgeschalt, wobei nur ein geringes Maß an Nachbehandlung erforderlich ist.

Die Anwendung des SCC erfolgt nach den in den europäischen Normen wie ÖNORM EN 206-9 geregelten Richtlinien für die Verwendung und den Einbau von selbstverdichtendem Beton. Dieser ist vor dem Einbau auf seine Qualität in puncto Fließfähigkeit und Viskosität zu testen:

- Überprüfung der Fließfähigkeit mittels Setzfließmaß:

Der zur Prüfung entnommene Frischbeton wird, wie in Abbildung 4.1 zu sehen, in einem Behälter, der sich auf der Prüfplatte befindet, eingebracht und anschließend die unten offene Form nach oben gezogen. Gemessen wird die Ausbreitung des Betons auf der Platte. Zusätzlich kann ein Blockierring angebracht werden, der die in der Schalung befindliche Bewehrung simulieren soll und somit Auskunft über das Fließverhalten geben kann. Erreicht der SCC ein Setzmaß von rund 700 – 800 mm und beträgt der Niveauunterschied beim Test mit Blockierring zwischen innerhalb und außerhalb des Ringes weniger als 50 mm, erfüllt der Beton die Anforderungen.



Abbildung 4.1: Überprüfung der Fließfähigkeit mit Blockierring [3]

- Sedimentationsneigung:

Um die Sedimentationsneigung eines selbstverdichtenden Betons beurteilen zu können, wird der Beton in einen, wie in Abbildung 4.2 schematisch dargestellt, 50 cm hohen Zylinder mit einem Durchmesser von 15 cm gefüllt. Mittels in den Drittpunkten der Zylinderhöhe angebrachten Schiebern kann die Probe in 3 Teilproben unterteilt werden. Erst 30 Minuten nach dem Befüllen werden die Trennbleche in den Zylinder geschoben und anschließend der selbstverdichtende Beton abschnittsweise in unterschiedliche Behälter gefüllt. Der Zementleim wird ausgewaschen und die getrockneten Siebrückstände mit der Genauigkeit auf 1 g gewogen.

Der SCC ist dann als sedimentationsstabil einzustufen, wenn die Abweichung der Masse der groben Gesteinskörnung sich um höchstens 20-Masse-% vom mittleren Grobgehalt der Probe unterscheidet.

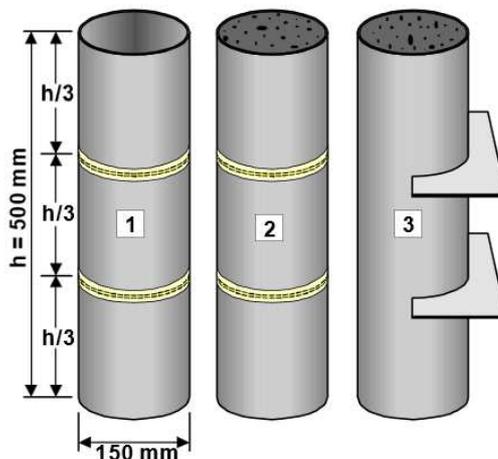


Abbildung 4.2 Sedimentationsversuch

- Auslauftrichter:

Ein genormter Trichter, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, wird zur Gänze mit Frischbeton gefüllt. Ohne den Beton zu verdichten, wird er durch die Trichterunterseite ausgelassen und die dabei benötigte Zeit gemessen. Die ermittelte Trichterauslaufzeit stoppt sobald der erste Blick von oben durch den Trichterauslauf möglich ist. Die bei diesem Versuch für SCC benötigte Zeit liegt laut Norm zwischen 5 und 20 Sekunden.



Abbildung 4.3: Auslauftrichter [5]

Selbstverdichtender Beton bietet in der Herstellung und in baubetrieblicher Hinsicht viele Vorteile, demgegenüber stehen allerdings ein höherer Preis und die Tatsache, dass zur Überprüfung der Betonqualität Fachpersonal erforderlich ist. SCC ist deswegen nicht auf Spezialanwendungen beschränkt und stellt somit eine ideale Ergänzung zum Massenbaustoff des herkömmlichen Betons dar.

## 5 Keilspaltversuch - Wedge Splitting Test

Zur Prüfung der Proben dieser Versuchsreihe wurde, wie auch bei der vorherigen, der Keilspaltversuch oder international als „Wedge Splitting Test“ bezeichnetes Prüfverfahren verwendet. Da dieser wesentlich für die von uns gefundenen Ergebnisse ist, möchten wir hier näher auf die bruchmechanischen Grundlagen und die Funktion des Tests eingehen, um eine Grundlage für die nachfolgenden Kapitel zu schaffen.

Der Versuch wurde im Jahr 1986 patentiert und dient der Ermittlung von materialspezifischen bruchmechanischen Kennwerten. Der Einsatz des Verfahrens eignet sich besonders gut für sich beim Bruch spröde oder sich quasi-spröde verhaltende Materialien. Die Kraft wird von einer Druckprüfmaschine erzeugt, die die Kraft über einen Metallkeil in eine vorgeschchnittene Kerbe überträgt. Die Umleitung der Kraft ist notwendig, um eine gleichbleibende und stabile Rissausbreitung über das Erreichen der Maximalkraft hinaus aufzuzeichnen.

Wie in Abbildung 5.1 zu sehen, muss eine Nut als Träger der Kraftübertragungsstücke hergestellt werden. Diese bestehen im Wesentlichen aus Lagern als Wälzkörpern, die die vertikale Maschinenkraft  $F_M$  in eine um den Keilfaktor verstärkte Horizontalkraft umsetzen. Diese vom Metallkeil übertragene horizontale Kraft wird in weiterer Folge als Spaltkraft  $F_H$  bezeichnet.

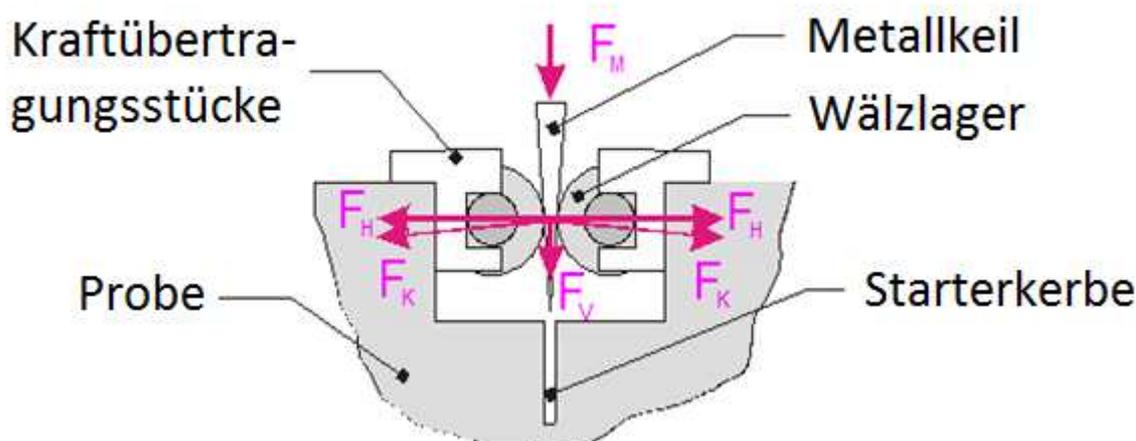


Abbildung 5.1: Kräfte am Keil [8]

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil des Keilspalttests sind elektronische Wegaufnehmer, die auf Höhe der Nut mittels einer speziell für diesen Versuch angefertigten Halterung angebracht werden und damit die Rissöffnung auf Höhe der Krafteinleitung messen. Diese Messung erfolgt an beiden Seiten der Probe, um bei ungleichmäßiger Öffnung ein Mittel der erhaltenen Werte als ein brauchbares Messergebnis zu erhalten. Diese gemessene Rissbreite wird als „Crack Mouth Opening Displacement“, kurz CMOD, bezeichnet. Dabei kommt es auf Grund der Öffnung der Probe in der Kerbe zu einer Öffnung von oben nach unten und dadurch zu einem Winkelfehler in der Öffnungsmessung durch die Wegaufnehmer.

Da der Fehler bei einer Rissöffnung von 1mm lediglich im Mikrometerbereich liegt, hat dieser keinen Einfluss auf das Messergebnis und kann somit vernachlässigt werden.

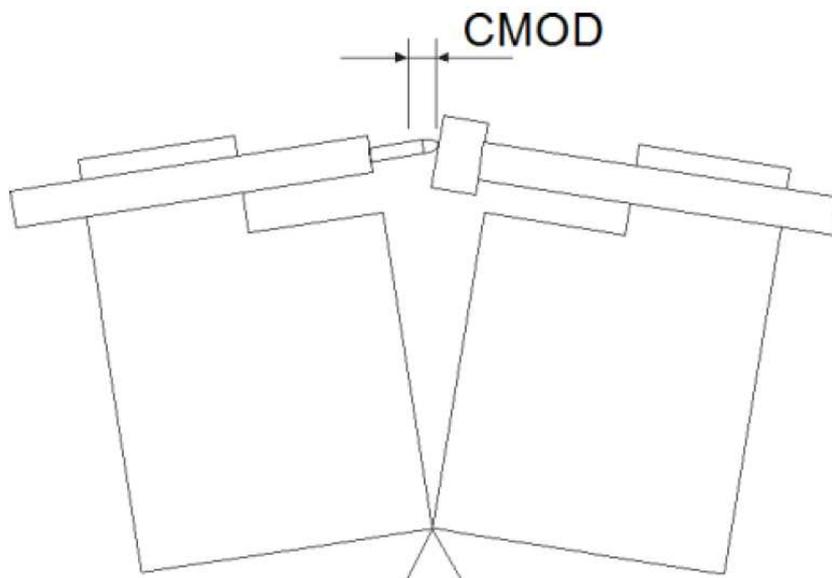


Abbildung 5.2: Schematische Darstellung der Rissöffnung [10]

Die vertikale Vorschubgeschwindigkeit der Druckprüfmaschine liegt bei der in den Normen festgelegten Geschwindigkeit von  $1\text{ mm}/\text{min}$ . Als Ergebnis des Keilspaltversuchs erhält man ein Last-Verschiebungs-Diagramm, im weiteren als LVK (Last-Verschiebungs-Kurve) bezeichnet. Es zeigt die von den beiden Wegaufnehmern gemessene gemittelte Rissbreite in Abhängigkeit der Spaltkraft  $F_H$ . Die Bruchenergie entspricht dabei dem Flächeninhalt, der von der Kurve und der Abszisse eingeschlossen wird.

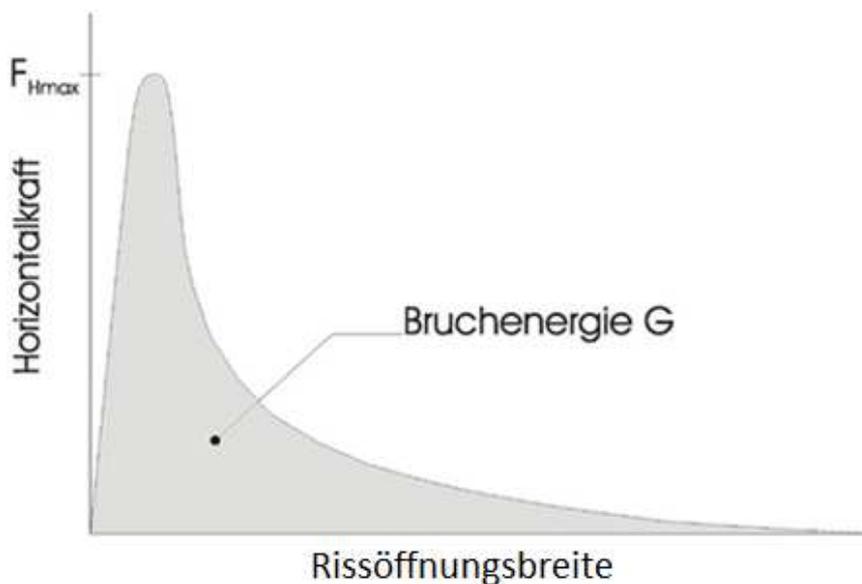


Abbildung 5.3: Schematische Darstellung einer Lastverschiebungskurve [8]

Um daraus die materialspezifische Bruchenergie zu erhalten, muss der Wert noch durch die projizierte Ligamentfläche (= die neu geschaffene Fläche) dividiert werden:

$$G_F = \frac{1}{A_{Lig}} \cdot \int_0^{\infty} F_H \cdot ds \quad \begin{array}{l} G_F \text{ .....spez. Bruchenergie [N/m]} \\ A_{Lig} \text{ .....Ligamentfläche [mm}^2\text{]} \\ F_H \text{ .....Horizontalkraft [N]} \\ s \text{ .....CMOD[mm]} \end{array} \quad (5-1)$$

Im folgenden werden die wichtigsten physikalischen Größen, die mit der LVK in Verbindung stehen, beschrieben:

- **Hooke'sche Gesetz:**

Idealisierter Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung. Da in der LVK der Zusammenhang von Kraft und Verschiebung dargestellt ist, ist die LVK dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm zwar ähnlich, unterscheidet sich aber grundlegend dadurch, dass beim Zugversuch ausschließlich Zugspannungen und beim Keilspaltversuch eine Kombination aus Zugkraft und Biegemoment auftritt. [8]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \begin{array}{l} \sigma \text{ .....Spannung[N/mm}^2\text{]} \\ E \text{ .....E-Modul [N/mm}^2\text{]} \\ \varepsilon \text{ .....Dehnung [-]} \end{array} \quad (5-2)$$

- **Dehnung:**

Die Dehnung ist als absolute Längenänderung eines Körpers bezogen auf seine Ausgangslänge definiert. Sie wird als Abszisse im Spannungs-Dehnungs-Diagramm aufgetragen.[8]

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad \begin{array}{l} l \text{ ..... gedehnte Länge [mm]} \\ l_0 \text{ .....Ausgangslänge [mm]} \\ \varepsilon \text{ .....Dehnung [-]} \end{array} \quad (5-3)$$

Man kann keine örtlichen Dehnungen (exakt) messen, sondern nur mittlere Dehnungen, etwa entlang von Verbindungslinien zweier Punkte, wobei diese nicht zu stark gekrümmt sein dürfen. [8]

- **Spezifische Rissinitiierungsenergie:**

Sie wird aus der LVK berechnet und stellt die plastische Energie bezogen auf die Bruchfläche dar, die nötig ist, um den Bruch der Probe einzuleiten. [8]

$$G_i = \frac{1}{A_{Lig}} \cdot \left( \int_0^{s_i} F_H \cdot ds - \frac{F_{H \max}^2}{2 \cdot E_{LVK}} \right) \quad \begin{array}{l} G_i \text{ .....Rissinitiierungsenergie [N/m]} \\ F_{H \max} \text{ .....max. Horizontalkraft [N]} \\ E_{LVK} \text{ .....Anstieg der LVK [N/mm]} \\ ds \text{ .....CMOD [mm]} \end{array} \quad (5-4)$$

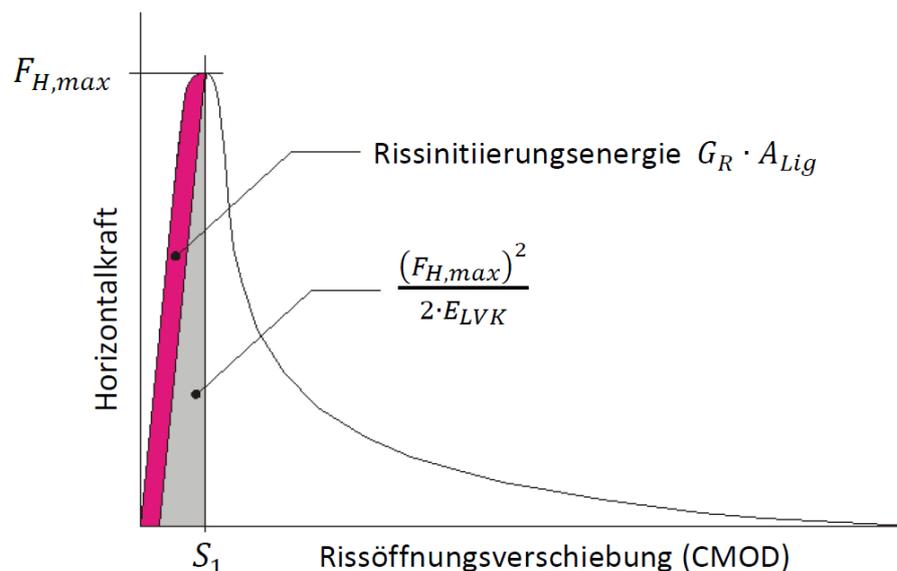


Abbildung 5.4: Rissinitiationsenergie im LVD [10]

Die grau dargestellte Fläche unter der Kurve entspricht der elastischen Energie, die bis zum Erreichen von  $F_{H,max}$  in der Prüfmaschine gespeichert ist und danach idealerweise langsam wieder abgegeben wird. [8]

- **Kerbbiegezugfestigkeit:**

Sie ist eine Kenngröße der Festigkeit (LEBM), liefert aber keine Aussage über das Bruchverhalten. Mit einer einfachen Programmroutine lässt sich die maximale Horizontalkraft  $F_{H,max}$  aus der LVK bestimmen. Aus ihr resultiert nach der Belastungsart "Biegung mit Normalkraft" die nominelle Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  (Kerbbiegezugspannung). Der Einfluss der Vertikalkomponente  $F_V$  und des Probeneigengewichts ist bei dieser Berechnung vernachlässigt worden. [8]

$$\sigma_{KBZ} = \frac{F_{H,max}}{A_{Lig}} + \frac{M_b}{W_y}$$

$\sigma_{KBZ}$ .....Kerbbiegezugspannung [N/mm<sup>2</sup>]  
 $M_b$ .....Biegemoment [Nmm]  
 $F_{H,max}$ .....max. Horizontalkraft [N]  
 $A_{Lig}$ .....Ligamentfläche [mm<sup>2</sup>]  
 $W_y$ .....axiales Widerstandsmoment der Ligamentfläche [mm<sup>3</sup>]

(5-5)

$$M_b = F_{H,max} \cdot (c - p + T_{Kerbe} + \frac{H_{Lig}}{2})$$

$(c-p)$  .....Abmaß siehe Abbildung 5.5 [mm]  
 $a$  .....Tiefe der Starterkerbe [mm]  
 $F_{H,max}$  .....max. Horizontalkraft [N]

(5-6)

$$W_y = \frac{B_{Lig} \cdot H_{Lig}^2}{6}$$

$B_{Lig}$ .....Ligamentbreite [mm]  
 $H_{Lig}$ .....Ligamenthöhe [mm]

(5-7)

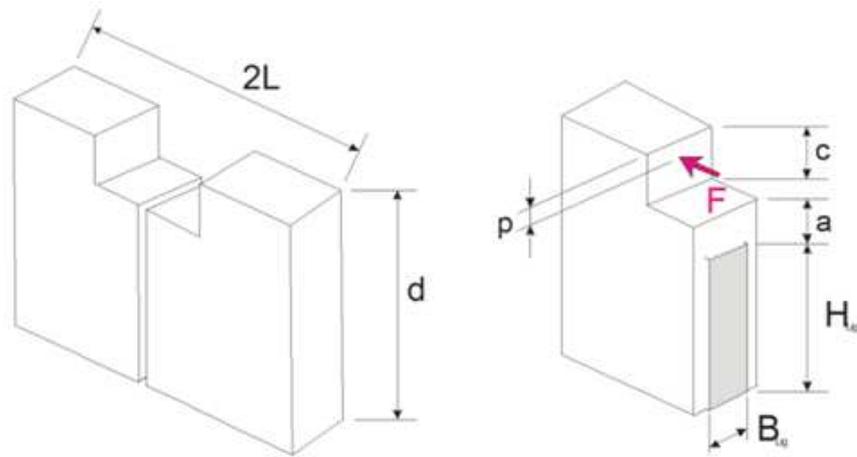


Abbildung 5.5: Abmessungen der Probe [10]

## 6 Untersuchung des Einflusses des hydrostatischen Druckes

Bei der Herstellung von Betonbauteilen im Hochbau mittels Schalungen werden diese nach dem Aufstellen meist von oben befüllt. Je nach Größe bzw. Volumen des Bauteils entstehen durch den bei der Anlieferung mengenmäßig begrenzten Beton unterschiedlich hohe Betonierhorizonte. Als Betonierhorizont wird die Höhe des Betons in der Schalung bezeichnet, auf die dieser durch das Befüllen der Schalung mit einer Lieferung steigt.

Auf Grund der unterschiedlichen Höhe in Bezug auf den Untergrund beziehungsweise den vorherigen Betonierhorizont stellt sich auch jedes Mal ein anderer hydrostatischer Druck ein. Dieser ist jeweils am Fußpunkt der Schalung bzw. am unteren Ende des frisch verfüllten Schalungsabschnittes am größten und nimmt mit der Höhe ab. Aus diesem Grund werden, wie in Kapitel 3 "*Schalungen [6]*" erwähnt, horizontale Wandschalungen aufgrund der hohen Frischbetondrücke gegeneinander verankert. Da sich selbstverdichtender Beton (SCC) wie eine Flüssigkeit verhält, kann der hydrostatische Druck für Wandschalungen wie folgt angenommen werden:

$$\rho = \gamma * h$$

$\rho$ .....	Druck [kN/m <sup>2</sup> ]	(6-1)
$\gamma$ .....	Dichte[kN/m <sup>3</sup> ]	
$h$ .....	Flüssigkeitshöhe [m]	

Auch im Zusammenhang mit dem Betonieren von Decken, wo der Beton in einteilige horizontale Schalungselemente verfüllt wird, stellt sich an der Unterseite ein über die gesamte Deckenschalung gleich verteilter Druck ein, wo hingegen die Randabschalungen der Decke auf den hydrostatischen Druck nach Formel (6-1) bemessen werden müssen. Da in Zusammenhang mit unseren Untersuchungen zu der zementgebundenen Holzfaserplatte, die als verlorene Schalungselemente am Bauwerk verbleiben, ist der Einfluss des hydrostatischen Druckes auf den Verbund von besonderem Interesse.

Den diesem Kapitel gewidmeten Untersuchungen liegt die Überlegung zu Grunde, dass ein durch höhere Betonierhorizonte verursachter größerer hydrostatischer Druck einen womöglich besseren Verbund zwischen Beton und der Oberfläche der zementgebundenen Holzspanplatte zur Folge haben könnte.

### 6.1 Versuchsaufbau

Um den Einfluss des hydrostatischen Druckes auf die Verbundfestigkeit testen zu können, mussten künstliche, unterschiedlich hohe Betonierhorizonte geschaffen werden. In Vorversuchen des Instituts für Mechanik der Werkstoffe und Strukturen der TU Wien wurde der unterschiedliche hydrostatische Druck durch eine definierte Auflast mit unterschiedlichen Gewicht auf die immer gleich hohe Betonprobe realisiert. In unseren Versuchen entschieden wir uns, wie in Abbildung 6.1 zu sehen, mit PVC-Röhren unterschiedlichen Höhen, die völlig ausbetoniert wurden, zurückzugreifen, um diverse äußere Einflüsse zu minimieren.

Die Rohre wiesen jeweils einen Durchmesser von 110 mm auf. Als Simulation der Schalung dienten auch hier wieder 15x15 cm große Plättchen der unbehandelten *Cetris*<sup>®</sup>-Standardplatte. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden jeweils sechs Proben in den Abstufungen 25 cm, 50 cm und 75 cm Höhe hergestellt. Nach einer Aushärtungszeit von 28

Tagen wurde die Verbundfestigkeit wie mit der im Kapitel 6.5 "Testdurchführung – Zugversuch" beschriebene Methode ermittelt.



Abbildung 6.1: PVC-Röhren

## 6.2 Vorbereitung der Proben

In einem ersten Schritt wurden die 1 m langen PVC-Rohre mit einem Durchmesser von 110 mm mittels einer Bandsäge auf die Längen 25 cm, 50 cm und 75 cm zurechtgeschnitten. Um eine ebene Auflagefläche zu schaffen, mussten die Schnittränder der PVC-Rohre mittels einer Feile entgratet und mit einem Messer nachbearbeitet werden.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurden die *Cetris*<sup>®</sup>-Plättchen mittels einer Schablone in der Mitte markiert und beschriftet. Dabei folgt die Beschriftung folgenden Muster: Hxx\_1 bis Hxx\_6, wobei "xx" die jeweilige Betonierhöhe - hier also 25 cm, 50 cm oder 75 cm - angibt.

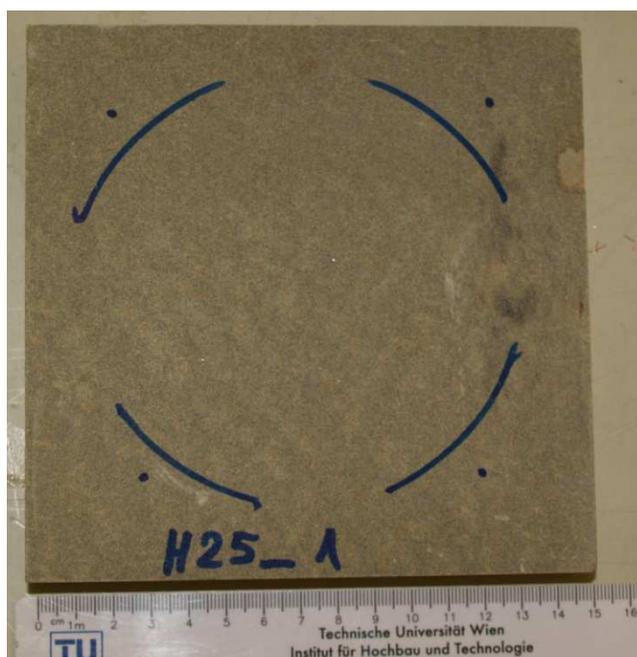


Abbildung 6.2: Markierte *Cetris*<sup>®</sup>-Platte

Neben der Markierung des Rohrquerschnittes auf der Platte und der Bezeichnung wurden auch Punkte für Bohrungen markiert. Diese 4 Bohrungen in den Eckbereichen der Platte außerhalb des Rohrquerschnittes dienten der weiteren Befestigung der Rohre mittels eines Spanndrahts. Der Zementgehalt von 25% der *Cetris*<sup>®</sup>-Platte erschwert das Bohren erheblich und zeigt die hohe Festigkeit der Platten im Vergleich zu reinen Holzspanplatten. Je zwei Drähte wurden in einer Höhe von 10 cm durch 4 mm große Bohrungen kreuzweise durch die Rohre und die Löcher in der Platte geführt. Die Enden der Drähte wurden auf der Rückseite ineinander verzwirbelt und mit einer Zange weiter gespannt bis das PVC-Rohr fest mit der Platte verbunden war. Dieser Schritt war notwendig, da die Rohre keine Auflast besaßen und somit die Möglichkeit bestand, dass diese beim Befüllen mit SCC „aufschwimmen“, für den Fall, dass die Abdichtung mittels Panzerband alleine nicht stark genug sein sollte.

Die geringe Höhe der 25 cm-Proben im Vergleich zu der Aufhängung aus Bewehrungsstahl machte es notwendig, die Aufhängung im oberen Bereich zu fixieren, damit diese nicht in Kontakt mit der Verbundfläche gerät. Dies geschah mittels zwei ebenfalls 4 mm großen Bohrungen 2 cm unterhalb des oberen Randes und Draht. Nachdem alle Rohre vorgespannt waren, erfolgte eine zusätzliche Abdichtung der Aufstandsfläche mittels orangen Panzerband (DuctTape).

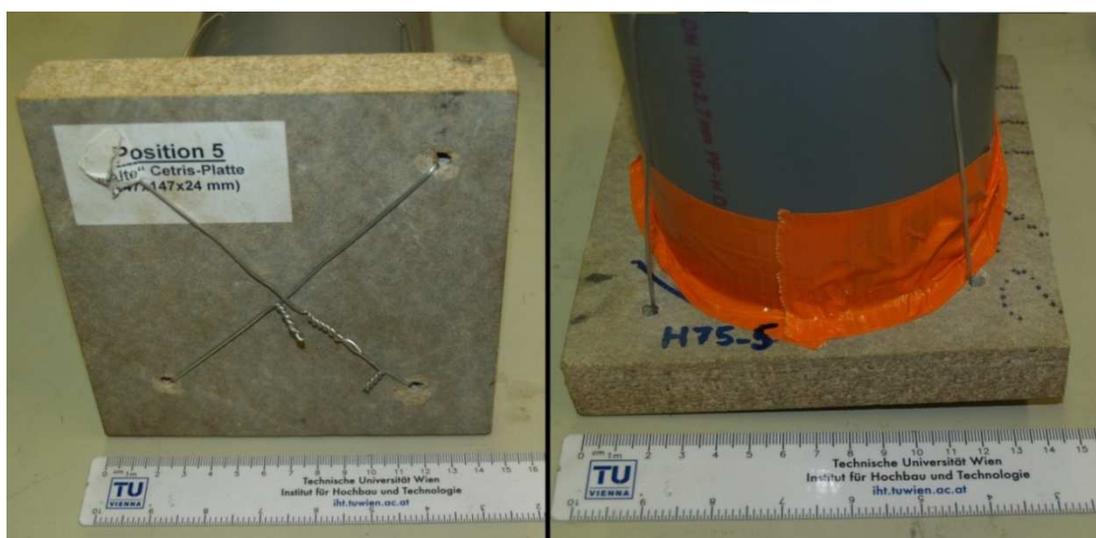


Abbildung 6.3: Fertig vorbereitete Probe (links: Untersicht, rechts: Ansicht)

Zum Übertragen der Zugkraft der Zugprüfmaschine wurden Aufhängungen aus Bewehrungsstahl händisch gebogen. Die Bewehrungsseisen wiesen eine gerippte Oberfläche und einen Durchmesser von 10 mm auf. Diese wurden in eine U-Form gebogen und dann an den beiden Enden nochmals hakenförmig aufgebogen, um ein Herausziehen aus der Betonprobe während des Zugvorgangs zu verhindern

### 6.3 Herstellen der Proben

Die Mischung des selbstverdichtenden Betons erfolgte nach einer Rezeptur der Firma Lafarge Permooser Holding AG - Wien. Eine der Würfelschalungen umfasste ein Volumen von 2,835 Litern. Die Proben wurden an einem Betoniertag hergestellt, wofür vier Mischungen erforderlich waren, die sich wie folgt zusammensetzten:

**Tabelle 6-1: Betonrezeptur für 20 Liter Frischbeton**

<b>Bezeichnung:</b>	<b>Menge:</b>	<b>EH</b>
FLUAMIX C	3,650	[kg]
DER SCHWARZE	6,390	[kg]
SAND 0/4	15,970	[kg]
KIES 4-16	13,070	[kg]
Proplast 200	0,037	[kg]
Profluid VP3	0,046	[kg]
Reinwasser	3,470	[kg]

**Fluamix C** ist ein Betonzusatzstoff zur Verbesserung der Betoneigenschaften. Es können damit Effekte wie eine Reduzierung des Wasserbedarfs, Verbesserung der Verarbeitbarkeit des Frischbetons und eine Reduktion der Hydratationswärme während der Erhärtung erzielt werden. Bei **Der Schwarze** handelt es sich um einen Universalzement der Festigkeitsklasse 42,5 [ $kN/cm^2$ ] und ist für Sichtbetonoberflächen besonders geeignet. Nach österreichischer Betonnorm ON B 4710-1 wird dieser genauer als CEM II/A-M(S-L) 42,5 N WT 38 bezeichnet. **Sand 0/4** weist eine Körnung von 0 bis 4 mm auf und ist damit sehr feinkörnig, wie es für die Herstellung von selbstverdichtenden Beton erforderlich ist. Als weiterer Zuschlagstoff dient Betonschotter mit einer Körnung von 4 bis 16 mm, hier als **Kies 4-16** bezeichnet. Damit erfüllt auch der Schotter den für die Herstellung von SCC notwendigen Parameter mit einem Größtkorn von 16 mm Durchmesser. [6]

Neben den genannten festen werden auch eine Reihe flüssiger Bestandteile zur Herstellung des SCCs benötigt. Diese umfassen neben Reinwasser vor allem den Anteil der Bauchemie. Die Anwendung moderner Hochleistungsverflüssiger ist essentiell für die richtige Konsistenz von selbstverdichtenden Beton. Der bei den Versuchen zum Einsatz gekommene Verflüssiger war **Proplast 200**, der generell zu einer Verringerung der Grenzflächenspannung innerhalb des Frischbetons führt. Dadurch kommt es zu einer besseren Mischung mit dem Anmachwasser und der Beton erhält eine weichere Konsistenz. Proplast 200 ist mit dem Superfließmittel **Profluid VP3** kombinierbar. Hierbei handelt es sich um ein Fließmittel auf Polycarboxylatbasis, das eine enorme Wassereinsparung im Vergleich zu herkömmlichen Fließmitteln ermöglicht. Weiter verlängert Profluid VP3 die mögliche Verarbeitungszeit und macht den Beton leichter pumpfähig. Alle Bestandteile der Bauchemie werden mit dem Anmachwasser in den Frischbeton dosiert. [6]

Im ersten Schritt der Betonmischung wurde die Trommel der Betonmischmaschine mit etwas Wasser befüllt und in Drehung versetzt, um die Trommel ausreichend zu befeuchten. Das Wasser wurde anschließend wieder abgelassen. Dieser Schritt ist notwendig, um genau jene Menge Wasser laut Rezeptur zu erhalten, da ansonsten ein Teil des Wassers an die trockene Trommel der Zementmischmaschine verloren gehen würde. Im zweiten Schritt werden alle festen Bestandteile abgewogen, dosiert und in die Trommel gegeben. Nachdem Sand, Kies und Zement in die Mischmaschine gegeben wurden, erfolgte das Trockenmischen. In der Zwischenzeit wurden die flüssigen Bestandteile, Reinwasser und Bauchemie, gewogen und mit dem Anmachwasser vermengt. Das Anmachwasser wurde inklusive der bauchemieschen-Zusätze bei laufender Maschine langsam zugegeben und bis zum Erreichen einer leicht zähen

honigartigen Konsistenz, für ca. 3 – 5 Minuten weiter gemischt. Das Abwiegen der Betonbestandteile erfolgte mittels einer Waage nach der zuvor bereits angegebenen Rezeptur. Dabei wurden folgende Toleranzen eingehalten: [6]

- Feststoffe  $\pm 20$  g
- Bauchemie  $\pm 1$  g
- Wasser  $\pm 5$  g

Die Präparation der PVC-Rohre erfolgte bei einer Außentemperatur von ca. 22 °C. Auf Grund der langen Lagerzeit der Baustoffe und des trockenen Raumklimas im Vergleich zu den Wintermonaten war etwas mehr Wasser erforderlich, um die gewünschte Konsistenz des SCCs zu erhalten. Dies lag vor allem an dem trockeneren Sand. Da mehr als eine Mischung zum Befüllen aller Proben erforderlich sein würde, aber eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet sein musste, wurde der Beton aus der ersten Mischung in alle Proben gleichermaßen verteilt. Alleine diese Mischung geht einen Verbund mit der Platte ein und ist somit bei allen Proben gleich. Der restliche Beton dient nur mehr als Auflast und somit hat dessen Zusammensetzung keinen Einfluss auf die Eigenschaften des Verbundes mit der *Cetris*<sup>®</sup>-Platte.

Für das vollständige Befüllen der 18 PVC-Rohre waren insgesamt vier Mischungen mittels Betonmischer erforderlich. Die Rohre selbst wurden mittels eines Trichters befüllt. Nachdem der Betonhorizont fast den oberen Rand des Rohres erreicht hatte, wurden die Bewehrungsbügel bei den 50 cm bzw. 75 cm hohen Proben in den Beton gedrückt und in einem Abstand von ca. 5 cm mittels Kanthölzer fixiert. Dabei musste darauf geachtet werden, dass die Bügel möglichst mittig aus dem Frischbeton ragten, damit im späteren Zugversuch keine bzw. nur möglichst kleine Momente entstehen.

Die Aushärtung erfolgte über einen Zeitraum von genau 28 Tagen im Präparationsraum.

## 6.4 Feuchtemessung und Erhebung der Plattenfarbe

Um weitere detailliertere Ergebnisse aus den Ergebnissen des Zugversuchs erhalten zu können, wurde der Zustand der Platten im Vorfeld der Probenvorbereitung genauer dokumentiert. Diese Dokumentation umfasste neben der Farbe der Platte auch Feuchtigkeit im Platteninneren.

### 6.4.1 Plattenfarbe

Im Zuge der Herstellung der Proben der letzten Versuchsreihe unter dem Projektarbeitstitel „*Verbunduntersuchungsstudie zum Einsatz von zementgebundenen Holzfasernplatten als verlorene Schalung in Kombination mit selbstverdichtendem Beton*“ stellten wir fest, dass die Plättchen, die wir aus dem tschechischen Werk erhielten, sehr unterschiedliche Oberflächenfärbungen aufwiesen. Neben Verfärbungen, die von eventuellen Verunreinigungen stammen könnten, wiesen die Platten auch unterschiedliche Graustufen auf. Die nachfolgende Abbildung 6.4 zeigt die für den Zugversuch verwendeten 16 *Cetris*<sup>®</sup>-Plättchen im Vergleich zu einer „Referenzplatte“. Als "Referenzplatte" diente während all der, von uns durchgeführten Versuchen, eine sehr dunkle Standardplatte. Auf Grund der Färbung wurde hier angenommen, dass diese Platte einen hohen Zementgehalt im Vergleich zu helleren Platten aufweist.

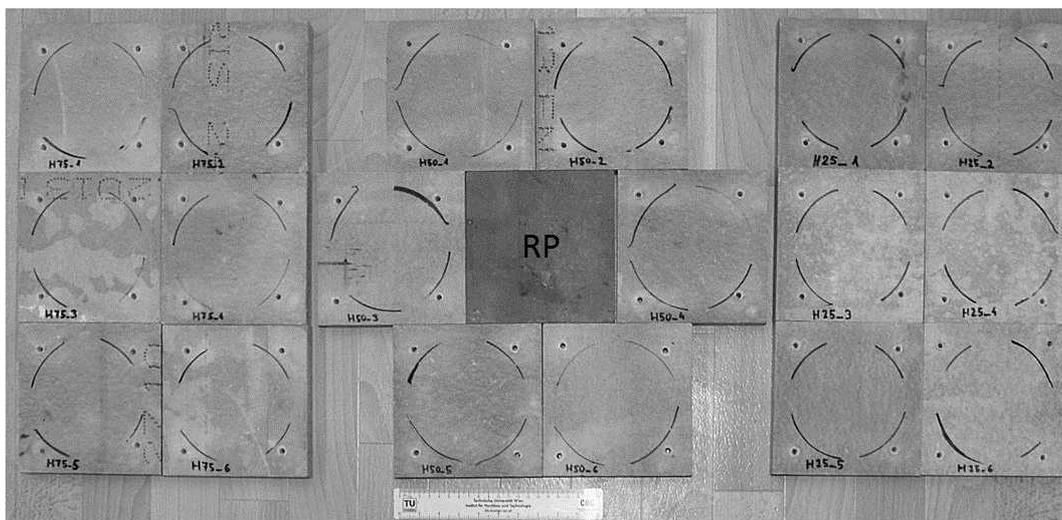


Abbildung 6.4: Vergleich der Färbung der Platten mit der Referenzplatte (RP)

Diesem Phänomen wurde die Annahme zu Grunde gelegt, dass ein höherer Zementgehalt zu einer dunkleren Färbung der Platte führen muss. Ein höherer Zementgehalt würde wiederum eine höhere Plattenfestigkeit zur Folge haben. Ein eventueller Zusammenhang wird im Zuge der Testauswertung in Kapitel 6.8.3 "Plattenfärbung" erörtert.

#### 6.4.2 Plattenfeuchte

Als Arbeitshypothese wurde angenommen, dass die Feuchtigkeit einen Einfluss auf die Plattenfestigkeit hat. Aus diesem Grund wurde mittels eines Holz- und Baufeuchtemessgerätes Modell Combo 200 der Firma BES Bollmann die Plattenfeuchte bestimmt. Bei diesem Holzfeuchtemessgerät handelt es sich um ein Messgerät des Pin-Typs, das bedeutet, es kann die Feuchtigkeit in einer gewünschten Tiefe gemessen werden. Dies hat den Nachteil, dass für die Messung 2 Stahlkontaktstifte am Prüfgerät in die Oberfläche eingeschlagen werden müssen und somit die Oberfläche eine Beschädigung aufweist. Die Feuchtigkeit wird dann in der gewünschten Tiefe, welche einfach durch die Eindringtiefe der Kontaktstifte bestimmt wird, durch eine Messung des elektrischen Widerstandes zwischen den beiden Spitzen der Kontaktstifte bestimmt. Ein wesentlicher Vorteil bei der Messung mit derartigen Einstechfühlern ist, dass die „Lage“ der Feuchtigkeit punktuell sehr genau bestimmt werden kann.

Im Allgemeinen bezeichnet die Bauteilfeuchte im Holz oder Beton den Wasseranteil in Prozent. Der Wassergehalt wird dabei auf die Gesamtmasse, das heißt Wasser und Feststoff, bezogen. Bei der Messung mit Einstechfühlern verändert sich der elektrische Widerstand mit dem Wassergehalt, das bedeutet, ein höherer Wassergehalt führt zu einem geringeren elektrischen Widerstand und umgekehrt. Nachdem das Messgerät auf die Oberflächentemperatur eingestellt wurde, um eine Temperaturkompensation des gemessenen Widerstandes vorzunehmen, wird am Display das Ergebnis in Prozent relativer Luftfeuchtigkeit angegeben. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass die Begriffe Bauteilfeuchtigkeit und Wassergehalt nicht gleichzusetzen sind. Zum Beispiel ist der Wassergehalt einer bestimmten Holzart bei einer Holzfeuchte von 100% gleich 50% der feuchten Masse.

Die Feuchtigkeit wurde im Labor bestimmt. Die Oberflächentemperatur der für den Zugversuch verbauten Platten sowie der Referenzplatte betrug jeweils 24 °C.

Die Messung mittels des BES Bollmann Combo 200 ergab in gleicher Tiefe folgende Werte:

**Tabelle 6-2: Plattenfeuchtigkeit**

	Temperatur [°C]	Feuchtigkeit [% RH]	
		Mitte	Rand
Referenzplatte	24	12,9	-
verbaute Platten	24	23,9	22,0

## 6.5 Testdurchführung – Zugversuch

Die Testdurchführung erfolgte nach einer Aushärtungszeit von genau 28 Tagen in einer Zugkraftprüfmaschine. Nachdem die Proben aus dem Präparationsraum ins Testlabor gebracht wurden, wurden die Spanndrähte und das Panzerband, welches als zusätzliche Abdichtung diente, entfernt. Die einzige Verbindung zwischen den *Cetris*<sup>®</sup>-Plättchen und den PVC-Rohren bzw. dem Betonkern bildete ab nun nur noch der Verbund an der Kontaktfläche. Um diese möglichst momentenfrei, das heißt nur mit einer reinen Zugkraft zu belasten, wurden die Proben an der Oberseite gelenkig in die Maschine eingespannt. Die Platten selbst wurden, wie in der folgenden Abbildung 6.5 zu sehen, mittels Spannpratzen in der Maschine fixiert. Diese wurden jedoch nicht fest angezogen, sondern wiesen ein geringes Spiel auf, sodass sich die Platte in Richtung der Zugkraft ausrichten konnte, um die Momentenbelastung der Verbundfläche weiter zu minimieren.



Abbildung 6.5: Einspannung in der Maschine

Der Zugversuch wurde mit einer Anfangsgeschwindigkeit von 30 mm/min bis zu einer anliegenden Kraft von 50 N durchgeführt. Nach dem Erreichen der 50 N wurde die Geschwindigkeit der Maschine auf 0,50 mm/min reduziert. Für diese Versuche wurde ein Abbruchkriterium definiert, welches den Test bei einem Kraftabfall auf 20% der Maximalkraft abbrechen sollte. Dieses wurde jedoch wieder entfernt, da wir feststellen mussten, dass es zu einem Abbruch beim Überspringen der Rippen der Bewehrungseisen gekommen ist. Aus diesem Grund weist die Probe H75\_1 keinen Wert auf, da der Verbund durch die Vorbelastung bereits beschädigt wurde und ein erneutes Testen einen nicht wahrheitsgetreuen Messwert geliefert hätte.

## 6.6 Ergebnisse des Zugversuchs

Die Ergebnisse der Zugversuche bestätigten deutlich, dass der hydrostatische Druck und der damit verbundene höhere Druck an der Verbundfläche zu keinem vermehrten Eindringen von Feinanteilen und somit zu einem besseren Verbund führt. Die Proben zeigten einheitlich, wie in Abbildung 6.6 zu sehen, einen 100%-tigen Bruch der Platte.



Abbildung 6.6: Bruchflächen

Die Proben wiesen im Mittel über alle 6 Proben einer Gruppe fast identische Mittelwerte der Zugkraft auf. Eine Übersicht über die Ergebnisse sind in Anhang A sowie in der nachfolgenden Abbildung 6.7 dargestellt.

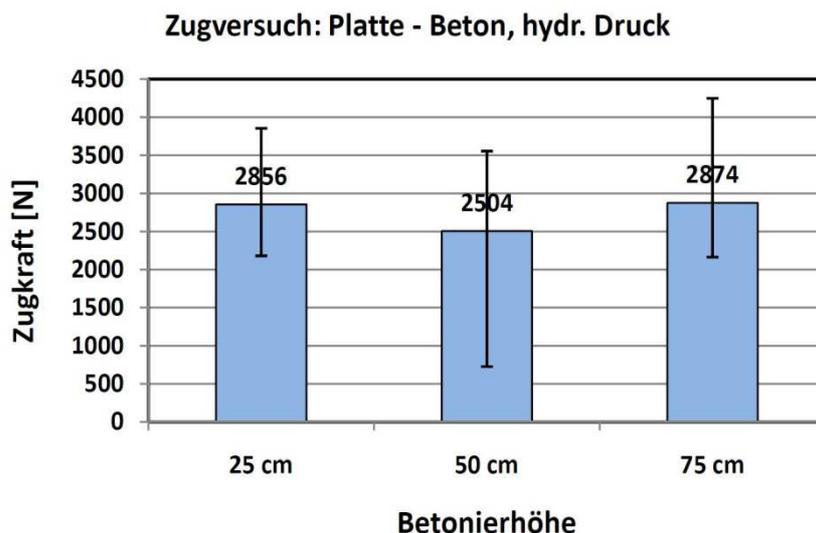


Abbildung 6.7: Ergebnisse der Zugversuche

Die Auswertung der Zugversuche ergab einen Höchstwert der Zugkraft von 4.250 N bei der Probe H75\_5 und einen Tiefstwert von lediglich 2.165 N, gemessen an der Probe H75\_6, sofern Probe H50\_7, welche nur 727 N erzielte, außer Acht gelassen wird. Alle anderen Ergeb-

nisse lagen, unabhängig von der Betonierhöhe, zwischen diesen Werten. Wie in Abbildung 6.7 zu sehen ist, liegen die Werte der maximal aufnehmbaren Zugkraft im Mittel sehr dicht um einen Durchschnittswert von etwa 2750 N.

## 6.7 Plattenfestigkeit – Keilspaltversuch

Um ein besseres Verständnis für die Ergebnisse des Zugversuchs zu erlangen, wurde mittels Keilspaltversuch (Wedge Splitting Test) jeweils die Probe mit dem höchsten und dem niedrigsten Werten des Zugversuches einer Gruppe auf ihre Festigkeit getestet.

Um die Platten aus dem Zugversuch mittels Keilspaltversuch testen zu können, mussten diese vorbereitet werden. Im ersten Schritt wurden 2 Beton-Blöcke mit den Abmessungen 15 x 15 x 7,50 cm mit Hilfe eines Klebemörtels an beide Seiten der Platten geklebt. Bei dem hierfür verwendeten Kleber handelte es sich um einen *SikaDur*<sup>®</sup> – 31 *AUT Normal*, einem feuchtigkeitverträglichen thixotropen 2-Komponenten-Kleber auf Epoxidharzbasis. Die Anwendung eines auf epoxidharzbasierenden Klebers wurde bevorzugt, um die Feuchte der Probe durch den Kleber nicht zu verändern. Der fertig gemischte Klebemörtel wurde auf beide Teile der Probe dünn aufgetragen und diese anschließend aufeinander gepresst.

Nach einer Aushärtungszeit von 24 Stunden wurde mittels einer wassergekühlten Bankkreissäge eine 2,4 mm starke Kerbe in die Mitte einer Seite der Platte geschnitten. Diese dient im Zuge des Keilspaltversuchs als Sollbruchstelle, als Ausgangspunkt für den Riss und wird als „Starterkerbe“ bezeichnet. Nach dem Schneiden werden links und rechts der Kerbe Marmorprismen auf die Betonkörper geklebt. Das Kleben erfolgt ebenfalls mit dem oben beschriebenen 2-Komponenten-Kleber. Dabei war darauf zu achten, dass die Prismen genau parallel zu einander und in der Mitte der Kerbe in einem Abstand von 4,10 cm aufgeklebt wurden. Die Aushärtungszeit für den Kleber der Marmorprismen wurde ebenfalls wieder mit 24 Stunden angesetzt.

### 6.7.1 Anbringen des Messequipments

In einem ersten Schritt wurden die Proben für die Prüfung in der Maschine vorbereitet. Um generell während der Prüfung Rissöffnungswerte zu erhalten, muss ein Aluminiumrahmen an der Probenoberseite befestigt werden. Dieser besteht aus zwei Teilen, die wiederum mit jeweils zwei Feststellschrauben an der Probe fixiert werden. Dieser Rahmen dient zur Aufnahme der beiden Wegaufnehmer, die im Verlauf des Tests die Öffnung der Probe in Höhe der Marmorprismen, an welchen auch die Krafteinleitung erfolgt, messen. Im durchgeführten Versuch kamen zwei Wegaufnehmer zum Einsatz, da sich die Proben nicht gleichmäßig spalten ließen. Die Werte der beiden Wegaufnehmer mit einer Präzision von einem Tausendstel Millimeter wurden im Zuge der Auswertung gemittelt. Beim Anbringen der Wegaufnehmer war darauf zu achten, dass diese bereits vor dem elektronischen Trieren des Messprogramms eine möglichst geringe Distanz zum Nullpunkt anzeigten, um ihnen den vollen Verschiebungsbereich in beide Richtungen während des Versuches zu ermöglichen. [6]

### 6.7.2 Versuchsdurchführung

Nachdem der Aluminiumrahmen an der Probe angebracht wurde, wurde diese, wie in Abbildung 6.8 zu sehen, mittig in der Prüfmaschine platziert; dabei war darauf zu achten, dass

sich die Platte genau mittig über dem linearen Auflager befindet. Um ein Kippen der Probe zu verhindern, wurden diese mittels PE-Schaumkeilen bis zum Anliegen der Prüfkraft gestützt. Nun erfolgte das Befestigen der beiden Wegaufnehmer an den dafür vorgesehenen Öffnungen des Aluminiumrahmens. [6]

Die Steuerung des Versuchs und der Druckprüfmaschine erfolgte durch ein Steuermodul der Firma „DOLI GesmbH“. Mittels eines an die Maschine angeschlossenen PCs wurden Messdaten der Maschine und des Messequipments von einer Messsoftware verarbeitet und als Ergebnis ausgegeben bzw. an die Prüfmaschine zurückgesendet. [6]



Abbildung 6.8: Probe in der Prüfmaschine

Vor dem Start jedes einzelnen Prüfdurchganges muss für jede Probe ein neues Prüfprotokoll angelegt und die Messwerte von Kraftmessdose und Wegaufnehmer auf null gesetzt werden. Ist dies erfolgt, kann der Versuch über die Messsoftware gestartet werden. Ab dem ersten Kontakt mit dem Keil liegt die vertikale Vorschubgeschwindigkeit der Druckprüfmaschine bei 1 mm pro Minute. Die Messung dauert solange an, bis entweder die Prüfkraft unter einer definierten Größe fällt oder die Wegaufnehmer einen gewissen Weg messen. Anschließend fährt die Presseinrichtung wieder nach oben, sodass die Wegaufnehmer aus dem Aluminiumrahmen und die Probe aus der Maschine entfernt werden können. Durch das Lösen der Fixierschrauben des Rahmens konnte dieser ebenfalls von der Probe entfernt und mit dem Test der nächsten Probe begonnen werden.



Abbildung 6.9: Wegaufnehmer

Das Ergebnis der Tests ist ein Last-Verschiebungs-Diagramm. Es zeigt die gemittelte Rissöffnung der Probe am Krafteinleitungspunkt in Abhängigkeit der Spaltkraft. Die folgende

Abbildung 6.10 zeigt exemplarisch den Verlauf der ermittelten Kurven. Diese Daten wurden mit Hilfe einer Excel-Tabelle, auf die im folgenden Kapitel 6.7.3 "Auswertung" eingegangen wird, weiter ausgewertet.

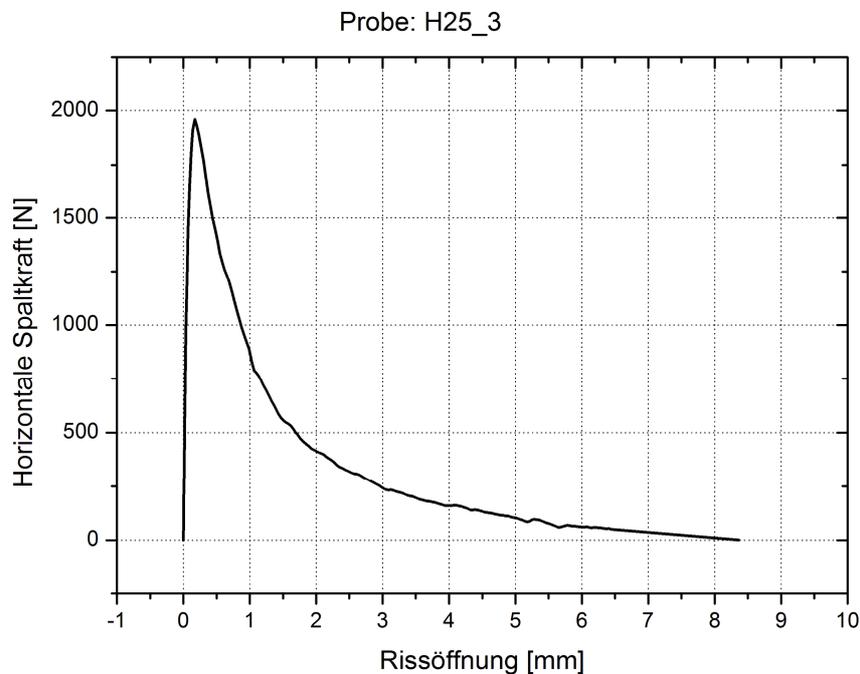


Abbildung 6.10: Last-Verschiebungs-Diagramm der Probe H25\_3

### 6.7.3 Auswertung

Die Auswertung der Messdaten erfolgte im Anschluss an den Test. Die Proben wurden, falls noch erforderlich, mittels des Keils und einem geringen Kraftaufwand gespalten. Die Proben wiesen, wie in Abbildung 6.11 bereits zusehen, eine Beschädigung durch den Zugversuch auf, sodass bei der Keilspaltmethode die Bruchfläche beeinträchtigt wurde. Daher musste diese Fläche  $A_1$ , wie in nachstehender Abbildung zu sehen, vermessen werden.

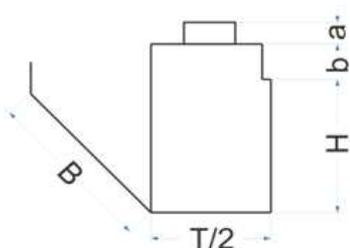


Abbildung 6.11: Vermessen der Bruchfläche – H75\_2 mit Abzugsfläche  $A_1$

Mit Hilfe dieser im Verbund nicht wirksamen Bruchfläche  $A_1$  wurde anschließend eine reduzierte Breite  $B_{red}$  berechnet:

$$B_{red} = B - \frac{A_1}{H} \quad \begin{array}{l} B_{red} \dots\dots \text{reduzierte Breite [mm]} \\ B \dots\dots\dots \text{wahre Breite [mm]} \\ A_1 \dots\dots\dots \text{nicht wirksame Bruchfläche [mm}^2\text{]} \\ H \dots\dots\dots \text{Höhe [mm]} \end{array} \quad (6-2)$$

Diese Annahme durfte getroffen werden, da in diesem Versuch nicht der Verbund zwischen Platte und Beton, sondern die Plattenfestigkeit selbst und der Riss auch in der Mitte der Platte initiiert wurde. Es wurde daher weiter angenommen, dass die Verbundfestigkeit des 2-Komponenten-Klebers wesentlich höher ist als die innere Plattenfestigkeit und sich ein Riss daher nicht in die Verbundfläche ausbreiten konnte. Diese Annahme bestätigte sich während der Versuche. Im nächsten Schritt wurden die Proben mittels Schiebelehre vermessen und die in Abbildung 6.12 dargestellten Abmessungen erhoben. Für die weitere Auswertung waren hier sechs Kennwerte der Probe von Bedeutung:



- a ... Höhe der Marmorprismen inkl. Kleber [mm]*
- b ... Tiefe der Starterkerbe [mm]*
- H ... Höhe der Verbundfläche [mm]*
- B ... Breite der Verbundfläche [mm]*
- T ... Tiefe der Würfelprobe [mm]*

Abbildung 6.12: Probenabmessungen u. Erläuterung der Bezeichnungen

Diese Messwerte wurden für die Datenerfassung in einen Prüfbericht (siehe Anhang A) eingetragen und später für die Berechnungen in Microsoft® Excel übertragen. Die von der Prüfmaschine ausgegebenen Daten wurden in das Programm „ORIGIN“ eingelesen. Auf diese Weise erhielten wir durch die Auswertung der Last-Verschiebungs-Diagramme, wie sie in Abbildung 6.10 dargestellt sind, einen Wert für die Bruchenergie  $G$  [Joule/m<sup>2</sup>] und den Maximalwert der horizontalen Spaltkraft  $F_{h,max}$  [kN]. Für die weitere Berechnung war die Anwendung folgender Formeln erforderlich:

$$\sigma_F = \frac{F_{h,max}}{A_{Verbundfläche}} \quad \begin{array}{l} F_{h,max} \dots\dots \text{max. Horizontalkraft [N]} \\ A_V \dots\dots\dots \text{Verbundfläche [mm}^2\text{]} \\ \sigma_F \dots\dots\dots \text{Spannung infolge der} \\ \text{Horizontalkraft [N/mm}^2\text{]} \end{array} \quad (6-3)$$

$$\sigma_M = \frac{M}{W} = \frac{F_{h,max} * \left( a - 5 \text{ mm} + b + \frac{H}{2} \right)}{(B_{red} * H^2) : 6} \quad \begin{array}{l} a \dots\dots\dots \text{Höhe der Marmorprismen} \\ \text{inkl. Kleber [mm]} \\ b \dots\dots\dots \text{Tiefe der Starterkerbe [mm]} \\ H \dots\dots\dots \text{Höhe der Verbundfläche [mm]} \\ B \dots\dots\dots \text{Breite der Verbundfläche [mm]} \\ \sigma_M \dots\dots\dots \text{Spannung infolge Biege-} \\ \text{moment [Nmm]} \end{array} \quad (6-4)$$

$$\sigma_{KBZ} = \sigma_F + \sigma_M \quad \sigma_{KBZ} \dots \text{Kerbbiegezugfestigkeit [Nmm]} \quad (6-5)$$

Die Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  setzt sich aus einem  $\sigma_F$  Kraft- und einem  $\sigma_M$  Momentenanteil zusammen. Die in die Berechnung eingehenden Parameter sind neben der maximalen Spaltkraft die geometrischen Abmessungen, die im Laufe der Probenvermessungen nach dem

Spaltzugversuch erhoben wurden. Die spezifische Bruchenergie  $G_F$  wird ebenfalls aus der EXCEL-Tabelle ermittelt. Die Bruchenergie  $G$  wird mittels des Programms ORIGIN als Integral der Last-Verschiebungs-Kurve ermittelt und ist somit mit dem Flächeninhalt, der von Kurve und Abszisse eingeschlossen wird, gleichzusetzen: [6]

$$G_F = \frac{G}{H * B} * 1000 \quad (6-6)$$

$G_F$  ..... spezifische Bruchenergie [J/m<sup>2</sup>]  
 $G$  ..... Bruchenergie [J]  
 $H$  ..... Höher der Verbundfläche [m]  
 $B$  ..... Breite der Verbundfläche [m]

Nachstehende Abbildung 6.13 zeigt eine Zusammenfassung der bruchmechanischen Eigenschaften der getesteten *Cetris*<sup>®</sup>-Platten in Abhängigkeit von der Betonierhöhe. Es wurden jeweils die über eine Messserie, das entspricht 2 Proben, gemittelten Werte der Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  und der spezifischen Bruchenergie  $G_F$  dargestellt.

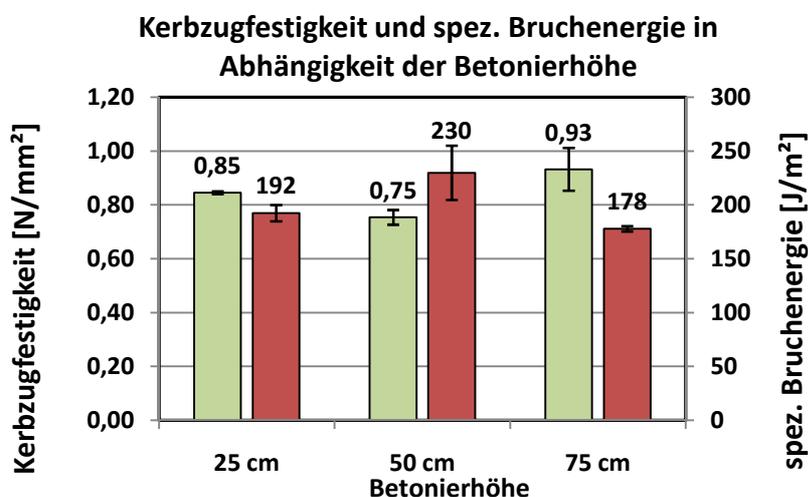


Abbildung 6.13: Kerbzugfestigkeit u. spez. Bruchenergie der Keilspaltversuche

Um eine bessere Aussage über die Qualität der Platten und deren innere Festigkeit treffen zu können, wurde diese Mittelwertbildung der Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  und der spezifischen Bruchenergie  $G_F$  ebenfalls auf den gesamten Umfang der Proben, das bedeutet auf alle 3 Messserien, angewendet. Somit erfolgte die Mittelwertbildung mit Hilfe von 6 Proben, welche in der nachfolgenden Abbildung 6.14 dargestellt ist.

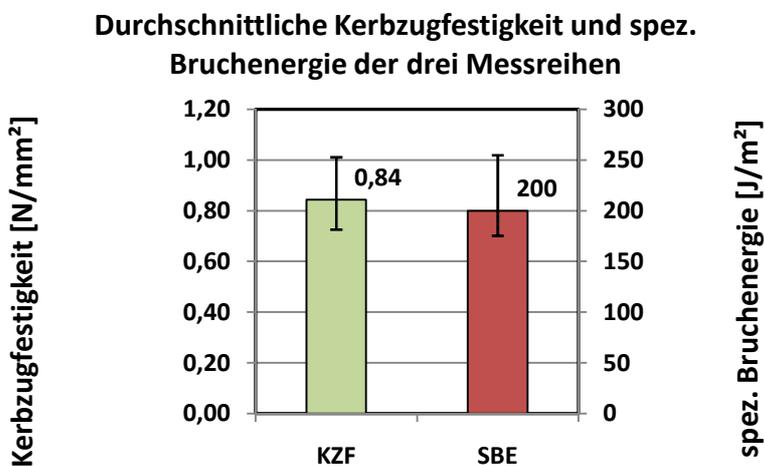


Abbildung 6.14: Durchschnitt der drei Messreihen 25, 50 u. 75 cm

Die Auswertung der Messdaten zu den Keilspaltversuchen ergab eine durchschnittliche Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  von  $0,84 \text{ N/mm}^2$ . Die Schwankungsbreite der Ergebnisse beläuft sich auf rund  $\pm 20\%$ . Der Höchstwert der spez. Bruchenergie lag bei  $255 \text{ Joule/m}^2$ , wobei die größte gemessene Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  nicht an der Probe mit der größten spezifischen Bruchenergie ermittelt worden ist. Je kleiner die spezifische Bruchenergie  $G_F$ , desto spröder versagt die Platte. Ergibt die Auswertung des Versuchs eine große spezifische Bruchenergie, dann spricht es hingegen für ein duktileres inneres Versagen der Platte, wobei dieses von der Kerbzugfestigkeit an sich unabhängig ist, da diese lediglich die Kraft angibt, die zum Bruch notwendig ist.

Um eine Beeinträchtigung der Versuchsergebnisse durch die Vorschädigung der Platten, welche durch die Zugversuche entstand, völlig auszuschließen, wurden die Bruchmechanischen Werte der Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  und der spezifische Bruchenergie  $G_F$  nochmals an unbeschädigten Platten der gleichen Charge erhoben. Die Ergebnisse, die in folgender Abbildung 6.15 dargestellt sind, zeigen, dass die wiederholten Versuche die gleichen Ergebnisse lieferten. Somit konnte eine Vorschädigung durch die Zugversuchen nachweislich ausgeschlossen werden.

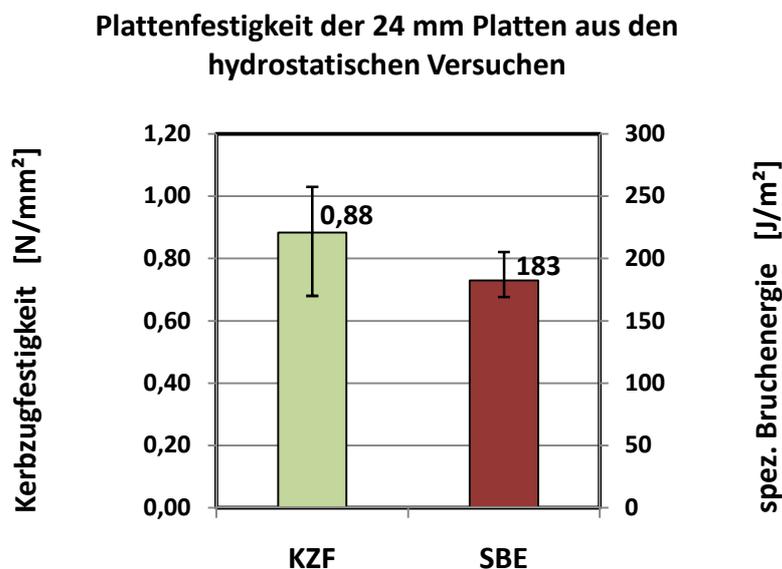


Abbildung 6.15:  $\sigma_{KBZ}$  und  $G_F$  unbeschädigter Platten aus dem hydr. Versuchen

## 6.8 Fazit

### 6.8.1 Zugversuch

Die eindeutigen Ergebnisse zeigten, dass die Betonierhöhe keinen oder wenn nur einen sehr geringen Einfluss auf die Qualität des Verbundes hat. Dennoch wiesen die Ergebnisse innerhalb einer Gruppe doch eine gewisse Streuung auf. Auf Grund der Tatsache, dass alle Proben zu 100% in der Platte brachen, folgte, dass die Verbundfestigkeit die Materialfestigkeit überstiegen hat. Weiter konnte daraus geschlossen werden, dass die Streuung der maximalen Auszugskraft in Zusammenhang mit der Plattenfestigkeit stehen musste, welche durch die Inhomogenität der kleinen Plättchen stark variieren kann. Da im Weiteren davon ausgegangen

werden kann, dass bei einem großflächigen Einsatz als verloren Schalung die Platten als homogen angesehen werden können, wurde nun die Plattenfestigkeit näher untersucht.

### 6.8.2 Plattenfestigkeit

Die Ergebnisse der Keilspaltversuche zeigten, dass sich die Werte der Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  und der spezifischen Bruchenergie  $G_F$  nur eine geringe Streuung aufwiesen, dennoch gab es erhebliche Unterschiede der gemessenen Zugkräfte im Zugversuch. Die grundlegende Annahme war, dass die maximal aufnehmbare Zugkraft direkt proportional zur Plattenfestigkeit sein müsste. Im folgenden Diagramm wurden daher die 18 Proben nach der Größe der im Test gemessenen Zugkraft gereiht, wobei eine der Proben keinen brauchbaren Messwert lieferte und das Diagramm aus diesem Grund nur 17 der insgesamt 18 Proben umfasst.

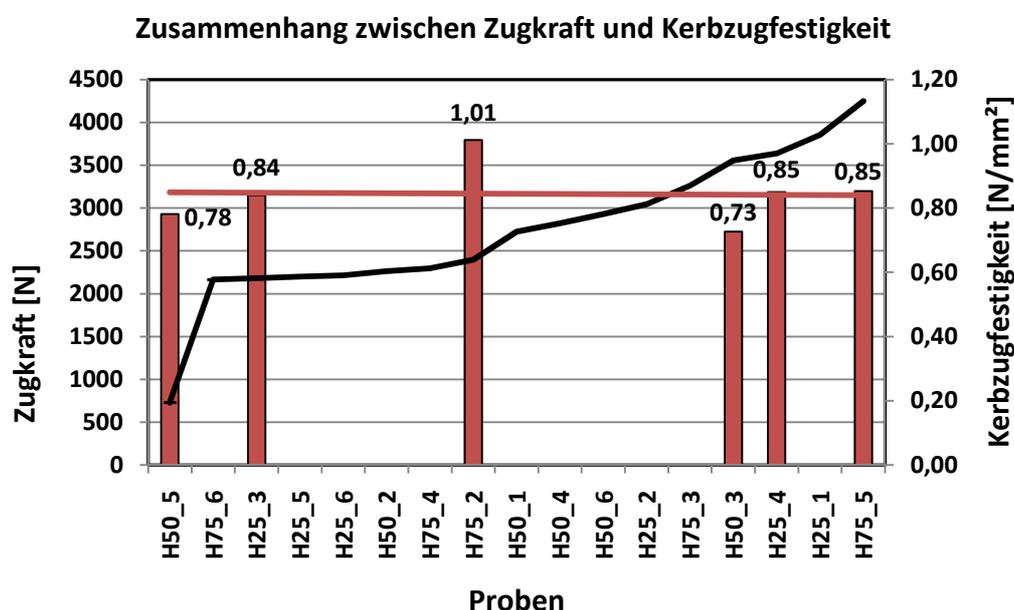


Abbildung 6.16: Zusammenhang zwischen Zugkraft und Plattenfestigkeit

- schwarze Linie: Diese zeigt die „Entwicklung der Zugkraft“, das bedeutet den ansteigenden Verlauf der Zugkraft der 17 Zylinderproben, welche ansteigend gereiht sind.
- rote Linie: Diese zeigt den Verlauf der Kerbzugfestigkeit, welche aus den sechs ausgewählten Proben ermittelt wurde.

Wie aus Abbildung 6.16 erkenntlich wird, besteht kein ersichtlicher Zusammenhang zwischen der gemessenen Zugkraft. Der Maximal- und Minimalwert der Zugkraft stehen im Verhältnis 2:1, wohingegen die Werte der ermittelten Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  relativ konstant waren. Würde ein Zusammenhang bestehen, dann müssten die Proben mit der höchsten Zugkraft auch die größten Werte der Kerbzugfestigkeit aufweisen. Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen könnte ein durch eine geringe Exzentrizität auftretendes Moment an der Einspannstelle sein, welches zu einer Reduktion der größtmöglich aufnehmbaren Zugkraft der Verbundfläche führt. Eine Überprüfung dieser Vermutung war uns im Zusammenhang dieser Untersuchung leider nicht möglich.

### 6.8.3 Plattenfärbung

Bei der Präparation und Auswahl der Platten fiel auf, dass einige der *Cetris*<sup>®</sup>-Platten dunkler waren als andere. Mit dem freien Auge waren aus den 18 Proben mindestens drei unterschiedliche Graustufen erkenntlich. Um den Unterschied besser erkennen zu können, wurde die Abbildung 6.4 mit Hilfe eines Bildbearbeitungsprogrammes in ein Graustufenbild umgewandelt. Wie in nachstehender Abbildung 6.17 zu sehen, zeigen sich deutliche Unterschiede.

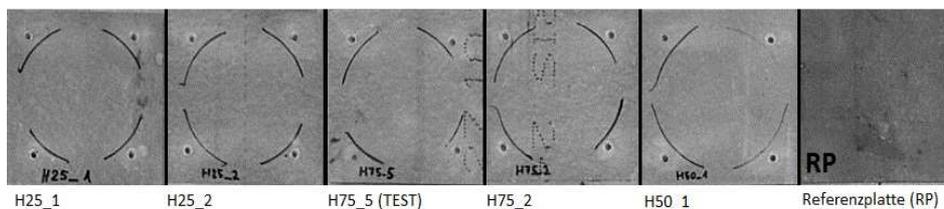


Abbildung 6.17: Serie dunkle Platten, von links nach rechts

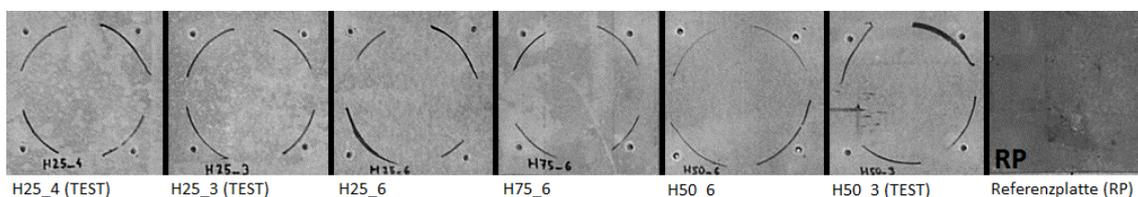


Abbildung 6.18: Serie heller Platten, von links nach rechts

Im Vergleich mit der Plattenfestigkeit, welche bei den Platten erhoben wurde, die mit „Test“ versehen sind, ergab, dass die Platte H75\_2 den höchsten Wert der Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  erzielte. Hier ist zu beachten, dass die Proben H25\_1 und H25\_2 nicht mittels der Keilspaltmethode getestet wurden und somit keine Werte für die Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  vorhanden sind. Den niedrigsten Wert aus den Keilspaltversuchen erhielten wir von der Probe H50\_3, welche tatsächlich der Gruppe der „hellen“ Platten, zu sehen in Abbildung 6.18, zuzuordnen ist. Der Wert der Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  der „hellsten“ getesteten Platte, Probe H25\_4, liegt jedoch mit  $0,85 \text{ [N/mm}^2\text{]}$  etwas über dem Wert der Probe H50\_3, die  $0,73 \text{ [N/mm}^2\text{]}$  erreichte. Dennoch liegt sie deutlich unter den  $1,01 \text{ [N/mm}^2\text{]}$  der Probe H75\_2.

Die aus den Versuchen gewonnenen Ergebnisse der Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  wurden in Abbildung 6.19 in Abhängigkeit einer rein optischen Beurteilung der Platten dargestellt. Hier zeigt sich ein erkennbarer Trend, dargestellt durch die rote Linie, einer zunehmenden inneren Plattenfestigkeit je dunkler die Platten werden. Nachstehende Abbildung 6.20 zeigt eine Übersicht über alle Platten, gereiht nach der Plattenfarbe.

Die Ergebnisse dieser Auswertung bestätigen noch keineswegs die Annahme, dass auf Grund der Färbung der Platte Rückschlüsse auf deren Festigkeit bzw. deren Zementgehalt gezogen werden können. Dennoch stellt sich die Frage nach den Toleranzen und Abweichungen bei der Herstellung der Platten in Bezug auf den Zementgehalt. In erster Linie würde ein höherer Zementgehalt eine erhöhte Festigkeit der Platte zufolge haben. Um dieser Fragestellung nachzugehen sind, weitere Untersuchungen erforderlich, auf die im Kapitel 8 "Zementgehaltsanalyse anhand von Festbetonproben" genauer eingegangen wird.

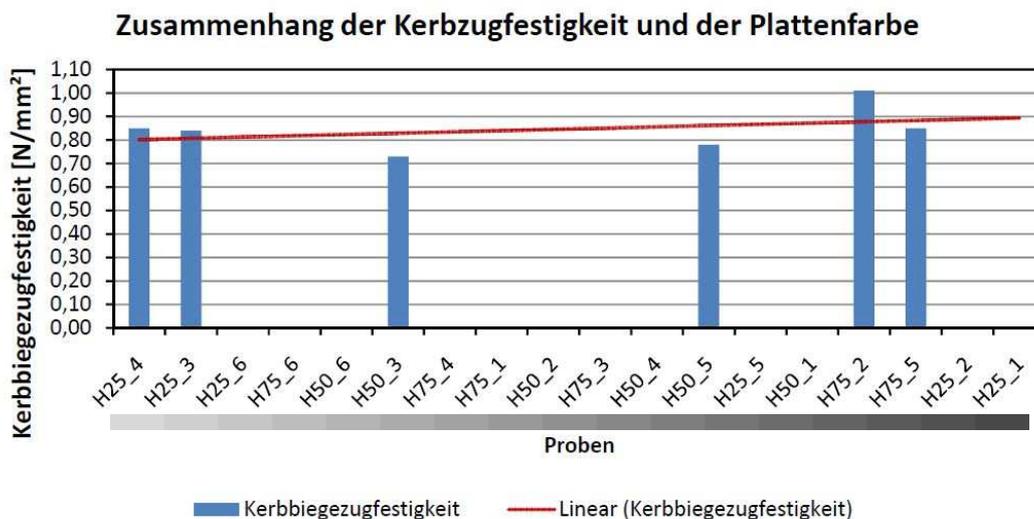


Abbildung 6.19: Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  in Abhängigkeit der Plattenfarbe

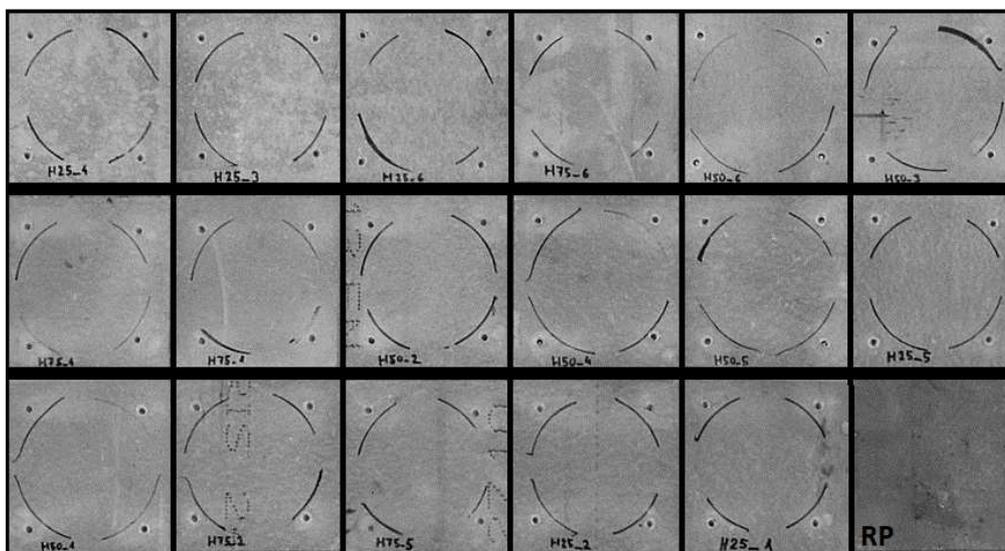


Abbildung 6.20: Platten gereiht von hell nach dunkel

### 6.8.4 Feuchtigkeit

Die Feuchtigkeit der Platten wurde an einer Referenzplatte und einer der Standardplatten im Vorfeld der Versuche mit einem Baufeuchtemessgerät mit Einstechfühlern gemessen. Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 6-2: *Plattenfeuchtigkeit* dargestellt und zeigen eine um etwa 10% höhere relative Feuchtigkeit der Standardplatte im Vergleich zu der Referenzmessung. Unmittelbar nach den Zugversuchen wurde bei jeder Probe ebenfalls die Feuchte im Zentrum der Bruchfläche in Plattenmitte bestimmt. Die Werte wurden in den Prüfbericht eingetragen und sind im Anhang A ersichtlich. Die Werte bewegen sich zwischen 52% und 69% und weisen damit keine großen Schwankungen auf.

Auch wenn die Platte mit der größten Kerbzugfestigkeit nur eine etwas geringere relative Feuchtigkeit (56%) aufweist als die Platte mit der höchsten (66%), wird dennoch vermutet, dass eine hohe Feuchtigkeit zu einem „Aufweichen“ der Platte und damit zu einer Reduzierung der Festigkeit führt. Dieser Zusammenhang ist in Um dieser Frage nachzugehen wurde die im folgenden Kapitel 7 "Normal/Wassersättigung-Probenstatistik" erläuterte Versuchsreihe eingeführt.

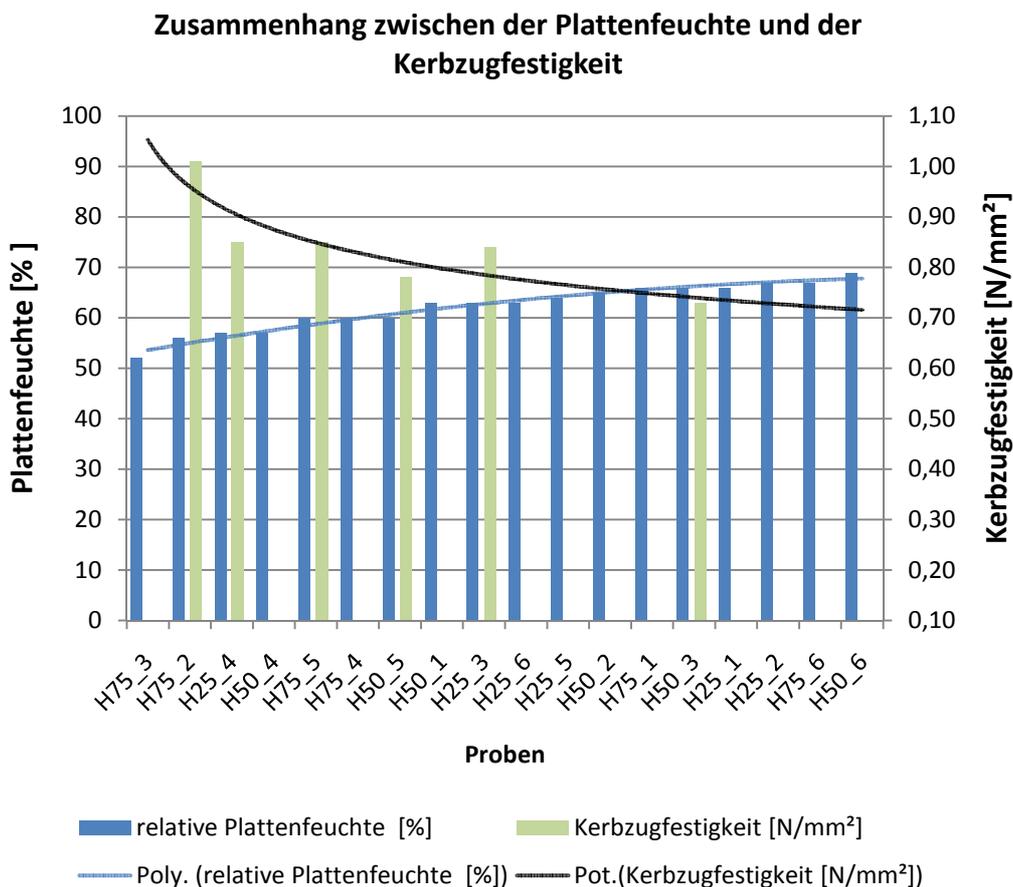


Abbildung 6.21: Zusammenhang von Plattenfeuchte und Kerbzugfestigkeit

## 7 Normal/Wassersättigung-Probenstatistik

Da vorangegangene Versuche immer wieder vermuten ließen, dass die Plattenfeuchtigkeit einen erheblichen Einfluss auf die Festigkeit der *Cetris*<sup>®</sup>-Platte hat, sollte dieser Einfluss mittels des Extremfalls einer Wassersättigung getestet werden. Schon bei den Zugversuchen, welche in Kapitel 6.5 "Testdurchführung – Zugversuch" beschrieben sind, zeigte sich eine Tendenz, dass feuchtere Platten eine gering niedrigere Festigkeit aufwiesen als die trockeneren Platten, auch wenn dieser Zusammenhang nach diesen Versuchen nicht eindeutig bestätigt werden konnte.

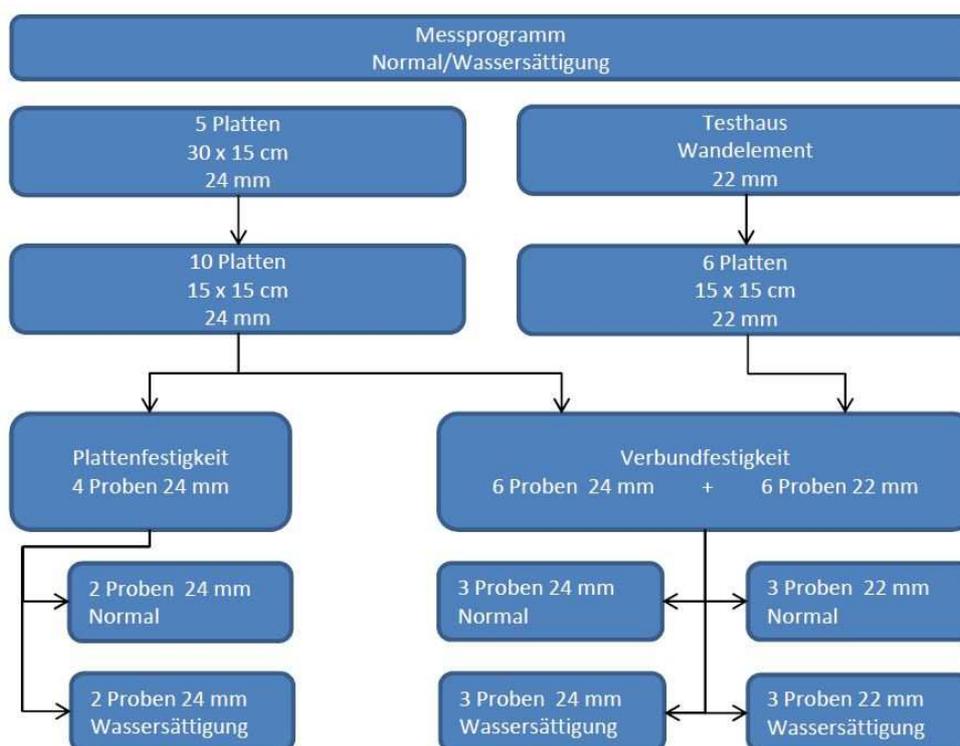


Abbildung 7.1: Messprogramm

Um in den, in Abbildung 7.1 schematisch aufgelisteten, Versuchen vergleichbare Werte zu erhalten wurden bei der Firma *Cetris*<sup>®</sup> neue Platten mit den Abmessungen 30 x 15 cm und einer Stärke von 24 mm bestellt. Diese hatten den Vorteil, dass daraus zwei 15 x 15 cm große Plättchen geschnitten werden konnten, die so gut wie identische Eigenschaften haben mussten, da sie nachvollziehbar aus einem Teil der im Werk gefertigten Platten stammten. Zusätzlich zu den aus dem Werk stammenden Platten wurden in dieser Versuchsreihe sechs Plättchen mit den Abmessungen 15 x 15 cm und einer Stärke von 22 mm getestet. Diese wurden aus einer großen Platte, welche aus der Wandschalung eines Testhauses herausgebrochen wurde, hergestellt.

Das **Testhaus** wurde auf Initiative des Auftraggebers der Studie, zu welcher auch diese Diplomarbeit gehört, in der Umgebung von Wien gebaut. Dies sollte den Einsatz des Systems und die Untersuchung allfälliger Schäden unter realen Bedingungen schaffen. Das verwendete Schalungssystem aus verlorenen Wand- und Deckenschalungen besteht aus fertigen Elementen die aus *Cetris*<sup>®</sup>-Platten im Werk gefertigt wurden und vor Ort auf der Baustelle nurmehr aufgestellt und

montiert werden mussten. Ein Grundriss zu dem Testhaus, welches aus 22 mm starken *Cetris*<sup>®</sup>-Platten gefertigt wurde, befindet sich im Anhang B. Das Betonieren erfolgte in drei Durchgängen, wobei die einzelnen Betonierhorizonte an den Schalungen markiert wurden. Während der zum Entstehungszeitpunkt dieser Arbeit beginnenden Aushärtungszeit traten bereits einige der erwarteten Schadensfälle, wie zum Beispiel Abplatzungen der Schalungen vom Betonkern, ein. Um realistische Bedingungen zu schaffen, wurde ein Teil des Testhauses mit einer Wärmedämmung versehen, während der baugleiche zweite Teil als Rohbau belassen wurde. Die am Testhaus durchgeführten Untersuchungen umfassen neben der Mängeldokumentation auch Feuchtemessungen und eine Untersuchung der werk- und bauseitigen Plattenstöße.

Für die Versuche wurden fünf der 30 x 15 x 2,40 cm Platten sowie sechs 15 x 15 x 2,20 cm Platten aus der Testhausplatte präpariert. Damit ergab sich ein Umfang von insgesamt 12 Proben, die für Verbundfestigkeitsversuche und 4 Proben, die zur Ermittlung der Plattenfestigkeit vorbereitet werden mussten.

## 7.1 Herstellung der Versuchskörper

### 7.1.1 Vorbereitung der Platten

In einem ersten Schritt mussten die im Werk bestellten Platten mit den Abmessungen 30 x 15 cm beschriftet werden. Die Beschriftung erfolgte wie in Tabelle 7-1 und nachstehender Abbildung 7.2. In einem nächsten Schritt wurden diese Platten mittels einer wassergekühlten Bankkreissäge auf die für die Würfelschalungen passenden Abmessungen zugeschnitten. Die aus dem Testhaus stammende Platte wurde von Betonresten befreit und anschließend ebenfalls in sechs Plättchen mit den Abmessungen 15 x 15 cm geschnitten.



Abbildung 7.2: Beschriftung der 30 x 15 cm Platten

Tabelle 7-1: Abkürzungen der Proben

		Bezeichnung der Probenserien	
		Abkürzung	
		Normal (A)	Wassersättigung (B)
Plattenfestigkeit			
	1. Serie (Vorversuche)	1_A	1_B
	2. Serie	PF_(3 4 5 6)A	PF_(3 4 5 6)B
	3. Serie	PF_(I II III IV V VI)A	PF_(I II III IV V VI)B
Verbundfestigkeit			
	Standardplatte	V_XA A/B	V_XB A/B
	Testhaus	TH_(1 2 3) A/B	TH_(4 5 6) A/B

X = Probennummer (1 - 6)

A = primärer Probenteil (Platte + Beton) - gilt nur für "Verbundfestigkeit"

B = sekundär Probenteil (nur Beton) - gilt nur für "Verbundfestigkeit"

### 7.1.2 Probenaufbau - Plattenfestigkeit

Die Proben mit der Bezeichnung "Plattenfestigkeit" wurden in die Gruppen "Normal" und "Wassersättigung" eingeteilt. Um den Einfluss der Feuchtigkeit auf die Plattenfestigkeit testen zu können, wurden die Platten wie in Kapitel 6.7 "Plattenfestigkeit – Keilspaltversuch" mittels 2 Beton-B-Blöcken präpariert und nach dem Einkerbigen die Marmorprismen aufgeklebt. Nach dem Aushärten des Klebers wurden die "B"-Proben für 4 Tage mit der Platte waagrecht in einem Wasserbecken gelagert, sodass diese von allen Seiten her mit Wasser bedeckt waren.

### 7.1.3 Probenaufbau - Verbundfestigkeit

Die verwendeten Platten, die wir aus dem Werk erhalten haben, weisen eine Plattenstärke von 24 mm, die am Testhaus verbauten, eine Plattenstärke von nur 22 mm auf. Für die Untersuchung des Verbundes mittels Keilspaltverfahren werden Probewürfel mit einer Kantenlänge von 15 cm angefertigt. Neben der Holzfaserzementplatte bestehen die Versuchskörper noch aus selbstverdichtendem Beton (SCC). Diese Proben erhielten die Bezeichnung "Verbund".

Die Probe für den Keilspaltversuch besteht aus 2 Teilen. Der Probenteil A besteht aus dem Teil der Probe, der sich im Verbund mit der Platte befindet und somit den Teil der *CETRIS*<sup>®</sup>-Platte enthält. Der zweite Teil der Probe, in dieser Arbeit weiter als „Teil B“ bezeichnet, besteht nur aus dem ergänzenden Betonblock. Die Abmessungen der gesamten Probe betragen 15x15x15 cm. [6]

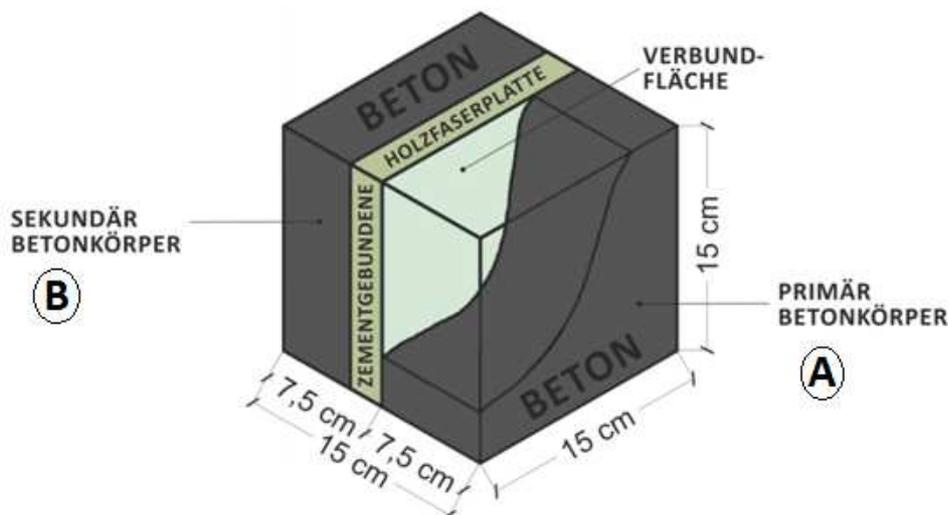


Abbildung 7.3: Schematischer Aufbau einer Würfelfarbe [10]

Die spätere Bruchfläche, anhand der die Qualität des Verbundes ermittelt werden soll, muss sich beim Einbau der Plättchen möglichst genau in der Mitte der Probe befinden. Dadurch weisen die B-Teile der Probe kleinere Tiefen von lediglich 5,10 cm auf als die A-Teile mit den 7,50 cm. Die Teilung der Probe wird durch das Abdecken der Plattenaußenseite mittels Folien erreicht. Die genaue Herstellung wird im folgenden Kapitel 7.1.3.1 "Anbringen der Folie" genauer erläutert. Dabei handelt es sich um einen sehr wichtigen Schritt in der Arbeitsvorbereitung, denn um den Test möglichst realitätsgetreu durchführen zu können, muss bei der Aushärtung eine Trocknung durch die freie äußere Oberfläche der Schalplatte gegeben sein. Der für die Auswertung interessante Teil der Probe ist der Teil A, welcher den Verbund mit dem Beton aufbaut und dessen Verbund zu untersuchen ist. Der sekundäre Block B der Probe dient dem Gleichgewicht und somit zur Stabilisierung während des Prüfvorganges und zur Aufnahme der Marmorprismen über die die Kraft eingeleitet wird.

Die Herstellung der Würfelfarben - mit der Kantenlänge von 15 cm - gliedert sich im Wesentlichen in folgende Arbeitsschritte:

1. Anbringen der Folien
2. Mischen des SCC
3. Vorbereitung der PVC-Würfelschalungen
4. Betoniervorgang
5. Ausschalen
6. Beschriftung
7. Lagerung

### 7.1.3.1 Anbringen der Folie

Um realitätsnahe Bedingungen zu schaffen, musste eine Austrocknung der *CETRIS*<sup>®</sup>-Platte über die Außenseite möglich sein. Dies erfordert das Abdecken der Platte mit einer Folie, damit sich diese Seite nicht mit dem Beton verbinden kann. Bei der Folie handelt es sich um eine 0,20 mm dünne PE-Folie, die einen Verbund der Plattenaußenseite mit dem Beton verhindert.

In vorangegangenen Versuchen wurden die Seitenflächen mit Silikon abgedeckt, um ein Eindringen von Beton zu verhindern. Da sich das Arbeiten mit Silikon als umständlich herausstellte und zusätzlich immer die Gefahr einer Verunreinigung der verbundseitigen Plattenoberfläche bestand, wurden die Folien, wie in folgender Abbildung 7.4 zu sehen, mittels Klammern an den Seitenflächen befestigt.



Abbildung 7.4: Anbringen der Folie

#### 7.1.3.2 Mischen des SCC

Das Mischen des selbstverdichtenden Betons erfolgte ebenfalls nach der Rezeptur von der Firma Lafarge Perlmooser Holding AG - Wien, wie sie bereits im Kapitel 6.3 "*Herstellen der Proben*" in Tabelle 6-1 beschrieben wurde. Für das Befüllen der 12 Würfelschalungen waren insgesamt 2 Mischungen mit einem Volumen von rund 34 Litern erforderlich. Die festen und flüssigen Bestandteile des SCCs wurden innerhalb der angegebenen Toleranzen mittels einer Trommelmischmaschine bis zum Erreichen einer honigartigen Konsistenz ca. 3-5 Minuten lang gemischt.

#### 7.1.3.3 Vorbereitung der Schalungen und der Betoniervorgänge

Als Schalung für das Ausbetonieren der Proben wurden Kunststoffwürfelschalungen mit Inhaltsabmessungen von 15x15x15 cm verwendet. Wie bei allen Schalungen muss die Innenseite der Schalhaut mit einem Trennmittel behandelt werden, um eine Haftung des Zements an der Schalhaut zu verhindern. Bei diesen Versuchen wurde ein pflanzliches Trennöl verwendet, das speziell für Schalungen entwickelt wurde und in Massen auf Baustellen verwendet wird. Da die Kunststoffoberfläche, je nach Grad der Verarbeitung, bereits eine sehr glatte Oberfläche bietet, kann die Menge an Trennöl stark reduziert werden. Mit einem Pinsel wurde ein dünner Ölfilm auf die Innenseite der Würfelschalungen aufgebracht. Dies erfolgte zeitgleich mit dem Mischen, sodass mit dem Betonieren begonnen werden konnte, sobald der Beton die gewünschte Konsistenz erreicht hatte. [6]

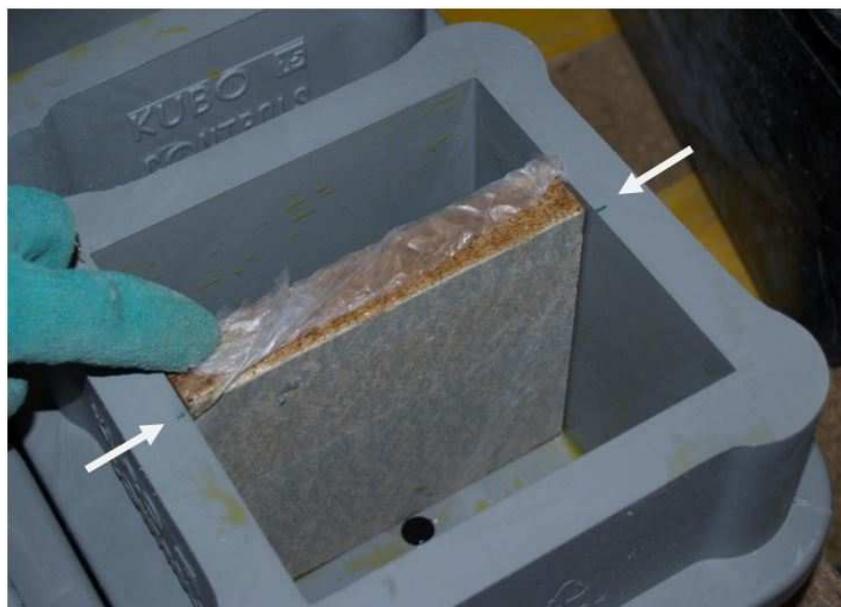


Abbildung 7.5: Vorbereitete Schalung mit Platte

Wie in Abbildung 7.5 zu sehen ist, wurden die Plättchen mittig in der Schalung platziert, damit sich die Fläche, die später einen Verbund mit dem Zement aufbaut, genau in der Mitte der Probe befindet. Die Mitte der Schalung wurde zuvor vermessen und am Rand markiert. Beim Einsetzen musste darauf geachtet werden, dass die Innenseite der *CETRIS*<sup>®</sup>- Platte nicht mit Trennöl verunreinigt wird, da dies wieder zu einer Verfälschung der Ergebnisse auf Grund eines schlechteren Verbundes führen würde. [6]

Beim Betonieren wurden die durch die Platte gebildeten Kammern mit Beton verfüllt. Um ein Kippen der Plättchen zu verhindern, wurden die Kammern immer abwechseln befüllt, sodass sich auf Grund des hydrostatischen Drucks immer ein Gleichgewicht einstellte bis die Form vollständig mit Beton gefüllt war. Nachfolgende Abbildung 7.6 zeigt den Betoniervorgang.



Abbildung 7.6: Betoniervorgang

#### 7.1.3.4 Ausschalen mittels Pressluft

Die gefüllten Würfelschalungen wurden für 48 Stunden im Präparationsraum belassen und anschließend ausgeschalt. Diese Zeit genügte, damit der Beton seine Frühfestigkeit von ca. 70% erreichen konnte. Die Kunststoffschalungen besaßen am Boden eine Öffnung, die vor dem Betonieren mit Klebeband verschlossen wurde, um eine Verstopfen zu verhindern. Das Ausschalen erfolgte, wie in Abbildung 7.7 zu sehen ist, mittels Pressluft, die von einem Kompressor erzeugt und über die Bodenöffnung in den Raum zwischen Schalung und Probekörper eingeleitet wurde. Das Verfahren erwies sich als sehr praktisch, denn neben dem äußerst geringen Reinigungsaufwand mussten die Schalungen, im Vergleich zu herkömmlichen Schalungen aus Stahl, nicht erst wieder zusammengesetzt werden.



Abbildung 7.7: Ausschalen mittels Pressluft

#### 7.1.3.5 Beschriftung und Lagerung der Proben

Der Umfang des Versuches umfasste 16 Proben, wobei 10 vom Werk gelieferte Platten waren und sechs aus dem Schalungselement des Testhauses bestanden. Die Platten aus dem Werk wurden mit "xA - Verbund" und "xB - Verbund" beschriftet. Die sechs Platten der Testhausprobe mit einer Stärke von 22 mm wurden für die weitere Dokumentation mit "TH\_1" bis "TH\_6" beschriftet.



Abbildung 7.8: Probenbeschriftung Würfelproben - V\_5A(A/B)

Wie in obiger Abbildung 7.8 ersichtlich, gliedern sich die Proben in den A-Teil, der die CETRIS®-Platte enthält und den kleineren für den Keilspalttest erforderlichen B-Teil, den reinen Betonblock.



Abbildung 7.9: Lagerung der Proben während der Aushärtung

Die Lagerung der 16 Würfelproben erfolgte in einem Lagerraum mit rund 70% Luftfeuchtigkeit und einer Raumtemperatur von ca. 22 °C. Die Dauer des Erhärtungsprozesses beträgt im Allgemeinen 28 Tage. In diesem Zeitraum wurden die Proben, wie in Abbildung 7.9 zu sehen, am Boden gelagert, indem der B-Teil unter den A-Teil geschoben wurde und die Platte frei obenauf lag. Die Bodentemperatur betrug jeweils ungefähr 20 °C.

## 7.2 Prüfung der Würfelproben – Plattenfestigkeit

Wie bereits im Kapitel 6.7 "*Plattenfestigkeit – Keilspaltversuch*" beschrieben, wurden auch diese Versuche zur Ermittlung der Plattenfestigkeit analog mittels Keilspaltversuch durchgeführt. Nach dem Anbringen des Messequipments und der beiden Wegaufnehmer konnte der Versuch gestartet werden und die Ergebnisse wurden von dem Messprogramm ausgegeben.

## 7.3 Prüfung der Würfelproben - Verbund

Die Prüfung der Verbundqualität erfolgte mit dem in Kapitel 5 "*Keilspaltversuch - Wedge Splitting Test*" beschriebenen Keilspaltversuch. Aus den Messdaten lassen sich Rückschlüsse, in qualitativer und quantitativer Hinsicht auf den Verbund ziehen. Die entscheidenden Messwerte sind hierbei die Kerbbiegezugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$ , die spezifische Bruchenergie  $G_F$  und der Anteil des Bruches in der Platte, die sogenannte Verbundrate. Um die Proben in der Prüfmaschine testen zu können, waren bestimmte Vorbereitungsschritte erforderlich, die sich in 3 Phasen und den Test selbst gliederten. [6]

### 7.3.1 Phase 1 nach 14 Tagen

Der Test der Proben erfolgte bisher immer nach genau 28 Tagen. Da für die Tests jedoch einige Vorbereitungen getroffen werden mussten und die Proben in Wasser für eine gewisse Zeit gelagert werden sollten, startete die erste Vorbereitungsphase bereits nach 14 Tagen.

Um die Kerbzugfestigkeit mittels „Wedge Splitting Test“ bestimmen zu können, war eine Würfelprobe erforderlich. Da aber bei der Aushärtung realistische Bedingungen geschaffen

wurden, lagen die Proben als 2 einzelne Teile vor, was die sachgemäße Testdurchführung unmöglich machte. Aus diesem Grund mussten die Blöcke "A" und "B" der Probe wieder zusammengeklebt werden, um testfähige Würfelproben zu erhalten. Die Proben wurden daher nach 14 Tagen mit Hilfe des bereits in Kapitel 6.7 "Plattenfestigkeit – Keilspaltversuch" erwähnten Klebemörtels mit der Produktbezeichnung *SikaDur*<sup>®</sup> – 31 *AUT Normal* wieder verklebt. Der fertig gemischte Klebemörtel wurde auf beide Teile der Probe dünn aufgetragen, um anschließend die Teile aufeinander zu pressen. Da eine Parallelität der Seitenflächen für den Test von großer Bedeutung ist, wurden die Probenteile, wie in Abbildung 7.10 zu sehen, mittels einer 15x15 cm großen Stahlplatte nach allen Richtungen ausgerichtet und anschließend nicht weiter bewegt.



Abbildung 7.10: Ausrichten der Proben

### 7.3.2 Phase 2 nach 16 Tagen

#### 7.3.2.1 Schneiden der Starterkerbe

Um im Zuge des Keilspaltversuchs eine gezielte Lasteinleitung in die Verbundebene zu erreichen, musste in die Probe eine sogenannte „Starterkerbe“ geschnitten werden.



Abbildung 7.11: Schneiden der Starterkerbe

Diese 2,4 mm starke und rund 3 cm tiefe Kerbe befand sich genau in der Mitte zwischen der inneren Schalungsseite und dem Betonkörper, sodass der Schnitt gleichermaßen in der Platte und im Betonkern lag. Der Schnitt erfolgte, wie in Abbildung 7.11 zu sehen, mittelst einem 12 Zoll Schneidblatt für Universalmauerwerk und einer wassergekühlten Bankkreissäge. Dies erfolgte immer für die jeweils 12 + 4 Proben an einem Tag, die auch gemeinsam ausgeschalt wurden. [6]

### 7.3.2.2 Aufkleben der Marmorprismen

Neben der Starterkerbe ist für den Keilspaltversuch auch eine Nut erforderlich. Da diese nicht gefräst werden konnte, wurden mit Hilfe des *SikaDur*<sup>®</sup> – 31 *AUT Normal* Klebemörtels 2 Marmorprismen parallel zu der bereits geschnittenen Starterkerbe aufgeklebt. Der Abstand zwischen den beiden Marmorprismen betrug genau 4,10 cm. Abbildung 7.12 zeigt das Ausrichten der Prismen mittels einer Schablone aus Stahl, die genau den Abmessungen der Nut entsprach.



Abbildung 7.12: Aufkleben der Marmorprismen

Die Marmorprismen dienen in weiterer Folge als Träger der Kraftübertragungsstücke zur Einleitung der vom Keil übertragenen Druckkraft. Für die Aushärtung des 2-Komponenten-Klebers wurde im Vorfeld wieder ein Tag eingeplant. So konnten die Proben bereits 17 Tage nach dem Betoniervorgang in ein Wasserbad gelegt werden, wo sie bis Tag 32 unmittelbar vor dem Test blieben.

### 7.3.2.3 Wasserlagerung

Um den Erhärtungsprozess und den sich aufbauenden Verbund nicht durch den Transport und die Umlagerung zu beschädigen, wurden die Proben mit der "xB" bzw. "TH4" bis "TH6" erst nach 17 Tagen in einen Wasserbehälter gelegt.

Wie in folgender Abbildung 7.14 zu sehen, zeigten die Vorversuche der Plattenfestigkeit, dass es länger als 4 Tage benötigt bis die Wassersättigung bis in die Mitte der Platte vorge-drungen ist. Durch den hohen Holzanteil der Platte besitzt diese ein gewisses Saugvermögen und nimmt bis zur vollständigen Sättigung Wasser aus dem Behälter auf. Um nun eine vollständige Sättigung der sich bereits verklebten Platte zu erreichen, wurde die Dauer der Wasserlagerung auf 14 Tage erhöht. Diese Proben wurden direkt nach der Entnahme aus dem Wasserbecken getestet, um eine beginnende Trocknung der Platten auszuschließen.

### 7.3.3 Phase 3 nach 31 Tagen – Keilspaltversuch (Wedge Splitting Test)

Die gesamte Versuchsdurchführung erfolgte analog zu den Keilspaltversuchen, die bereits im Kapitel 6 "*Untersuchung des Einflusses des hydrostatischen Druckes*" durchgeführt wur-

den. Die Proben wurden unmittelbar vor dem Test aus dem Wasserbehälter entnommen und in das Testlabor gebracht, wo in einem ersten Schritt, wie in Kapitel 6.7.1 "Anbringen des Messequipments" beschrieben, das erforderliche Messequipment angebracht wurde. Dieses besteht im Wesentlichen aus einem Aluminiumrahmen als Träger der Wegaufnehmer und den Widerlagern des Keils.

Nachdem alle Voreinstellungen im Messprogramm getroffen wurden, konnte der Versuch, wie in Kapitel 6.7.2 "Versuchsdurchführung" gestartet werden. Die ermittelten Messdaten bestehen hier ebenfalls aus der anliegenden Kraft und der von den Wegaufnehmern gemessenen und gemittelten Rissöffnungsbreite, welche in einem Last-Verschiebungs-Diagramm dargestellt wurde. Die nachstehende Abbildung 7.13 zeigt exemplarisch den Verlauf eines solchen Last-Verschiebungs-Diagramms für die Plattenfestigkeit\_30x15\_3\_Wassergesättigung (PF\_3B).

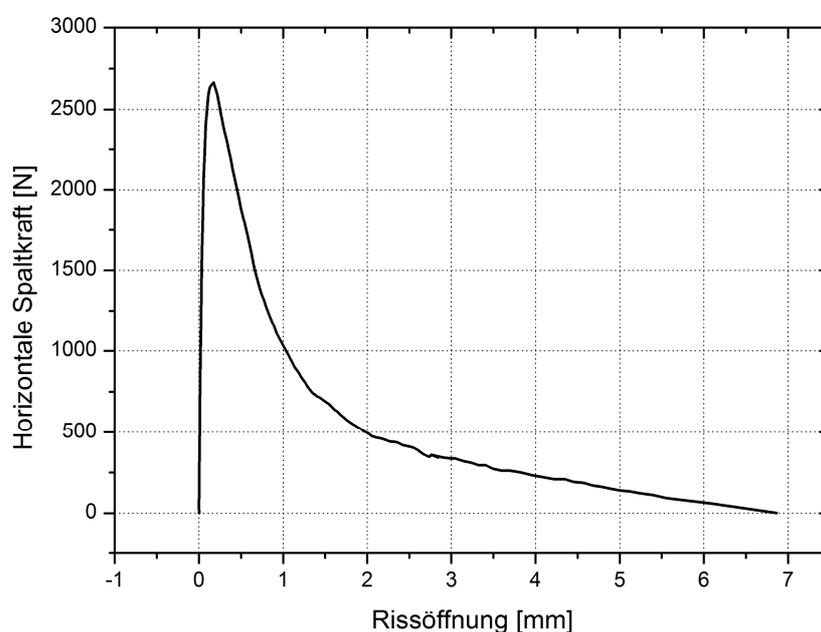


Abbildung 7.13: LV-Diagramm der Probe PF\_3B (Wassersättigung)

## 7.4 Auswertung der Versuche

### 7.4.1 Keilspaltversuch - Plattenfestigkeit

Die Auswertung der Messdaten erfolgte im Anschluss an den Test. Nachdem die Platten zur Gänze gespalten wurden, konnten die Bruchflächen, wie bereits in Kapitel 6.7.3 "Auswertung" beschrieben, vermessen werden, mit dem Unterschied, dass auf Grund der nicht vorhandenen Beschädigung der Platte nicht mit einer reduzierten Breite  $B_{red}$  sondern der wahren Breite  $B$  gerechnet werden konnte. Die Abmessungen wurden in den Prüfbericht eingetragen, welcher im Anhang B zu finden ist. Die Berechnung der Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  und der spezifischen Bruchenergie  $G_F$  erfolgten nach den Formeln (6-3), (6-4), (6-5) und (6-6).

Durch den Ausfall der Probe 2\_A konnten nur die Proben 1\_A und 1\_B aussagekräftige Ergebnisse liefern. Die trockene Probe 1\_A lieferte die Referenzwerte für die Kerbzugfestig-

keit  $\sigma_{KBZ}$  und die spezifische Bruchenergie  $G_F$ , welche anschließend mit den Werten der für vier Tage im Wasser gelagerten Probe 1\_B verglichen wurden. Im Keilspaltversuch erzielten die beiden Proben folgende Werte:

Probe	Kerbbiegezugfestigkeit $\sigma_{KBZ}$	spez. Bruchenergie $G_F$
1_A	0,79 [N/mm <sup>2</sup> ]	77,80 [Joule/m <sup>2</sup> ]
1_B	0,49 [N/mm <sup>2</sup> ]	119,9 [Joule/m <sup>2</sup> ]

Auch in diesen Versuchen wurden jeweils 100% Bruch in der Platte erzielt. Die B-Proben lagen vier Tage in einem Wasserbehälter und nahmen daher viel Feuchtigkeit auf, jedoch war, wie die Abbildung 7.14 zeigt, diese Zeitspanne nicht lange genug, um die Platte vollständig zu durchfeuchten.



Abbildung 7.14: Durchdringung nach 4 Tagen

Die Feuchtigkeit der Platte wurde mittels BES Bollmann Combo 200 aufgenommen und dokumentiert. Auf Grund des gut sichtbaren Feuchtehorizonts wurden jeweils 2 Messungen, einmal am Rand und einmal in der Mitte der Platte, durchgeführt. Während die trockene Platte 1\_A eine Materialfeuchte von rund 25% RH aufwies, erreichte die im Wasser gelagerte Platte 1\_B in der trockeneren Mitte einen Wert von nur 15%, am Rand jedoch 87% RH.

Durch den Ausfall einer der beiden Proben der Vorversuche wurden im Zuge der Probenpräparation der Würfelproben in Phase 2 erneut Proben zur Überprüfung der Plattenfestigkeit hergestellt. Die Bezeichnung erfolgte nach der in Tabelle 6-1 unter Punkt "2. Serie" bzw. "3.

Serie" dargestellten Form. Diese Versuche unterschieden sich nicht von den Vorversuchen, es wurde allerdings auf Grund der Erkenntnisse der 1. Serie die Zeit der Wasserlagerung auf eine Dauer von 14 Tagen ausgedehnt, um eine vollständige Sättigung der Platte und damit eindeutige Ergebnisse zu erhalten.

Die Auswertung der Versuche der 3. Serie zeigte ein ähnliches Bild wie schon die Ergebnisse der ersten Proben. In Abbildung 7.15 ist eine Zusammenstellung der Ergebnisse dargestellt. Der Prüfbericht mit den Abmessungen, die für eine Auswertung erforderlich waren befindet sich im Anhang B. Die Wasserlagerung betrug aus zeitlichen Gründen 10 Tage und führte im Wesentlichen zu einer Durchfeuchtung von durchschnittlich 80%. In den Versuchen wurde deutlich, dass für eine ganzheitliche Durchfeuchtung ein Zeitraum von mindestens 21 Tagen erforderlich ist. Die Platten der Serie "Normal" erreichten einen Höchstwert der Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  von 1,33 [N/mm<sup>2</sup>] wo hingegen der Höchstwert bei der Vergleichsprobe nach der Wasserlagerung ("Wassersättigung") nur bei 1,16 [N/mm<sup>2</sup>] lag. Auf Grund der Wasseraufnahme der Holzfasern kam es zu einem Abfall der Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  um 12,80%. Dies steht im Einklang mit den erzielten Werten der spezifischen Bruchenergie  $G_F$ . Hier lag das Maximum bei 194,20 [J/m<sup>2</sup>] und sank durch die Wassersättigung um 11,70% auf 171,20 [J/m<sup>2</sup>].

Die in Abbildung 7.15 dargestellten Ergebnisse beruhen auf der Auswertung der 30 x 15 cm großen Platten PF\_II\_A/B, PF\_III\_A/B und PF\_IV\_A/B, da es auf Grund von Materialfehlern und anderen Einflüssen wieder zu Ausfällen von Proben kam und somit keine weiteren Ergebnispaaire einer Platte gebildet werden konnten. In die Auswertung wurden noch die Probe PF\_VI\_A sowie die Probe PF\_V\_B mit einbezogen. Im Durchschnitt ist bei der Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  eine Abnahme um 22,80% zu beobachten gewesen. Die spezifischen Bruchenergie  $G_F$  nahm hingegen im Mittel nur um nur 5,00% ab. Je näher der Fasersättigungspunkt des Holzes erreicht wird, desto eher wird das "Aufweichen" der Platten auch in den Ergebnissen sichtbar, wie den Vorversuchen zu entnehmen ist.

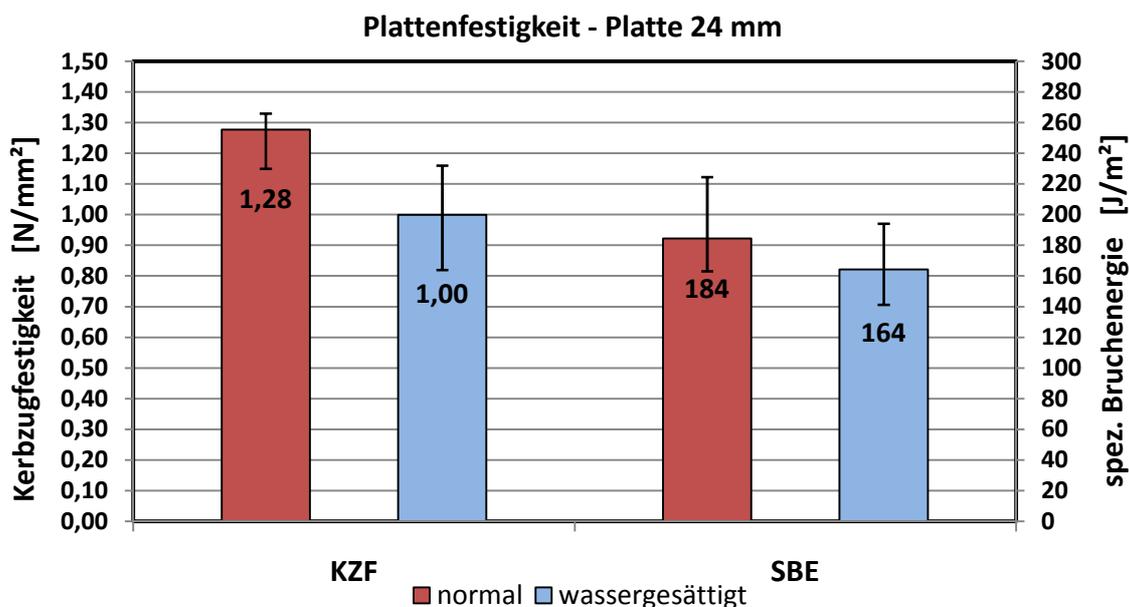


Abbildung 7.15: Ergebnisse der Versuche zur Plattenfestigkeit

### 7.4.2 Keilspaltversuch - Verbundfestigkeit

Für die Versuche zur Untersuchung des Einflusses der Feuchtigkeit auf die Verbundqualität standen insgesamt 12 Proben zur Verfügung. Die Auswertung erfolgte auf die gleiche Art und Weise wie bereits in dem vorangegangenen Kapitel 6.7.3 "Auswertung" beschrieben. Die Abmessungen wurden in den Prüfbericht eingetragen, welcher im Anhang B zu finden ist. Bei den Verbunduntersuchungen wurde als erstes die Verbundrate erhoben und in Abbildung 7.16 dargestellt.

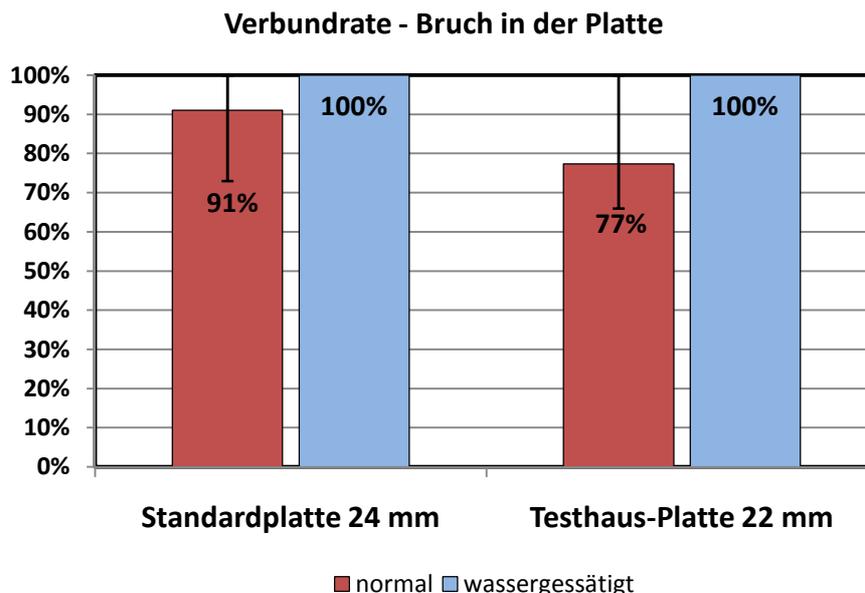


Abbildung 7.16: Verbundrate der Proben der Verbunduntersuchungen

Die Ergebnisse wiesen im Allgemeinen gute Verbundwerte auf, wobei deutlich zu sehen war, dass alle Platten der Gruppe "Wassersättigung" in der Platte versagten. Die Berechnung der Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  und der spezifischen Bruchenergie  $G_F$  erfolgten abermals nach den Formeln (6-3), (6-4), (6-5) und (6-6). In nachfolgender Abbildung 7.17 sind die Kerbzugfestigkeiten der Standardplatte und der Testhausplatte, jeweils über 6 Proben gemittelt, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die zementgebundene Holzfaserplatte des Testhauses, welche um 2 mm dünner ist als die der Standardplatte, geringfügig niedrigere Werte der Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  erzielt als die Standardplatte.

Der Mittelwert dieser Versuchsreihe lag bei den Standardplatten bei  $0,97 \text{ N/mm}^2$ . Eine Ähnlichen Versuchsdurchführung wurde bereits im Sommer 2013 von Herrn Dipl.-Ing. Aleksandar Milkov Radoevski an der technischen Universität Wien durchgeführt. Das mittlere Ergebnis der Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  betrug hier  $1,45 \text{ N/mm}^2$ . Die Auswertung der, im Zuge dieser Arbeit erhobenen Messdaten ergab folgenden, in Abbildung 7.18 dargestellte gemittelte Werte für die spezifischen Bruchenergie  $G_F$ .

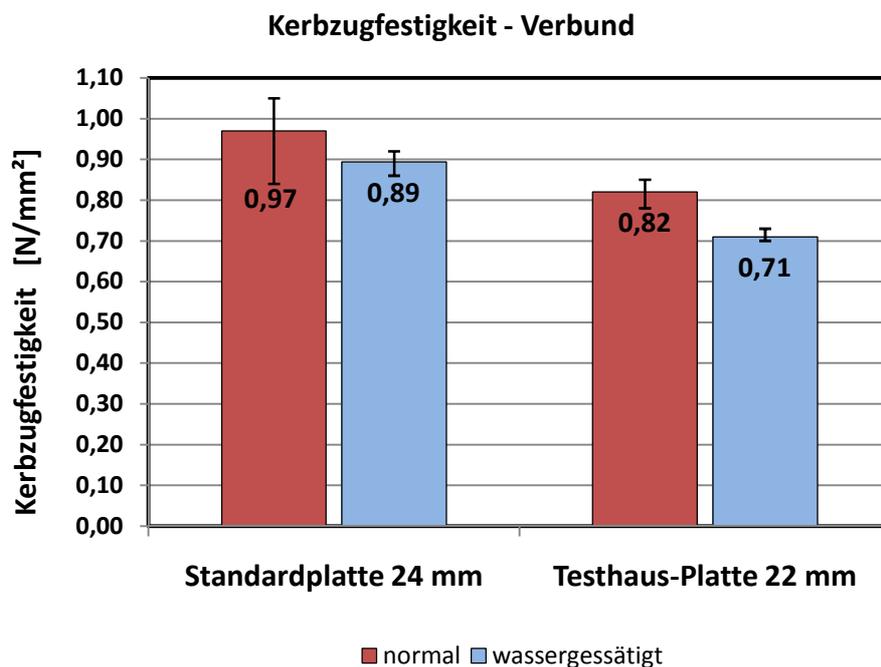


Abbildung 7.17: Gemittelte Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  der Verbundproben

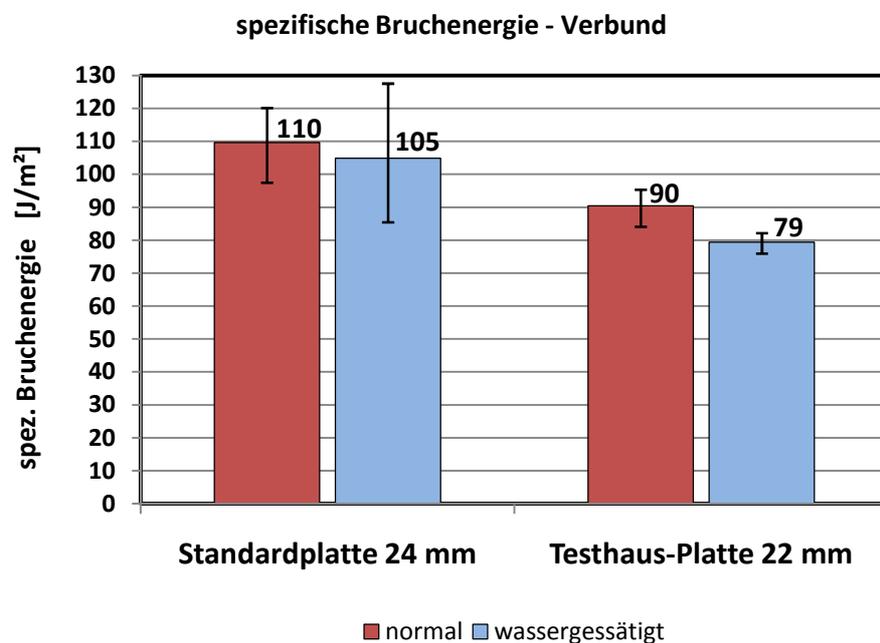


Abbildung 7.18: gemittelte spezifischen Bruchenergie  $G_F$  der Verbundproben

## 7.5 Fazit

### 7.5.1 Plattenfestigkeit

Nachdem Holz ausgeprägte hygroskopische Eigenschaften besitzt, nimmt es Feuchtigkeit aus der Umgebung auf und gleicht die Holzfeuchte der Umgebungsfeuchte an. Die Holzfeuchte beeinflusst dabei Parameter, wie die Dichte und die elastomechanischen Eigenschaften des Holzes. Diese Feuchte ist als freies Wasser in den Zellhohlräumen gebunden und wird bei einer Trocknung zuerst an die Umgebung abgegeben. Enthält Holz nun kein freies Wasser mehr, liegt die Holzfeuchte, je nach Holzart, zwischen 23% und 35%. Man bezeichnet diesen Zustand als Fasersättigungsbereich. Holz zeigt im Vergleich zu seiner Druckfestigkeit hohe Festigkeiten bei Zugbeanspruchung, wobei diese mit zunehmender Feuchtigkeit bis hin zum Fasersättigungspunkt abnimmt.

Diese hygroskopischen Eigenschaften des Holzes führten zu dem Ansatz, dass feuchte *CETRIS*<sup>®</sup>-Platten, die einen Holzanteil von 60% aufweisen, eine geringere Festigkeit besitzen müssten. Durch den hohen Holzanteil der Platte mussten auch zwangsläufig einige Eigenschaften des Holzes auf diesen Kompositwerkstoff übergehen. Gerade während des Betoniervorgangs und der anschließenden Erhärtungszeit wird ein großer Teil der späteren Plattenfeuchte in das Bauwerk eingetragen. Konventionelle Schalungen werden hier an der Innenseite beschichtet, sodass diese Feuchtigkeit im Beton verbleibt. Dies ist jedoch hier nicht möglich, da die Schalungsinenseite einen Verbund mit dem Betonkern aufbauen soll.

Die Versuchsergebnisse der Vorversuche bestätigten diesen Ansatz deutlich. Die Probe 1\_A, welche nicht in Wasser gelagert wurde, erreichte durchschnittliche Festigkeitswerte für die *CETRIS*<sup>®</sup>-Standardplatte. Die Vergleichsprobe 1\_B, welche aus der gleichen Platte hergestellt und anschließend vier Tage in einem Wasserbehälter gelagert wurde, erreichte nur etwas mehr als die Hälfte der Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  der A-Probe. Die spezifische Bruchenergie  $G_F$  hingegen stieg im Vergleich um ca. 50%, bezogen auf die A-Probe. Das bedeutet, dass die um ein Versagen herbeizuführende erforderliche Kraft mit zunehmender Feuchtigkeit sinkt, sich der Werkstoff aber gleichzeitig wesentlich zäher verhält.

Die zweite Testserie, die nach dem Ausfall einer Probe der ersten Serie im Zuge der Präparation der Würfelproben für die Ermittlung der Verbundfestigkeit angelegt wurde, zeigte ein ähnliches Bild wie die Probe 1\_A in Bezug auf Probe 1\_B. Da es leider auch hier auf Grund von Materialfehlern zu vereinzelt Ausfällen von Proben kam, wurde eine dritte Serie im Umfang von 2x6 Proben hergestellt. Die Ergebnisse sind in Kapitel 7.4.1: "*Keilspaltversuch - Plattenfestigkeit*" in Abbildung 7.15 dargestellt.

Wie zu sehen, ist führt die Wasserlagerung und damit die Einbringung von Feuchtigkeit zu einem erheblichen Verlust der Materialfestigkeit. Das Holz ist in der Lage diese Feuchte nur relativ langsam aufzunehmen, da die Platten durch den Zement sehr dicht und feuchtebeständig sind. Trotzdem erreichen die Platten nach 2 bis 3 Wochen die Fasersättigung des Holzes und verlieren somit erheblich an Festigkeit. Die sich einstellende Plattenfeuchte einer noch nicht zur Gänze gesättigten *CETRIS*<sup>®</sup>-Platte lag bei 87% RH, die am Testhaus teilweise gemessenen Werte lagen jedoch noch etwas höher, teilweise sogar bei über 90% RH. Daraus ergab sich, dass die Platte auf Grund ihrer Zusammensetzung und dem Zementanteil von 25% länger braucht, um eine Sättigung des Hohlanteils und des Porenraums zu erreichen. Im Falle des gebauten Testhauses erfolgte die Feuchtemessung, bei welcher in Plattenmitte Werte über 90% RH gemessen wurden, nach zwei bis drei Wochen.

Eine Lösung für dieses Problem könnte eine Versiegelung der inneren Oberfläche in Kombination mit einem nachträglich aufgebracht Haftgrund darstellen. Diese neue Oberfläche müsste einerseits ein Eindringen des nichtgebundenen Anmachwassers des Frischbetons verhindern und andererseits einer Oberfläche schaffen, die mit dem Beton einen Verbund eingehen kann und dabei gleichzeitig mit der zementgebundenen Holzfaserplatte ebenfalls eine ausreichende Verbundwirkung erzielt. Neben dem technischen Aufwand sprechen allerdings auch wirtschaftlichen Mehrkosten gegen diese Lösung, da somit die angestrebte Kostenreduktion in der Herstellung verloren gehen würde.

### 7.5.2 Verbundfestigkeit

Die Auswertung der Versuche, wie sie in Abbildung 7.16, Abbildung 7.17 und Abbildung 7.18 dargestellt sind, bestätigen die Annahme, dass eine erhöhte Materialfeuchte zu einer geringeren Festigkeit führt. Sowohl bei den 24 mm Standardplatten als auch den 22 mm Platten des Testhauses konnte mit Hilfe einer Wassersättigung in allen Fällen ein Bruch zu 100% in der Platte erzielt werden. Die Ursache hierfür liegt in den hygroskopischen Eigenschaften des Holzes. Das „Aufweichen“ der Platte führte in weiterer Folge dazu, dass auch die Werte der bruchmechanischen Kennwerte wie Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  und spezifische Bruchenergie  $G_F$  deutlich abfielen und die Verbundfestigkeit die Plattenfestigkeit überstieg.

In der Praxis erfolgen die Einbringung der Feuchtigkeit, das Austrocknen und der Aufbau des Verbundes zwischen der zementgebundenen Holzfaserplatte und des Betonkerns zur gleichen Zeit und nicht wie in den durchgeführten Laborversuchen erst nachdem sich der Verbund schon fast vollständig ausbilden konnte. Die Trocknung der Schalplatten erfolgt an der Außenseite, während die Feuchte vom Frischbeton an der Innenseite an die Platte abgegeben wird. Je nach Exposition und Umweltbedingungen entsteht auf diese Art ein unterschiedlich starker Feuchtegradient im Inneren der Platte. Der Verbund zwischen Platte und SCC baut sich in demselben Zeitraum auf, wie dieser Feuchtigkeitstransport stattfindet. Anfänglich nimmt die zementgebundene Holzfaserplatte sehr viel der Feuchte des Frischbetons auf, wird „aufgeweicht“ und gibt Verformungen leichter nach, sodass sich ein beginnender Verbund einstellen kann. Trocknet die Platte nun, z.B. durch starke Sonneneinstrahlung an der Außenseite sehr schnell, nimmt auch die Kernfeuchte der Platte wieder ab, wodurch die Platte an Steifigkeit gewinnt. Bei weiterer Trocknung an der Außenseite nimmt der Feuchtegradient weiter zu und die Platte beginnt aufgrund ihres großen Holzanteiles an der Außenseite zu schrumpfen. In Folge dessen wird der Verbund zwischen der Platte und dem Betonkern auf Zug beansprucht. Diese Kräfte können nun die sich aufbauenden Verbundkraft übersteigen, da der Verbund noch nicht vollständig ausgebildet ist und damit seine erforderliche Festigkeit noch nicht erreichen konnte. Dieses Phänomen betrifft vor allem Eck- und Randbereiche der Schalkonstruktionen, wo feuchtebedingte Verformungen der Platte am größten sind.

## 8 Zementgehaltsanalyse anhand von Festbetonproben

Kommt es im Zuge der Erstellung von Hoch- und Tiefbauten zu Schadensfällen, wird oft mit der Untersuchung der verwendeten Baustoffe begonnen. Im Normalfall erfolgt die entsprechende Prüfung von Beton unmittelbar nach dem Antransport vor dem Einbau. Sind nun derartige Prüfprotokolle nicht mehr auffindbar, weil diese verloren gegangen sind, niemals angelegt wurden oder es sich um sehr alte Bauwerke handelt, müssen andere Verfahren zur Ermittlung der Betonzusammensetzung gefunden werden. All diesen Verfahren liegt eine Analyse von Festbetonproben aus Kernbohrungen der zu untersuchenden Bauteile zu grunde.

Für die Analyse von Beton sind vor allem folgende Faktoren in Hinsicht Qualität und ihres quantitativen Anteils am Beton von Bedeutung:

- Zementgehalt
- Gesteinskörnungsgehalt
- Wasser-Bindemittel-Wert

Der **Wasser-Zement-Wert**, oder kurz auch als w/z-Wert bezeichnet, ist ein Baustoffkennwert für Frischbeton, der das Verhältnis des hydraulischen Bindemittels zu der Menge des Anmachwassers angibt. Bei der Erhärtung des Frischbetons durch Hydratation wird ein gewisser Teil des zugegebenen Wassers für die chemische Reaktion benötigt. Dieser Anteil liegt ca. bei 40% der Masse des hydraulischen Bindemittels und entspricht somit einem w/z-Wert von 0,40. Bei selbstverdichtenden Betonen liegt dieser Wert in der Regel unter 0,50. Bei Werten, die die aufnehmbare Menge an Anmachwasser von 40% übersteigen und damit w/z-Werte über 0,40 (bzw. 0,50 bei SCC) übersteigen, kann nicht das gesamte Wasser chemisch gebunden werden. Das bedeutet, dass das Überschusswasser im Frischbeton verbleibt und Kapillarporen bildet. Diese Poren setzen im Wesentlichen die Druckfestigkeit des Betons herab.

Die **Gesteinskörnung** bestimmt über die Art an Zuschlagstoffen und der Sieblinie der Körnung die späteren Eigenschaften des Betons. Die Verarbeitbarkeit und die Beschaffenheit der sichtbaren Betonoberfläche wird im Wesentlichen vom definierten Größtkorn, in der Regel kleiner als 32 mm Durchmesser, beeinflusst. Dieses ist derart zu wählen, dass eine ausreichende Verarbeitbarkeit des Frischbetons gewährleistet werden kann und die Feinanteile und Füllstoffe die Hohlräume zwischen den Großkörnern ausfüllen können. Die Qualität der Zuschlagstoffe ist von großer Bedeutung, denn der Anteil der Gesteinskörnung liegt im Betonvolumen bei ca. 70%.

Für die Herstellung von Zement dienen in erster Linie kalkhaltige Gesteine, die bei 1450 °C gebrannt und homogenisiert und als Klinker bezeichnet werden. Der Klinker wird zusammen mit anderen Zusatzstoffen sofern erforderlich in einer Mühle gemahlen und der fertige Zement anschließend in Silos gelagert. Der **Zementgehalt** im Beton ist von den Anforderungen und der geforderten Druckfestigkeit abhängig und variiert je nach Eignung und Art der Zuschläge. Der Anteil liegt ca. bei 25% des Betonvolumens und ist nach den geltenden Normen und Richtlinien zu wählen.

## 8.1 Verfahren nach Dorner, H. W.

Für die qualitative und quantitative Zusammensetzung von Beton sind im Wesentlichen 3 Faktoren von Bedeutung. Neben dem Zementgehalt sind Kenntnisse über die Gesteinskörnung und den Wasser-Zement-Wert erforderlich, um eine fundierte Aussage über den vorliegenden Beton treffen zu können.

Bei den meisten Verfahren zur Bestimmung des Zementgehalts ist die Bestimmung der Zementart nicht vorgesehen, da sich diese im Normalfall viel leichter erheben lässt als der Anteil an Zement, der bei der Herstellung der Betonbauteile tatsächlich verwendet wurde. Das auf Essigsäure basierende Bestimmungsverfahren nach H. W. Dorner geht bei der Analyse von Festbetonproben vom ungünstigsten Fall, das heißt vom Fehlen aller Informationen über die Ausgangsstoffe, aus. Dabei gliedert sich das Verfahren in 2 Schritte:

- 1. Schritt: Bestimmung der Zugabewassermenge
- 2. Schritt: Bestimmung des basischen Zementsteins

Bei der Bestimmung der Zugabewassermenge wird eine Probe bestehend aus Festbeton zerkleinert, bis sie ein Größtkorn von 16 mm ausweist. Die Menge an zerkleinertem Material sollte in etwa 1 Liter an Volumen betragen. Die Probe wird in einem Trocknungsofen bei 105 °C für 3 Tage bis zum Erreichen der Gewichtskonstanz getrocknet. Hierbei wird davon ausgegangen, dass das gesamte in den Porenraum vorhandene Wasser verdampft ist. Um das chemisch gebundene Wasser z.B. aus dem Portlandit entfernen zu können, muss die Probe für weitere 5 bis 12 Stunden in einem Härteofen bei 450 °C geglüht werden. Andere Verfahren setzen hierfür eine Temperatur von 1000 °C fest. Dies führt auf der einen Seite zu einer besseren Dehydratation aber auf der anderen Seite auch zu einem Masseverlust der carbonatischen Gesteinskörnung.

Der nach dem Glühen in der Probe verbleibende Porenraum entspricht dem Volumen der Zugabewassermenge und kann nun nach einer 6 stündigen Wassersättigung unter einem Vakuumwasserstrahl gravimetrisch erfolgen. Der massebezogene Wassergehalt  $w'$  bestimmt sich hier folgendermaßen, wobei die Masse der Rückstände in Gramm [g] einzusetzen ist:

$$w' = \frac{m_{450^{\circ}\text{C},\text{wg}} - m_{450^{\circ}\text{C}}}{m_{450^{\circ}\text{C}}} * 100$$

$m_{450^{\circ}\text{C}}$  ..... Masse des bei 450 °C geglühten Betons [g]  
 $m_{450^{\circ}\text{C},\text{wg}}$  ..... Masse des bei 450 °C geglühten, abgekühlten u. wassergesättigten Betons [g]  
 $w'$  ..... Wassergehalt in Masseprozent [Ma-%]

(8-1)

Der volumsbezogene Wassergehalt berechnet sich aus dem massebezogenen Wassergehalt über die aus dem Volumen von 1 Liter ermittelte Dichte der Betonprobe:

$$w = w' * \rho_{450^{\circ}\text{C}} * 10$$

$\rho_{450^{\circ}\text{C}}$  ..... Dichte der Probe nach dem Glühen [kg / dm<sup>3</sup>]  
 $w'$  ..... Wassergehalt in Masseprozent [Ma-%]  
 $w$  ..... Wassergehalt in [kg/m<sup>3</sup>]

(8-2)

Eine Verbesserung der Ergebnisse kann durch eine vollständige Verdichtung des Betons erreicht werden, da dadurch die Verdichtungsporen weniger als 2 Volums-% ausmachen. Da bei unseren Proben SCC also selbstverdichtender Beton zum Einsatz kommt, kann davon ausgegangen werden, dass dieses Verfahren sehr gute Ergebnisse erzielen kann. Für eine weitere Verbesserung der Genauigkeit kann durch die Verwendung einer dichten Gesteinskörnung und eine Minimierung der Rissbildung beim Glühen gesorgt werden. Ist nun die Bestimmung des Anmachwassers abgeschlossen, kann mit dem 2. Schritt, der eigentlichen Bestimmung des Zementgehaltes begonnen werden.

Durch ein organisches Lösungsmittel erfolgt eine selektive Lösung des Zementsteins. Das Lösungsmittel muss dabei folgende Bedingungen erfüllen:

- Es darf zu keiner Carbonatisierung des Probekörpers kommen.
- Ausreichende Reaktivität der Säure gegenüber der Hydratationsprodukte des Zements.
- Das Lösungsmittel darf keine bzw. nur eine sehr geringe Reaktion mit den carbonatischen Gesteinskörnungen der Zuschlagstoffe eingehen.

Ein Lösungsmittel, welches diese Bedingungen erfüllt, ist Essigsäure, da diese selbst in einer hochkonzentrierten Form die carbonatischen Gesteinskörnungen nicht angreift. Für die Lösung des Zementsteins ist die Herstellung repräsentativer Betonmehlproben erforderlich. Dafür wird eine Probe mit einem Volumen von rund 1 Liter wieder bei 105 °C getrocknet und anschließend bei 450 °C gegläht. Nachdem die Masse dieser Probe bestimmt wurde, muss diese gebrochen, gemahlen und homogenisiert werden. Die maximale Korngröße sollte hier unter 0,125 mm liegen.

Die Betonmehlproben werden mit jeweils 50 g eingewogen und wieder für 5 Stunden bei 450 °C gegläht und anschließend nach dem Erreichen der Raumtemperatur mit rund 500 ml der hochkonzentrierten Essigsäure versetzt. Die Einwirkdauer der Essigsäure beträgt weitere 5 Stunden. bevor die Rückstände für 16 Stunden an der Luft getrocknet werden. Um alle Säurerückstände zu entfernen werden die Rückstände für 2 Stunden bei 105 °C getrocknet und anschließend für 5 Stunden bei 450 °C erneut gegläht.

Das Abkühlen der Rückstände muss ohne Aufnahme von Luftfeuchtigkeit erfolgen, da die Bestimmung des Zementgehalts ebenfalls gravimetrisch erfolgt. Aus diesem Grund muss die Trocknung über einem Exsikkator über Kieselgel erfolgen. Der massebezogene Zementgehalt  $z'$  wird anschließend gravimetrisch bestimmt:

$$z' = \frac{m_{450^{\circ}\text{C}} - m_{\text{Rest},450^{\circ}\text{C}}}{m_{450^{\circ}\text{C}}} * 100 \quad \begin{array}{l} m_{450^{\circ}\text{C}} \dots\dots\dots \text{Masse des bei } 450^{\circ}\text{C} \text{ geglähten Betons [g]} \\ m_{\text{Rest},450^{\circ}\text{C}} \dots\dots\dots \text{Masse der Rückstände nach dem Glähen [g]} \\ z' \dots\dots\dots \text{Zementgehalt in Masseprozents [Ma-\%]} \end{array} \quad (8-3)$$

Dabei stellt  $m_{\text{Rest},450^{\circ}\text{C}}$  die Masse der in der Essigsäure unlöslichen Rückstände der bei 450°C geglähten Probe an zerkleinertem Festbeton dar. Der volumenbezogene Zementgehalt errechnet sich abschließend wie folgt:

$$z = z' * \rho_{450^{\circ}\text{C}} * 10 \quad \begin{array}{l} \rho_{450^{\circ}\text{C}} \dots\dots\dots \text{Dichte der Betonprobe nach dem} \\ \text{Glähen [kg / dm}^3 \text{]} \\ z' \dots\dots\dots \text{Zementgehalt in Masseprozents [Ma-\%]} \\ z \dots\dots\dots \text{Zementgehalt in [kg/m}^3 \text{]} \end{array} \quad (8-4)$$

Die Bestimmung des Zementgehaltes, sowie die Menge des Anmachwassers sollte als Mittelwertbestimmung erfolgen. Dabei sollten für die Bestimmung des Wassergehaltes 2 Proben und zur Bestimmung des Zementgehaltes 8 Proben herangezogen werden. Die aus diese Art erhaltenen Ergebnisse liegen zwischen rund 95% und 101% der tatsächlichen Wassermenge und bei ungefähr 97% bis 100% der tatsächlichen verwendeten Menge an Zement. Vergleichbare Verfahren, wie zum Beispiel in der DIN 52170 beschrieben, liefern weitaus weniger genaue Ergebnisse mit einer Schwankungsbreite von  $\pm 10\%$  gegenüber dem Verfahren nach Dorner mittels Essigsäure.

## 8.2 Vorversuche mittels bekannter Betonzusammensetzung

Um im Vorfeld dieses neue Verfahren zur Analyse von Festbetonproben zu testen, wurde ein Vorversuch anhand von Betonproben mit bekannter Mischrezeptur durchgeführt. Hierfür wurden 2 der Betonblöcke vorangegangener Würfelproben, die für Tests mittels Keilspaltmethode getestet worden waren, verwendet. In einem ersten Schritt wurden die Proben mittels der wassergekühlten Bankkreissäge derart zugeschnitten, dass Reste von Epoxidharz und zementgebundener Holzspanplatte entfernt wurden. Die beiden Proben, in folgender Abbildung 8.1 dargestellt, besaßen nach dem Zuschnitt jeweils ein Volumen von ca. 1 dm<sup>3</sup> an erhärtendem Beton.



Abbildung 8.1: Betonproben A u. B der Vorversuche zur Zementgehaltsanalyse

Die Proben wurden als Probe "A" und Probe "B" gekennzeichnet, mittels Schiebelehre vermessen und anschließend gewogen. Die Messdaten befinden sich im Anhang C. Danach wurden die Proben für 2 Tage bei 105 °C in einen Trocknungsofen gelegt. Beide Proben verloren während der Trocknung ca. 100 g an im Porenraum gebundener Feuchtigkeit. Nach dem Wiegen wurden die beiden Proben in einem Ofen für 12 Stunden bei 450 °C geblüht. Die Abbildung 8.2 zeigt die Proben unmittelbar nach dem Ende des Glühvorgangs. Um möglichst genaue Werte zu erhalten, wurde die Probe bereits nach kurzer Abkühldauer erneut gewogen, damit diese nicht zu viel der Umgebungsfeuchte aus der Luft aufnehmen konnte. Auch hier zeigten die beiden Proben einen sehr ähnlichen Gewichtsverlust von 44 g bei der Probe "A" und von 42 g bei der Probe "B". Aus den Abmessungen der Proben und den ermittelten Massen von 2286 g bzw. 2259 g wurden ihre Dichten bestimmt.

In einem nächsten Schritt wurden die Proben in einen Behälter mit Wasser gelegt, sodass über einen längeren Zeitraum eine Wassersättigung der Betonblöcke erreicht werden konnte.

Die Proben wurden tageweise gewogen und solange in dem Wasserbad belassen, bis sich eine annähernde Gewichtskonstanz einstellte.



Abbildung 8.2: Betonprobe nach dem Glühen bei 450 °C

Die Berechnung der Zugabewassermenge erfolgte nach den Formeln (8-1) und (8-2). Die auf diese Weise ermittelte Zugabewassermenge lag in beiden Fällen bei ca. 8% der Gesamtmasse und entsprach damit 175,5 l bei der Probe "A" bzw. 188,5 l bei der Probe "B". Da diese Proben streng nach der vorgegebenen Rezeptur hergestellt wurden, war der Sollwert des Anmachwassers mit  $190 \text{ l/m}^3$  bekannt. Vor allem die Probe "B" mit der sehr geringen Abweichung von lediglich 0,81% des tatsächlichen Wertes zeigt die mögliche Genauigkeit des Verfahrens.

Für die Ermittlung des Zementgehaltes wurden die Proben mittels einer Bankkreissäge in kleinere Blöcke geschnitten, welche nach einer mehrtägigen Trocknung bei 250 °C mit Hilfe einer hydraulischen Presse zerkleinert wurden. Das möglichst feine Material wurde, wie in Abbildung 8.3 zu sehen, in Gläser eingewogen und anschließend mit Essigsäure versetzt.



Abbildung 8.3: Zerkleinerten Festbeton- und Plattenprobe

Für die Lösung des Zementsteins wurde in diesen Versuchen sowohl bei den Vorversuchen als auch bei der Untersuchung der zementgebundenen Holzfaserverplatten eine hochkonzentrierte 95%-tige Essigsäure mit technischem Reinheitsgrad verwendet.

Nachdem die zerkleinerten Proben 5 Tage in den Gläsern zusammen mit der Essigsäure gelagerten, wurden die Rückstände mittels Filterpapier von der Säure und den darin gelösten Stoffen getrennt. Um Säurereste von den Rückständen zu entfernen wurden diese abermals für einige Stunden bei 250 °C im Trocknungsofen getrocknet. Nachdem die Proben abgekühlt waren wurde die Rückstände gewogen und die Werte in die Formel (8-3) bzw. in Formel (8-4) eingesetzt.

Die Ergebnisse und das Prüfprotokoll sind in Anhang C ersichtlich. Eine Auswertung für den Zementgehalt konnte auch Grund von technischen Problemen leider nicht erfolgen.

### 8.3 Zementgehaltsanalyse zementgebundener Holzspanplatten

Auf Grund der Versuchsergebnisse, die aus den Zugversuchen in Kapitel 6: "*Untersuchung des Einflusses des hydrostatischen Druckes*" gewonnen werden konnten, erfolgte unter Berücksichtigung der Plattenfarbe eine Auswahl drei unterschiedlich gefärbter Plättchen der zementgebundenen Holzfaserplatte. Wie die nachfolgende Abbildung 8.4 zeigt, wurden jeweils eine helle (H), eine mittlere (M) und eine dunkle Platte (D) für diese Versuche ausgewählt.

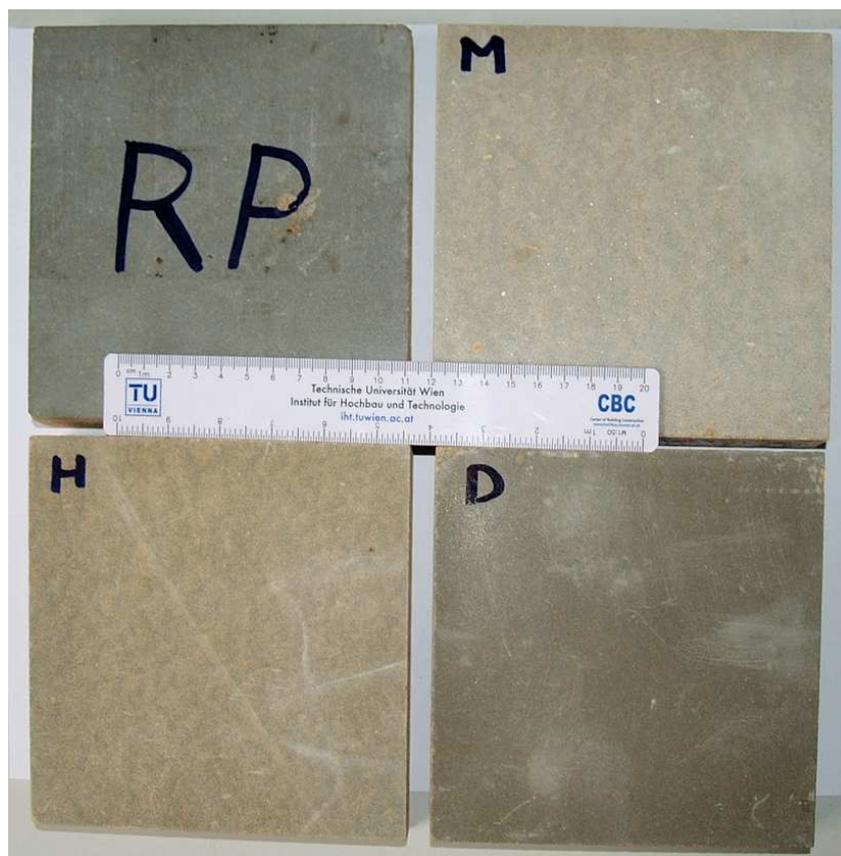


Abbildung 8.4: Platten "hell" (H), "mittel" (M), "dunkel" (D) u. Referenzplatte (RP)

In einem ersten Schritt wurden die drei Platten getrocknet. Da der Hauptbestandteil dieser Platten Holz ist und sie im Vergleich zu üblichen Festbetonproben nicht ausschließlich aus

mineralischen Bestandteilen aufgebaut sind musste das Verfahren modifiziert werden. Da Holz je nach Holzart, zwischen 280 °C und 340 °C zu brennen beginnt konnten die zementgebundenen Holzfaserplatten nicht wie die Festbetonproben im Ofen bei 450 °C gegläht werden ohne sie dabei zu zerstören. Auch eine Bestimmung des Anmachwassers ist auf Grund der hygroskopische Eigenschaften von Holz mittels diesem Verfahren nicht durchführbar, da das Holz Wasser bis zum Sättigungspunkt aufnehmen und sich somit nicht nur der Porenraum alleine füllen würde. Daher sollte das Verfahren auf die Bestimmung des Zementgehalts beschränkt werden, wobei die Proben bei 250 °C für mehrere Tage getrocknet anstatt gegläht wurden. Nach dem Trocknen wurden die Proben auf Beschädigungen untersucht und anschließend vermessen und gewogen. Die Daten sind im Anhang C zu finden.

Weiter wurden die Proben wie schon die Festbetonproben der Vorversuche mittels einer hydraulischen Presse möglichst fein zerkleinert, in Gläsern eingewogen und ebenfalls mit 95%-tiger Essigsäure versetzt. Dies erfolgte parallel zu den Festbetonproben "A" und "B". Hier zeigten sich bereits erste Unterschiede. In dem Moment als das zerkleinerte Plattenmaterial mit der Essigsäure in Kontakt kam, fand eine starke wärme Entwicklung bis zum Erreichen des Siedepunkts der Säure statt. Dies könnte auf eine starke Reaktion der Essigsäure mit dem Zusatzstoff Aluminiumsulfat zurückzuführen sein. Es zeigten sich bereits nach kurzer Zeit farbliche Unterschiede in den Proben "H", "M" und "D", wohingegen die Festbetonproben eine annähernd gleiche Färbung zeigten. Die zerkleinerten Plättchen wurden ebenfalls für 5 Tage in der Säure gelagert.



Abbildung 8.5: Farbunterschiede der Essigsäure

In einem letzten Arbeitsschritt sollten auch hier die Rückstände gefiltert und anschließend im Ofen bei 250 °C getrocknet werden, um alle Säurereste zu entfernen. Leider erwies sich das gewählte Verfahren zur Bestimmung des Zementgehalts für einen derartigen Kompositwerkstoff als ungeeignet. Da die *CETRIS*<sup>®</sup>-Platten zu 60% aus Holz bestehen, kam es dazu, dass die Holzfasern die Säure aufsaugten und sich das Volumen des Holzzementgemenges in dem Behälter fast verdoppelte und wieder erhärtete. Eine Auswertung nach den Formeln (8-3) und (8-4) war somit nicht möglich. Dennoch bestätigte die unterschiedliche Färbung teilweise die getroffene Annahme, dass Unterschiede von Charge zu Charge bestehen müssen.

Auch bei der Auswertung der beiden Festbetonproben "A" und "B" traten Probleme auf, die eine genaue Bestimmung des Zementgehalts unmöglich machten. In erster Linie lag das Problem hier in der Zerkleinerung der Proben. Dadurch dass dem Institut keine Gesteinsmühle zur Verfügung stand, waren beide Proben noch zu grob, das bedeutet die Säure konnte den Zementstein nicht vollständig lösen. Obwohl die Einwirkzeit der Säure und deren Menge erhöht

wurde, konnten nach dem Trocknen der Rückstände im Ofen keine brauchbaren Ergebnisse gewonnen werden. Allerdings zeigten die Versuche zur Bestimmung der Anmachwassermenge eine sehr hohe Zuverlässigkeit (siehe Anhang C), womit die Funktion des Verfahrens gezeigt werden konnte. Zukünftige Versuche mittels entsprechender technischer Hilfsmittel könnten es ermöglichen auch hier den Zementgehalt von Festbetonproben zu bestimmen und ein adaptives Verfahren für die zementgebundenen Holzfaserplatten zu finden.

## 9 Zusammenfassung

Seit nun mehr als 20 Jahren existieren Baustoffe wie die zementgebundene Holzspanplatte der Firma *CETRIS*<sup>®</sup> am Markt. Obwohl aus der Not und der Rohstoffknappheit des 2. Weltkrieges heraus geboren, entwickelten sich diese Baustoffe weiter und wurden nicht zuletzt wegen des Verlangens nach ressourcenschöner und nachhaltiger Bauverfahren zu einem der zukunftsträchtigsten Baustoffe unserer Zeit. Geringes Gewicht, Flexibilität, Feuerbeständigkeit und hohe Festigkeit schaffen ideale Voraussetzungen für den Einsatz dieser zementgebundenen Holzfaserplatten als verlorene Schalungselemente für die Herstellung von Hochbauten.

Für das Erstellen von Betonbauteilen im Hochbau sind in erster Linie formgebende Schalungselemente, in die der Frischbeton gegossen wird, erforderlich. Der Frischbeton, der sich wie eine Flüssigkeit verhält, übt enorme Kräfte auf die Schalung aus, denen diese bis zum Erreichen der Frühfestigkeit des Betons entgegenwirken muss. Auch die Elemente verlorener Schalungen müssen in der Lage sein diesen Kräften zu widerstehen, allerdings entfallen Zeit und Kosten für Ausschalen und Reinigung der Elemente. Die zementgebundenen Holzfaserplatten bauen einen Verbund mit dem Betonkern auf und verbleiben daher am fertigen Bauteil und können daher bereits werkseitig mit allen benötigten Einbauten versehen werden. Allerdings sind mit dieser modernen Bauweise auch einige Schadensfälle aufgetaucht, die zu erforschen und zu lösen sind.

Um die Ursache von Fehlstellen im Verbund zu ergründen wurden im Zuge der Diplomarbeit mehrere bruchmechanische Versuche durchgeführt, um den Einfluss der Feuchtigkeit, die durch den Frischbeton in die Schalelemente eingetragen wird, auf den Verbund und die Materialfestigkeit zu untersuchen. Ausgangspunkt jeder Untersuchung waren dabei Plattenelemente mit einer Abmessung von 150 x 150 x 24 mm, der zementgebundenen Holzfaserplatte, die im Weiteren als "Plättchen" bezeichnet wurden. Die Ermittlung der bruchmechanischen Kennwerte der Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  und der spezifische Bruchenergie  $G_F$  erfolgten dabei mittels der Keilspaltmethode nach ÖNORM B 3592.

Zugversuche sollten klären, welchen Einfluss die Höhe der Betonierhorizonte auf den sich langsam aufbauenden Verbund haben würde. Dazu wurden Plättchen mittels unterschiedlichen hohen Frischbetonsäulen belastet und 28 Tage bis zur vollständigen Erhärtung gelagert. Die Ergebnisse des anschließenden Zugversuchens lieferten Werte zur maximal aufnehmbaren Zugkraft und gaben Auskunft über die entstandenen Bruchflächen, welche meist zu 100% in der Platte lagen. Das bedeutet, dass die Verbundfestigkeit die Materialfestigkeit bei weitem überstieg. Weiter konnte mit diesen Versuchen ein Einfluss der Betonierhöhe widerlegt werden.

Um die Materialfestigkeit der zementgebundenen Holzfaserplatten im Zusammenhang mit der Materialfeuchte zu untersuchen, wurden aus 300 x 150 x 24 mm großen Platten je zwei Plättchen hergestellt und den gleichen bruchmechanischen Tests unterzogen, wobei eine der beiden einer Vorbehandlung unterzogen wurde. Diese bestand darin, die fertig präparierte Probe mehrere Tage in einem Behälter mit Wasser zu lagern, um so eine vollständige Durchfeuchtung, das heißt eine Wassersättigung zu erzielen. Die Lagerung während der Aushärtung, sowie die Testbedingungen selbst waren für beide Platten immer gleich. Es konnte mit diesen Versuchen und dem Vergleich der bruchmechanischen Kennwerte Kerbzugfestigkeit  $\sigma_{KBZ}$  und spezifische Bruchenergie  $G_F$  gezeigt werden, dass eine Wassersättigung zu einem Herabsetzen der Materialfestigkeit der zementgebundenen Holzfaserplatten führt. Diese lag im Bereich von etwa 20%.

Die Problematik, die mit diesen Erkenntnissen verbunden ist, besteht darin, dass es bei Systemen wie hier, deren Bestandteil ein Verbund zwischen Schalplatte und Betonkern ist, nur äußerst schwierig ist eine, wasserundurchlässige Oberfläche der Platte zum Beton hin herzustellen und dabei den wirtschaftlichen Vorteil des Verfahrens zu wahren.

Im Zuge der Zugversuche zeigten sich ebenfalls Unterschiede im Verhalten der zementgebundenen Holzfaserplatten in Bezug auf deren Färbung. Der Grundgedanke für die Analyse des Zementgehalts war somit geboren und sollte klären, ob dunklere Platten, wie die Versuchsergebnisse andeuteten, einen höheren Zementgehalt aufweisen als hellere Platten. Diese Versuche sollten mit dem Verfahren nach Dorner, H. W. erfolgen. Dieses Verfahren basiert neben der gravimetrischen Bestimmung des Wassergehalts auf einem Analyseverfahren mittels hochkonzentrierter Essigsäure. Leider gelang es auf Grund verfahrenstechnischer Probleme nicht, aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. Der Holzanteil der zementgebundenen Holzfaserplatte von 60% macht eine Bestimmung mittels Essigsäure unmöglich, da das Holz die Säure aufsaugt und es damit kaum zu einer Lösung des Zementsteins kommen konnte.

Gelingt es in Zukunft diese Fehler im Zusammenhang mit dem Verbund und der Materialfestigkeit der Platten und der eindringenden Feuchtigkeit in den Griff zu bekommen, besitzt dieses Bauverfahren großes Potential um Kundenwünsche in kürzester Zeit kostengünstig umzusetzen und das Verlangen nach nachhaltigen Alternativen im Bereich der Bauindustrie zu befriedigen.

---

**Literaturverzeichnis:**

- [1] **BetonMarketing Deutschland GmbH** Beton.org [Online] - <http://www.beton.org>
- [2] **CIDEM Hranice, a.s.** Division CETRIS [Online] - 2013 - <http://www.cetris.cz/de/>
- [3] **Deutschland Bundesrep.** Universität der BW München [Online] - <http://www.unibw.de>
- [4] **Dorner Dr. Horst W.**, ConChem-Journal 5. Jahrgang 03/1997, Seite 95-103
- [5] **FORM+TEST Seidner + Co.GmbH** Prüfsysteme [Online] - <http://www.formtest.de>
- [6] **Hanisch Christian BSc., Sigmund Dominik** Verbunduntersuchungsstudie zum Einsatz von zementgebundenen Holzfaserplatten als verlorene Schalung in Kombination mit selbstverdichtendem Beton - Wien 2014: Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Wien, 2014
- [7] **HeidelbergCement AG** HEIDELBERG Cement [Online] - 2013 - <http://www.heidelbergcement.com>
- [8] **Jamek Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael** Bestimmung der Energiebilanz bei Rissinitiierung und Rissausbreitung in quasispröden Werkstoffen [Buch]. - Wien : Institut für Festkörperphysik (E138) der Technischen Universität Wien, 2002.
- [9] **Lafarge Cement CE Holding GmbH** LAFARGE Building better cities [Online]. - <http://www.lafarge.at>
- [10] **Radoevski Dipl.-Ing. Aleksandar Milkov** Verbunduntersuchung zwischen selbstverdichtendem Beton und verlorenen Schalungselementen aus zementgebundenen Holzfaserplatten [Buch]. - Wien: Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Wien, 2014
- [11] **unbekannt** Wikipedia/Beton[Online] - [de.wikipedia.org/wiki/Selbstverdichtender\\_Beton](http://de.wikipedia.org/wiki/Selbstverdichtender_Beton)

## Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2.1: ZUSAMMENSETZUNG DER CETRIS-PLATTE [2].....	5
ABBILDUNG 2.2: GROBSPÄNE [10].....	7
ABBILDUNG 2.3: FEINSPÄNE [10].....	7
ABBILDUNG 2.4: SÄGEMEHL [10].....	8
ABBILDUNG 2.5: RECYCLAT [10].....	8
ABBILDUNG 2.6 : HERSTELLUNGSSCHEMA [2].....	9
ABBILDUNG 3.1: FUNKTION EINES ANKERS BEI WANDSCHALUNGEN.....	12
ABBILDUNG 3.2: MONTAGE DER ELEMENTE IM WERK.....	14
ABBILDUNG 3.3: WANDELEMENTE.....	15
ABBILDUNG 4.1: ÜBERPRÜFUNG DER FLIEßFÄHIGKEIT MIT BLOCKIERRING [3].....	17
ABBILDUNG 4.2 SEDIMENTATIONSVERSUCH.....	18
ABBILDUNG 4.3: AUSLAUFTRICHTER [5].....	18
ABBILDUNG 5.1: KRÄFTE AM KEIL [8].....	19
ABBILDUNG 5.2: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER RISSÖFFNUNG [10].....	20
ABBILDUNG 5.3: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINER LASTVERSCHIEBUNGSKURVE [8].....	20
ABBILDUNG 5.4: RISSINITIERUNGSENERGIE IM LVD [10].....	22
ABBILDUNG 5.5: ABMESSUNGEN DER PROBE [10].....	23
ABBILDUNG 6.1: PVC-RÖHREN.....	25
ABBILDUNG 6.2: MARKIERTE <i>Cetris</i> ®-PLATTE.....	25
ABBILDUNG 6.3: FERTIG VORBEREITETE PROBE (LINKS: UNTERSICHT, RECHTS: ANSICHT).....	26
ABBILDUNG 6.4: VERGLEICH DER FÄRBUNG DER PLATTEN MIT DER REFERENZPLATTE (RP)...	29
ABBILDUNG 6.5: EINSpannung IN DER MASCHINE.....	30
ABBILDUNG 6.6: BRUCHFLÄCHEN.....	31
ABBILDUNG 6.7: ERGEBNISSE DER ZUGVERSUCHE.....	31
ABBILDUNG 6.8: PROBE IN DER PRÜFMASCHINE.....	33
ABBILDUNG 6.9: WEGAUFNEHMER.....	33
ABBILDUNG 6.10: LAST-VERSCHIEBUNGS-DIAGRAMM DER PROBE H25_3.....	34
ABBILDUNG 6.11: VERMESSEN DER BRUCHFLÄCHE – H75_2 MIT ABZUGSFLÄCHE $A_1$ .....	34
ABBILDUNG 6.12: PROBENABMESSUNGEN U. ERLÄUTERUNG DER BEZEICHNUNGEN.....	35
ABBILDUNG 6.13: KERBZUGFESTIGKEIT U. SPEZ. BRUCHENERGIE DER KEILSPALTVERSUCHE.....	36
ABBILDUNG 6.14: DURCHSCHNITT DER DREI MESSREIHEN 25, 50 U. 75 CM.....	36
ABBILDUNG 6.15: $\sigma_{KBZ}$ UND $GF$ UNBESCHÄDIGTER PLATTEN AUS DEM HYDR. VERSUCHEN...	37
ABBILDUNG 6.16: ZUSAMMENHANG ZWISCHEN ZUGKRAFT UND PLATTENFESTIGKEIT.....	38
ABBILDUNG 6.17: SERIE DUNKLE PLATTEN, VON LINKS NACH RECHTS.....	39
ABBILDUNG 6.18: SERIE HELLER PLATTEN, VON LINKS NACH RECHTS.....	39
ABBILDUNG 6.19: KERBBIEGEZUGFESTIGKEIT $\sigma_{KBZ}$ IN ABHÄNGIGKEIT DER PLATTENFARBE.....	40
ABBILDUNG 6.20: PLATTEN GEREIHT VON HELL NACH DUNKEL.....	40
ABBILDUNG 6.21: ZUSAMMENHANG VON PLATTENFEUCHTE UND KERBZUGFESTIGKEIT.....	41
ABBILDUNG 7.1: MESSPROGRAMM.....	42
ABBILDUNG 7.2: BESCHRIFTUNG DER 30 X 15 CM PLATTEN.....	43
ABBILDUNG 7.3: SCHEMATISCHER AUFBAU EINER WÜRFELPROBE [10].....	45
ABBILDUNG 7.4: ANBRINGEN DER FOLIE.....	46
ABBILDUNG 7.5: VORBEREITETE SCHALUNG MIT PLATTE.....	47
ABBILDUNG 7.6: BETONIERVORGANG.....	47
ABBILDUNG 7.7: AUSSCHALEN MITTELS PRESSLUFT.....	48
ABBILDUNG 7.8: PROBENBESCHRIFTUNG WÜRFELPROBEN - V_5A(A/B).....	48
ABBILDUNG 7.9: LAGERUNG DER PROBEN WÄHREND DER AUSHÄRTUNG.....	49
ABBILDUNG 7.10: AUSRICHTEN DER PROBEN.....	50
ABBILDUNG 7.11: SCHNEIDEN DER STARTERKERBE.....	50
ABBILDUNG 7.12: AUFKLEBEN DER MARMORPRISMEN.....	51
ABBILDUNG 7.13: LV-DIAGRAMM DER PROBE PF_3B (WASSERSÄTTIGUNG).....	52
ABBILDUNG 7.14: DURCHDRINGUNG NACH 4 TAGEN.....	53
ABBILDUNG 7.15: ERGEBNISSE DER VERSUCHE ZUR PLATTENFESTIGKEIT.....	54
ABBILDUNG 7.16: VERBUNDRATE DER PROBEN DER VERBUNDUNTERSUCHUNGEN.....	55
ABBILDUNG 7.17: GEMITTELTE KERBZUGFESTIGKEIT $\sigma_{KBZ}$ DER VERBUNDPROBEN.....	56
ABBILDUNG 7.18: GEMITTELTE SPEZIFISCHEN BRUCHENERGIE $GF$ DER VERBUNDPROBEN.....	56

---

ABBILDUNG 8.1: BETONROBEN A U. B DER VORVERSUCHE ZUR ZEMENTGEHALTSANALYSE..	62
ABBILDUNG 8.2: BETONPROBE NACH DEM GLÜHEN BEI 450 °C .....	63
ABBILDUNG 8.3: ZERKLEINERTEN FESTBETON- UND PLATTENPROBE .....	63
ABBILDUNG 8.4: PLATTEN "HELL" (H), "MITTEL" (M), "DUNKEL" (D) U. REFERENZPLATTE (RP)	64
ABBILDUNG 8.5: FARBUNTERSCHIEDER DER ESSIGSÄURE .....	65

## **Tabellenverzeichnis**

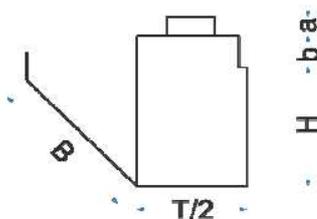
TABELLE 6-1: BETONREZEPTUR FÜR 20 LITER FRISCHBETON .....	27
TABELLE 6-2: PLATTENFEUCHTIGKEIT .....	30
TABELLE 7-1: ABKÜRZUNGEN DER PROBEN.....	44

## Anhang A

### Zugversuch - Einfluss des hydrostatischen Druckes u. Bestimmung der Plattenfestigkeit:

Probe Nr.	Bruch i.d. Platte [%]	Plattenfeuchte RH [%]	Zugkraft [N]	Kerbzugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	sp. Bruchenergie [J/m <sup>2</sup> ]
H25_1	100	66	3.856	-	-
H25_2	100	67	3.045	-	-
H25_3	100	63	2.182	0,84	185
H25_4	100	57	3.640	0,85	200
H25_5	100	64	2.198	-	-
H25_6	100	63	2.216	-	-
H50_1	100	63	2.726	-	-
H50_2	100	65	2.261	-	-
H50_3	100	66	3.556	0,73	205
H50_4	100	57	2.824	-	-
H50_5	100	60	727	0,78	255
H50_6	100	69	2.930	-	-
H75_1	100	66	-	-	-
H75_2	100	56	2.399	1,01	175
H75_3	100	52	3.261	-	-
H75_4	100	60	2.297	-	-
H75_5	100	60	4.250	0,85	180
H75_6	100	67	2.165	-	-

### Prüfbericht 25.06.2014 - Einfluss des hydrostatischen Druckes u. Bestimmung der Plattenfestigkeit:



V = 1 mm/min

Keil: 19,2 °

Alle Maßen in mm!

$A_1$  = nicht wirksame Fläche

$B_{red}$  =  $B - A_1/H$ ; reduzierte Ligamentbreite

Probe	a	b	H	$B_{red}$	T	B	$A_1$	Bemerkungen
H25_3	20,0	31,6	116,5	128,2	150,0	147,0	2195,0	Auf Grund des Zugversuchs wurde die Platte so beschädigt, dass bei der Keilspaltmethode die Bruchfläche beeinträchtigt wurde.
H25_4	18,9	28,8	118,9	110,6	150,0	147,0	4324,0	Auf Grund des Zugversuchs wurde die Platte so beschädigt, dass bei der Keilspaltmethode die Bruchfläche beeinträchtigt wurde.
H50_3	19,4	31,1	116,8	124,5	150,0	147,0	2625,0	Auf Grund des Zugversuchs wurde die Platte so beschädigt, dass bei der Keilspaltmethode die Bruchfläche beeinträchtigt wurde.
H50_5	18,0	29,3	118,4	110,7	150,0	147,0	4295,0	Auf Grund des Zugversuchs wurde die Platte so beschädigt, dass bei der Keilspaltmethode die Bruchfläche beeinträchtigt wurde.
H75_2	18,5	28,1	119,1	125,3	150,0	147,0	2583,0	Auf Grund des Zugversuchs wurde die Platte so beschädigt, dass bei der Keilspaltmethode die Bruchfläche beeinträchtigt wurde.
H75_5	19,6	31,0	116,7	119,4	150,0	147,0	3217,0	Auf Grund des Zugversuchs wurde die Platte so beschädigt, dass bei der Keilspaltmethode die Bruchfläche beeinträchtigt wurde.

**Umrechnungstabelle Holzfeuchte in relative Feuchtigkeit:**

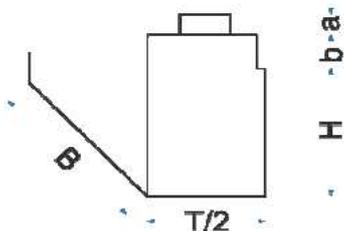
rel. Luft- feuchtigkeit	Werte für die Holzausgleichsfeuchte in %						
90%	21,1	21	21	20,8	20	19,8	19,3
85%	18,1	18	18	17,9	17,5	17,1	16,9
80%	16,2	16	16	15,8	15,5	15,1	14,9
75%	14,7	14,5	14,3	14	13,9	13,5	13,2
70%	13,2	13,1	13	12,8	12,4	12,1	11,8
65%	12	12	11,8	11,5	11,2	11	10,7
60%	11	10,9	10,8	10,5	10,3	10	9,7
55%	10,1	10	9,9	9,7	9,4	9,1	8,8
50%	9,4	9,2	9	8,9	8,6	8,4	8
45%	8,6	8,4	8,3	8,1	7,9	7,5	7,1
40%	7,8	7,7	7,5	7,3	7	6,6	6,3
35%	7	6,9	6,7	6,4	6,2	5,8	5,5
30%	6,2	6,1	5,9	5,6	5,3	5	4,7
25%	5,4	5,3	5	4,8	4,5	4,2	3,8
Temperatur	10 °C	15 °C	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C

Quelle: <http://www.power-pellets.de>





### Prüfbericht 14.07.2014 - Plattenfestigkeit:



V = 1 mm/min  
 Keil: 19,2°  
Alle Maßen in mm!

Probe	a	b	H	B	T	Bemerkungen
1_A	20,9	31,9	119,6	147,0	150,0	trocken: 25% RH Mitte; 100% B.i.d.P.
1_B	20,4	32,0	116,9	147,8	150,0	nass: 15% RH Mitte, 87% RH Rand; 100% B.i.d.P.
2_A	-	-	-	-	-	ausgefallen
2_B	20,5	30,6	116,8	147,8	150,0	-

### Prüfbericht 19.19.2014 - Plattenfestigkeit:

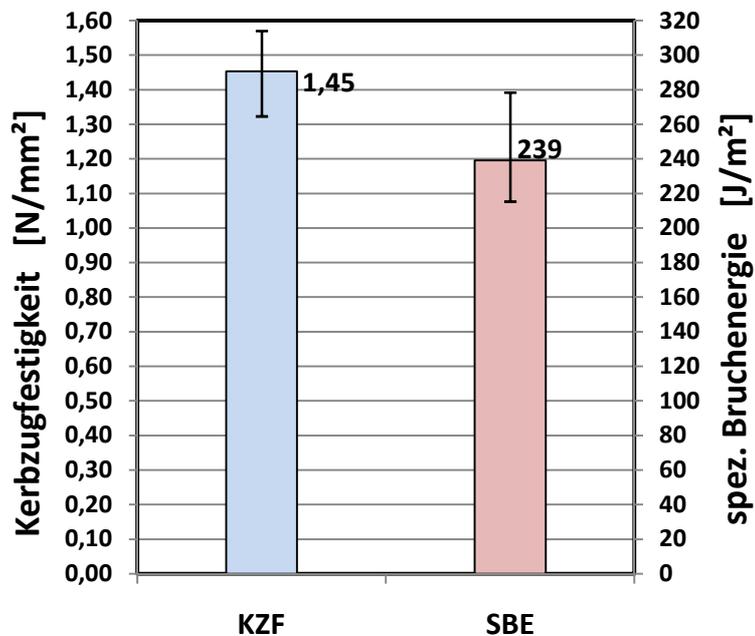
Probe	a	b	H	B	T	Bemerkungen
PF_I_A	20,7	33,2	115,2	147,4	150,0	Wegaufnehmer 1 am Anfang korr.! - ausgefallen
PF_II_A	21,1	28,8	118,5	147,4	150,0	100% Bruch in der Platte
PF_III_A	21,8	31,3	116,8	147,3	150,0	100% Bruch in der Platte
PF_IV_A	21,4	29,7	118,6	147,2	150,0	100% Bruch in der Platte
PF_V_A	-	-	-	-	-	ausgefallen
PF_VI_A	21,1	31,0	117,3	147,9	150,0	90% Bruch in der Platte
PF_I_B	20,1	0,0	147,4	147,6	150,0	Bruch nicht in Starterkerbe - ausgefallen
PF_II_B	21,9	29,8	118,5	147,6	150,0	90% Durchfeuchtung, 100% Bruch in der Platte
PF_III_B	19,7	32,5	115,4	147,2	150,0	90% Durchfeuchtung, 100% Bruch in der Platte
PF_IV_B	21,6	30,8	116,5	147,3	150,0	60% Durchfeuchtung, 100% Bruch in der Platte
PF_V_B	19,3	29,6	116,8	147,2	150,0	60% Durchfeuchtung, 100% Bruch in der Platte
PF_VI_B	-	-	-	-	-	ausgefallen

### Prüfbericht 08.08.2014 - Verbundfestigkeit:

Probe	a	b	H	B	T	Bemerkungen
V_3A	19,0	30,2	118,2	147,7	150,0	Mix 1 - 100% Bruch in der Platte (Verbundprobe)
V_4A	18,9	29,3	119,8	147,4	150,0	Mix 2 - 73% Bruch in der Platte (Verbundprobe)
V_5A	19,9	29,1	118,7	147,9	150,0	Mix 1 - 100% Bruch in der Platte (Verbundprobe)
V_3B	18,8	30,4	117,6	147,6	150,0	Mix 1 - 100% Bruch in der Platte (Verbundprobe)
V_4B	20,5	29,0	119,6	147,7	150,0	Mix 1 - 100% Bruch in der Platte (Verbundprobe)
V_5B	18,7	31,0	117,6	147,2	150,0	Mix 2 - 100% Bruch in der Platte (Verbundprobe)
TH_1A	18,7	31,0	117,9	147,1	150,0	Mix 1 - 100% Bruch in der Platte (Verbundprobe)
TH_2A	18,7	30,0	121,2	147,0	150,0	Mix 2 - 66% Bruch in der Platte (Verbundprobe)
TH_3A	18,9	28,5	118,7	146,9	150,0	Mix 2 - 66% Bruch in der Platte (Verbundprobe)
TH_4B	18,8	32,2	120,5	147,1	150,0	Mix 2 - 100% Bruch in der Platte (Verbundprobe)
TH_5B	19,9	30,8	120,2	147,9	150,0	Mix 2 - 100% Bruch in der Platte (Verbundprobe)
TH_6B	18,1	29,4	118,3	147,1	150,0	Mix 1 - 100% Bruch in der Platte (Verbundprobe)

### Ergebnisse der Kerbzugfestigkeit $\sigma_{KBZ}$ - Platte 24 mm Sommer 2013:

#### Plattenfestigkeit - Platte 24 mm Messserie "Sommer 2013"



## Anhang C

## Prüfbericht u. Ergebnisse der Vorversuche:

Phase 1 - Bestimmung des Wassergehalts					
Referenzmessung		Probe A		Probe B	Einheit
	Länge 1	60,0	60,0		[mm]
	Länge 2	136,0	133,0		[mm]
	Länge 3	138,0	130,0		[mm]
	Volumen	1,126	1,037		[dm <sup>3</sup> ]
	Gewicht	2429	2403		[g]
	Gewicht	2,429	2,403		[kg]
	Dichte	2,1570	2,3164		[kg/dm <sup>3</sup> ]
<hr/>					
105°C	Gewicht	2330	2301		[g]
	Δm	-99	-102		[g]
450°C	Gewicht	2286	2259		[g]
	Δm	-44	-42		[g]
	Gewicht	2286	2259		[g]
Wassersättigung	Gewicht	2460	2432		[g]
	Δm	+174,0	+173,0		[g]
Wassersättigung	Gewicht	2464	2437		[g]
	Δm	+4,0	+5,0		[g]
Wassersättigung	Gewicht	2467	2439		[g]
	Δm	+3,0	+2,0		[g]
Wassersättigung	Gewicht	2469	2440		[g]
	Δm	+2,0	+1,0		[g]
	Gewicht	2469	2440		[g]
	Dichte <sub>450°C</sub>	2,1926	2,3520		[kg/dm <sup>3</sup> ]
<hr/>					
Wassergehalt					
$w' = \frac{m_{450°C, wg} - m_{450°C}}{m_{450°C}} \cdot 100$		8,01	8,01		[Masse-%]
Wassergehalt					
$w = w' \cdot \rho_{450°C} \cdot 10$		175,5	188,5		[l/m <sup>3</sup> ]
Reinwasser-Sollwert	190	Δm	14,5	Δm	1,5
		≙	7,62%	≙	0,81%