



UNIVERSITÉ DU  
LUXEMBOURG

# CONDITION ASSESSMENT OF BRIDGE STRUCTURES BY DAMAGE LOCALISATION BASED ON THE DAD-METHOD AND CLOSE-RANGE UAV PHOTOGRAMMETRY



## Dolgion Erdenebat

Publication Series of the Laboratory of Solid Structures  
Editor: Prof. Dr.-Ing. Danièle Waldmann  
Volume 5



PhD-FSTM-2020-10  
The Faculty of Sciences, Technology and Medicine

## DISSERTATION

Defence held on 27/03/2020 in Esch-sur-Alzette

to obtain the degree of

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

by

**Dolgion ERDENEBAT**

Born on 28 March 1988 in Ulaanbaatar, (Mongolia)

## CONDITION ASSESSMENT OF BRIDGE STRUCTURES BY DAMAGE LOCALISATION BASED ON THE DAD-METHOD AND CLOSE-RANGE UAV PHOTOGRAMMETRY

### Dissertation defence committee

Prof. Dr.-Ing. Andreas Zilian, Chairman

*Professor, University of Luxembourg, Faculty of Science, Technology and Medicine*

Prof. Dr.-Ing. Norman Teferle, Vice-Chair

*Professor, University of Luxembourg, Faculty of Science, Technology and Medicine*

A-Prof. Dr.-Ing. Danièle Waldmann, Dissertation supervisor

*Assistant-Professor, University of Luxembourg, Faculty of Science, Technology and Medicine*

Prof. Dr.-Ing. Steffen Marx

*Professor, Technische Universität Dresden, Institut für Massivbau*

Prof. Dr.-Ing. Marc Gutermann

*Professor, Hochschule Bremen, Institut für Experimentelle Statik*



Schriftenreihe des Laboratory of Solid Structures

**Dolgion Erdenebat**

**Condition assessment of bridge structures by  
damage localisation based on the DAD-method and  
close-range UAV photogrammetry**

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., 2020

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 978-3-8440-8260-9

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](http://www.shaker.de) • e-mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# 1 Danksagung

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand am Institut (Institute of Civil and Environmental Engineering INCEEN) an der Fakultät für Naturwissenschaften, Technologie und Kommunikation der Universität Luxemburg und im Rahmen des Forschungsprojekts „STATOSTRUC“ zur Zustandsbewertung von Brücken im Zeitraum vom 15.05.2015 bis 12.05.2020.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Waldmann als meine direkte wissenschaftliche Betreuerin. Ihre wertvollen Anregungen, die kooperative Unterstützung sowie das angenehme Arbeitsklima trugen maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit bei. Zudem danke ich Herrn Prof. Andreas Zilian von der Universität Luxemburg für die fachübergreifende, interdisziplinäre Begleitung der Arbeit. Herrn Prof. Norman Teferle möchte ich mich für die fachspezifische Unterstützung der Arbeit, die Bereitstellung der Fachliteraturen, sowie für die Empfehlungen bedanken.

Aufrichtig danken möchte ich den Professoren Steffen Marx von der Leibniz Universität Hannover und Marc Gutermann der Hochschule Bremen für das Interesse an der Forschungsarbeit und für die Mitwirkung in meinem Prüfungskomitee.

Darüber hinaus danke ich meinen Kollegen der technischen Abteilung Marc Seil, Gilbert Klein, Claude Colle, Cédric Bruyère, Logan Filipe Freitas Moreira, Ed Weyer, Ken Adam, Grace Ligbado, Vicente Reis Adonis, Ralph Reiter und Remi Radinovic für die engagierte Unterstützung der zahlreichen experimentellen Untersuchungen. Für die Ermöglichung des Drohnenflugs im Rahmen des Brückenversuchs danke ich Herrn Prof. Holger Voos, Herrn Prof. Miguel Angel Olivares und Herrn Dr. Jose Luis Sanchez Lopez.

Ein großer Dank gilt Herrn Frédéric De Oliveira und Herrn Gilberto Fernandes von Administration des Ponts et Chaussées Luxembourg für die außerordentliche Kooperationsbereitschaft und die Realisierung des großformatigen Brückenversuchs in Altrier.

Des Weiteren bedanke ich mich Herrn Harald Krause von Photo Mess Systeme AG für die Unterstützung zur professionellen Anwendung der Photogrammetrie-Software Elcovision 10.

Außerordentlich danke ich Herrn Dr. Michael Weiler für die Herstellung des ersten Bezugs zu diesem Projekt. Meinen direkten Kollegen Golen Gael Chewe Ngapeya, Vishojit Bahadur Thapa, Patrick Pereira Dias, Lorenc Bogoviku, Hooman Eslami und Laddu Bhagya Jayasinghe für die stetige Diskussionsbereitschaft und die kollegiale Zusammenarbeit. Herrn Dietmar Backes bedanke ich mich für die produktiven Gespräche und die Zusammenarbeit. Weiterhin danke ich den Studierenden Muamer Kajevic, Jorge Goncalves, Yann Fux, Laurent Oestreicher, Jonathan Sousa Coimbra, die im Rahmen ihrer Studien-, Bachelor- und Masterarbeiten das Projekt, insbesondere die Versuche tatkräftig unterstützt haben.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Familie, den Eltern und den Freunden. Mein größter Dank gilt meiner Frau und unseren gemeinsamen Kindern für den Rückhalt in den vergangenen Jahren.

Luxemburg, Januar 2020

Dolgion Erdenebat

“Men build too many walls and not enough bridges”

Joseph Fort Newton





## 2 Contents

---

<b>1</b>	<b>Danksagung .....</b>	<b>iii</b>
<b>2</b>	<b>Contents .....</b>	<b>vii</b>
<b>3</b>	<b>Abstract.....</b>	<b>xiii</b>
3.1	Lëtzebuergesch .....	xiii
3.2	English.....	xiv
3.3	Deutsch.....	xiv
3.4	Français.....	xv
3.5	МОНГОЛ.....	xvi
<b>4</b>	<b>General.....</b>	<b>- 1 -</b>
4.1	Motivation .....	- 1 -
4.2	Aims.....	- 2 -
4.3	Structure of the thesis .....	- 3 -
4.4	List of papers .....	- 6 -
4.4.1	Journal papers (Q1) .....	- 6 -
4.4.2	Peer-reviewed conference papers.....	- 6 -
4.4.3	Authors contributions.....	- 7 -
<b>5</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>- 11 -</b>

<b>6</b>	<b>Introduction to the publication I</b> .....	<b>- 42 -</b>
<b>7</b>	<b>Publication I: The Deformation Area Difference (DAD) method for condition assessment of reinforced structures</b> .....	<b>- 43 -</b>
	Abstract.....	- 43 -
7.1	Introduction .....	- 44 -
7.2	The Deformation Area Difference-method .....	- 48 -
7.2.1	Relation between deflection line, inclination angle, curvature and stiffness .....	- 48 -
7.2.2	The principles of the DAD-method.....	- 51 -
7.3	Description of the laboratory experiment .....	- 59 -
7.3.1	Load-deflection behaviour of the laboratory beam .....	- 60 -
7.4	Applied measurement techniques .....	- 62 -
7.5	Condition assessment of the beam using the DAD-Method.....	- 65 -
7.5.1	Detectable damage and influencing factors .....	- 65 -
7.5.2	DAD-values for the experimental beam.....	- 67 -
7.6	Investigation based on theoretical calculations .....	- 73 -
7.6.1	Variation of the degree of damage .....	- 73 -
7.6.2	Application of the DAD-method on different static systems and for different damage positions.....	- 75 -
7.6.3	Effect of temperature changes on the DAD-Method .....	- 77 -
7.6.4	Case study with planned stiffness change .....	- 79 -
7.7	Summary.....	- 82 -
<b>8</b>	<b>Transition to the publication II</b> .....	<b>- 84 -</b>
8.1	Conclusion of the first paper .....	- 84 -
8.2	Introduction to the second paper .....	- 84 -
<b>9</b>	<b>Publication II: Curvature based DAD-method for damage localisation under consideration of measurement noise minimisation</b> .....	<b>- 86 -</b>

---

Abstract:.....	- 86 -
9.1 Introduction .....	- 87 -
9.2 The Deformation Area Difference Method (DAD-method).....	- 92 -
9.3 Procedure of the DAD-method.....	- 96 -
9.3.1 Standard deviation.....	- 97 -
9.3.2 Polynomial regression and smoothing of the deflection line .....	- 99 -
9.3.3 Consideration of measurement point variations.....	- 102 -
9.3.4 Summary of the evaluation procedure based on flowchart .....	- 104 -
9.4 Laboratory experiment .....	- 106 -
9.4.1 Theoretical calculation compared to the measurement .....	- 107 -
9.4.2 Consideration of the measurement accuracy and smoothing the curves.....	- 109 -
9.4.3 Consideration of measurement point variations.....	- 110 -
9.4.4 Localisation of damage using DAD-method.....	- 112 -
9.4.5 Case study: a steel beam experiment with local damages.....	- 114 -
9.4.6 Analysis of the achieved accuracy and the noise effect .....	- 118 -
9.4.7 Summary .....	- 120 -
<b>10 Transition to the manuscript III.....</b>	<b>- 123 -</b>
10.1 Conclusion of the second paper .....	- 123 -
10.2 Introduction to the third paper .....	- 123 -
<b>11 Manuscript III: The influence of camera calibration and quality for high-precision structural deflection measurements by close-range photogrammetry.....</b>	<b>- 125 -</b>
Abstract.....	- 125 -
11.1 Introduction .....	- 126 -
11.2 Background of the study.....	- 129 -
11.3 Used cameras.....	- 131 -

11.4 Calibration of the camera ..... - 132 -

    11.4.1 Calibration walls ..... - 132 -

    11.4.2 Depth of field and focussing of the camera..... - 133 -

    11.4.3 Calibration runs ..... - 137 -

11.5 Calibration results..... - 138 -

11.6 Close-range photogrammetric application for deflection measurement on a laboratory experiment ..... - 146 -

11.7 Conclusion and future works ..... - 158 -

11.8 Acknowledgements ..... - 160 -

**12 Transition to the manuscript IV ..... - 161 -**

    12.1 Conclusion of the third manuscript ..... - 161 -

    12.2 Introduction to the fourth manuscript..... - 161 -

**13 Manuscript IV: Application of the DAD method for damage localisation on an existing bridge structure using close-range UAV photogrammetry..... - 163 -**

    Abstract..... - 163 -

    13.1 Introduction ..... - 164 -

    13.2 Deformation Area Difference (DAD) method..... - 167 -

        13.2.1 Relationship between deflection curve and stiffness of the structure ..... - 167 -

        13.2.2 Background of the DAD-method ..... - 169 -

        13.2.3 Smoothing of the measurement noise ..... - 171 -

        13.2.4 Identification of damages (outliers) ..... - 172 -

    13.3 Description of the bridge ..... - 173 -

        13.3.1 Applied techniques ..... - 174 -

        13.3.2 Experimental setup ..... - 176 -

        13.3.3 Finite element model of the bridge ..... - 177 -

---

13.3.4	Loading of the bridge .....	- 179 -
13.3.5	Environmental conditions during the test.....	- 180 -
13.4	Results of the bridge experiment .....	- 182 -
13.4.1	Measurement precisions .....	- 182 -
13.4.2	The damage detection and the DAD values .....	- 187 -
13.5	Measurement noise and its influence.....	- 189 -
13.5.1	Artificial noise.....	- 190 -
13.5.2	Relation between the detectable degree of damage and the measurement precision for the use of DAD method.....	- 191 -
13.5.3	Influence of the deflection size on the detectability of damage .....	- 191 -
13.6	Influence of damage position on detection of damage .....	- 193 -
13.7	Influence of the repetition of measurements .....	- 193 -
13.8	Recommendation for practitioners .....	- 195 -
13.9	Conclusion .....	- 195 -
13.10	Acknowledgements.....	- 197 -
<b>14</b>	<b>Conclusion and outlook .....</b>	<b>- 198 -</b>
14.1	Conclusion .....	- 198 -
14.2	Outlook .....	- 202 -
<b>15</b>	<b>List of figures.....</b>	<b>- 205 -</b>
<b>16</b>	<b>List of tables.....</b>	<b>- 213 -</b>
<b>A.</b>	<b>Appendix.....</b>	<b>- 214 -</b>
A.1	Reinforced concrete beams.....	- 214 -
A.2	Bridge experiment .....	- 220 -
<b>17</b>	<b>References.....</b>	<b>- 223 -</b>