

DRY-STACKED INSULATION MASONRY BLOCKS BASED ON MISCANTHUS CONCRETE



Dr.-Ing. Patrick Pereira Dias

Publication Series of the Laboratory of Solid Structures

Editor: Prof. Dr.-Ing. Danièle Waldmann

Volume 2



PhD-FSTM-2021-023
The Faculty of Sciences, Technology and Medicine

DISSERTATION

Defence held on 26/04/2021 in Esch-sur-Alzette

to obtain the degree of

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DU LUXEMBOURG EN SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

by

Patrick PEREIRA DIAS

Born on 5th April 1990 in Luxembourg (Luxembourg)

DRY-STACKED INSULATION MASONRY BLOCKS BASED ON MISCANTHUS CONCRETE

Dissertation defence committee

Dr. Danièle WALDMANN, dissertation supervisor
Professor, Université du Luxembourg

Dr. Frank SCHOLZEN, Chairman
Professor, Université du Luxembourg

Dr. André LECOMTE, Vice – chairman
Professor, Université de Lorraine

Dr. Marc OUDJENE, Member
Professor, Université de Laval

Dr. Romain TRAUCHESSEC, Member
Université de Lorraine

Schriftenreihe des Laboratory of Solid Structures

Patrick Pereira Dias

**Dry-stacked insulation masonry blocks
based on Miscanthus concrete**

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Luxemburg, Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8174-9

ISSN 2626-8469

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Phone: 0049/2421/99011-0 • Telefax: 0049/2421/99011-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de

ACKNOWLEDGMENT

The present thesis entitled “Dry-stacked insulation masonry blocks based on Miscanthus concrete” was elaborated during my PhD at the Faculty of Science, Technology and Medicine (FSTM) of the University of Luxembourg. The experimental tests were mainly carried out at the Laboratory of Solid Structures (LSS) of the University of Luxembourg. The realisation of the present work, as well as the writing and the defence were carried out in the period from the 1st September 2016 to the 30th April 2021.

First, I want to express my sincere gratitude to Prof. Dr.-Ing. Danièle Waldmann for offering me this unique opportunity for accepting me as a scientific collaborator in her research group. Furthermore, I want to thank her for the continuous guidance, the permanent availability, the trust put on my work, her professionalism including a lot of constructive advices and especially for her comprehension considering personal reasons.

Moreover, I my sincere thanks go also to my thesis supervision committee (CET), specifically Prof. Dr.-Ing. Frank Scholzen, Professor of Mechanical Engineering from the FSTM at the University of Luxembourg and Prof. Dr. –Ing. André Lecomte, Professor at the Department of Chemistry and Physics of Solids and Surfaces (Institut Jean Lemour) of the University of Lorraine for acting as Chairman respectively Vice-Chairman in my dissertation defence committee. Their remarks during our yearly meetings were very valuable and allowed me to improve my dissertation in different ways. Moreover, I also want to thank Prof. Marc Oudjene, Professor in the department of civil engineering from the

University of Laval (Québec, Canada) and Dr. Romain Trauchessec from the Department of Chemistry and Physics of Solids and Surfaces (Institut Jean Lemour) of the University of Lorraine for accepting to be part of the jury members of my defence.

Moreover, I am deeply thankful to the management board of Contern S.A., especially to Carlo Spina and Kahtan Watfa from Contern S.A. for the supply of the Misanthus, the valuable feedback and the help in different experimental tests, which were very valuable to achieve my research goals. I would also like to express my gratitude to Zornitza Tosheva, Research specialist from the Department of Physics and Materials Science of the FSTM at the University of Luxembourg for supplying and help on the scanning electron microscopic analysis.

I am also very thankful to the support team from the structural laboratory of the University of Luxembourg, namely Gilbert Klein, Marc Seil, Claude Collé, Logan Freitas, Vicente Reis Adonis, Ed Weyer, Ken Adam, Markus Schlienz, Cédric Bruyère and Grace Ligbado for sharing their professional and private knowledge, which allowed me to distract from the daily work. I would like to express my deepest gratitude to Marc Seil and Gilbert Klein for their extremely amicable and beneficial help, their support to improve the tests and their flexibility to help and give precise and good advises. Furthermore, I would like to thank to the staff members of the University of Luxembourg for their administrative help, especially Marielle Mabille, Mike Hansen, Shayan Weber and Suzanne Biwer. I am also very thankful to the team of the informatics support, especially to Antoine Zoccolo, Clément Linnig and Mickael Pilato for their availability and their kindness.

I want also to express my deepest gratitude to my PhD and Post-doc colleagues, Dr. –Ing. Vishojit Bahadur Thapa, Dr. –Ing. Dolgion Erdenebat, Dr. –Ing. Michael Weiler, Dr. -Ing. Gael Chewe Ngapeya, Dr. –Ing. Laddu Bhagya Jayasinghe, Dr. –Ing. Thanh Tung Nguyen, Lorenc Bogoviku, Hooman Eslami, Tarik Camo and Sinan Kaassamani for the numerous laughing escapades, the very nice lunch breaks, the professional and private advices and the kindness giving throughout my PhD. You were all in a way or another important.

Moreover, I would like to thank the students Joe Steines, Michael Gonçalves Dantas, Yannick Zimmer, Mike Paulus, Elma Arifi, Vanessa Jesuino Kammer, Magdalena Ivanova, Fabienne Leclerc, Cristiano Monteiro, Céline Tavares, Kim Rech and Michel Almeida Silva for their active contribution to the success of this work through their semester projects, Bachelor and Master's theses under my personal supervision.

In particular, I want to thank all my friends, especially to Dany, Gil, Tiago, David and Sidnei. Furthermore, I would like to express my deepest gratitude to my parents and sister for their moral and unconditional support over many years. Without the happiness provoked by all of you, this work would

not have been possible. The deepest acknowledgment goes especially to my wife and our two young daughters Laura and Lydia. We had many difficult moments and it was very difficult for all of us, but with your help, I managed to conclude this work.

I really thank you all for the support in one way or the other!

Luxembourg, the 28th February 2021

Patrick Pereira Dias

ABSTRACT

The present dissertation entitled “Dry-stacked insulation masonry blocks based on Miscanthus concrete” is carried out at the University of Luxembourg and financed by CONTERN Lëtzebuerger Beton. The principal aim of this project is to valorise the sustainability in the construction sector and improve the circular economy by using Luxembourgish Miscanthus to produce a masonry block. The latter should include bearing and thermal properties. Besides, a dry-stacked system should be adopted. The imposed aims are reached by developing a masonry block based on two materials connected by a dovetail connection. Furthermore, a dry-stacked system is adopted using a horizontally and vertically tongue-groove system. The present research demonstrates the approach performed to achieve these goals.

The process to reach the described aims is divided in five major steps. The first step consists of an analysis on the needed amount of mixture components with the aim of achieving the highest possible load-bearing capacity of concrete based on Miscanthus aggregates. It can be concluded that the variation of the amount of components affects the density, which has an increasing parabolic relation with the load-bearing capacity of the specimens. Furthermore, the long-term deformations considering shrinkage of Miscanthus concrete achieve in average $2350 \mu\text{m}/\text{m}$, which is the double of a lightweight concrete. However, comparing the long-term deformations of Miscanthus concrete with Hemp-concrete a benefit of at least 50 % can be considered.

Secondly, a machine-learning tool is applied to predict the compressive strength by introducing the mixture components and avoiding the need of creating time-consuming and costly experimental tests. Furthermore, it is possible to analyse the impact of each individual component on the load-bearing

capacity. This tool has the ability of optimising the mixture according to the needs in compressive strength.

Next, a Miscanthus concrete mixture is used to manufacture rectangular masonry blocks and an analysis on their geometrical height and roughness imperfections is performed experimentally and numerically on the load-bearing capacity of walls and single masonry blocks. The roughness was investigated by measuring the contact surface. Accordingly, an exponential relation is identified between the applied compressive strength and the contact surface. The height imperfections show a low impact on the load-bearing capacity of the wall. This statement is also validated in the numerical calculation. Finally, an increase of the relation height to length of a wall reduces linearly the maximum achieved compressive strength.

The next step consists of investigating the use of a Mycelium-Miscanthus composite for insulation purposes and analyse different properties. The scanning electron microscopic analysis allows investigating the bond between Mycelium and Miscanthus. It can be concluded that the Mycelium webs enter the Miscanthus fibre and holds in the way the specimen together. Furthermore, a density of 122 kg/m³ and a thermal conductivity of 0.09 W/mK is measured in this bio composite, which is higher than a conventional insulation material. Besides, a fire resistance of category EI15 according to EN13501-2:2003 is measured. These results show a promising capacity of this composite as a building insulation.

The last phase of this project consists of creating an interaction between all the parts by applying the investigated material properties into one masonry block with a geometry able to be applied in a dry-stacked masonry wall. The latter is applied by introducing a horizontal and vertical tongue-groove system in the masonry block. This block is divided in two parts, a bearing and insulation material, which are connected by a dovetail connection. A sensitivity analysis is performed in the wall by varying different properties of the masonry block, such as the thickness of the bearing and the insulation part, the angle of the dovetail connection or the position of tongue-groove system. An increase of the width of the bearing part has an increasingly linear impact on the load-bearing capacity. However, an increase of the thickness of the insulation part does not show any impact on the maximum achieved compressive strength. Furthermore, the impact of the geometrical imperfections like height and roughness are analysed. Subsequently, the needed thickness of the masonry block is calculated based on the imposed thermal transmittance value. A total thickness of the masonry block of 77 cm was determined. Therefore, it can be concluded that the thermal conductivity of the insulation part has to be improved to reduce the needed thickness of the masonry block.

Finally, this thesis assesses the use of Miscanthus fibres in a masonry block, which has a bearing and insulation capacity. Furthermore, the tongue-groove system of the masonry block and the low Young's Modulus of the Miscanthus mixture allow its application in a dry-stacked wall in the construction sector.

Keywords – *Miscanthus x giganteus; Miscanthus lightweight concrete; Pre-treatment of Miscanthus fibres; Compressive strength; Shrinkage; Machine learning; Gaussian process regression; Dry-stacked masonry; load-bearing capacity; roughness; contact surface; height differences; Mycelium; Thermal insulation; Bio-composite*

KUERZFAASUNG

Dës Dissertatioun mam Titel "Dry-stacked insulation masonry blocks based on Miscanthus concrete" gëtt op der Uni Lëtzebuerg duerchgefouert a finanzéiert vun CONTERN Lëtzebuerger Beton. D'Haaptzil vun désem Projet ass d'Nohaltegeet am Bausecteur ze valoriséieren an d'kreeslafwirtschaft ze verbesseren andeems lëtzebuerger Miscanthus benutzt gëtt fir e Mauerblock ze produzéieren. Dësen soll droend a isolatiounsfähegkeeten enthalen. Ausserdem sollt en dréchent gestapelt Mauersystem adoptéiert ginn. Déi imposéiert Ziler ginn erreecht duerch d'Entwicklung vun engem Mauerblock baséiert op zwee Materialien verbonne mat enger Schwälbenschwanzverbindung. Den dréchen gestapelt Mauersystem gëtt mat engem horizontale a vertikale Nut-Feder-System ugeholl. Déi aktuell Fuerschung demontréiert d'Approche fir dës Ziler z'erreechen.

De Prozess fir déi beschriwwenen Ziler z'erreechen ass a fënnef Schrëtt gedeelt. Den éischte Schrëtt besteht aus enger Analyse iwwer déi néideg Quantitéit u Mëschungskomponenten mam Zil déi héchst méiglech Tragkrafft vu Beton op Basis vu Miscanthus Aggregaten z'erreechen. Et kann ofgeschloss ginn datt d'Variatioun vun der Menge u Komponenten d'Dicht beaflosst, déi eng wuessend parabolesch Relatioun mat der tragender Kapazitéit vun den Exemplairen huet. Ausserdem erreechen déi laangfristeg Deformatiounen duerch d'Schwinden vu Miscanthus Beton am Duerchschnëtt ëm $2350 \mu\text{m}/\text{m}$, wat d'Duebelt vun engem Liichtbeton ass. Vergläicht een die laangfristeg Deformatiounen vu Miscanthus Beton mat Hanf-Beton, kann e Benefice vun op d'mannst 50% berécksichchtegt ginn.

Zweetens gëtt e Maschinneléiereinstrument ugewannt fir d'Kompressiounsstärkt virauszesoen andeems d'Mëschungskomponente agefouert ginn. Dëst huet den Virdeel en Besoin un Zäitverbrauchend an deier experimentell Tester ze vermeiden. Ausserdem ass et méiglech den Impakt vun all eenzel Komponent

op déi tragend Kapazitéit ze analyséieren. Dësen Tool huet d'Fäegkeet d'Mëschung ze optimiséieren je no de Bedierfnesser an der Drockkraaf.

Als nächstes gëtt eng Miscanthus Betonmëschung benutzt fir rechteckeg Mauerbléck ze fabrizéieren. Den Impakt vun hir geometresch imperfektiounen (Héicht a Rauegkeet) gëtt experimentell an numeresch op der tragender Kapazitéit vu Maueran an eenzege Mauerbléck analyséiert. D'Rauegkeet gët énnersicht andeems d'Kontaktoberfläche gemoosst gët. Deementspriechend gëtt eng exponentiell Bezéitung téscht der ugewandter Drockkraaf an der Kontaktfläch identifizéiert. D'Héichtenonreegelméissegkeeten weisen e klengen Impakt op d'Tragfähigkeit vun der Mauer. Dës Ausso gëtt och an der numerescher Berechnung validéiert. Schlussendlech reduzéiert eng Erhéijung vun der Bezéitung téschent der Héicht an der Längt vun enger Mauer déi maximal erreechten Drockkraaf.

De nächste Schrëtt besteht aus der Untersuchung iwwer de Gebrauch vun engem Mycelium-Miscanthus Komposit fir Isoléierungszwecker a verschidden Eegeschaften ze analyséieren. D'Scannenelektronmikroskopesch Analyse erlaabt d'Verbond téscht Mycelium a Miscanthus z'énnersichen. Et kann ofgeschloss ginn datt d'Mycelium Weben an d'Misanthus Faser erakommen an esou den specimen zesummen hält. Ausserdem gëtt eng Dicht vun 122 kg/m^3 an eng Wärmeleitung vun $0,09 \text{ W/mK}$ an dësem Biokomposit gemooss, wat méi héich ass wéi e konventionell Isoléiermaterial. E Feierwiderstand vun der Kategorie EI15 geméiss EN13501-2:2003 gët an dem Biokomposit gemooss. Dës Resultater weisen eng villverspriechend Kapazitéit vun dësem Komposit als Gebaiisolatioun.

Déi lescht Phase vun dësem Projet besteht aus enger Interaktioun téscht all Deeler ze kreeieren andeems d'énnersicht Materialeegeschaften an ee Mauerblock mat enger Geometrie applizéiert ginn, déi an enger dréchen gestapelt Mauerwand applizéiert ka ginn. Déi lescht gëtt ugewannt andeems en horizontal a vertikal Nut-Feder-System am Mauerblock agefouert gët. Dëse Block ass an zwee Deeler opgedeelt, e Droenden an en Isoléierenden, déi duerch eng Schwälbenschwanzverbindung verbonne ginn. Eng Sensibilitéitsanalyse gëtt an der Mauer duerch verschidden Eegeschafte vum Mauerblock gemaach, wéi d'Déckt vum Droenden an d'Isolatiounsdeel, de Wénkel vun der Schwälbenschwanzverbindung oder der Positioun vum Nut-Feder-System. Eng Erhéijung vun der Breet vum Droenden deel huet d'Auswirkung déi tragend Kapazitéit z'erhéijen. Den Isolatiounsdeel awer weist mat enger Erhéijung vun der Déckt keen Impakt op déi maximal erreecht Drockkraaf. Ausserdem gouf den Impakt vun de geometresche Onreegelméissegkeeten wéi Héicht a Rauegkeet analyséiert. Als lässt gëtt déi néideg Déckt vum Mauerblock berechent op Basis vum imposéierten Wärmedurchgangskoeffizient. Eng Gesamtdéckt vum Mauerblock vu 77 cm gouf festgeluecht. Dofir kann et ofgeschloss ginn datt d'Wärmeleitfähigkeet vum Isoléierungsdeel muss verbessert ginn fir déi néideg Déckt vum Mauerblock ze reduzéieren.

Schlussendlech beurteelt dës Dissertatioun d'Benutzung vu Miscanthus Faseren an engem Mauerblock deen Droend- an Isolatiounskapazitéiten huet. Den nidderegen E-Modul vun der Miscanthus Mëschung an d'Nut-Feder-System vum Mauerblock erlaabt seng Uwendung an enger dréchen gestapelter Mauer am Bausecteur.

Schlüsselwörter – Miscanthus x giganteus; Miscanthus liicht Beton; Virbehandlung vu Miscanthus Faseren; Drockkrafft; Schwinden; Maschinnel léieren; Gaußesche Prozess Regressiou; Dréchen gestapelt Mauerwierk; Tragfähigkeet; Rauegkeit; Kontakt Uewerfläch; Héichten Differenz; Mycelium; Isolatioun; Bio-Komposit

SOMMAIRE

Le présent mémoire intitulé "Dry-stacked insulation masonry blocks based on Miscanthus concrete" est réalisé à l'Université du Luxembourg et financé par CONTERN Lëtzebuerger Beton. L'objectif principal de ce projet est de valoriser la durabilité dans le secteur de la construction et d'améliorer l'économie circulaire en utilisant le miscanthus luxembourgeois pour produire un bloc de maçonnerie. Ce dernier devrait inclure des propriétés portantes et thermiques. En outre, un système de pose à sec devrait être adopté. Les objectifs imposés sont atteints par le développement d'un bloc de maçonnerie basé sur deux matériaux reliés par un assemblage à queue d'aronde. En outre, un système d'empilement à sec est adopté en utilisant un système de rainure et languette horizontale et verticale. La présente recherche démontre l'approche adoptée pour atteindre ces objectifs.

Le processus pour atteindre les objectifs décrits est divisé en cinq étapes. La première étape consiste en une analyse de la quantité nécessaire de composants du mélange dans le but d'obtenir la plus grande capacité portante possible du béton à base de granulats de miscanthus. On peut conclure que la variation de la quantité de composants affecte la densité, qui a une relation parabolique croissante avec la capacité portante des échantillons. En outre, les déformations à long terme en tenant compte du retrait du béton de miscanthus atteignent en moyenne $2350 \mu\text{m}/\text{m}$, soit le double d'un béton léger. Cependant, en comparant les déformations à long terme du béton de miscanthus avec celles du béton de chanvre, on peut considérer un bénéfice d'au moins 50 %.

Ensuite, un outil d'apprentissage machinal est appliqué pour prédire la résistance à la compression en introduisant les composants du mélange. Ceci a l'avantage d'éviter la nécessité de créer des tests expérimentaux longs et coûteux. En outre, il est possible d'analyser l'impact de chaque composant

individuel sur la capacité de charge. Cet outil a la capacité d'optimiser le mélange en fonction des besoins en matière de résistance à la compression.

Ensuite, un mélange de béton au miscanthus est utilisé pour fabriquer des blocs de maçonnerie rectangulaires et une analyse de leurs imperfections géométriques (hauteur et rugosité) est effectuée expérimentalement et numériquement sur la capacité portante des murs et des blocs de maçonnerie seuls. La rugosité a été étudiée en mesurant la surface de contact. En conséquence, une relation exponentielle est identifiée entre la résistance à la compression appliquée et la surface de contact. Les imperfections en hauteur montrent un faible impact sur la capacité de charge du mur. Cette affirmation est également validée dans le calcul numérique. Enfin, une augmentation de la relation entre la hauteur et la longueur d'un mur réduit linéairement la résistance maximale à la compression.

L'étape suivante consiste à étudier l'utilisation d'un composite Mycélium-Miscanthus à des fins d'isolation et à analyser différentes propriétés. L'analyse au microscope électronique à balayage permet d'étudier la liaison entre le mycélium et le miscanthus. On peut conclure que les toiles de mycélium entrent dans la fibre de miscanthus et maintiennent l'échantillon ensemble. De plus, une densité de 122 kg/m³ et une conductivité thermique de 0,09 W/mK sont mesurées sur ce composite biologique, ce qui est supérieur à un matériau d'isolation conventionnel. En outre, une résistance au feu de la catégorie EI15 selon la norme EN13501-2:2003 est mesurée. Ces résultats montrent une capacité prometteuse de ce composite en tant qu'isolant de bâtiment.

La dernière phase de ce projet consiste à créer une interaction entre toutes les parties en appliquant les propriétés des matériaux étudiés dans un bloc de maçonnerie avec une géométrie permettant l'application dans un mur de maçonnerie empilé à sec. Cette dernière est appliquée par l'introduction d'un système de rainure et de languette horizontal et vertical dans le bloc de maçonnerie. Ce bloc est divisé en deux parties, un matériau porteur et un matériau isolant reliés par un assemblage à queue d'aronde. Une analyse de sensibilité est effectuée sur le mur en faisant varier différentes propriétés du bloc de maçonnerie, telles que l'épaisseur de la partie porteuse et de la partie isolante, l'angle de la connexion en queue d'aronde ou la position du système de rainure et languette. Une augmentation de la largeur de la partie porteuse a un impact de plus en plus linéaire sur la capacité de charge. En revanche, une augmentation de l'épaisseur de la partie isolante n'a pas d'incidence sur la résistance maximale à la compression obtenue. En outre, l'impact des imperfections géométriques telles que la hauteur et la rugosité est analysé. Ensuite, l'épaisseur nécessaire du bloc de maçonnerie est calculée sur la base de la valeur de transmission thermique imposée par la norme. Une épaisseur totale du bloc de maçonnerie de 77 cm a été déterminée. On peut donc conclure que la conductivité thermique de la partie isolante doit être améliorée pour réduire l'épaisseur nécessaire du bloc de maçonnerie.

Enfin, cette thèse évalue l'utilisation des fibres de miscanthus dans un bloc de maçonnerie, qui a une capacité portante et isolante. De plus, le système languette-rainure du bloc de maçonnerie et le faible module de Young du mélange de miscanthus permettent son application dans un mur empilé à sec dans le secteur de la construction.

Mots clés – Miscanthus x giganteus; Béton léger au miscanthus; Prétraitement des fibres de miscanthus; Résistance à la compression; Retrait; Apprentissage machinal; Régression du processus gaussien; Maçonnerie empilée à sec; Capacité portante; Rugosité; Surface de contact; Différences de hauteur; Mycélium; Isolation thermique; Composite biologique

KURZFASSUNG

Die vorliegende Dissertation mit dem Titel "Dry-stacked insulation masonry blocks based on Miscanthus concrete" wurde an der Universität Luxemburg durchgeführt und von CONTERN Lëtzebuerger Beton finanziert. Das Hauptziel dieses Projekts ist es, die Nachhaltigkeit im Bausektor aufzuwerten und die Kreislaufwirtschaft zu verbessern, indem luxemburgischer Miscanthus zur Herstellung eines Mauersteins verwendet wird. Dieser soll tragende und thermische Eigenschaften aufweisen. Außerdem soll ein trocken gestapeltes System verwendet werden. Die auferlegten Ziele werden durch die Entwicklung eines Mauersteins erreicht, der auf zwei Materialien basiert, die durch eine Schwalbenschwanzverbindung verbunden sind. Darüber hinaus wird ein trocken gestapeltes System mit einem horizontalen und vertikalen Nut-Feder-System verwendet. Die vorliegende Arbeit demonstriert die Vorgehensweise zur Erreichung dieser Ziele.

Der Prozess zur Erreichung der beschriebenen Ziele ist in fünf Hauptschritte unterteilt. Der erste Schritt besteht aus einer Analyse der benötigten Menge an Mischungskomponenten mit dem Ziel, eine möglichst hohe Tragfähigkeit des Miscanthus-Betons zu erreichen. Es wurde festgestellt, dass sich die Variation der Menge der Komponenten auf die Dichte auswirkt, die einen parabolischen Zusammenhang mit der Tragfähigkeit der Probekörper aufweist. Weiterhin erreichen die Langzeitverformungen unter Berücksichtigung des Schwindens von Miscanthus-beton im Mittel $2350 \mu\text{m}/\text{m}$, was dem Doppelten eines Leichtbetons entspricht. Vergleicht man jedoch die Langzeitverformungen von Miscanthus-Beton mit denen von Hanf-Beton, so kann man von einem Vorteil von mindestens 50 % ausgehen.

Zweitens wird ein Machine-Learning-Tool zur Vorhersage der Druckfestigkeit eingesetzt, indem die Mischungskomponenten eingeführt werden. Dies hat den Vorteil lange Erstellungszeit und

kostenintensive experimentelle Tests zu vermeiden. Darüber hinaus ist es möglich, den Einfluss jeder einzelnen Komponente auf die Tragfähigkeit zu analysieren. Dieses Werkzeug hat auch die Fähigkeit, die Mischung entsprechend den Anforderungen an die Druckfestigkeit zu optimieren.

Folgend wird eine Miscanthus-Betonmischung zur Herstellung von rechteckigen Mauersteinen verwendet. Eine Analyse der Auswirkung ihrer geometrischen Unregelmäßigkeiten (Höhe und Rauigkeit) wird experimentell und numerisch auf die Tragfähigkeit von Wänden und einzelnen Mauersteinen durchgeführt. Die Rauigkeit wurde durch Messung der Kontaktfläche untersucht. Demnach wird ein exponentieller Zusammenhang zwischen der aufgebrachten Druckfestigkeit und der Kontaktfläche identifiziert. Die Höhenunregelmäßigkeiten zeigen einen geringen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Wand. Diese Aussage wird auch in der numerischen Berechnung bestätigt. Schließlich reduziert eine Vergrößerung des Verhältnisses Höhe zu Länge einer Wand die maximal erreichte Druckfestigkeit.

Der nächste Schritt besteht darin, die Verwendung eines Myzel-Miscanthus-Verbund für Dämmzwecke zu untersuchen und verschiedene Eigenschaften zu analysieren. Die rasterelektronenmikroskopische Analyse ermöglicht die Untersuchung der Bindung zwischen Myzel und Miscanthus. Es kann festgestellt werden, dass die Myzel-Vliese in die Miscanthus-Faser eindringen und so den Probekörper zusammenhalten. Weiterhin wird in diesem Bio-Verbundwerkstoff eine Dichte von 122 kg/m^3 und eine Wärmeleitfähigkeit von $0,09 \text{ W/mK}$ gemessen. Diese ist jedoch höher als herkömmliche Dämmstoffe. Des Weiteren wird ein Feuerwiderstand der Kategorie EI15 nach EN13501-2:2003 gemessen. Diese Ergebnisse zeigen eine vielversprechende Kapazität dieses Bioverbunds als Gebäudedämmung.

Die letzte Phase dieses Projekts besteht darin, eine Interaktion zwischen allen Teilen zu schaffen, indem die untersuchten Materialeigenschaften in einem Mauerstein mit einer Geometrie angewendet werden, die in einer trocken gestapelten Mauer angewendet werden kann. Letzteres wird durch die Einführung eines horizontalen und vertikalen Nut-Feder-Systems in den Mauerstein erreicht. Der Mauerstein besteht aus zwei Einzelteilen, ein Trag- und ein Dämmmaterial, die durch eine Schwabenschwanzverbindung verbunden sind. Es wird eine Sensitivitätsanalyse in der Wand durchgeführt, indem verschiedene Eigenschaften des Mauersteins variiert werden, wie z. B. die Dicke des Trag- und des Dämmstoffteils, der Winkel der Schwabenschwanzverbindung oder die Position des Nut-Feder-Systems. Eine Vergrößerung der Breite des tragenden Teils hat einen zunehmend linearen Einfluss auf die Tragfähigkeit der Wand. Eine Erhöhung der Dicke des Dämmteils zeigt hingegen keinen Einfluss auf die maximal erreichte Druckfestigkeit. Weiterhin wird der Einfluss der geometrischen Unregelmäßigkeiten wie Höhe und Rauigkeit analysiert. Anschließend wird eine erforderliche Gesamtdicke des Mauersteins von 77 cm auf der Grundlage des vorgegebenen

Wärmedurchgangskoeffizienten berechnet. Daraus wurde geschlossen, dass die Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs verbessert werden muss, um die erforderliche Dicke des Mauersteins zu reduzieren.

Schließlich wird in dieser Arbeit die Verwendung von Miscanthus-fasern in einem Mauerstein beurteilt, der eine Trag- und Dämmfähigkeit aufweist. Darüber hinaus ermöglichen das Nut-Feder-System des Mauersteins und der niedrige Elastizitätsmodul der Miscanthus-Mischung eine Anwendung als Trockenbauwand im Baubereich.

Schlüsselwörter – Miscanthus x giganteus; Miscanthus-Leichtbeton; Vorbehandlung von Miscanthus-Fasern; Druckfestigkeit; Schwinden; Maschine-learning; Gauß'sche Prozessregression; Trockenmauerwerk; Tragfähigkeit; Rauigkeit; Kontaktfläche; Höhenunterschiede; Myzel; Wärmedämmung; Bio-Verbundstoff

RESUMO

A presente dissertação intitulada “Dry-stacked insulation masonry blocks based on Miscanthus concrete” foi realizada na Universidade do Luxemburgo e financiada pela CONTERN Lëtzebuerger Beton. O objetivo principal deste projeto é valorizar a sustentabilidade no setor da construção e melhorar a economia circular, usando Miscanthus produzido no Luxemburgo para produzir blocos de alvenaria. Este último deve incluir propriedades com capacidade de carga e térmicas. Além do mais, deve ser adotado um sistema de empilhamento a seco. Estes objetivos serão alcançados através do desenvolvimento de um bloco de alvenaria composto por dois materiais e ligados por uma cauda de andorinha (“dovetail connection”). Também pretende-se adotar um sistema de empilhamento a seco, utilizando um sistema de entalhe horizontal e vertical. A presente pesquisa demonstra a abordagem realizada para atingir esses objetivos.

O processo para atingir os objetivos descritos está dividido em cinco etapas principais. A primeira etapa consiste numa análise da quantidade necessária de componentes de mistura, com o objetivo de alcançar a maior capacidade de carga possível de betão com base em agregados de Miscanthus. Pode concluir-se que a variação da quantidade de componentes afetou a densidade assemelhando-se a uma parábola em relação à capacidade de carga das amostras. Além disso, as deformações a longo prazo considerando a retração do betão Miscanthus atingem em média $2350 \mu\text{m}/\text{m}$, que é o dobro de um betão leve. No entanto, comparando as deformações de longo prazo do betão Miscanthus com o betão cânhamo, pode ser considerado um benefício de pelo menos 50%.

Em segundo lugar, uma máquina de aprendizagem é aplicada para prever a resistência à compressão, introduzindo os componentes da mistura e evitando a necessidade de criar testes experimentais

demorados e dispendiosos. Além disso, é possível analisar o impacto de cada componente individual na capacidade de carga. Esta ferramenta tem ainda a capacidade de otimizar a mistura de acordo com as necessidades de resistência à compressão.

Em seguida, uma mistura de betão Miscanthus é usada para fabricar blocos de alvenaria retangulares e uma análise das suas imperfeições geométricas e rugosidade é realizada experimental e numericamente sobre a capacidade de carga de paredes e blocos de alvenaria simples. A rugosidade foi investigada através da medição da superfície de contato. Consequentemente, é identificada uma relação exponencial entre a resistência à compressão aplicada e a superfície de contato. As imperfeições de altura mostram um baixo impacto na capacidade de carga da parede. Esta afirmação também é validada no cálculo numérico. Finalmente, um aumento da relação altura-comprimento de uma parede reduz linearmente a resistência à compressão máxima alcançada.

O próximo passo consiste em investigar o uso de um compósito Micélio-Miscanthus para fins de isolamento e analisar as diferentes propriedades. A análise microscópica eletrônica de varrimento permite investigar a ligação entre o Micélio e Miscanthus. Conclui-se que as teias de micélio entram na fibra de Miscanthus e prendem o espécime no seu conjunto. Além disso, uma densidade de 122 kg/m^3 e uma condutividade térmica de $0,09 \text{ W/mK}$ é medida neste compósito, que é maior do que um material de isolamento convencional. Também é medida uma resistência ao fogo da categoria EI15 de acordo com EN13501-2:2003. Estes resultados mostram uma capacidade promissora desse compósito como isolante de edifícios.

A última fase deste projeto consiste em criar uma interação entre todas as partes, aplicando as propriedades do material investigado num bloco de alvenaria com uma geometria passível de ser aplicada em uma parede de alvenaria empilhável a seco. Esta última é aplicada através da introdução de um sistema de um sistema horizontal e vertical de entalhes no bloco de alvenaria. Este mesmo bloco é dividido em duas partes, uma parte de apoio e outra de isolamento, que são conectados por uma ligação em cauda de andorinha. É realizada uma análise de sensibilidade na parede variando diferentes propriedades do bloco de alvenaria, como a espessura da parte de portadora e da parte de isolamento, o ângulo da conexão da cauda de andorinha ou a posição do sistema de encaixe de entalhes. Um aumento da largura da parte portadora tem um impacto crescente linear na capacidade de suporte de carga. No entanto, um aumento da espessura da parte de isolamento não mostra qualquer impacto na resistência à compressão máxima alcançada. Além disso, o impacto das imperfeições geométricas como a altura e rugosidade é analisada. Subsequentemente, a espessura necessária do bloco de alvenaria é calculada com base no valor de transmitância térmica imposta pela norma. Foi determinada uma espessura total do bloco de alvenaria de 77 cm. Portanto, pode-se concluir que a condutividade térmica da parte de isolamento deve de ser melhorada para reduzir a espessura necessária do bloco de alvenaria.

Finalmente, esta tese avalia a utilização de fibras de Miscanthus em um bloco de alvenaria, que possui capacidade de carga e isolamento. Para além disso, o sistema de entalhes do bloco de alvenaria e o baixo módulo de elasticidade da mistura de Miscanthus permitem a sua aplicação numa parede empilhável a seco no setor da construção.

Palavras-chave – *Miscanthus x giganteus; betão leve Miscanthus; Pré-tratamento de fibras de Miscanthus; Resistência à compressão; Encolhimento; Aprendizagem maquinaria; Regressão do processo Gaussiano; Alvenaria empilhável a seco; capacidade de carga; rugosidade; superfície de contato; diferenças de altura; Micélio; Isolamento térmico; composto biológico*

TABLE OF CONTENTS

Acknowledgment.....	I
Abstract	V
Kuerzfaasung.....	IX
Sommaire.....	XIII
Kurzfassung.....	XVII
Resumo	XXI
Table of contents	XXV
Chapter 1 General	1
1.1 Motivation	1
1.2 Scope and aims	2
1.3 Contents and structure of the thesis	3
1.4 Presentation of the research papers and the links between each publication.....	4
1.4.1 Publication on Miscanthus mixtures.....	5
1.4.2 Manuscript on Machine learning.....	5
1.4.3 Manuscript on Miscanthus masonry blocks	6
1.4.4 Publication on Mycelium Miscanthus insulation	6

1.5	Coherence between the papers and the objectives.....	7
Chapter 2	Introduction	9
Chapter 3	Literature review	13
3.1	Miscanthus.....	14
3.1.1	Species of Miscanthus	14
3.1.2	Miscanthus x giganteus	15
3.1.2.1	Morphology of Miscanthus x giganteus	15
3.1.2.2	Usage of Miscanthus x giganteus	18
3.1.3	Similarities to other sustainable fibres.....	20
3.1.3.1	Sustainable fibres in cementitious mixtures	20
3.1.3.2	Similarities between Miscanthus and hemp	26
3.1.4	Patents.....	29
3.1.4.1	Construction material on a plant basis and method for the producing of this construction material (M. Freudiger 2002).....	29
3.1.4.2	Building material with a plant filler (H. Höhn, 2004)	31
3.1.4.3	Building material with plant filler (H. Höhn 2007).....	32
3.1.4.4	Material or dry blend with vegetable aggregate (J. Peters 2008)	33
3.1.4.5	Construction material with filler of vegetable origin (I. Höhn and H. Höhn 2008) ..	34
3.1.4.6	Agro-sourced lightweight concrete and use thereof (F. Jacquemot and P. Rougeau 2013) ..	35
3.2	Different fibrous cementitious mixtures.....	36
3.2.1	Steel fibres	36
3.2.2	Synthetic fibres.....	37
3.2.3	Ceramic fibres	38
3.2.4	Carbon fibres	38
3.3	Mycelium.....	39
3.3.1	Different species of Mushroom	39
3.3.2	Mycelium with sustainable fibres for insulation purposes	40
3.4	Masonry blocks	41
3.4.1	Generalities.....	41
3.4.2	Dry-stacked wall.....	43

3.4.2.1	Existing Systems	44
3.4.2.2	Imperfections of a masonry block	49
3.4.1	Connection to insulation material.....	57
3.5	Machine learning	60
3.5.1	Artificial neural network	61
3.5.2	Fuzzy logic	61
3.5.3	Regression analysis	62
Chapter 4	Optimisation of the mechanical properties of Miscanthus lightweight concrete (Publication on Miscanthus mixtures)	63
4.1	Abstract	63
4.2	Introduction	64
4.3	Materials and experiments.....	69
4.3.1	Raw materials	69
4.3.2	Characterisation of the mixtures.....	70
4.3.3	Mixture preparation and filling procedure.....	72
4.4	Results and Discussion	73
4.4.1	Quantity of chlorine in the mixture	73
4.4.2	Density and compressive strength	74
4.4.2.1	Miscanthus variation.....	75
4.4.2.2	Cement variation	76
4.4.2.3	W/C ratio variation	78
4.4.2.4	Relation between the density and the compressive strength.....	79
4.4.2.5	Pre-treatment variation	80
4.4.3	Analysis of the Young's Modulus	81
4.4.4	Analysis of the hygric properties of Miscanthus lightweight concrete	83
4.5	Conclusions	86
4.6	Acknowledgements	88
Chapter 5	Machine learning in mix design of Miscanthus lightweight concrete (Manuscript on Machine learning).....	89
5.1	Abstract	89

5.2	Introduction	90
5.3	Experimental procedure.....	92
5.3.1	Materials	92
5.3.2	Test details.....	93
5.4	Methodology.....	95
5.4.1	Gaussian process regression (GPR).....	95
5.4.2	Dataset	97
5.4.3	Cross-validation and performance evaluation	98
5.5	Results and discussion.....	100
5.6	Conclusion.....	106
Chapter 6	Analysis of the geometrical imperfections of a dry-stacked masonry block based on Miscanthus (Manuscript on Miscanthus masonry blocks)	107
6.1	Abstract	107
6.2	Introduction	108
6.3	Materials and experimental and numerical approach	112
6.3.1	Materials and Mixtures.....	112
6.3.2	Experimental Approach.....	114
6.3.3	Analysis of the height imperfections of masonry blocks.....	117
6.3.4	Numerical Approach.....	117
6.3.4.1	Composition of the numerical masonry block.....	117
6.3.4.2	Parametrical study	120
6.3.4.3	Creation of a FEM of a dry-stacked wallet.....	122
6.4	Results and discussion.....	124
6.4.1	Load-bearing capacity	124
6.4.1.1	Parametric study: W/C ratio variation.....	124
6.4.1.2	Parametric study: analysis of the mixing procedure.....	127
6.4.1.3	Parametric study: combination of mixing procedure and W/C ratio	128
6.4.1.4	Parametric study: curing time of 28d and stepwise analysis	129
6.4.1.5	Analysis on wallets.....	130
6.4.2	Analysis of the roughness.....	134

6.4.2.1	Parametric study: W/C ratio variation	135
6.4.2.2	Parametric study: combination of mixing procedure and W/C ratio	135
6.4.2.3	Parametric study: curing time of 28 days and stepwise analysis.....	136
6.4.2.4	Analysis on wallets.....	137
6.4.3	Height differences of the masonry blocks	138
6.4.4	Numerical analysis	139
6.4.4.1	Single masonry block	139
6.4.4.2	Wallet	143
6.5	Conclusions	147
6.6	Acknowledgements	148
Chapter 7	Investigation of Mycelium-Miscanthus composites as building insulation material (Publication on Mycelium-Miscanthus)	149
7.1	Abstract	149
7.2	Introduction	150
7.3	Experimental study.....	152
7.3.1	Materials	152
7.3.2	Preparation of samples.....	154
7.4	Results and discussion.....	157
7.4.1	Feasibility of use coffee as starch.....	158
7.4.2	Scanning electron microscopy (SEM) analysis	159
7.4.3	Compressive test.....	161
7.4.4	Water absorption	162
7.4.5	Thermal insulation test	163
7.4.6	Fire resistance test	167
7.5	Conclusion.....	170
7.6	Acknowledgements	171
Chapter 8	Analysis of a wall based on masonry blocks with a bearing and insulation part based on Miscanthus	173
8.1	Creation of the model	173
8.2	Introduction to the sensitivity analysis of the geometry	177

8.3	Analytical calculation of the thermal transmittance value	178
8.4	Numerical analysis	178
8.4.1	Comparison to the wall using rectangular masonry blocks from Chapter 6.....	178
8.4.2	Sensitivity analysis on the dry-stacked wall.....	181
8.5	Thermal transmittance value of the masonry block.....	186
8.6	Conclusion.....	187
Chapter 9	Summary.....	189
Chapter 10	Outlook	193
Chapter 11	List of figures	197
Chapter 12	List of tables	205
Chapter 13	ANNEX A	209
Chapter 14	References	211