

KI Keramik-Institut GmbH

**„Entwicklung und Produktionsversuch eines stranggezogenen
wasserdurchlässigen Pflasterziegels“
*1. Teilprojekt***

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 32302 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr. Jens Petzold

Meißen, August 2018

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	32302/01-23	Referat	23	Fördersumme	692.085 €
Antragstitel		Entwicklung und Produktionsversuch eines stranggezogenen wasserdurchlässigen Pflasterziegels - Teilprojekt 1 (TP1)			
Stichworte					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
2 Jahre	19.06.2016				
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger	KI Keramik-Institut GmbH Ossietzkystr. 37a 01662 Meißen			Tel	03521-463515
				Fax	03521-463516
				Projektleitung	Dr. Jens Petzold
			Bearbeiter	Anett Lübchow	
Kooperationspartner	Wienerberger GmbH Oldenburger Allee 26 30659 Hannover				
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Wasserdurchlässige Deckschichten sind heute Stand der Technik. Ihre Anwendung ist in Merkblättern und Vorschriften geregelt. In der KI Keramik-Institut GmbH wurde in den letzten Jahren ein wasserdurchlässiger Pflasterziegel entwickelt, der den Regelungen entspricht und in seiner Optik und Haptik wasserundurchlässigen Pflasterklinkern ähnelt. Alle technologischen Schritte und Eigenschaften der Zwischenprodukte entsprechen den Forderungen der Ziegelindustrie. Die einzige Ausnahme ist die Formgebung mittels hydraulischer Presse. Das Trockenpressen wird in der Ziegelindustrie faktisch nicht angewandt und stellt somit das Haupthindernis zur Überführung der Technologie in die industrielle Produktion dar.</p> <p>Es soll eine Technologie zur Herstellung eines wasserdurchlässigen Pflasterziegels mittels Strangpressen entwickelt (TP1) und in einer Pilotproduktion (TP 2) getestet werden. Damit wird Nutzern, die heute aus ästhetischen oder historischen Gründen keramische Deckschichten benutzen die Möglichkeit gegeben werden, versickerungsfähige Verkehrsflächen zu errichten, die den bisher verwendeten wasserundurchlässigen Deckschichten aus Keramik im Material, in der Optik und in der Haptik gleichen.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<ul style="list-style-type: none"> - Herstellung von wasserdurchlässigen Pflasterziegeln aus beim Kooperationspartner ökonomisch verfügbaren Rohstoffen entsprechend der vergangenen Entwicklung, Schaffung der Rohstoffbasis, Erreichen des Standes der Technik mit neuen Rohstoffen (Trockenpressen) - Formgebung der Masse mittels Strangpresse im Technikum - Ermittlung optimaler Feuchten beim Einsatz von Plastifizierern - Strangziehen mit realen Pflasterziegelformaten - Aufbereitung unter Industriebedingungen - Strangziehen unter Industriebedingungen - Bewertung der unter Industriebedingungen hergestellten Produkte - Vorbereitung der industriellen Pilotproduktion (Diese soll im Teilprojekt 2 stattfinden.) 					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt □ An der Bornau 2 □ 49090 Osnabrück □ Tel 0541/9633-0 □ Fax 0541/9633-190 □ http://www.dbu.de					

Ergebnisse und Diskussion

Die Rohstoffe des wasserdurchlässigen Pflasterziegels sind Gerüst Korn (Hauptbestandteil), Flussmittel und Ton. Beim Brand verringern der Ton und das Sinterhilfsmittel ihr Volumen, die Gesteinskörnung verhindert jedoch eine Schwindung des Ziegels. Dadurch entstehen Hohlräume und Kanäle im Ziegel, die die Wasserdurchlässigkeit ermöglichen.

Im ersten Schritt des TP1 wurden Rohstoffe gefunden, die am geplanten Produktionsstandort mit einem ökonomisch vertretbarem Transportaufwand verfügbar sind und redundant sind: Zwei Basalte aus etwas weniger als 200 km Entfernung sowie zwei Tone aus 300 km und 500 km Entfernung.

In den nächsten Schritten wurde gezeigt, dass durch Versatzanpassungen und die Anwendung hochplastischer Tone das Extrudieren des Versatzes auf der industriellen Strangpresse am Produktionsstandort möglich ist. Auf die Verwendung künstlicher Plastifikatoren konnte letztendlich verzichtet werden, wenn das Mundstück bewässert wurde. Die extrudierten, getrockneten und gebrannten Pflasterziegel erreichten bei einer Dicke von 76 mm die normativ geforderte Biegebruchlast und den Frost-Tauwechsel-Widerstand. Die Wasserdurchlässigkeit war mehr als das 10fache der Geforderten. Der Stapelbrand war möglich (6 Ziegel). Die Masse ließ sich nur in einem schmalen „Feuchte-Fenster“ verarbeiten, darunter wie darüber war das Zusammenspiel aus Plastizität und dem Trocknen sowie dem Brennen ungenügend. Weitere Versuche im TP2 müssen eine Erhöhung des Pressdrucks durch Umbau der Strangpresse ermöglichen und die Staubbelastung bei der Aufbereitung muss durch z.B. grubenfeuchte Rohstoffe verringert werden. In größeren Serien (Pilotversuch im TP2) ist eine weitere Masseoptimierung und konstante FeuchteEinstellung zu erreichen. Dann werden die oben genannten umweltpolitischen Ziele des Gesamtprojektes erreicht.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Die (Zwischen-) Ergebnisse des TP 1 wurden dem Bundesverband der deutschen Ziegelindustrie vorgestellt, um schon heute eine Normung für wasserdurchlässige Pflasterziegel voranzubringen. Auf dem 23. Eurosymposium in Meißen werden die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Nach Genehmigung und Abarbeitung des TP 2 werden neben der Darstellung der Ergebnisse für die Ziegelindustrie Planer und Händler informiert, um eine breite Anwendung der Pflasterziegel zu erreichen.

Fazit

- ✓ Es ist gelungen einen wasserdurchlässigen Pflasterziegel durch das Formgebungsverfahren Extrusion herzustellen.
- ✓ Der stranggezogene wasserdurchlässige Pflasterziegel erfüllt die kritischen Parameter Biegebruchlast und Wasserdurchlässigkeit der jeweiligen Normen. Die Wasserdurchlässigkeit liegt beim 10 bis 20fachen der geforderten Durchlässigkeit, so dass große Reserven gegen Verschmutzung bestehen.
- ✓ Die Parameter Frost-Tauwechsel und Rohdichte der Normen wurden ebenfalls erfüllt.
- ✓ Der stranggezogene wasserdurchlässige Pflasterziegel ist deutlich rauer als sein trockengepresstes Pendant. Auf eine Bestimmung des Gleitwiderstandes wurde deshalb verzichtet.
- ✓ Die Aufbereitung der Rohstoffe konnte an die Aufbereitungsmethoden der Ziegelindustrie angepasst werden. Kleinere Modifikationen sind notwendig (Bypass Walzwerke!).
- ✓ Die Ziegel konnten im Stapel mit bis zu 6 Ziegeln gebrannt werden (Ausbrandtemperatur 1130°C).
- ✓ Die notwendigen Rohstoffe sind aus ökonomisch vertretbaren Entfernungen verfügbar.
- ❖ Die Ziegel flossen direkt nach der Strangpresse, so dass eine leicht trapezförmige Fläche entstand. Dieses Fließen geht vermutlich auf eine zu geringe Verdichtung der Masse zurück.
- ❖ Die Ziegel zeigten direkt nach der Strangpresse ein leichtes Aufwölben an der Oberseite. Dieser Effekt tritt als Rückdehnung und bei nicht exakt geschwindigkeitskonformen Transportbändern auf.
- ❖ Die Biegebruchlast wurde an 75 mm dicken Ziegeln bestimmt, bei dünneren Ziegeln wird die geforderte Biegebruchlast von 80 N/mm (T4 nach [4]) vermutlich nicht erreicht.
- ❖ Im Stapelbrand kam es wegen der nicht exakt ebenen Standflächen der Ziegel und einer vermutlich geringen Erweichung zu kleinen Verschiebungen der jeweils obersten Ziegelreihe.
- ❖ Das Mischen der trockenen Rohstoffe wurde manuell durchgeführt und hatte eine erhebliche Staubbelastung für die Ausführenden zur Folge.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	4
VERZEICHNIS DER TABELLEN	5
VERZEICHNIS DER BILDER	6
ABKÜRZUNGEN, BEGRIFFE UND DEFINITIONEN	7
Zusammenfassung.....	8
1 Anlass und Aufgabenstellung	9
2 Stranggezogene wasserdurchlässige Pflasterziegel	11
2.1 ROHSTOFFBASIS	11
2.1.1 GERÜSTKORN.....	11
2.1.2 TON	12
2.1.3 MEHRFACHANALYSEN.....	13
2.2 HERSTELLUNG WASSERDURCHLÄSSIGER PFLASTERZIEGEL MIT NEUEN ROHSTOFFEN UND BEKANNTER TECHNOLOGIE (TROCKENPRESSEN)	14
2.3 STRANGZIEHVERSUCHE IM KERAMIK-INSTITUT	16
2.3.1 ERMITTLUNG DER OPTIMALEN FEUCHTE ZUM STRANGZIEHEN	16
2.3.2 STRANGZIEHEN IM KERAMIK-INSTITUT	17
2.4 STRANGZIEHVERSUCHE MIT REALEN PFLASTERZIEGELFORMATEN	17
2.4.1 HERSTELLEN VON MASSEN BEI WIENERBERGER	18
2.4.2 STRANGZIEHEN VON MASSEN MIT PLASTIFIZIERER.....	19
2.4.3 STRANGZIEHEN EINER MASSE OHNE PLASTIFIZIERER (MASSE G3)	23
2.4.3 TROCKNEN UND BRENNEN EINER MASSE OHNE PLASTIFIZIERER (MASSE G3).....	25
2.5 EIGENSCHAFTEN WASSERDURCHLÄSSIGER PFLASTERZIEGEL AUS DEM ERFOLGSVERSATZ (VERSATZ G3)	27
3 Fazit	29
3.1 WAS WURDE ERREICHT?	29
3.2 WAS MUSS IN WEITEREN ARBEITEN (TEILPROJEKT 2) GELÖST WERDEN?	29
4 Literaturverzeichnis.....	31

Verzeichnis der Tabellen

Projektkennblatt	2
Tabelle 1: Edelsplitte, deren Eigenschaften zur Herstellung wasserdurchlässiger Pflasterziegel geeignet sind. Kursiv: Körnung 1/3 sofort verfügbar, alle anderen auf Nachfrage. Fett: verwendet für die weiteren Versuche.	12
Tabelle 2: Tone deren Eigenschaften zur Herstellung wasserdurchlässiger Pflasterziegel am geplanten Standort geeignet sind. Fett: für die weiteren Versuche verwendeter Ton.....	13
Tabelle 3: Spannweite ausgewählter Parameter in den für die Versuche verwendeten Splitten, *...Spannweite kleiner als die Unterscheidungsgrenze.....	13
Tabelle 4: Wasserdurchlässigkeiten und Biegebruchlasten wasserdurchlässiger Pflasterziegel mit neuen und z.T. veränderten Versätzen. Ausbrandtemperatur 1110° bis 1150°C, Parameterbestimmung an Ziegeln des Brandes mit subjektiv ausreichender bzw. höchster Wasserdurchlässigkeit.....	15
Tabelle 5: Wasserdurchlässigkeit von trockengepressten wasserdurchlässigen Pflasterziegeln unter Verwendung von 3% Zellulose.....	16
Tabelle 6: geschätzte Wasserdurchlässigkeit an Probekörpern mit Plastifizierern (Zellulose), Ausbrandtemperatur 1130°C.	17
Tabelle 7: Wasserdurchlässigkeit von stranggezogenen wasserdurchlässigen Pflasterziegeln unter Verwendung von 4% Zellulose.....	22
Tabelle 8: Parameter von wasserdurchlässigen Pflasterziegeln bei verschiedenen Ausbrandtemperaturen. Für die Temperatur 1150°C wurden nur 3 Ziegel anstatt der geforderten 10 geprüft.	27

Verzeichnis der Bilder

Bild 1:	Trockengepresste Wasserdurchlässige Pflasterziegel in verschiedenen Farben.....	9
Bild 2:	Sägefläche in einem trockenepressten wasserdurchlässigen Pflasterziegel	10
Bild 3:	Einrichtung zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit.....	14
Bild 4:	Manuelles Vormischen des Versatzes in einer Vorratsbox.....	18
Bild 5:	Siebrundbeschicker außen mit Lochscheibe und Transportband.....	19
Bild 6:	Siebrundbeschicker innen mit Brause zur Einstellung der Feuchte.....	19
Bild 7:	Staubentwicklung bei der Zugabe der Zellulose beim Vormischen in der Box.....	20
Bild 8:	Extrusionsversuch der Masse V206 F4M-W5/Z4 mit ca. 21 Ma% Feuchte, Drachenzähne über den gesamten Strang.....	21
Bild 9:	Extrusionsversuch der Masse V206 F4M-W5/Z4 mit ca. 22 Ma% Feuchte, Format 240x120, keine Drachenzähne aber Rückdehnungen nach dem Mundstück.....	21
Bild 10:	Extrudierte Masse nach Brand, Verformung durch Trocknung auf normaler Lattung 22	
Bild 11:	Masse G3; Nach dem Mauken	23
Bild 12:	Masse G3; Nach dem Mauken, Detail	23
Bild 13:	Mundstücksbewässerung für Masse G3	Fehler! Textmarke nicht definiert.
Bild 14:	Strang aus der Masse G3 in einer Phase optimaler Feuchte (ca. 9%) mit eingeschalteter Bewässerung.	24
Bild 15:	Pflasterziegel aus dem Versatz G3, stranggezogen und getrocknet bei Wienerberger	25
Bild 16:	Pflasterziegel aus dem Versatz G3, stranggezogen und getrocknet bei Wienerberger, gebrannt im Keramik-Institut, 24h kalt zu kalt, Ausbrandtemperatur 1130°C	26
Bild 17:	Stapelbrand Versatz G3, Ausbrandtemperatur 1130°C, mit am Brennring bestimmten Maximaltemperaturen	26
Bild 18:	Gefüge eines stranggezogenen wasserdurchlässigen Pflasterziegels entlang eines Sägeschnitts.....	28

Abkürzungen, Begriffe und Definitionen

Abkürzung/Begriff	Definition
HP	Halbkugelpunkt bestimmt mittels Erhitzungsmikroskop
FP	Fließpunkt bestimmt mittels Erhitzungsmikroskop
TIC	Gehalt an anorganischem Kohlenstoff bestimmt mittels Elementaranalyse, Infrarotspektroskopie
TC	Gehalt an Gesamtkohlenstoff bestimmt mittels Elementaranalyse, Infrarotspektroskopie
QU	Quarzgehalt bestimmt mittels Röntgendiffraktometrie
SiO ₂ bis SO ₃	chemische Bestandteile bestimmt mittels Röntgenspektroskopie
GV	Glühverlust bei 1000°C
Entf.	Entfernung Lagerstätte zum geplanten Produktionsstandort
Quellf. Tonminerale	Anteil quellfähiger Tonminerale: z.B. Smektit, Montmorillonit. Bestimmt mittels Röntgendiffraktometrie. Verantwortlich für Plastizität von Tonen
Enslin-Wert	Der Enslin-Wert wird in Prozent angegeben und ist die Menge an Wasser, die durch eine semipermeable Schicht von einem Ton aufgenommen wird. Angegeben wird der Quotient aus eingewogenem Trockengewicht der Probe und Menge an Wasser, welche angesaugt wurde.
Wasserdurchlässigkeit	Labormäßige Bestimmung der hydraulischen Wasserdurchlässigkeit mit einer Vorrichtung entsprechend [3], siehe auch Bild 3
Biegebruchlast	Die Biegebruchlast wird an Ziegeln geprüft, die an den Enden aufliegen und mittig bis zum Bruch belastet werden. Bestimmung entsprechend [4]
Feuchte	Als Feuchte bezeichnet man die Gewichts Differenz zwischen der Masse der Originalsubstanz eines Feststoffes und der Masse eines Feststoffes nach der Exposition bei einer Temperatur von 105°C. Bestimmt nach DIN 51078 „Bestimmung der anhaftenden Feuchte“.
Ausbrandtemperatur	Programmierte Temperatur während der Haltezeit

Zusammenfassung

Wasserdurchlässige Deckschichten sind heute Stand der Technik. Ihre Anwendung ist in Merkblättern und Vorschriften geregelt. In der KI Keramik-Institut GmbH wurde in den letzten Jahren ein wasserdurchlässiger Pflasterziegel entwickelt, der diesen Regelungen entspricht und in seiner Optik und Haptik wasserundurchlässigen Pflasterklinkern ähnelt. Alle technologischen Schritte und Eigenschaften der Zwischenprodukte entsprechen den Forderungen der Ziegelindustrie. Die einzige Ausnahme ist die Formgebung mittels hydraulischer Presse mit exakt einstellbarem Pressdruck. Die Formgebung mittels hydraulischen Pressen wird in der Ziegelindustrie faktisch nicht angewandt und stellt somit das Haupthindernis zur Überführung der Technologie in die industrielle Produktion dar. Im Teilprojekt 1 (TP1) sollte für den geplanten Produktionsstandort der Wienerberger GmbH eine Technologie zur Herstellung eines wasserdurchlässigen Pflasterziegels mittels Strangpressen entwickelt werden. Im Erfolgsfall des TP1, soll im zukünftigen Teilprojekt 2 (TP2) die Formsteinanlage am geplanten Produktionsstandort so angepasst werden, dass eine Pilotproduktion von wasserdurchlässigen Pflasterziegeln möglich wird. Mit der auf TP2 folgenden echten Produktion von wasserdurchlässigen Pflasterziegeln wird Nutzern, die heute aus ästhetischen oder historischen Gründen keramische Deckschichten benutzen, die Möglichkeit gegeben werden, versickerungsfähige Verkehrsflächen zu errichten, die den bisher verwendeten wasserundurchlässigen Deckschichten aus Keramik im Material, sowie in der Optik und in der Haptik gleichen.

Die Rohstoffe des wasserdurchlässigen Pflasterziegels sind Gerüstkorn (Hauptbestandteil), Flussmittel und Ton. Beim Brand verringern der Ton und das Sinterhilfsmittel ihr Volumen, die Gesteinskörnung verhindert jedoch eine Schwindung des Ziegels. Dadurch entstehen Hohlräume und Kanäle im Ziegel, die die Wasserdurchlässigkeit ermöglichen.

Im ersten Schritt des TP1 wurden Rohstoffe gefunden, die am geplanten Produktionsstandort mit einem ökonomisch vertretbaren Transportaufwand verfügbar sind und redundant sind: Zwei Basalte aus etwas weniger als 200 km Entfernung sowie zwei Tone aus 300 km und 500 km Entfernung.

In den nächsten Schritten wurde gezeigt, dass durch Versatzanpassungen und die Anwendung hochplastischer Tone das Extrudieren des Versatzes auf der industriellen Strangpresse möglich ist. Auf die Verwendung künstlicher Plastifikatoren konnte verzichtet werden, wenn das Mundstück bewässert wurde. Die extrudierten, getrockneten und gebrannten Pflasterziegel erreichten bei einer Dicke von 76 mm die normativ geforderte Biegebruchlast und den Frost-Tauwechsel-Widerstand. Die Wasserdurchlässigkeit war mehr als das 10fache der Geforderten. Der Stapelbrand war möglich (6 Ziegel). Die Masse ließ sich nur in einem schmalen „Feuchte-Fenster“ verarbeiten, darunter wie darüber war das Zusammenspiel aus Plastizität und dem Trocknen sowie dem Brennen ungenügend. Weitere Versuche im TP2 müssen eine Erhöhung des Pressdrucks durch Umbau der Strangpresse ermöglichen. In größeren Serien (Pilotversuch) ist eine weitere Masseoptimierung und konstante Feuchte-einstellung zu erreichen. Dann werden die oben genannten umweltpolitischen Ziele des Gesamtprojektes erreicht.

1 Anlass und Aufgabenstellung

Versickerungsfähige Verkehrsflächen mit wasserdurchlässigen Deckschichten sind heute Stand der Technik. Im Allgemeinen werden Gittersteine aus Keramik oder Beton verwendet oder die Wasserdurchlässigkeit wird durch ein geeignetes Verlegemuster erreicht. Massive wasserdurchlässige Betonsteine (Drainbeton) sind ebenfalls erhältlich. Einzig diese Steine stellen eine „echte“ Befestigung sicher, sind aber für repräsentative Flächen nicht optimal geeignet. Ihre Anwendung ist in [1] geregelt. In diesem Merkblatt und in [2] werden Vorschriften gemacht wie wasserdurchlässige Deckschichten zu verlegen sind, damit diese u.a. frostsicher sind.

In der KI Keramik-Institut GmbH wurde ein wasserdurchlässiger Pflasterziegel entwickelt der den Anforderungen von [1] und den jeweils höchsten Anforderungen von [2] (soweit anwendbar) entspricht und dabei in seiner Optik und Haptik wasserunndurchlässigen Pflasterklinkern ähnelt (Bild 1).



Bild 1: Trockengepresste Wasserdurchlässige Pflasterziegel in verschiedenen Farben

Die entwickelte Technologie ist dabei wie folgt: Ein Gerüstkorn (Hauptbestandteil) wird mit einem Gemisch aus Ton und Sinterhilfsmittel gecoatet, die entstehenden Granalien werden auf einer hydraulischen Presse zu Pflasterziegeln geformt, die Rohlinge werden getrocknet und 24 h "kalt zu kalt" gebrannt. Beim Brand verringern der Ton und das Sinterhilfsmittel ihr Volumen, die Gesteinskörnung verhindert jedoch eine Schwindung des Ziegels. Dadurch entstehen Hohlräume und Kanäle im Ziegel, die die Wasserdurchlässigkeit ermöglichen (Bild 2).

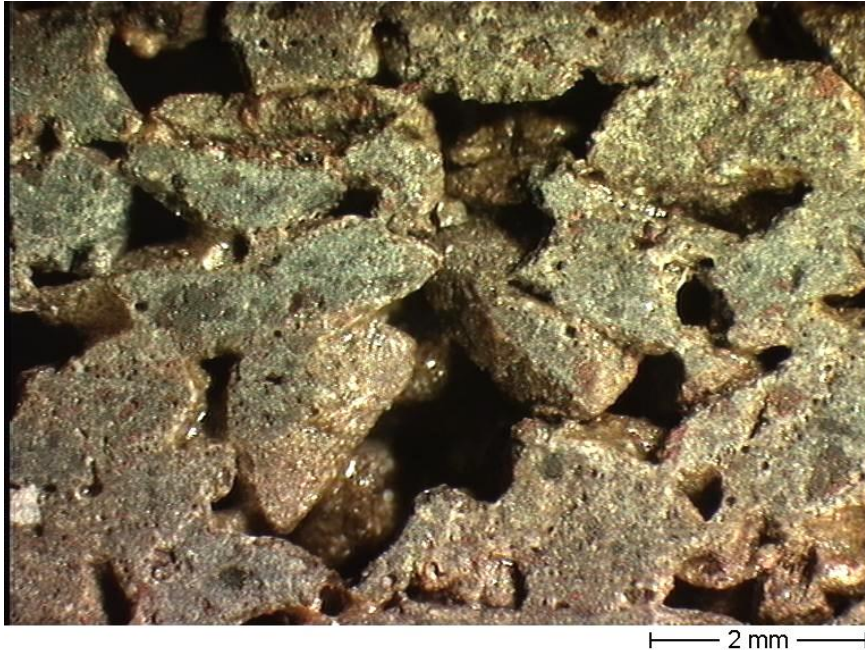


Bild 2: Sägefläche in einem trockengepressten wasserdurchlässigen Pflasterziegel

Alle technologischen Schritte und Eigenschaften der Zwischenprodukte entsprechen den Forderungen einer industriellen Produktion (Robustheit der Roh- und Grünlinge, Trocknung, Stapelbrand möglich, energiesparende und einfache Brennkurve). Die einzige Ausnahme ist die Formgebung mittels hydraulischer Presse mit exakt einstellbarem Pressdruck (Trockenpressen). Neben den Eigenschaften des Versatzes und der Ausbrandtemperatur hat der Pressdruck einen entscheidenden Einfluss auf die erreichbare Wasserdurchlässigkeit des Produktes: Ist die Anfangsverdichtung zu hoch, kann keine ausreichende Wasserdurchlässigkeit erreicht werden, bei zu niedriger Verdichtung treten Probleme mit dem Handling der ungebrannten Ziegel auf. Die Formgebung mittels hydraulischen Pressen wird in der Ziegelindustrie faktisch nicht angewandt und stellt somit das Haupthindernis zur Überführung der Technologie in die industrielle Produktion dar.

Für das Werk der Wienerberger GmbH sollte eine Technologie zur Herstellung eines wasserdurchlässigen Pflasterziegels mittels Strangpressen entwickelt und in einer Pilotproduktion getestet werden. Dieser Pflasterziegel soll als Deckschicht nach [1] Verwendung finden können. Nutzer die heute aus ästhetischen oder historischen Gründen keramische Deckschichten benutzen, werden im Fall einer erfolgreichen Entwicklung die Möglichkeit haben, versickerungsfähige Verkehrsflächen zu errichten, die den bisher verwendeten wasserunndurchlässigen Deckschichten aus Keramik im Material, in der Optik und in der Haptik gleichen.

2 Stranggezogene wasserdurchlässige Pflasterziegel

In einem ersten Schritt war der bekannte Versatz für trockengepresste wasserdurchlässige Pflasterziegel so zu modifizieren, dass für den geplanten Produktionsstandort der Wienerberger GmbH Rohstoffe verwendet werden, die aus ökonomisch vertretbaren Entfernungen an die Produktionsstätte geliefert werden können. Mit diesem neuen Versatz mussten unter den bekannten technologischen Bedingungen die für wasserdurchlässige Pflasterziegel notwendigen grundlegenden Eigenschaften erreicht werden:

- Wasserdurchlässigkeit $> 20 \cdot 10^{-5}$ m/s (normativ nach [1]: $5 \cdot 10^{-5}$ m/s, Rest Sicherheitsaufschlag nach Verschmutzung)
- Biegebruchlast > 80 kN (normativ nach [4]: 80 kN für T4)
- Frost-Tau-Widerstand > 100 (normativ nach [4]: 100)

2.1 Rohstoffbasis

2.1.1 Gerüstkorn

Die zuletzt erfolgreichen Versätze für wasserdurchlässige Pflasterziegel basierten auf basaltischen Gerüstkorn aus der Eifel. Das Gerüstkorn muss thermisch zum verwendeten Ton und Sinterhilfsmittel "passen", damit beim Brennen eine Verbindung zwischen dem gesinterten bzw. verglasten Ton/Sinterhilfsmittel und dem Gerüstkorn entsteht. Genauso wichtig ist die Abwesenheit gröberer Körner von anorganischem Kohlenstoff (TIC) und von Schwefel im Gerüstkorn, da es sonst bei der Benutzung der Pflasterziegel früher oder später zur Zerstörung der Ziegel bzw. zu Ausblühungen kommt.

Wegen des hohen Anteils an Splitt im Versatz wurde zwischen den Kooperationspartnern eine maximale Entfernung der Splittlagerstätte zum Produktionsstandort von ca. 200 km angesetzt. In diesem Zusammenhang wurden an 18 Splitten und Edelsplitten die in Tabelle 1 dargestellten kritischen Eigenschaften der Splitte im Keramik-Institut ermittelt. Tabelle 1 zeigt die Rohstoffe, die auf Grund Ihrer Eigenschaften für die weiteren Versuche in Frage kamen.

Es muss davon ausgegangen werden, dass der ermittelte Gesamtkohlenstoff (TC) zu nahezu 100% als anorganischer Kohlenstoff (TIC) vorliegt. Die Nachweisgrenze für anorganischen Kohlenstoff beträgt 0,02 Ma% , aus z.B. in Siderit (Fe-Carbonat) liegt sie jedoch bei 0,05 Ma%, für Magnesit (Mg-Carbonat) bei über 0,1 Ma%. Die TC-Werte müssen deshalb auch beachtet werden. Da der *Basalt Original* 0,04 Ma% TC bei TIC-Werten kleiner 0,02 Ma% aufwies und Ziegel aus diesem Basalt problemfrei waren, wurden 0,04 Ma% TC und 0,02 Ma% TIC auch hier als Grenzwerte eingesetzt.

	HP	FP	TIC	TC	QU	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	SO ₃	GV	Entf
	°C	°C	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	km
Basalt Original	1188	1199	<0,02	0,04	1	46,4	12,3	11,2	10,5	11,4	2,5	<0,02	1,4	500
Basalt H	1189	1193	<0,02	0,03	< 1	43,4	10,1	12,0	10,4	16,8	2,4	<0,02	0,5	317
Basalt P	1191	1193	<0,02	0,04	< 1	40,9	10,7	12,8	13,8	12,3	2,7	<0,02	1,5	305
Basalt L	1182	1185	<0,02	<0,02	< 1	41,4	11,7	12,3	15,4	9,7	3,2	<0,02	1,0	296
Basalt M	1181	1184	<0,02	0,04	< 1	42,1	11,7	12,3	12,0	11,7	3,3	<0,02	1,4	194
Basalt O	1191	1196	<0,02	0,05	1	49,5	13,7	11,4	9,5	8,4	3,1	<0,02	0,5	195

Tabelle 1: Edelsplitt¹, deren Eigenschaften zur Herstellung wasserdurchlässiger Pflasterziegel geeignet sind. Kursiv: Körnung 1/3 sofort verfügbar, alle anderen auf Nachfrage. Fett: verwendet für die weiteren Versuche.

Einzig der Basalt P war sofort als Edelsplitt in der Körnung 1/3 verfügbar, deshalb wurde er in die Versuche einbezogen. Der insbesondere auf Grund der Entfernung deutlich geeignetere Splitt Basalt M war nur als Edelsplitt 0/5 verfügbar. Dieser Basalt wurde ebenfalls für die weiteren Versuche ausgewählt, da es mittels Siebung möglich war, die gewünschte Körnung 1/3 zu extrahieren. Der Basalt O wurde, trotz der räumliche Nähe, bisher nicht in die Versuche einbezogen, da seine chemische Analyse recht weit von der des Basalt Original abweicht und die Befürchtung bestand, dass im Basalt fast 0,05Ma% karbonatischer Kohlenstoff gebunden ist, der mit dem angewandten Messverfahren aus dem im vorigen Abschnitt genannten Grund nicht gefunden wird (z.B. Magnesit).

2.1.2 Ton

Bei der bisherigen Technologie (Formgebung auf hydraulischer Presse) ist es die Aufgabe des Tones, eine ausreichende Trockenbiegefestigkeit zu gewährleisten. Außerdem hat der Ton Einfluss auf die Brennfarbe des Produktes. Sein thermisches Verhalten spielt vermutlich eine eher untergeordnete Rolle, er wirkt genau wie der Kaolin bei der Porzellanherstellung als eine Art „Schwamm“ für das Flussmittel. Dabei erhöht er das Volumen gesinterter Bereiche und gibt dem Produkt außerdem eine gewisse Plastizität bzw. Elastizität, so dass Sprödbrüche wie bei reinem Glas verhindert werden. Für die jetzt angestrebte Formgebung ist der Ton die einzige Komponente im Versatz, die eine zum Strangpressen ausreichende Plastizität

¹ Edelsplitt: Gesteinskörnung mit nahezu kubischer Form, zweifach gebrochen

ermöglichen kann. Es war also wichtiger als zuvor einen Ton zu verwenden der einen hohen Anteil plastischer -quellfähiger- Tonminerale hat (Bentonit, Smektit, Montmorillonit). Mit der Mineralphasenanalyse mittels XRD kann dieser Anteil ermittelt werden. Ein hoher Eisenanteil ist außerdem wünschenswert, um die Farbe des fertigen Produktes möglichst nah an das Ziegelrot zu bringen. Die beiden letzten Kriterien sind die Entfernung und die Möglichkeit den Ton als trockenes Tonmehl geliefert zu bekommen. Tabelle 2 zeigt die zwei einzigen gefundenen Tone die alle 4 Kriterien oder 3 Kriterien erfüllen. Neben dem zu niedrigen Anteil quellfähiger Tonminerale in den meisten Tönen, war das häufigste Ausschlussmerkmal die Lieferform. Ein Versuch mit reinem Bentonit zu arbeiten wurde nicht unternommen, da es in einer Ziegelei unmöglich scheint 1 bis 2% Bentonit zu dosieren und bei höheren Mengen zu hohe Kosten entstehen.

	Quellfähige Tonminerale	Fe ₂ O ₃	Enslin-Wert	Entf.	Verfügbar als Tonmehl
	Ma%	Ma%	Ma%	km	
Ton F	29	5,5	160	290	X
Ton K	30	25	600	590	X

Tabelle 2: Tone deren Eigenschaften zur Herstellung wasserdurchlässiger Pflasterziegel am geplanten Standort geeignet sind. Fett: für die weiteren Versuche verwendeter Ton

2.1.3 Mehrfachanalysen

Insbesondere die Anbieter von Splitten verkaufen Ihre Produkte an Hand von Korngrößen und mechanischen Eigenschaften. Eine Konstanz bestimmter chemischer Bestandteile (z.B. Anteil anorganischer Kohlenstoff - TIC) wird von diesen Anbietern nicht garantiert. An den beiden für weitere Versuche ausgewählten Splitten wurden deshalb über die Projektlaufzeit die in Tabelle 3 gelisteten Parameter an mehreren Lieferungen und z.T. auch innerhalb von Lieferungen analysiert, um eine mögliche Spannweite kritischer Parameter abschätzen zu können. Diese Spannweiten sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Tabelle muss, falls es zu einer Weiterführung der Arbeiten kommt, fortgeschrieben werden.

Parameter	Basalt P		Basalt M	
	Anz. Analysen	Spannweite	Anz. Analysen	Spannweite
TIC [Ma%]	8	0,005*	4	0,005*
Quarz [Ma%]	4	0,5*	4	0,5*
GV [Ma%]	8	0,2	4	0,15
HP [°C]	4	20	4	25

Tabelle 3: Spannweite ausgewählter Parameter in den für die Versuche verwendeten Splitten, *...Spannweite kleiner als die Unterscheidungsgrenze

Für Ton und Feldspat wurde auf Mehrfachanalysen verzichtet, da alle Anbieter bereits in die keramische Industrie liefern und deshalb mit der Forderung nach Konstanz von für die Keramik relevanten Parametern vertraut sind.

2.2 Herstellung wasserdurchlässiger Pflasterziegel mit neuen Rohstoffen und bekannter Technologie (Trockenpressen)

Die Rohstoffe Basalt P und Basalt M, sowie die Tone F und K wurden hier verwendet, um mit der bekannten Trockenpresstechnologie wasserdurchlässige Pflasterziegel herzustellen. Diese Technologie ist im Absatz 1 beschrieben. Für die Versätze V200A und V200B und V201A und V201B wurde der Standardversatz mit den neuen Rohstoffen getestet. Mit dem Ziel die Plastizität der Masse zu erhöhen, wurde in den Versätzen V 206 bis V208 der Tongehalt auf Kosten der anderen Rohstoffe erhöht. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Wasserdurchlässigkeit und Biegebruchlasten der einzelnen Versätze. Die Einrichtung zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit zeigt Bild 3. Auf die Bestimmung der Biegebruchlast wurde verzichtet, wenn die Wasserdurchlässigkeit nicht befriedigend war.



Bild 3: Einrichtung zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit

Versatz Nr.	Versatzbeschreibung	Wasserdurchlässigkeit [m/s *10 ⁻⁵]	Biegebruchlast (50 mm Dicke) N/mm
V200A	Standardversatz: Basalt P, Ton F, Feldspat	102	134
V200B	Standardversatz: Basalt P, Ton K, Feldspat	98	105
V201A	Standardversatz: Basalt M, Ton F, Feldspat	44	162
V201B	Standardversatz: Basalt M, Ton K, Feldspat	131	61
V206	Basalt P, Ton F, Feldspat: erhöhter Tongehalt	13	82
V207	Basalt P, Ton F, Feldspat: erhöhter Tongehalt	9	-
V208	Basalt P, Ton F, Feldspat: erhöhter Tongehalt	8	-

Tabelle 4: Wasserdurchlässigkeiten und Biegebruchlasten wasserdurchlässiger Pflasterziegel mit neuen und z.T. veränderten Versätzen. Ausbrandtemperatur 1110° bis 1150°C, Parameterbestimmung an Ziegeln des Brandes mit subjektiv ausreichender bzw. höchster Wasserdurchlässigkeit

Aus Tabelle 4 ist erkennbar, dass die neuen Rohstoffe wasserdurchlässige Pflasterziegel mit den gewünschten Eigenschaften ermöglichen, wenn diese mit der Standardtechnologie (Abschnitt 1) hergestellt werden. Eine Erhöhung des Tongehaltes führt zu einer starken Absenkung der Wasserdurchlässigkeit, der Grund liegt aber vermutlich in der parallelen Absenkung des Splittanteils und/oder des Feldspatanteils.

Da beim geplanten Strangziehen Probleme wegen fehlender Plastizität der Masse zu vermuten waren, wurde weitere Versuche mit einem Plastifizierer auf Zellulosebasis unternommen. Tabelle 5 zeigt 2 Versätze unter der Verwendung zweier Zellulosen, die als Plastifizierer dienen können. Es sollte getestet werden, welchen Einfluss die Zellulosen auf das gebrannte Produkt haben. Bei der Formgebung mittels Trockenpressen wurde mit der üblichen Feuchte gearbeitet, so dass die Zellulosen hier funktionslos waren. Beim Brand 24 h kalt zu kalt kam es zu Bläherscheinungen an den Ziegeln. Im Bereich des Ausbrandes organischer Stoffe aus dem Ziegel (400-800°C) wurde deshalb die Aufheizgeschwindigkeit verringert, so dass die Brennkurve danach 28 h kalt zu kalt war.

Versatz Nr.	Versatzbeschreibung	Wasserdurchlässigkeit [m/s *10 ⁻⁵]	Biegebruchlast (50 mm Dicke) [N/mm]
V3_F4M	Standardversatz: Basalt P, Ton F, Feldspat, 3% Zellulose 1	123	78
V3_240	Standardversatz: Basalt P, Ton K, Feldspat, 3% Zellulose 2	85	100

Tabelle 5: Wasserdurchlässigkeit von trockengepressten wasserdurchlässigen Pflasterziegeln unter Verwendung von 3% Zellulose

Ergebnis dieser Serie war, Zellulosen beeinflussen das Endprodukt nicht negativ, verteuern aber den Brand und natürlich den Versatz.

2.3 Strangziehversuche im Keramik-Institut

2.3.1 Ermittlung der optimalen Feuchte zum Strangziehen

Bei ersten Strangziehversuchen wurde schnell klar, dass die Originalmasse auf Grund Ihrer Eigenschaften nicht plastisch genug war, um sie auf der Versuchsstrangpresse des Keramik-Instituts zu verarbeiten (max. Pressdruck 10 bar). Auch die volle Ausschöpfung des Wasseraufnahmevermögens des jeweiligen Tones reichte nicht aus, da dieser in zu geringen Anteilen in der Masse enthalten war. Damit entfielen Versuche zu mechanischen Veränderungen in der Strangpresse, stattdessen musste ein aus der technischen Keramik gut bekannter Plastifizierer in die Masse eingebracht werden. Bei der Produktion technischer Keramik aus z.B. Aluminiumoxid wird Zellulose als Plastifizierer eingesetzt. Vor dem Einsatz solcher Zellulosen muss die zum Strangziehen optimale Feuchte für jede Masse neu ermittelt werden, die Erfahrungen der Verarbeitung beim Trockenpressen sind dabei nutzlos. Die optimale Feuchte wird hier in den ersten zwei Schritten in Handversuchen in einem dritten Schritt in Strangziehversuchen ermittelt.

1. Schritt: Ansetzen der Zellulose mit 10 verschiedenen Feuchten (1+2 bis 1+11)
2. Schritt Ansetzen der Masse (500 g) mit der subjektiv als optimal gewählten Feuchte für die Zellulose und Ton in drei Wasserzugaben (1+0,5 bis 1+1,5)
3. Schritt Herstellen einer Masse mit der subjektiv als optimal ermittelten Feuchte (abhängig vom Zellulose-Anteil: 12 bis 25%).

Diese Masse musste mindestens 72 h mauken, kürzere Maukzeiten schlossen die Zellulose nicht komplett auf.

2.3.2 Strangziehen im Keramik-Institut

Im Keramik-Institut wurden auf einer Strangpresse mit ca. 10 bar erreichbarem Enddruck Probekörper eines Durchmessers von 10 cm geformt. Die Massen enthielten zuerst 2 und 4% einer Zellulose deren Plastizität im Bereich ab ca. 40°C zum Gelieren neigt. Eine Extrusion war nur möglich bis sich die Strangpresse auf die Geliertemperatur erwärmt hatte (5-10 min), danach kam der Extrusionsprozess zum Stillstand, ein mehrstündiges Reinigen der Presse war nötig.

Mit einem Plastifizierer der eine Geliertemperatur von ca. 65 °C aufwies war ein kontinuierlicher Prozess möglich (3% Zellulose in der Masse), bei einer Zugabe von ca. 2% Zellulose kam der Prozess ebenfalls nach ca. 10 min wegen Überhitzung der Presse zum Stillstand.

In Tabelle 6 sind die Wasserdurchlässigkeiten von Probekörpern an 4 untersuchten Massen subjektiv bestimmt worden. Eine exakte Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit wie in [3] beschrieben und Bild 3 dargestellt, war an den extrudierten Probekörpern mit einem Durchmesser von 10 cm und 3 cm Dicke nicht möglich.

	Wasserdurchlässigkeit [m/s *10 ⁻⁵]
V206 F4M-W5/Z3	> 20
V206 F4M-W5/Z2	> 20
V 206/DZ4	> 20
V 206/DZ2	> 50

Tabelle 6: geschätzte Wasserdurchlässigkeit an Probekörpern mit Plastifizierern (Zellulose), Ausbrandtemperatur 1130°C.

2.4 Strangziehversuche mit realen Pflasterziegelformaten

Da im Verlaufe der Arbeiten erkannt wurde, dass es auf den Strangpressen des Keramik-Institutes nicht möglich sein würde Probekörper in der realen Größe von Pflasterziegeln 200x100 mm zu erzeugen, wurden die weiteren Versuche bei Wienerberger auf der Formsteinanlage durchgeführt. Dies geschah aus der Erfahrung, dass industrielle Aggregate und Einrichtungen oftmals ein anderes Verhalten als Technikumsausrüstungen haben, vor allem robuster und leistungstärker sind.

Bei Wienerberger wird am Versuchsstandort neben der Hauptproduktionsanlage eine sogenannte Formstein-Linie betrieben. Dort werden Sonderprodukte für den Denkmalschutz oder Repräsentationsbauten hergestellt. Diese Linie hat Ihre eigenen Kastenbeschicker und

ihre eigene Formgebung (Transportbänder, Siebrundbeschicker, Strangpresse), jedoch keine eigene Aufbereitung. Die Aufbereitung (Mischen und Zerkleinern von Rohstoffen) findet auf den Ausrüstungen der Hauptproduktionsanlage statt. Die minimale Produktionsmenge der Formsteinanlage liegt bei ca. 4 t.

2.4.1 Herstellen von Massen bei Wienerberger

Die, auch für die Formsteinanlage zuständige, „große“ Masseaufbereitung des Werkes konnte für die Masse der wasserdurchlässigen Pflasterziegel nicht eingesetzt werden, da für das Grob- und Feinwalzwerk (Walzspalt: 0,7 mm) kein Bypass vorhanden ist und die Errichtung eines solchen im Rahmen des Teilprojektes 1 zu aufwändig gewesen wäre. Außerdem benötigt die Aufbereitung als Teil der Hauptanlage in Summe mindestens 10 Tonnen Rohstoffe. Aus diesen Gründen wurde entschieden die Masse manuell vorzumischen (Bild 4) und danach in einem unechten Kreislauf im Siebrundbeschicker (Bilder 5 und 6) zu homogenisieren und die Feuchte einzustellen. Im Siebrundbeschicker wurden 7 mm Lochplatten verwendet.



Bild 4: Manuelles Vormischen des Versatzes in einer Vorratsbox



Bild 5: Siebrundbeschicker außen mit Lochscheibe und Transportband



Bild 6: Siebrundbeschicker innen mit Brause zur Einstellung der Feuchte

Der unechte Kreislauf funktionierte wie folgt:

1. manuell oder im Siebrundbeschicker vorgemischte Masse in den Kastenbeschicker
2. Transport mit Bändern zum Siebrundbeschicker
3. Wasserzugabe im Siebrundbeschicker
4. Austragen der Masse auf Radladerschaufel
5. Abschütten der Masse in eine Box
6. Feuchtebestimmung

Die Schritte 1 bis 6 wurden wiederholt bis die gewünschte Feuchte fast erreicht war. Danach folgte ein Mauken von mindestens 72 Stunden. Danach wurde die Masse erneut in den oben beschriebenen Ablauf eingeschleust. Im Punkt 3 konnte jetzt noch eine letzte Korrektur der Feuchte erfolgen bevor die Masse automatisch zur Strangpresse gefördert wurde.

2.4.2 Strangziehen von Massen mit Plastifizierer

Wie schon aus den Versuchen im Keramik-Institut bekannt, verhält sich die Masse des wasserdurchlässigen Pflasterziegels ähnlich wie eine unplastische Masse für technische Keramik. Extruder für technische Keramik weisen gegenüber Extrudern für grobkeramische Massen jedoch einige wichtige Unterschiede auf (geringere Fördervolumina, längere Schnecken, geringerer Abstand zwischen Schnecke und Inliner und meist kühlbar). Diese Unterschiede mussten bei den Versuchen berücksichtigt werden, da eine Überlastung der Strangpresse oder ein Gelieren der Masse im Extruder zu u.U. mehrtätigen Reinigungsarbeiten am Extruder oder zu Zerstörungen hätte führen können. Im ersten Versuch wurde

deshalb die hochplastische Masse V206 F4M-W5/Z4 eingesetzt, welche 4% der im Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Zellulose enthielt.

Der Versatz wurde wie in Absatz 2.4.1 beschrieben hergestellt. Hauptproblem war die starke Staubentwicklung bei der Zugabe der Zellulose (Bild 7). Durch sofortige Zugabe von Wasser konnte die Staubentwicklung später eingedämmt aber nicht unterbunden werden. In einem Produktionsprozess ist diese Staubentwicklung nicht tolerierbar.



Bild 7: Staubentwicklung bei der Zugabe der Zellulose beim Vormischen in der Box

Während der Versatzerstellung im Siebrundbeschicker wurde die Feuchte der Masse mit Hilfe eines Feuchteschnellbestimmers² auf ca. 22 Ma% eingestellt. In der Endmasse sollte eine Feuchte von 25% erreicht werden.

Nach der Lagerung der Masse über ca. 84 h wurde in der Masse -trotz einer Umgebungstemperatur von ca. 10°C- nur noch eine Feuchte von 19,5 Ma% gefunden. Geringe Veränderungen ergaben sich vermutlich durch die Lagerung, der weitaus größte Beitrag dürfte aber aus der Probenahme eines insgesamt noch inhomogenen Haufwerks stammen (siehe auch Fußnote zum Feuchteschnellbestimmer).

Die Zielfeuchte von 25 Ma% war somit nicht mehr erreichbar. Bei mit der installierten Wasserzugabe im Siebrundbeschicker (Bild 5) maximal erreichbaren Feuchte von ca. 21% verformten Mitarbeiter von Wienerberger die Masse in der Hand und stellten subjektiv fest, dass die Verarbeitbarkeit in der Strangpresse gegeben sein sollte. Diese Einschätzung war fast zutreffend. Bild 8 zeigt, dass der Strang sehr stark mit Drachenzähnen belastet war.

² Der Feuchteschnellbestimmer konnte die Analysenzeit zur Bestimmung der Feuchte in der Masse auf 15-20 min senken. Auch diese Zeit ist zu lang, um die Feuchte schnell und exakt in Haufwerken aus mehreren 100 kg einstellen zu können. Für die Produktion muss, nach weiteren Versuchen, eine feste Wassermenge pro Tonne Masse vorgegeben werden.



Bild 8: Extrusionsversuch der Masse V206 F4M-W5/Z4 mit ca. 21 Ma% Feuchte, Drachenzähne über den gesamten Strang

Eine zusätzliche Zugabe von Wasser über einen Schlauch erhöhte die Ziehfeuchte auf ca. 22%. Drachenzähne waren jetzt die Ausnahme, es konnten nahezu fehlerfreie Pflasterziegel gezogen werden. Gearbeitet wurde mit Mundstücken für die Formate 200x100 mm (Verformungsgrad: 4,7), sowie 250x120 mm (Verformungsgrad: 3,1). Durch in der Geschwindigkeit nicht optimal auf einander abgestimmte Transportbänder und durch Rückdehnungen ergaben sich Pflasterziegel, deren Seitenflächen keine einwandfreien Rechtecke waren (Bild 9). Diese Probleme sind mehr oder weniger bei jeder Extrusion vorhanden, können jedoch mit einfachen Mitteln gelöst werden.



Bild 9: Extrusionsversuch der Masse V206 F4M-W5/Z4 mit ca. 22 Ma% Feuchte, Format 240x120, keine Drachenzähne aber Rückdehnungen nach dem Mundstück

Direkt nach der Formgebung waren die Pflasterziegel mit Zellulose relativ weich, so dass es bei der Trocknung der Ziegel zu weiteren Verformungen bei der Auflage auf die normale Trocknerlattung kam (Bild 10).



Bild 10: Extrudierte Masse nach Brand, Verformung durch Trocknung auf normaler Lattung

Der Brand der Versätze V206 F4M-W5/Z4 erfolgte mit der im Abschnitt 2.2 beschriebenen Brennkurve in 28h kalt zu kalt. Auch bei dieser Brennkurve waren noch leichte Bläherscheinungen an den Pflasterziegeln zu erkennen. Tabelle 7 zeigt die Wasserdurchlässigkeit und die Biegebruchlast von Pflasterziegeln des Versatzes V206 F4M-W5/Z4. Die Ziegel wurden für die Bestimmung der beiden Parameter auf ein Format 200x100 gesägt, da die Wasserdurchlässigkeitsbestimmung nur an diesem Format möglich ist.

Versatz Nr.; Ausbrandtemperatur	Versatzbeschreibung	Wasserdurchlässigkeit [m/s *10 ⁻⁵]	Biegebruchlast (75 mm Dicke) N/mm
V206 F4M-W5/Z4 1110 °C	Basalt P, Ton F, Feldspat,4% Zellulose 2, 22% Feuchte	97	68
V206 F4M-W5/Z4 1130 °C	Basalt P, Ton F, Feldspat,4% Zellulose 2, 22% Feuchte	54	85

Tabelle 7: Wasserdurchlässigkeit von stranggezogenen wasserdurchlässigen Pflasterziegeln unter Verwendung von 4% Zellulose

Das Fazit dieses Versuches ist:

1. Das Extrudieren der Masse auf der Industriestrangpresse PVP 35 - KEMA ist möglich
2. Die Kennwerte für die Wasserdurchlässigkeit werden erreicht, die der Biegebruchlast bei einer Ausbrandtemperatur von 1130 °C und einer Dicke von 75 mm. Die Biegebruchfestigkeit ist trotzdem erheblich geringer als bei den in Tabelle 4 dargestellten trocken-gepressten Ziegeln. Dies geht auf eine geringere Verdichtung beim Extrudieren und auf den Ausbrand des Plastifizierers zurück.
3. Die Rohlinge haben eine nur geringe Festigkeit, wodurch sie nicht auf der herkömmlichen Trocknerlattung getrocknet werden können. Der Grünling hat eine subjektiv sehr gute Festigkeit.

4. Durch die Zellulose kommt es zu einer mehr als Verdopplung der Rohstoffkosten für den Versatz.

Insbesondere Punkt 4 der Aufzählung wurde von Wienerberger als nicht akzeptabel eingeordnet, so dass das folgende Ziel die zumindest drastische Reduzierung des Zelluloseanteils in der Masse war. In mehreren Schritten wurden Massen mit sinkenden Anteilen an Zellulose als Plastifizierer extrudiert. Eine Masse mit 1% Plastifizierer und einem modifizierten restlichen Versatz ließ sich auf dem Extruder mit den oben beschriebenen Arbeitsschritten formen. Im Rahmen des sinkenden Plastifizierungsanteils kam es allerdings wieder zu Drachenzähnen und zu immer häufigeren Drahtabrissen am Abschneider. Trotzdem wurde die Entscheidung gefällt, den modifizierten Versatz ohne künstliche Plastifizierer zu extrudieren.

2.4.3 Strangziehen einer Masse ohne Plastifizierer (Masse G3)

Vier Tonnen der Masse ohne Plastifizierer wurden wie im Abschnitt 2.4.2 beschrieben gemischt und gelagert. Die Bilder 11 und 12 zeigen die Masse nach dem Mauken. Zur Verbesserung des Extrusionsergebnisses wurde darüber hinaus eine Mundstückbewässerung gebaut und auf Funktionsfähigkeit getestet (Bild 13).



Bild 11: Masse G3; Nach dem Mauken



Bild 12: Masse G3; Nach dem Mauken, Detail

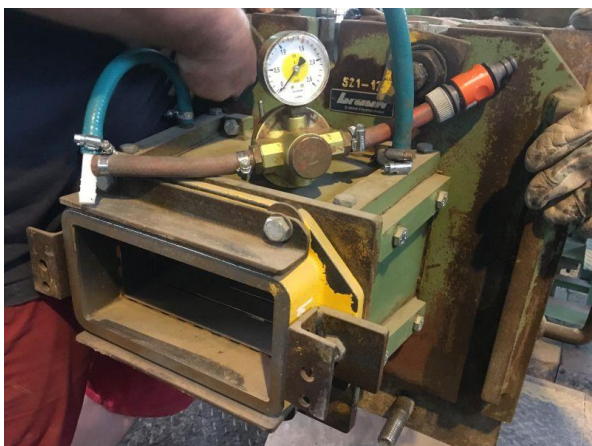


Bild 13: Mundstückbewässerung für Masse G3

Es war sofort ersichtlich, dass die Mundstücksbewässerung zu einer Verbesserung des Extrusionsergebnisses führte, indem sie Drachenzähne verminderte oder verhinderte. Allerdings traten auch bei diesem Versuch wieder die Probleme mit der Einstellung einer zum Extrudieren geeigneten Feuchte auf. Aus Rücksicht auf die Strangpresse wurde zu Beginn, mit einer sehr hohen Feuchte gearbeitet. Die Extrusion war möglich aber die Ziegel waren nicht handhabbar, sie zerfielen. Danach wurde eher zufällig eine Feuchte im Siebrundbeschicker eingestellt, die einen „makellosen“ Strang ermöglichte (Bild 14). Die Feuchte wurde mit ca. 9% bestimmt, ließ sich aber im verbleibenden Prozess nicht rekonstruieren (siehe auch Fußnote 2).

Aus der Phase des „makellosen“ Stranges wurden ca. 50 Pflasterziegel gewonnen. Auch diese Ziegel zeigten eine Nachdehnung, sie ließen sich aber ohne Verformungen auf der normalen Trocknerlattung trocknen.



Bild 14: Strang aus der Masse G3 in einer Phase optimaler Feuchte (ca. 9%) mit eingeschalteter Bewässerung.

Bei diesem Versuch kam es auch wieder zu 3 Abrissen des Drahtes am Abschneider, obwohl der dickste zur Verfügung stehende Draht eingebaut worden war.

An den ca. 50 Ziegeln aus der besten Extrusionsphase, wurden alle weiteren Test und Analysen für den stranggezogenen wasserdurchlässigen Pflasterziegel ausgeführt.

2.4.3 Trocknen und Brennen einer Masse ohne Plastifizierer (Masse G3)

Das Bild 15 zeigt den getrockneten Ziegel aus der Masse G3. Ein Eindringen der Trocknerlatten bei Verwendung der Masse V206 F4M-W5/Z4 (Bild 10) trat nicht auf, ein geringes Fließen der Masse nach der Formgebung fand wie die Trapezform des Ziegels zeigt trotzdem statt. Dieser Verformung kann durch eine geeignete Mundstücksgeometrie, aber mehr noch durch eine steifere Masse begegnet werden. Für Letzteres ist eine Strangpresse notwendig, welche höhere Pressdrücke als die hier verwendete erzeugen kann.



Bild 15: Pflasterziegel aus dem Versatz G3, stranggezogen und getrocknet bei Wienerberger

Bild 16 zeigt den gebrannten wasserdurchlässigen Pflasterziegel, welcher für die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit zu einem Format 200x100 mm gesägt wurde. Eine leichte Rückdehnung ist auch hier zu beobachten. Diese ist, wie oben beschrieben, durch eine geeignete Mundstücksgeometrie beherrschbar.

Außerdem wurde ein Stapelbrand mit den Pflasterziegeln aus dem Versatz G3 durchgeführt. Bild 17 zeigt den Blick in den Kammerofen nach dem Stapelbrand und beweist, dass Stapelbrände mit bis zu 6 Ziegeln übereinander möglich sind. Die Stapelgeometrie ist verbesserungswürdig: An der Farbe der Ziegel ist zu erkennen, dass es zu keiner gleichmäßigen Oxidation kam, da die Ziegel zu eng standen. Außerdem ist die obere Reihe aufgrund der leicht gewölbten Oberfläche und anscheinend einem geringen Erweichen der Ziegel nicht ganz im Lot.



Bild 16: Pflasterziegel aus dem Versatz G3, stranggezogen und getrocknet bei Wienerberger, gebrannt im Keramik-Institut, 24h kalt zu kalt, Ausbrandtemperatur 1130°C



Bild 17: Stapelbrand Versatz G3, Ausbrandtemperatur 1130°C, mit am Brennring bestimmten Maximaltemperaturen

2.5 Eigenschaften wasserdurchlässiger Pflasterziegel aus dem Erfolgsversatz (Versatz G3)

In Tabelle 8 sind die Eigenschaften der bei Wienerberger stranggezogenen und getrockneten und im Keramik-Institut gebrannten wasserdurchlässigen Pflasterziegel dargestellt. Die Pflasterziegel einer Ausbrandtemperatur von 1110 °C erfüllen die Zielgröße der Biegebruchlast nicht. Deshalb wurde an 3 verbleibenden Ziegeln ein Brand bei 1150°C unternommen. Die Zielgrößen sind zufriedenstellend. Allerdings entspricht eine Prüfung an nur 3 Proben nicht der Norm und ein Stapelbrandversuch bei dieser Brenntemperatur wurde auch nicht unternommen.

Parameter	Normativ	Versatz G3; 1110 °C	Versatz G3; 1130 °C	Versatz G3; 1150 °C
Frost-Tau-Widerstand	100 Zyklen [4]	Nicht geprüft	100 Zyklen	Nicht geprüft
Biegebruchlast 75 mm Dicke	80 N/mm - T4 [4]	66 N/mm	170 N/mm	210 N/mm
Wasseraufnahme	< 6Ma% [5]	>> 6 Ma%	>> 6 Ma%	>> 6 Ma%
Scherbenrohdichte	> 2 t/m ³ [5]	2,1 t/m ³	2,1 t/m ³	2,1 t/m ³
Wasserdurchlässigkeit	> 5 m/s*10 ⁻⁵ [3]	112 m/s *10 ⁻⁵	100 m/s*10 ⁻⁵	55 m/s*10 ⁻⁵

Tabelle 8: Parameter von wasserdurchlässigen Pflasterziegeln bei verschiedenen Ausbrandtemperaturen. Für die Temperatur 1150°C wurden nur 3 Ziegel anstatt der geforderten 10 geprüft.

Bild 18 zeigt eine fotografische Darstellung eines Sägeschnitts durch den Versatz G3 stranggezogen und bei 1130 °C gebrannt. Bild 2 dieses Berichtes zeigt ein ebensolches Bild für das Gefüge eines trockengepressten wasserdurchlässigen Pflasterziegels. Die Bilder sind im Grunde identisch.

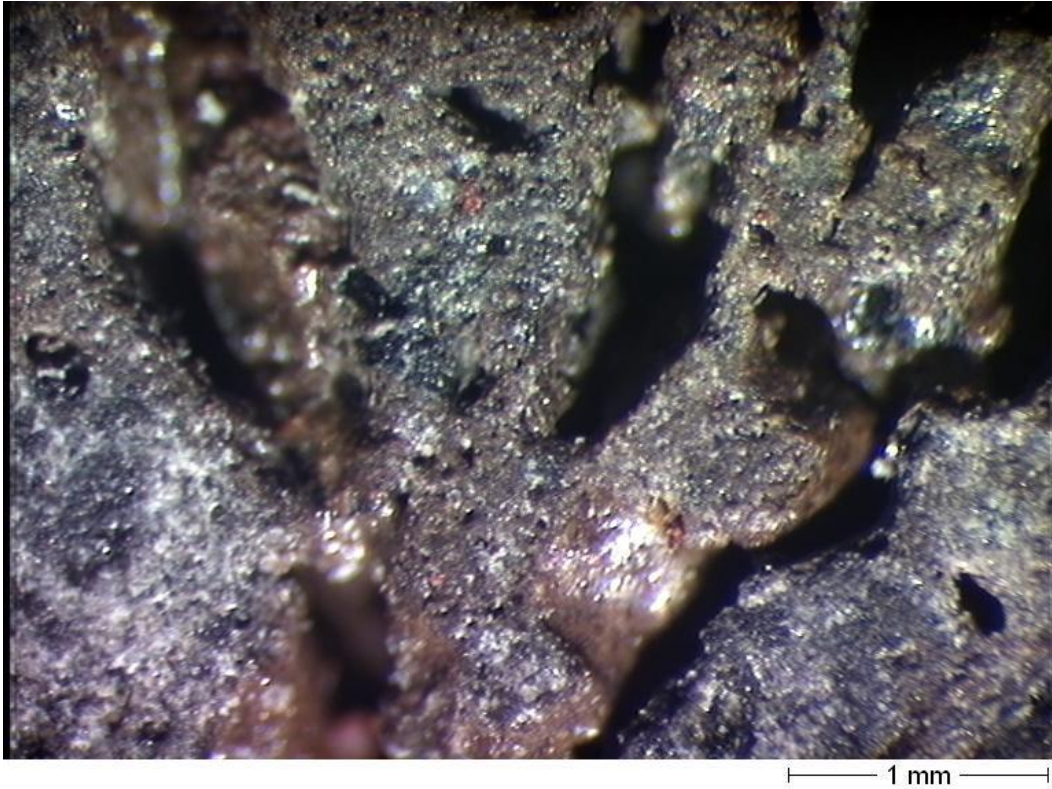


Bild 18: Gefüge eines stranggezogenen wasserdurchlässigen Pflasterziegels entlang eines Sägeschnitts

3 Fazit

3.1 Was wurde erreicht?

1. Es ist gelungen einen wasserdurchlässigen Pflasterziegel durch das Formgebungsverfahren Extrusion herzustellen.
2. Der stranggezogene wasserdurchlässige Pflasterziegel erfüllt die kritischen Parameter Biegebruchlast und Wasserdurchlässigkeit der jeweiligen Normen. Die Wasserdurchlässigkeit liegt beim 10 bis 20fachen der geforderten Durchlässigkeit, so dass große Reserven gegen Verschmutzung bestehen.
3. Die Parameter Frost-Tauwechsel und Rohdichte der Normen wurden ebenfalls erfüllt.
4. Der stranggezogene wasserdurchlässige Pflasterziegel ist deutlich rauer als sein trocken-gepresstes Pendant. Auf eine Bestimmung des Gleitwiderstandes wurde deshalb verzichtet.
5. Die Aufbereitung der Rohstoffe konnte an die in der Ziegelindustrie vorherrschenden Aufbereitungsmethoden angepasst werden. Kleinere Modifikationen sind notwendig (Bypass Walzwerke!)
6. Die Ziegel konnten im Stapel mit bis zu 6 Ziegeln gebrannt werden (Ausbrandtemperatur 1130°C).
7. Die verwendeten Rohstoffe sind in ausreichender Qualität aus ökonomisch vertretbaren Entfernungen verfügbar

Die prinzipielle Machbarkeit der Herstellung von wasserdurchlässigen Pflasterziegeln mit eingeführten Technologien der Ziegelindustrie wurde bewiesen.

3.2 Was muss in weiteren Arbeiten (Teilprojekt 2) gelöst werden?

1. Die Ziegel flossen direkt nach der Strangpresse, so dass eine leicht trapezförmige Fläche entstand. Dieses Fließen geht vermutlich auf eine zu geringe Verdichtung der Masse zurück.
2. Die Ziegel zeigten direkt nach der Strangpresse ein leichtes Aufwölben an der Oberseite. Dieser Effekt tritt als Rückdehnung und bei nicht exakt geschwindigkeitskonformen Transportbändern auf.
3. Die Biegebruchlast wurde an 75 mm dicken Ziegeln bestimmt, bei dünneren Ziegeln wird die geforderte Biegebruchlast von 80 N/mm (T4 nach [4]) vermutlich nicht erreicht.
4. Im Stapelbrand kam es wegen der nicht exakt ebenen Standflächen der Ziegel und einer vermutlich geringen Erweichung zu kleinen Verschiebungen der jeweils obersten Ziegelreihe.
5. Das Mischen der trockenen Rohstoffe wurde manuell durchgeführt und hatte eine erhebliche Staubbelastung für die Ausführenden zur Folge.
6. Echte Pilotproduktion über mehrere Tage
7. Externe zertifizierte Testung der wasserdurchlässigen Pflasterziegel nach [1] und [4].

8. Beantragung der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) des wasserdurchlässigen Pflasterziegels durch das DIBT
9. Auslegen von Musterflächen an 2-3 ausgewählten Standorten

Die förderpolitischen Zielstellungen wurden bisher nicht erreicht, da hier über die Arbeiten des Teilpaketes 1 berichtet wird. Nach Beendigung des Teilpaketes 2 wird das Werk der Wienerberger GmbH in der Lage sein, die im Projektantrag prognostizierten Beiträge zur Umweltentlastung zu leisten: *„In Deutschland werden zur Zeit pro Jahr ca. 3 Millionen Tonnen wasserundurchlässige Pflasterziegel in ca. 40 Werken hergestellt (Vollauslastung der Werke). Bei der Verlegung von jährlich 1 Million Tonnen wasserdurchlässiger Pflasterziegel an Stelle wasserundurchlässiger Pflasterziegel kommt es zu einer Verringerung der versiegelten Flächen um 800 ha/a. Das sind ca. 3% der jährlich in Deutschland insgesamt versiegelten Flächen (nach...einer Veröffentlichung des Umweltbundesamtes... werden in Deutschland ca. 80 ha am Tag versiegelt). Hinzu kommt, dass sich die Brennzeiten von 72 h kalt zu kalt für wasserundurchlässige Pflasterziegel bei wasserdurchlässigen Pflasterziegeln auf 24 h verkürzen, was in einem Tunnelofen eine Energie- und CO₂-Einsparung von ca. 66 Prozent zur Folge hat.“* [6]

4 Literaturverzeichnis

- [1] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt für Versickerungsfähige Verkehrsflächen (MVV R2), Ausgabe 2013.
- [2] Sönke Bogwart: „Geeigneter Oberbau für wasserdurchlässiges Pflaster“. Betonwerk + Fertigteil-Technik BFT, 3(1995).
- [3] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: „Merkblatt für Versickerungsfähige Verkehrsflächen“
- [4] DIN EN 1344: Pflasterziegel – Anforderungen und Prüfverfahren
- [5] DIN 18503 12-2003: Pflasterklinker – Anforderungen und Prüfverfahren
- [6] KI Keramik-Institut GmbH: Projektantrag „Entwicklung und Produktionsversuch eines stranggezogenen wasserdurchlässigen Pflasterziegels“, April 2016