

Universität für Bodenkultur Wien Department für Bautechnik + Naturgefahren

Abstracts - BauNat

Schriftenreihe des Departments Nr. 23 – Jänner 2017

Markus Fiebig Johannes Hübl Christian Zangerl Wei Wu Rosemarie Stangl Konrad Bergmeister

Vorwort

In diesem Band sind Kurzfassungen der derzeit laufenden Doktorarbeiten an unserem Department für Bautechnik und Naturgefahren zusammengefasst. Dissertationen sind in der Wissenschaft (und damit natürlich auch in unserem Department) essentiell wichtig. Auch im Rahmen der letzten Evaluierung unseres Departments ist diese große Bedeutung von Doktorarbeiten noch einmal explizit betont und diskutiert worden.

Mit dem vorliegenden Band wird sichtbar, welche engagierten Nachwuchswissenschaftlerinnen und Wissenschaftler derzeit in unserem Department aktiv sind und welche Themen in unserer Forschung eine maßgebliche Rolle spielen. Der Bogen spannt sich entsprechend der Institute von Alpinen Naturgefahren, über Angewandte Geologie, Geotechnik, Ingenieurbiologie und Landschaftsbau zu Konstruktivem Ingenieurbau. Dabei geht es inhaltlich vom Assessment bis zum Lebenszyklusende, von der Mure bis zur Moräne, vom Gebäude bis zur Gehölzpflanzung und vom Erdbeben bis zum Befestigungselement. Eine breite Forschungsanstrengung rund um unser gemeinsames Thema Bautechnik und Naturgefahren.

Ein herzliches Dankeschön an Evelin Kamper und Michael Schwenn für die gelungene Gestaltung des Bandes.

Den Dissertierenden und ihren Betreuungsteams wünschen wir alles Gute für ihre Forschungsarbeiten und einen gelungenen Abschluss der jeweiligen Dissertationen!!

Im Namen der Institutsleitungsrunde im Department

Univ. Prof. Markus Fiebig (Departmentleiter)

Univ.Prof. Johannes Hübl (Stellv. Departmentleiter und Institutsleiter Alpine Naturgefahren)

Univ. Prof. Christian Zangerl (Institutsleiter Angewandte Geologie)

Univ.-Prof. Wei Wu (Institutsleiter Geotechnik)

Univ. Prof.ⁱⁿ Rosemarie Stangl (Institutsleiterin Ingenieurbiologie und Landschaftsbau)

o.Univ. Prof. Konrad Bergmeister (Institutsleiter Konstruktiver Ingenieurbau)

Assoc. Prof. Alfred Strauss (stellvertretender Institutsleiter Konstruktiver Ingenieurbau)

Wien im Jänner 2017

Index

GEORG NAGL Murenmessbauwerk
DAVID PRENNER
Hydrological trigger conditions leading to flash floods and debris flows5
ANDREAS SCHIMMEL Automatische Detektion alpiner Massenbewegungen mittels Infraschall- und seismischen Signalen
PETER SCHÖN Terrain-based Parameter for Predicting Mountain Snow Redistribution11
MATTHIAS BENEDIKT What makes the difference? A comparison of computational tools for the numerical simulation of mass flow propagation
SANDRA M. BRAUMANN
Sensitivität von Gletscher in den Ostalpen gegenüber Klimawandel Die Reaktion von vergletscherten Gebieten auf Klimawandel in der Vergangenheit und Gegenwart und Implikationen für die Zukunft
JULIA KRENN Optimizing the choice and parameterization of modelling tools for the motion of rapid mass movements
I PUTU KRISHNA WIJAYA Contribution of Engineering Geology to Landslide Hazard Assessment in Volcanic Rock
XIAOGANG GUO Hypoplastic constitutive model for debris materials20
GUOPING LEI Landslide reinforced by piles Analytical, numerical analysis and centrifuge tests
SHUN WANG A visco-hypoplastic constitutive model for soil creep
JAKOB GROHMANN Systematische Gehölzpflanzung bei Infrastrukturprojekten
STEPHAN HÖRBINGER Ökosystemdienstleistungen ingenieurbiologischer Maßnahmen auf unterschiedlichen Skalierungsebenen
ALEXANDRA MEDL ,Green Walls' Materialien und Methodik zu Vegetationsentwicklung und Mikroklima an begrünten Spritzbetonwänden in Tirol42
OMAROVA DINARA Das Wurzelwachstum von Salix purpurea in Böden verschiedener Korngrößen
MANUEL SOKOPP Untersuchungen von Weidenspreitlagen an schiffbaren Binnenfließgewässern
MAGDALENA VON DER THANNEN Ein Life Cycle Assessment Modell für Ingenieurbiologie Entwicklung einer Bewertungsstrategie ingenieurbiologischer Bauwerke
CLEMENS WEISSTEINER

Georg Nagl

Murenmessbauwerk

Zur Bemessung von Bauwerken, die dem Schutz gegen alpine Naturgefahren (Muren, Lawinen, Steinschlag und Rutschungen) dienen, ist die Kenntnis jener Einwirkungen notwendig, welche durch die entsprechenden Prozesse auftreten können. Die Ermittlungen von Kraftgrößen von Muren in unterschiedlichsten Veröffentlichungen setzten sich jedoch vorwiegend aus Laborversuchen und von Schadereignissen Rückrechnungen zusammen. Laborversuche große dynamische weisen Skalierungsprobleme auf, wie auch bei Rückrechnungen nur grobe Annahmen von Muranpralldrücken entstehen. Es finden sich nur sehr wenige direkte Messungen von Anpralldrücken durch reale Murgänge. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit von direkten Messungen von Muranpralldrücken und deren Parametern für die Dimensionierung. Um eine Vergleichbarkeit 711 gewährleisten sind mehrere Messungen notwendig. Da ein Murgang jedoch eine relative seltene Ereignishäufigkeit aufweist, war es notwendig ein Messgebiet mit einer hohen Frequenz an Murgängen zu finden. Dies wurde im Gadria Wildbach in Südtirol (Autonome Provinz Bozen) gefunden. Ein weiterer Vorteil ist, dass jenes Gebiet mit Monitoring Stationen ausgestattet ist und eine gut dokumentierte Datengrundlage vorweist. Zur Messung von realen Anprallkräften und zur Bestimmung notwendiger Parameter wie Dichte, Geschwindigkeit und Abflusshöhe, wurde ein Messbauwerk errichtet. Dieses Bauwerk wurde mit 32 Sensoren ausgestattet, die die entstehenden Kräfte an der Front sowie Fließgeschwindigkeiten und die Interaktion mit dem Bauwerk selbst, sowie den Abtrag der Kräfte in den Untergrund durch Bodendrucksensoren erfassen. Zusätzlich Parameter bestimmt, die für werden jene ein Prozessverständnis dienen. Der gesamte Aufbau soll ein besseres Verständnis des Prozesses und deren Einwirkungen auf Schutzbauwerke liefern.

Keywords: Mure, Impact, Monitoring

1 Einleitung

Alpine Regionen sind oft katastrophalen Massenverlagerungsprozessen ausgesetzt, einige dieser alpinen Naturkatastrophenprozesse sind Muren, Rutschungen und Steinschlag. Muren sind gravitative, schnell fließende Verlagerungsprozesse welche aus Geröll, Erdmaterial und Wasser bestehen. Die hohen Geschwindigkeiten wie auch die Fähigkeit, große Blöcke zu transportieren, sind Gründe für das große Schadenspotential eines Murganges. Zum Schutz gegen diese gravitativen Naturgefahren können aktive Schutzmaßnahmen ergriffen werden, wie z.B. Schutzbauwerke. Für die Konstruktion dieser Bauwerke sind Bemessungswerte notwendig. Durch die außerordentlich hohen Anprallkräfte sowie die Unvorhersagbarkeit der Ereignisse, erweist sich die direkte Messung jedoch als besonders

To design technical mitigation structure against debris flows in torrents it is important to define realistic design impact loads. Presented impact forces were mostly derived from back calculations of past events and yielded a rough estimation. The majority of scientific publications of impact force are based on small scale experiments in laboratories, but the transfer to real scale problems is limited due to scaling issues. Monitoring in real scale of debris flows is necessary to understand the process and the apparent phenomena. The Gadria valley in the Autonomous Province of Bozen-Bolzano is one of the rare areas were debris flows frequently occur. Therefore the Gadria torrent is already equipped with a monitoring station to provide data to analyze the occurring debris flows. To measure real scale impact forces of a debris flow and the variables that are necessary to calculate and understand the impact process and the debris flow/structure/ground interaction, a special monitoring check dam is designed and will be built in September 2016. An arrangement of 38 sensors will measure the impact forces on the check dam, the acceleration of the construction and the interaction with the ground. Also the pore water pressures, weights and heights of the debris flows will be recorded. This arrangement of sensors should help to understand the debris flow structure interaction to facilitate the calibration of numerical models and to improve guidelines for national standards.

Keywords: Debris flow, Impact, Monitoring

schwierig. Weltweit wurden nur wenige Messungen durchgeführt um die Anprallkräfte von Murgängen abzuschätzen [4, 11 ,14 ,12]. Der Großteil der veröffentlichten Daten stammt aus Laborversuchen und Rückrechnungen von Schadereignissen. Jedoch weist jede dieser Methoden Schwächen auf. Laborversuche sind großen Skalierungsfehlern unterworfen, da sie die dynamischen Mechanismen und Komponenten oft nur ungenügend darstellen können. Auch Rückrechnungen weisen große Ungenauigkeiten durch die oft unbekannten und abgeschätzten Prozessparameter auf. Der Prozess und die Mechanismen sowie die tatsächlich erreichten Kraftgrößen bei einem Murenanprall sind noch weitgehend unbekannt; dies ergibt sich auch durch die Mannigfaltigkeit des Murenprozesses an sich [6, 9].

Monitoring spielt eine große Rolle in der Erforschung von

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Murgängen. Es dient zur Bestimmung der Auslösemechanismen bis hin zu dem Ablagerungsverhalten. Viele Regionen der Welt besitzen solche Monitoring-Stationen, z.B. China [13], Japan [10], Italien [8], und Österreich [5,7]. Jedoch fehlt es an einer permanenten Messstation für Murenanprallkräfte die die notwendigen Parameter und die Prozesse ausreichend beschreiben. Aus diesem Grund wurde ein Messbauwerk im September 2016 in einem fundiert untersuchten und überwachten Wildbach aufgebaut. Das Ziel dieses Bauwerkes ist es, die einwirkenden Kräfte zu bestimmen und die Interaktion mit dem Bauwerk und dem Untergrund zu analysieren. Für dieses Vorhaben werden die Fließgeschwindigkeit, Dichte, Abfluss, Fließtiefe, Anprallkräfte, Gewicht sowie Porenwasserdruck und die Scherkräfte gemessen. Weiters erfolgt zusätzlich eine Messung der Erddrücke unterhalb des Fundamentes sowie der Spannungen der Bewehrung an 8 Punkten innerhalb des Bauwerkes. Diese kurze Übersicht möchte einen Überblick über dieses Bauwerk und die methodische Vorgangsweise geben.

2 Methode

Für die Bemessung aktiver Schutzmaßnahmen wie Schutzbauwerken werden für die Dimensionierung und Planung Einwirkungen benötigt. Diese Einwirkungen setzen sich zusammen aus Kraftgrößen, Lokalität und der Form der Lastverteilung. Einwirkungen erzeugen Verdrehungen, Verschiebungen und Spannungen innerhalb von Bauteilen und Bauwerken. Diese Kräfte müssen anschließend, wenn man dem Verlauf der Kräfte folgt, in den Untergrund abgetragen werden. Jede dieser Stationen wird in dieser Arbeit einzeln betrachtet: Beginnend bei den Prozessparametern, welche die Charakteristika der Muren beschreiben, bis hin zu den Einwirkungen weiter zu den Bauwerk bzw. Bauteil Reaktion bis hin zur Abtragung in das Erdreich (siehe Abbildung 1).







Eine herausfordernde Aufgabe ist es, jene Eigenschaften abzuschätzen, die auch in weiterer Folge dazu verwendet werden können, die Einwirkungen auf Schutzbauwerke zu bestimmen. Häufig werden die Fließgeschwindigkeit, Dichte und Fließhöhe verwendet, um dies darzustellen [2]. Diese Kenngrößen werden mit Lastplatten, Videoaufzeichnungen und Ultraschall-Abflusshöhenmessung ermittelt.

Station 2. Einwirkungen:

Um die enormen Kräfte messen zu können, die Werte von bis zu mehreren 100kN/m² erreichen können [12, 14], werden Kraftmesszellen mit einer Nenngröße bis zu 2 Meganewton verwendet. 14 dieser Messzellen sind auf der Anprallseite des Bauwerkes montiert (siehe Abbildung 2). Dies ermöglicht eine flächige Darstellung der Verteilung sowie auch die Unterscheidungsmöglichkeit eines Einzelanpralles zu einem flächigen fluviatilem Druck.

Station 3. Bauwerk:

Die Einwirkungen des Murenanpralles führen zu Verschiebungen, Schwingungen und Spannungen innerhalb des Bauwerkes. Werden die entgegenwirkenden Größen des Bauwerkes überschritten, führt dies zu einem Versagen des Bauwerkes. Betrachtet man nun die innere Standsicherheit, spiegelt sich diese in der Spannung innerhalb des Bauwerkes wieder. Diese wird mittels 8 Dehnmesstreifen an der Bewehrung gemessen. Schwingungen werden mittels eines dreidimensionalen Beschleunigungsaufnehmers innerhalb des Bauwerkes erfasst.

Station 4. Grund:

Folgt man den einwirkenden Kräften, werden diese zuletzt in den Untergrund abgeleitet. Um diesen Prozess beschreiben zu können sind 9 Erddruckmessdosen unterhalb des Fundamentes installiert. Diese helfen bei der Darstellung der entstehenden Erddruckverteilung infolge des Anpralles eines Murenereignisses.



University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren



Abbildung 3: Murenmessbauwerk in der Bauphase

3 Conclusio:

Ziel dieser Arbeit ist es, ein besseres Prozessverständnis des Murganges und auch seiner Einwirkungsmechanismen zu erlangen, um realistische Dimensionierungswerte für die Konstruktion von Schutzbauwerken zu erhalten.

Literaturverzeichnis:

- ARATTANO, M.; COVIELLO, V.; CAVALLI, M.; COMITI, F.; MACCONI, P.; THEULE, J.; CREMA, S. (2015): BRIEF COMMUNICATION: A NEW TESTING FIELD FOR DEBRIS FLOW WARNING SYSTEMS. IN NAT. HAZARDS EARTH SYST. SCI. 15 (7), PP. 1545– 1549. DOI: 10.5194/NHESS-15-1545-2015.
- [2] BERTI, M.; GENEVOIS, R.; LAHUSEN, R.; SIMONI, A.; TECCA, P. R. (2000): DEBRIS FLOW MONITOR-ING IN THE ACQUABONA WATERSHED ON THE DO-LOMITES (ITALIAN ALPS). IN PHYSICS AND CHEMIS-TRY OF THE EARTH, PART B: HYDROLOGY, OCEANS AND ATMOSPHERE 25 (9), PP. 707–715.
- [3] COMITI, F.; MARCHI, L.; MACCONI, P.; ARATTANO, M.; BERTOLDI, G.; BORGA, M. ET AL. (2014): A NEW MONITORING STATION FOR DEBRIS FLOWS IN THE EUROPEAN ALPS: FIRST OBSERVATIONS IN THE GADRIA BASIN. IN NATURAL HAZARDS 73 (3), PP. 1175–1198. DOI: 10.1007/s11069-014-1088-5.

- [4] HU, K.; WEI, F.; LI, Y. (2011): REAL-TIME MEAS-UREMENT AND PRELIMINARY ANALYSIS OF DEBRIS-FLOW IMPACT FORCE AT JIANGJIA RAVINE, CHINA. IN EARTH SURF. PROCESS. LANDFORMS 36 (9), PP. 1268–1278. DOI: 10.1002/ESP.2155.
- [5] HÜBL, J.; SCHIMMEL, A.; KOGELNIG, A.; SURI-ÑACH, E.; VILAJOSANA, I.; MCARDELL, B. W. (2013): A REVIEW ON ACOUSTIC MONI TORING OF DEBRIS FLOW. IN INT. J. SAFE 3 (1), PP. 105–115. DOI: 10.2495/SAFE-V3-N2-105-115.
- [6] HUNGR, O.; MORGAN, G. C.; KELLERHALS, R. (1984): QUANTITATIVE ANALYSIS OF DEBRIS TOR-RENT HAZARDS FOR DESIGN OF REMEDIAL MEASURES. IN CAN. GEOTECH. J. 21 (4), PP. 663– 677. DOI: 10.1139/T84-073.
- [7] KAITNA, R.; PALUCIS, M. C.; YOHANNES, B.; HILL, K. M.; DIETRICH, W. E. (2016): EFFECTS OF COARSE GRAIN SIZE DISTRIBUTION AND FINE PARTI-CLE CONTENT ON PORE FLUID PRESSURE AND SHEAR BEHAVIOR IN EXPERIMENTAL DEBRIS FLOWS. IN J. GEOPHYS. RES. EARTH SURF. 121 (2), PP. 415–441. DOI: 10.1002/2015JF003725.
- [8] MARCHI, L.; ARATTANO, M.; DEGANUTTI, A. M. (2002): TEN YEARS OF DEBRIS-FLOW MONITORING IN THE MOSCARDO TORRENT (ITALIAN ALPS). IN GEOMORPHOLOGY 46 (1-2), PP. 1–17. DOI: 10.1016/S0169-555X(01)00162-3.
- [9] SCHEIDL, C.; CHIARI, M.; KAITNA, R.; MÜLLEG-GER, M.; KRAWTSCHUK, A.; ZIMMERMANN, T.; PROSKE, D. (2013): ANALYSING DEBRIS-FLOW IM-PACT MODELS, BASED ON A SMALL SCALE MODEL-LING APPROACH. IN SURVEYS IN GEOPHYSICS 34 (1), PP. 121–140. DOI: 10.1007/s10712-012-9199-6.
- [10] SUWA, HIROSHI; OKANO, KAZUYUKI; KANNO, TA-DAHIRO (2011): FORTY YEARS OF DEBRIS FLOW MONITORING AT KAMIKAMIHORIZAWA CREEK, MOUNT YAKEDAKE, JAPAN. IN ITALIAN JOURNAL OF ENGINEERING GEOLOGY AND ENVIRONMENT 2011, CHECKED ON 6/24/2016.
- [11] SUWA, HIROSHI; OKUDA, SETSUO; YOKO-YAMA, KOJI (1973): OBSERVATION SYSTEM ON ROCKY MUDFLOW. IN BULL.DISAS.PREV.INST, KYOTO UNIV., VOL 23. PARTS 3-4 NO.213.
- [12] WENDELER, C.; VOLKWEIN, A.; ROTH, A.; DENK, M.; WARTMANN, S. (2007): FIELD MEASUREMENTS AND NUMERICAL MODELLING OF FLEXIBLE DEBRIS FLOW BARRIERS. IN DEBRIS-FLOW HAZARDS

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

MITIG. MECH. PREDICT. ASSESS. MILLPRESS, ROT-TERDAM, PP. 681–687.

- [13] ZHANG, SHUCHENG (1993): A COMPREHENSIVE AP-PROACH TO THE OBSERVATION AND PREVENTION OF DEBRIS FLOWS IN CHINA. IN NATURAL HAZARDS 7 (1), PP. 1–23.
- [14] ZHANG, SHUCHENG; YUAN, JIANMO (1984): IM-PACT FORCES OF DEBRIS FLOW AND ITS DETECTION. IN MEMOIRS OF LANZHOU INSTITUT OF GLAZIOL-OGY AND CRYOPEDOLOGY CHINESE ACADEMY OF SCIENCE 1984 (04), CHECKED ON 8/18/2016.SS, R.; MEYER-OTTENS, C.; RICHTER, E.: STAHLBAU-BRANDSCHUTZ-HANDBUCH.

AUTOR/PHD:



Dipl.-Ing. Georg Nagl Peter-Jordan-Straße 82 1190 Vienna georg.nagl@boku.ac.at

Supervisor:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Johannes Hübl

Advisory team:

Assoc. Prof. Dr. Alfred Strauss

Privatdoz. Dipl.-Ing. Dr. Robert Hofmann

Assoc. Prof. Dr. Roland Kaitna

David Prenner

Hydrological trigger conditions leading to flash floods and debris flows

Due to its alpine setting, Austria is vulnerable for natural hazards like flash floods and debris flow. While hazard forecasting research mainly focused on the derivation of rainfallbased intensity-duration thresholds, other components of the water cycle, like soil saturation, groundwater level or snow melt were neglected. This study is devoted on the identification of characteristical hydrological trigger pattern of selected alpine catchments on a daily basis by using a processbased, rainfall-runoff model. Next, the simulated time series are statistically analyzed to capture which hydrological components were significant at the time of occurrence of documented geomorphological events during the past 100 years. Based on these findings and results from collaborative climate change modeling results, the effect of global warming caused shifts in weather dynamics on torrential hazard disposition is investigated. The results of the study shall improve the forecasting of torrential disasters as well as to better estimate of which process type – either flash flood or debris flow – is likely to be triggered at given hydrological boundary conditions.

Keywords flash floods; debris flows; hydrology; trigger conditions

1 Introduction

Geomorphic processes like flash floods and debris flows represent frequent natural hazards in alpine regions. In higher altitudes, considerable sediment volumes are mobilized rapidly by water and often deposited within human settlements in the valley floor. Although it is tried to mitigate risk for infrastructure and humans by implementation of mitigation measures within the catchment, in the channel, or immediately at the endangered sites, it is still difficult to forecast such events and counteract them with temporary facilities. So far, it is clear that meteorological triggers are either heavy rainstorm events or long lasting frontal precipitation. However, explicit threshold values - even for specific regions have a wide range and are afflicted with a high level of uncertainty. Recent research recognizes the importance of hydrological parameters like antecedent moisture to play a crucial role in process initiation [1].

Aim of the doctoral thesis is to identify critical hydrological conditions which advantage the genesis of torrential disasters. It should become clearer which components of the alpine water cycle are at an extreme before and at the day of event occurrence. A separate consideration of the process Hydrologische Auslösebedingungen von Murgängen und Flash Floods: Aufgrund der alpinen Lage, ist Österreich anfällig für Naturgefahren wie Murgängen und Flash Floods. Während sich die Gefahrenvorhersageforschung vorwiegend mit der Ableitung von regenbasierten Intensitäts-Dauer Grenzwerten beschäftigte, wurden andere Komponenten des Wasserkreislaufs wie Bodensättigung, Grundwasserstand oder Schneeschmelze vernachlässigt. Diese Arbeit ist daher der Identifizierung charakteristischer hydrologischer Auslösemuster gewidmet, wobei ausgewählte alpine Einzugsgebiete mittels eines prozess-basiertem Niederschlags-Abflussmodells hydrologisch simuliert werden. Anschließend erfolgt eine statistische Analyse der modellierten Zeitreihen um zu erfassen, welche hydrologischen Komponenten zum Zeitpunkt dokumentierter Wildbachereignis der vergangen 100 Jahre signifikant waren. Basierend auf diesen Erkenntnissen und einer hydrologischen Modellierung von prognostizierten Wetterdaten, wird der Effekt der globale Erwärmung auf die Disposition von Wildbachgefahren untersucht. Die Ergebnisse sollen zu einer besseren Gefahrenvorhersage führen als auch die Abschätzung verbessern, welcher Prozess – Flash Flood oder Murgang – bei gegeben hydrologischen Randbedingungen eher auftritt.

Schlüsselwörter Flash Floods, Murgänge, Hydrologie, Auslösebedingungen

type's flash flood and debris flow should bring a better delineation and understanding of why a certain event is triggered at given hydrological boundary conditions. Additionally, it is intended to study the impact of global change on alpine natural hazard patterns by accessing predicted weather data untill the year 2100.

2 Study areas

For the analysis, study catchments located in the higher alpine zone as well as lower alpine zone of Austria were chosen. The main selection criteria were rainfall/runoff data availability and a balanced occurrence of flash floods and debris flows. Due to credibility reasons, only catchments smaller than 400 km² were evaluated. In particular, following study sites were chosen: Ill/Suggadin, Pitztal, Pitten, Defreggental, Obere Isel, Obere Mur, Paltental and the Gailtal

3 Methodology

The first step consists in developing a process-based, hydrological rainfall-runoff model to simulate the water balance of the study catchments. Such a type of model enables an insight into the systems and allows capturing of internal fluxes and storage dynamics caused by the different hydrological

processes when a given precipitation is converted to according areal runoff [2]. Specialized for the mountainous environment, the processes of interception, evaporation, plant transpiration, slow and preferential percolation, groundwater flow, preferential percolation, surface and subsurface flow, capillary rise, snow accumulation, and snow melt were explicitly considered by the model. The water retention capabilities of the catchment are represented by using unique reservoirs for unsaturated soil, hill slope groundwater, interception, and snow. Spatial heterogeneity is considered by classification of the catchments into so called hydrological response units (HRU) which are derived from land-use, geology and height-above-nearest-drainage maps. Each HRU is described with an individual parameter set, flow routing system as well as reservoir components except for the hill slope groundwater. The modeling is carried out on a daily basis with weather input parameters precipitation and air temperature which were monitored at ground stations. Due to a lack of observation, evapotranspiration is derived empirically from temperature data and solar radiation considerations. During the model calibration and validation stage, runoff data and snow cover measurements from the NASA MODIS dataset are used. Since physical components temperature and precipitation have a strong relation with altitude, the model operates elevation resolved with a step size of 200 m.

After the modeling, the simulated results are linked with the Austrian Event database, which represents a comprehensive documentation of geomorphological events in Austria. In this study we focus on events which occurred during the last 100 years. The database provides information to process type, time of occurrence, location and transport volume for the registered events. This data combination allows to perform a statistical analysis of the hydrological component states at the day of event occurrence as well as the days before. Through a statistical analysis, characteristic hydrological conditions in the time series which precede an event should be identified. Appropriate statistical toolsets will rely on the Bayesian probability [3] or more newer approaches like machine learning and neural networks [4].

In the last step, the effect of climate change on the hydrological water cycle of the alpine catchment and the appearance of event trigger conditions is investigated. The already calibrated hydrological models are rerun with modelled meteorological data until the year 2100 for each of the study catchments. When seeking for the already known trigger pattern in future time series, it can be estimated how flash flood and debris flow characteristics will change.

4 Conclusion

This doctoral thesis consist of three parts. First, a processbased hydrological run-off model is developed to capture the water cycle in the study catchments. Secondly, a statistically analysis is performed to identify hydrological trigger conditions of debris flows as well as flash floods. In the last step, the impact of climate change on geomorphological process setup is evaluated by modeling with predicted weather data up to the year 2100. Aim of this work is to improve forecasting and to estimate the future development of alpine natural hazards.

5 References

[1] E. Napolitano, F. Fusco, R. L. Baum, J. W. Godt, and P. De Vita, "Effect of antecedent-hydrological conditions on rainfall triggering of debris flows in ash-fall pyroclastic mantled slopes of Campania (southern Italy)," *Landslides*, Nov. 2015.

[2] M. Hrachowitz, H. Savenije, T. A. Bogaard, D. Tetzlaff, and C. Soulsby, "What can flux tracking teach us about water age distribution patterns and their temporal dynamics?," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 17, no. 2, pp. 533–564, Feb. 2013.

[3] M. Berti, M. L. V. Martina, S. Franceschini, S. Pignone, A. Simoni, and M. Pizziolo, "Probabilistic rainfall thresholds for landslide occurrence using a Bayesian approach: PROBABILISTIC RAINFALL THRESHOLD," *J. Geophys. Res. Earth Surf.*, vol. 117, no. F4, p. n/a-n/a, Dec. 2012.

[4] T.-C. Chang and R.-J. Chao, "Application of backpropagation networks in debris flow prediction," *Eng. Geol.*, vol. 85, no. 3–4, pp. 270–280, Jun. 2006.

[5] K. E. Taylor, R. J. Stouffer, and G. A. Meehl, "An Overview of CMIP5 and the Experiment Design," *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 93, no. 4, pp. 485–498, Apr. 2012.

Autor/PhD:

David Prenner¹ david.prenner@boku.ac.at

Supervisor/Advisory team:

Roland Katina¹ Markus Hrachowitz² Douglas Maraun³ Markus Stoffel⁴

¹Institute of Mountain Risk Engineering, Boku Vienna, Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien
²Water Resources, TU Delft, Stevinweg 1 / PO-box 5048, 2628 CN Delft / 2600 GA Delft
³Wegener Center for Climate and Global Change, Brandhofgasse 5, 8010 Graz
⁴Climate Research Group, University of Geneva, Site de Batelle,

Bat. D / 7 route de Drize, CH-1227 Carouge

Andreas Schimmel

Automatische Detektion alpiner Massenbewegungen mittels Infraschall- und seismischen Signalen

Die automatische Erkennung von alpiner Massenbewegungen wie Erdrutschen, Muren oder Lawinen gewinnt zunehmend an Bedeutung für Schutzmaßnahmen und Frühwarnung. Frühere Studien zeigten, dass solche Prozesse charakteristische seismische Signale und akustische Signale im Infraschall-Spektrum induzieren, die für die Ereignisdetektion verwendet werden können. Bislang wurde jedoch kein System entwickelt, das eine Kombination beider Technologien zur automatischen Detektion von Muren, Erdrutschen oder Lawinen verwendet.

Diese Arbeit zielt darauf ab, ein System zu entwickeln, welches alpine Massenbewegungen mit hoher Genauigkeit in Echtzeit direkt am Sensorstandort basierend auf Infraschall und seismische Signale detektiert. Das entwickelte System besteht aus einem Geophon, einem Infraschall-Sensor und einem Mikrocontroller, worauf ein speziell entwickelten Detektionsalgorithmus ausgeführt wird. Zukünftige Arbeiten versuchen, mehr Informationen aus den seismischen und Infraschall-Signale zu erhalten, um eine automatische Identifikation der Prozessart und der Größe eines Ereignisses zu ermöglichen. Derzeit ist das System auf mehreren Wildbächen in Österreich, der Schweiz und Italien installiert und diese Tests zeigen vielversprechende Ergebnisse.

Keywords: Infraschall, seismische Signale, Muren, Detektions-System The automatic detection of sediment related disasters like landslides, debris flows and debris floods, gets increasing importance for hazard mitigation and early warning. Past studies showed that such processes induce characteristic seismic signals and acoustic signals in the infrasonic spectrum which can be used for event detection. So already many studies has been done on signal processing and detection methods based on seismic or infrasound sensors. But up to date no system has been developed which uses a combination of both technologies for an automatic detection of debris flows, debris floods or landslides.

This work aims to develop a system which is based on one infrasound and one seismic sensor to detect sediment related processes with high accuracy in real time directly at the sensor site. The developed system compose of one geophone, one infrasound sensor and a microcontroller where a specially developed detection algorithm is executed.

Further work tries to get out more information of the seismic and infrasound signals to enable an automatic identification of the process type and the magnitude of an event. Currently the system is installed on several test sites in Austria, Switzerland and Italy and these tests show promising results.

Keywords: infrasound, seismic signals, debris flow, debris flood, detection system

1 Einleitung

Naturgefahren wie Muren, Hangrutschungen oder Lawinen werde, durch die rasche sozio-ökonomische Entwicklung alpiner Gebiete sowie den Klimawandel, zunehmend zu einer Gefahr für Menschen und Sachwerte. Behörden versuchen Siedlungen und Verkehrswege durch aktive Maßnahmen (z.B. Rückhaltesperren, etc.) und/oder passive Maßnahmen (z.B. Raumplanung, Evakuierungen, Schließen von Straßen und Eisenbahnen im Falle einer akuten Gefahr) zu schützen. Diese Maßnahmen, insbesondere passive Ansätze erfordern zuverlässige Daten und Informationen aus Monitoring- und Frühwarnsystemen. Kenntnisse über das Vorkommen und die Häufigkeit der alpine Massenbewegungen und Informationen über ihrer Art und Größe können regionale oder lokale Behörden unterstützen das Risiko eines solchen Gefahren zu reduzieren. Dieses Projekt hat zum Ziel, eine zuverlässige Methode zur Detektion und Identifizierung von Massenbewegungs-Prozessen zu schaffen. Es existieren bereits verschiedene Ansätze zur Identifikation dieser Prozesse mit Infraschall [1][2][3] oder seismische Signale [4][5], jedoch wurde kein Verfahren entwickeln, welches eine Kombination von beider Technologien verwendet und versucht, allgemeine Identifikationsregeln für Ereignis-Typ und Größe zu definieren. Die Korrelation der Infraschall und seismische Signale, soll die Zuverlässigkeit des Systems verbessern. Diese Verbesserungen sind möglich, weil die Vorteile beider Technologien genutzt und die Nachteile minimiert werden können [6] (z. B. seismisch: geringe Störungen durch Wind und Wetter, aber starke Abhängigkeit von der Geologie sowie hohe Dämpfung mit zunehmender Entfernung zwischen Massenbewegung und Sensor; Infraschall: geringe Dämpfung in der Luft bei lokalen Distanzen, aber hohe Störgeräusch durch Wind).

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

2 Detektions-System

Die Grundidee für das Detektions-System ist, eine Aufbau mit einem Infraschall- und einem seismischen Sensor am selben Standort, mit einer Datenverarbeitung in Echtzeit direkt vor Ort mittels Mikrocontroller. Diese Lösung kann ohne großen Aufwand in der Nähe eines Wildbaches installiert werden und bietet somit eine praktische und kostengünstige Lösung für die Frühwarnung. Das Anwendungsgebiet eines solchen Systems könnte z.B. der Schutz von Straßen und Eisenbahnen durch Steuerung einer Ampel sein. Zur automatisch Erkennung von Murgängen basierend auf seismische und Infraschall-Daten musste eine Detektions-Algorithmus entwickelt werden, welcher Ereignisse so früh wie möglich in einem möglichst einfachen Verfahren ohne viele Fehlalarme identifiziert, so dass der Algorithmus in Echtzeit direkt am Sensorstandort ohne großen Rechenaufwand (z.B. auf einem Mikrocontroller) ausgeführt werden kann. Diese Anforderungen führte zu einer Analyse der Entwicklung der Amplituden der Signale in einem Zeit-Frequenzbereich. Dazu wird das Infraschall-Signal und das seismische Signal mittels Fast-Fourier Transformation (FFT) verarbeitet und der Detektionsalgorithmus vergleicht die Entwicklung der Signale im Zeitverlauft in charakteristischen Frequenzbänder für Muren. Das System hat zwei unterschiedliche Niveaus der Alarmierung (Level 1/Level 2), die von den

Amplituden des Infraschall-Signal abhängig sind, um zwischen großen und kleinen Ereignisse zu unterscheiden. Nähere Details zum Systemaufbau und zum Detektions-Algorithmus sind in [7] und [8] erhältlich. Die automatische Erkennung eines Ereignisses wird durch eine minimale Größe des Ereignisses, Wetterbedingung, Entfernung und Hintergrundrauschen begrenzt.

3 Ergebnisse Muren-Detektion

Abbildung 1 zeigt eine charakteristischen Verlauf der Infraschall- und seismischen Signale die bei einem Murgang am 16.08.2015 am Lattenbach in Tirol aufgezeichnet wurden. Am Lattenbach, mit einem Einzugsgebiet von 5,3 km², wird eine Muren-Monitoring-Station vom Institut für Alpine Naturgefahren betrieben, welche seit 2004 mit Infraschall und seismischen Sensoren ausgestattet ist. Die Mure am Lattenbach vom 16.08.2015 wies einem Spitzenabfluss von 16 m3/s, und eine Gesamtvolumen von 10000 m3 auf mit einer Ereignisdauer von etwa 1500 s. Die max. Infraschallamplituden reichten bis zu 1,5 Pa und die max. seismische Amplituden erreichten bis zu 200 µm/s. Das Ereignis wurde durch den Detektionsalgorithmus bei Sek. 2859 für die Level 1 und bei 2994 s für die Level 2 detektiert. Somit betrug die Vorwarnzeit zwischen der Detektion und dem Passieren des ersten Murschubs am Sensorstandort (bei 2960 s) etwa 100 s.



Bild 1 Infraschall und seismische Daten des Murgangs am Lattenbach am 16.08.2015. Signale dargestellt mit einer gemeinsamen Zeitbasis. (a) Infraschall-Zeitreihe; (b) Seismogramm; (c) Spektrum des Infraschall-Signals; (d) Spektrum des seismischen Signals; (e) Pegelstand

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren



Bild 2 Übersichtskarte der Testgebiete seit 2013.

In den Sommermonaten 2013 wurden das System an fünf Wildbächen in Österreich installiert, die als Testgebiet für die Detektion von Muren dienen. Im Jahr 2015 wurden dann noch zwei weitere Stationen in Italien und eine Station in der Schweiz installiert. Die Karte in Abbildung 2 bietet einen Überblick der geographischen Lage der Testgebiete. Eine Übersicht über die Anzahl der Ereignisse bei den verschiedenen Test-Sites und den Detektionen oder Fehlalarme für Muren seit der Saison 2013 ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Ereignisdetektionen werden in kleinere Ereignisse aufgeteilt (Detektion Level 1 (L1), meist kleine murartige Prozesse und höhere Abflüsse mit Sedimenttransport) und größere Ereignisse (Level 2 Detektionen (L2), reale Muren und murartige Ereignisse). Alle größeren Ereignisse (L2) konnten an jedem Standort in der Testperiode detektiert werden und nur vier

 Tabelle 1
 Überblick Ereignisse und Detektionen in den Saisonen 2013-2015

kleinere Ereignisse (Level 1) konnten nicht detektiert werden. Nur sechs Fehlalarme traten in den letzten Jahren auf und 14 Detektionen konnten nicht eindeutig als Ereignis klassifiziert werden (neun davon am Wartschenbach wegen technischen Problemen).

4 Zusammenfassung

Dieser Beitrag präsentiert einen Ansatz für ein Detektionssystem für Murgänge, welches niedrige Kosten aufweist, einfach zu installieren ist und für verschiedene Arten von alpinen Massenbewegungen verwendet werden kann. Die Kombination von Infraschall und seismischen Sensoren kann die Detektionswahrscheinlichkeit erhöhen und Fehlalarme reduzieren. So war es möglich, alle größeren Ereignisse im Zeitraum von 2013 bis 2015 auf acht verschiedenen Testgebieten zu erkennen, während nur sechs Fehlalarme in dieser Zeit registriert wurden. Jedoch muss die Sensorik und der Standort eines solchen Systems sorgfältig gewählt werden und die Parameter der Detektionsalgorithmus müssen auf die Anwendung des Systems und dem Hintergrundrauschen des Aufstellungsortes angepasst werden.

Zusammengefasst bestätigt diese Arbeit, dass Murgänge und murartige Ereignisse seismische und Infraschall-Signale mit definierten Eigenschaften erzeugen, die an sehr unterschiedlichen Versuchsstandorte und unter verschiedenen Umweltbedingungen reproduzierbar sind und zeigt vielversprechende Ergebnisse bei der Erkennung von alpinen Massenbewegungen basiert auf einer Kombination von seismischen und Infraschall Sensoren.

test site	year	detected	detection	detection	false	not classifiable	not detected
		events	L1	L2	alarms	detections	events
Lattenbach	2013	1	1	0	0	1	0
	2014	2	2	0	1	0	0
	2015	3	0	3	0	0	1
Dristenau	2013	18	14	4	0	1	0
	2014	7	7	0	0	0	0
	2015	12	9	3	0	0	1
Farstrinne	2013	0	0	0	1	0	0
	2014	2	0	2	0	0	0
	2015	1	0	1	0	0	0
Schüsserbach	2013	3	2	1	0	0	0
	2014	0	0	0	0	0	0
	2015	2	2	0	0	1	0
Wartschenbach	2013	5	5	0	0	9	0
	2015	1	1	0	0	0	0
Illgraben	2015	6	2	4	0	1	0
Gadria	2015	1	1	0	1	0	0
Marderello	2015	3	2	1	3	1	2
	Sum:	67	48	19	6	14	4

Seite 9

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Literatur

- CHOU, H.T., CHANG, Y.L. AND ZHANG, S.X.
 (2010), ACOUSTIC SIGNALS AND GEOPHONE RE-SPONSE OF RAINFALL-INDUCED DEBRIS FLOWS. J. OF CHINESE INSTITUTE OF ENGINEERS
- [2] MARCHETTI, E., RIPEPE, M., ULIVIERI, G. AND KO-GELNIG, A. (2015), INFRASOUND ARRAY CRITERIA FOR AUTOMATIC DETECTION AND FRONT VELOCITY ESTIMATION OF SNOW AVALANCHES: TOWARDS A REAL-TIME EARLY-WARNING SYSTEM, NATURAL HAZARDS AND EARTH SYSTEM SCIENCES, 15, 2545-2555
- [3] ZHANG, S., HONG, Y., YU, B. (2004), DETECTING INFRASOUND EMISSION OF DEBRIS FLOW FOR WARNING PURPOSE, 10. CONGRESS INTERPRAEVE-MENT
- [4] BURTIN, A., HOVIUS, N., & TUROWSKI, J. M. (2016). SEISMIC MONITORING OF TORRENTIAL AND FLUVIAL PROCESSES. EARTH SURFACE DYNAMICS, 4(2), 285–307.
- [5] COVIELLO, V., ARATTANO, M., TURCONI, L. (2015), DETECTING TORRENTIAL PROCESSES FROM A DISTANCE WITH A SEISMIC MONITORING NET-WORK. NATURAL HAZARDS 78(3), 2055-2080
- [6] KOGELNIG, A. (2012), DEVELOPMENT OF ACOUS-TIC MONITORING FOR ALPINE MASS MOVEMENTS, PHD THESIS, UNIVERSITY OF NATURAL RE-SOURCES AND LIFE SCIENCES (BOKU), VIENNA, INSTITUTE OF MOUNTAIN RISK ENGINEERING
- [7] SCHIMMEL, A., HÜBL, J. (2014), APPROACH FOR AN EARLY WARNING SYSTEM FOR DEBRIS FLOW BASED ON ACOUSTIC SIGNALS. IN: LOLLINO, G. ET AL. (ED.), ENGINEERING GEOLOGY FOR SCIETY AND TERRITORY, VOLUME 3, S. 55-58

[8] SCHIMMEL, A., HÜBL, J. (2015), AUTOMATIC DE-TECTION OF DEBRIS FLOWS AND DEBRIS FLOODS BASED ON A COMBINATION OF INFRASOND AND SEISMIC SIGNALS. LANDSLIDES, ONLINE FIRST, ISSN 1612-510X

Autor/PhD:



Andreas Schimmel

Peter-Jordan-Straße 82

1190 Wien

andreas.schimmel@boku.ac.at

Betreuerteam:

Johannes Hübl u.w.

Peter Schön

Terrain-based Parameter for Predicting Mountain Snow Redistribution

The dissertation investigates how terrain-based parameters can be used to predict the redistribution of snow by wind. In alpine areas, wind and snow drift are the dominating factors determining snow distribution and accumulation. The distribution of snow depths in such areas is consequently characterized by a high spatial variability that is difficult to evaluate and quantify, but at the same time of high interest for avalanche forecasting. For example, the amount of snow present in avalanche starting zones is a key element for evaluating avalanche hazard. To estimate snow redistribution qualitatively and quantitatively, we merge a terrain-based parameter Sx, which characterizes the degree of shelter or exposure of a grid point provided by the upwind terrain, with estimations of quantity of snow transported by the wind, provided by snow particle counters. The method results are compared with measured changes in snow heights, obtained with terrestrial laser scanning (TLS). Data and results are from the Col du Lac Blanc research site in the French Alps. We use a high raster resolution of 1 m, which is required when assessing the snow-redistribution situation in highly structured terrain or in the starting zones of small and medium-sized avalanches.

Keywords < Terrain-based parameter; Schnee; Lawinen; Modell;>

The PhD work investigates how terrain-based parameters can be used to predict the redistribution of snow by wind. In alpine areas, wind and snow drift are the dominating factors determining snow distribution and accumulation. The distribution of snow depths in such areas is consequently characterized by a high spatial variability that is difficult to evaluate and quantify, but at the same time of high interest for avalanche forecasting. For example, the amount of snow present in avalanche starting zones is a key element for evaluating avalanche hazard.

The research involves three methods:

i) Terrain-based parameter (Sx):

The terrain-based parameter Sx characterizes the wind scalar and quantifies the degree of shelter or exposure of a grid point provided by the upwind terrain. In the course of the PhD work, the parameter was modified and adapted several times and optimized to the research site and the available data sets.

ii) Terrestrial laser scanning (TLS):

Terrestrial laser scanning (TLS) is used increasingly in snow and avalanche research for accurately mapping snow depths over an area of several square kilometers. During the research, we used TLS to compare the estimated snow depths obtained from the terrain-based parameter to the measured changes in snow depths and absolute snow depths (snow distribution). The abilities of TLS for obtaining input parameters for dynamic avalanche modeling were also shown.

iii) Snow particle counters (SPC)

Snow particle counters (SPC) count drifting snow particles and provide an estimation of the mass of drifting snow particles per time and area, expressed as snow flux. Thus, the SPC provide data about the duration and intensity of drifting snow events, two important factors not accounted for by the terrain parameter Sx. In our current study, we analyze how snow flux data can be merged with Sx for a better quantitative estimation of wind drift.

The dissertation is structured as a cumulative. I have so far pusblished ne paper as first author and one as second author. The abstracts of the two publications follow:

 Prokop, A., Schön, P., Singer, F., Pulfer, G., Naaim, M, Thibert, E und Soruco, A., 2015: Merging terrestrial laser scanning technology with photogrammetric and total station data for the determination of avalanche modeling parameters. Cold Regions Science and Technology, 110, 223-230.

Dynamic avalanche modeling requires as input the volumes and areas of the snow released, and consequently the fracture heights. Determining these parameters requires high-resolution spatial snow surface data from before and after an avalanche. In snow and avalanche research, terrestrial laser scanners are used increasingly to efficiently and accurately map snow surfaces and depths over an area of several km². In practice however, several problems may occur, which must be recognized and accounted for during post-processing and interpretation. Thus, we combine terrestrial laser scanning with photogrammetry, total station measurements and field snow observations to document and accurately survey an artificially triggered avalanche at the Col du Lautaret test site (2058 m) in the French Alps. The ability of TLS to determine avalanche modeling input parameters efficiently and accurately is shown, and we demonstrate how, merging TLS with the other methods facilitates and improves data post-processing and interpretation. Finally, we present for this avalanche the data required for the parameterization and validation of dynamic avalanche models.

 Schön, P., Prokop, A., Vionnet, A., Vionnet, V., Guyomarc'hb, G., Naaim-Bouvet, F. und Heiser, M., 2015: Improving a terrain-based parameter for the assessment of snow depths with TLS data in the Col du Lac Blanc area. Cold Regions Science and Technology, 114, 15–26.

Wind and the associated snow drift are dominating factors determining the snow distribution and accumulation in alpine areas, resulting in a high spatial variability of snow depth that is difficult to evaluate and quantify. The terrain-based parameter Sx characterizes the degree of shelter or exposure of a grid point provided by the upwind terrain without the computational complexity of numerical wind field models. The parameter has shown to qualitatively predict snow redistribution with good reproduction of spatial patterns, but has failed to quantitatively describe the snow redistribution. By comparing the parameter with high-resolution snow surface data obtained through terrestrial laser scanning (TLS), we are able a) to identify areas of poor correlations between predicted and measured snow distribution and changes in snow depths, and b) to increase its ability to predict changes in snow depths by modifying the parameter, based on the TLS data and the terrain and wind conditions specific to our research site, the Col du Lac Blanc in the French Alps. We show how results improve if a snow surface model

is used for calculating the parameter instead of a digital elevation model, and demonstrate the effects of changing the parameter's maximum search distance and of raster smoothing. Our analyses and results are important steps in the improvements of the parameter's ability to predict changes in snow depths.

A second paper as main author is currently under revision:

Schön, P., Prokop, A., Naaim-Bouvet, F., Vionnet, V., Heiser, M., Guyomarc'h, G., Nishimura, K.: Merging a Terrain-Based Parameter with Blowing Snow Fluxes for Assessing Snow Redistribution in the Col du Lac Blanc Area

Wind and the associated snow transport are dominating factors determining the snow distribution and accumulation in alpine areas. These factors result in a high spatial variability of snow heights that is difficult to evaluate and quantify. In this study, we propose an efficient method for estimations of changes in snow heights during blowing snow events. We merge a terrainbased parameter Sx, which characterizes the degree of shelter or exposure of a grid point provided by the upwind terrain, with estimations of quantity of snow transported by the wind. This estimation is provided by snow particle counters (SPC) that estimate the snow flux, the mass of drifting snow particles per time and area. From the SPCs' point measurements of horizontal snow flux, a quantity of transported snow is derived, which is distributed over the terrain in dependency of a modified terrain-based parameter Sxm. The results are compared with measured changes in snow heights, obtained with terrestrial laser scanning (TLS). Data and results are from the Col du Lac Blanc research site in the French Alps. We use a high raster resolution of 1 m, which is required when assessing the snowredistribution situation in highly structured terrain or in the starting zones of small and medium-sized avalanches. Results show that the proposed method can estimate snow distributions based on a terrain parameter Sxm and measured snow flux data. It could reproduce patterns of snow redistribution and estimate changes in snow heights reasonably well, as shown by regression values (r) of 0.78 to 0.86. The derivation of Sxm and snow flux are specific to the research site and not yet generally applicable, and are formulations that should be calibrated when applied in studies with other terrain and weather characteristics. The calibration requires the alteration of two parameters only and can then be used for other regions.

The last paper includes most of the findings and developments of the PhD work. The original terrain-based parameter Sx has been successively improved and developed into a modified parameter Sxm. The research shows that it is a simple, but effective method to predict snow redistribution patters. We also showed that a quantitative method (with actual changes in snow depths as output) based on a modified terrain-based parameter Sxm and blowing snow flux data works in principle.

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Literatur

- [1] PROKOP, A., SCHÖN, P., SINGER, F., PULFER, G., NAAIM, M, THIBERT, E UND SORUCO, A., 2015: MERGING TERRESTRIAL LASER SCANNING TECH-NOLOGY WITH PHOTOGRAMMETRIC AND TOTAL STATION DATA FOR THE DETERMINATION OF AVA-LANCHE MODELING PARAMETERS. COLD REGIONS SCIENCE AND TECHNOLOGY, 110, 223-230.
- [2] SCHÖN, P., PROKOP, A., VIONNET, A., VIONNET, V., GUYOMARC'HB, G., NAAIM-BOUVET, F. UND HEISER, M., 2015: IMPROVING A TERRAIN-BASED PARAMETER FOR THE ASSESSMENT OF SNOW DEPTHS WITH TLS DATA IN THE COL DU LAC BLANC AREA. COLD REGIONS SCIENCE AND TECH-NOLOGY, 114, 15–26.

Autor/PhD:



Peter Schön, MSc

Olderdalsveien 94

9146 Olderdalen

Norwegen

Betreuerteam:

The dissertation is supervised by Prof. Dr. Johannes Hübl (BOKU, Institute of Mountain Risk Engineering; IAN). The dissertation committee comprises DI Dr. Alexander Prokop University Centre in Svalbard, UNIS) and HDR. Florence Naaim-Bouvet (Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture; IRSTEA, France).

Matthias Benedikt

What makes the difference? A comparison of computational tools for the numerical simulation of mass flow propagation

Geophysical mass flows such as snow and rock avalanches or debris flows represent a significant risk to mountain societies worldwide. Computer models have become standard to improve our understanding of observed events or even to anticipate possible future events, in order to reduce loss. There are currently quite a few software packages available supporting numerical simulations of the propagation of rapid mass flows. They differ in terms of the type of model used, functionalities, licensing (free or commercial) and usability. Examples of such tools are RAMMS (commercial), TITAN2D (freeware), DAN3D (commercial), PFC (commercial) or r.avaflow (open source). Aim (1) shall be achieved through various types of surveys and interviews with different user groups. Aim (2) relies on comparative simulations for a number of case studies, using identical input data. The case studies will consist of three debris flows (two in Austria, one in Italy) and four rock avalanches of varying complexity (three in Austria, one in New Zealand).

The present thesis aims at:

(1) Improving the understanding of the scientific impact of each tool and the comprehension of which groups of users (research & education, public administration, consultants) employ which software packages for which tasks. Further, exploring which functionalities different user groups expect of mass flow propagation models in order to guide the future development of useful computational tools.

(2) Providing an insight into the similarities and differences of the results and the performance of selected tools (r.avaflow, RAMMS, TITAN2D and DAN 3D) for various computational tasks. The outcomes shall support future users in the choice of the suitable software for their specific purpose.

Autor/PhD Kandidat:

Matthias Benedikt, MSc

matthias.benedikt@boku.ac.at

Betreuerteam:

Priv.-Doz. Dr. Martin Mergili

Univ.-Prof. Dr. Christian Zangerl

Assoc. Prof. Dr. Roland Kaitna

Sandra M. Braumann



Sensitivität von Gletscher in den Ostalpen gegenüber Klimawandel

Die Reaktion von vergletscherten Gebieten auf Klimawandel in der Vergangenheit und Gegenwart und Implikationen für die Zukunft

1 Allgemeines

Gletscher sind markante Elemente des alpinen Raums, die rasch auf Klimaschwanken reagieren [1, 2, 3]. Fluktuationen der Eismassen haben die alpine Landschaft nachhaltig geformt und prägnante geomorphologische Spuren hinterlassen aus denen sich räumliche und zeitliche Informationen zu früheren Gletscherständen ableiten lassen. Die Kartierung und Datierung von glazialen Ablagerungen und Schliffgrenzen gewähren nicht nur Einblicke ins Paläoklima, sondern tragen auch wichtige Daten zur Erstellung und Kalibrierung robuster Gletschermodelle bei, deren Ziel es ist, die zukünftige Entwicklung von Gletschern möglichst genau vorauszusagen.

Gegenstand des vorgelegten Forschungsvorhabens ist eine multidisziplinäre Gletscher- und Klimastudie in der Silvrettagruppe. Deren Gletschersysteme reagieren äußerst sensibel auf Änderungen der Sommertemperaturen und spiegeln Paläoklimaschwankungen u.a. in Form ausgeprägter Moränensequenzen wider [4]. Sie eignen sich damit hervorragend dazu, Klimasignale von Gletschern in den Ostalpen während der jüngsten Epoche der Erdgeschichte, des Holozäns, zu erfassen, bezüglich der Klimasensitivität zu interpretieren und darauf basierend Gletscherprognosen für das 21. Jahrhundert zu erstellen.

Neueste Entwicklungen in der Aufbereitung und Analytik kosmogener Nuklide liefern seit Kurzem das nötige geochemische Rüstzeug um eine umfangreiche zeitliche Einstufung von Gletscherschwankungen im Holozän durchzuführen [5, 6, 7, 8]. Mit Hilfe hochpräziser 10Be Expositionsdatierung können Moränen Alter zugeordnet werden, die Gletscherhochstände während holozäner Kaltphasen repräsentieren. Ergänzend werden Radiokarbondatierung und dendrochronologische Analysen eingesetzt werden um organische Ablagerungen in glazialen Sedimenten zeitlich einzuordnen. Die Kombination mehrerer unabhängiger Datierungsmethoden zusammen mit detaillierter geomorphologischer Kartierung der Gletschersysteme wird es ermöglichen, ein umfassendes Bild von Gletscher- und Klimabedingungen während der letzten 11.700 Jahre in der Silvretta zu erlangen. Die Eingliederung dieser Studie in einen größeren räumlichen Kontext (Österreichischer und Schweizer Alpenraum) unter Berücksichtigung von weiteren wichtigen Paläoklima- und Gletscherarchiven verspricht Hinweise auf die nach wie vor ungeklärten Auslösemechanismen von Klimaänderungen und die damit verbundenen Gletscherschwankungen zu geben.

Im Laufe der nächsten Jahrzehnte ist mit wachsenden Verlusten an Gletscherflächen zu rechnen, welche ökologische, ökonomische und sozialen Folge im Umfeld von glazialen Gebieten haben werden und sich unter anderem auf Wasserversorgung, schutzbedürftige Lebensräume, Biodiversität, Naherholung und Tourismus, Naturgefahren in Siedlungsräumen und die Nutzung von Wasserkraft auswirken können. Durch Erstellung eines robusten Gletschermodells für die Silvretta, in welches die neuen geochronologischen Daten eingebunden werden, wird es möglich sein, das Ausmaß der Veränderungen in Form aussagekräftiger Parameter wie beispielsweise Schmelzwasserspende, eisbedeckte Fläche und Höhe der Gleichgewichtslinie unter Annahme prognostizierter Klimaänderungen zu simulieren. Damit können quantitative Informationen zum Wandel des alpinen Raums in der Silvretta und in einem nächsten Schritt für die Ostalpen bereitgestellt werden.

2 Methoden

(1) Kartierung

Den Feldarbeiten werden die Beschaffung und Sichtung verfügbarer Geodaten (u.a. Digitale Höhenmodelle, Satellitenbilder, Orthofotos, historisches Bildmaterial, vorangegangene Kartierungen) und glaziologischer, hydrologischer und meteorologischer Zeitreihen vorangehen. Die Feldarbeiten selbst werden über zwei Sommersaisonen hinweg stattfinden und insgesamt in etwa sechs bis acht Wochen Kartierung und Proben-



ahme inklusive Drohnenbefliegung umfassen. Ziel der Kartierung ist die Erstellung einer detaillierten Geodatenbank für das Silvrettagebiet und das Verfassen von digitalem Kartenmaterial in Kollaboration mit der Geologischen Bundesanstalt Österreich.

(2) Datierung

Mittels ¹⁰Be Expositionsdatierung an Blöcken in verschiedenen Moränensequenzen im Silvrettagebiet wird eine präzise Chronologie holozäner Gletschervorstöße erstellt werden. Um aussagekräftige Altersdaten und damit eine kohärente Interpretation gewährleisten zu können, wird eine ¹⁰Be Gesamtprobenanzahl von mindestens 70 Proben angestrebt. Die Beryllium-Extraktion und Analyse wird in enger Zusammenarbeit mit dem Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, NY und dem Lawrence Livermore National Laboratory, CA durchgeführt werden.

Sollten organische Stoffe und/oder ganze Baumstämme in Moränenablagerungen gesichtet werden, werden Radiokarbondatierung und Baumringanalyse als komplementäre Methode zur Datierung herangezogen werden.

(3) MATLAB-Modellierung der Gletscher- und Klimadynamik in der Silvretta

Als erster Schritt wird eine simple, prozessbasierte Modellierung von Paläogletscherständen unter Berücksichtigung glaziologischer Parameter (z.B. Gletscherlänge, Eismächtigkeit, Talbreite, Talgefälle) vorgenommen, welche die Ergebnisse der vorangegangenen Kartierung und Datierung heranzieht [9, 10, 11, 12]. Die daraus resultierenden Höhenlagen von Gletschergleichgewichtslinien werden in einem nächsten Schritt Eingang in ein Massenbilanzmodell finden um zu eruieren, wie empfindlich die Gletscher auf Klimaänderungen in der Vergangenheit reagiert haben [13, 14]. Das Massenbilanzmodell wird anhand von Daten bezüglich moderner, historischer und Paläo-Gletscherständen kalibriert werden. Während ein Großteil der gängigen Gletschermodelle ausschließlich auf Messreihen der maximal letzten 150 Jahre zurückgreift, wird es mit dem vorgeschlagenen Modellansatz und durch die Einbindung geochronologischer Daten möglich sein, Gletscherfluktuationen auf unterschiedlichen und vor allem längeren Zeitskalen zu betrachten, d.h. Dekaden, Jahrhunderte und Jahrtausende. Damit wird das räumliche und zeitliche Verständnis von holozänen Gletscherschwankungen in der Silvretta signifikant verbessert werden, da als Kalibrierungszeitraum neben der instrumentellen auch die geologische Zeitskala miteinbezogen wird. In Folge können sowohl Gletscheroszillationen seit der Industrialisierung, welche von anthropogenem Handeln beeinflusst worden sind, als auch natürliche Gletschervariabilität über Jahrhunderte und Jahrtausende hinweg simuliert werden. Die Erweiterung des Kalibrierungszeitraums ebnet den Weg für robuste Prognosen für die Zukunft, basierend auf kurz- und langzeitliche Klimaund Gletscherschwankungen. In einem weiteren Modellierungsschritt kann durch Variationen von Temperatur und Niederschlag im Massenbilanzmodell, welche sich an verschiedenen Emissionsszenarien orientieren, die Entwicklung von Gletschern in der Silvretta im 21. Jahrhundert prognostiziert werden.

Die zu erwartenden Ergebnisse sind einerseits relevant für die Energieproduktion in den kommenden Jahrzehnten, insbesondere unter dem Blickpunkt, dass die Illwerke AG mehrere Wasserkraftwerke in den betrachteten Einzugsgebieten betreibt (Obervermunt, Kleinvermunt, Kopswerk I und II, Rifawerk). Andererseits kann das Output der Gletschermodellierung wertvolle Informationen für Biodiversitätsforscher in der Region liefern, als Planungsgrundlage für Überlegungen von Moutain Risk Engineers dienen und von Interesse für Studien zum Wandel alpiner Räume im Allgemeinen sein.

3 Zu erwartende Ergebnisse

- Aktuelles glaziologische und geomorphologisches Kartenmaterial der Einzugsgebiete in der Silvretta mit hoher Auflösung; neues, georeferenziertes Bildmaterial und Videomaterial durch Drohnenbefliegung
- ¹⁰Be Moränenalter der Silvretta für das Holozän, d.h. zeitliche Abgrenzung von Perioden, in denen Gletscher in tiefere Lagen vorgedrungen sind. Dadurch kann insbesondere Einblick in die zeitliche und räumliche Struktur der holozänen Gletscherentwicklung gewonnen werden. Da historische und instrumentelle Aufzeichnungen mit der geologischen Zeitskala überlappen werden, kann überdies die Analytik von ,lowlevel⁽¹⁰Be auf Validität geprüft werden.
- Die Verknüpfung geochronologischer Datenreihen mit modernen Beobachtungen durch Integrierung in Gletschermodelle erlaubt erstens eine umfangreiche Kalibrierung zugunsten der Modellrobustheit, sodass verlässliche Aussagen bezüglich Gletscherfluktationen über längere Zeiträume hinweg und insbesondere hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung getroffen werden können. Zweitens können Rückschlüsse auf

Paläoklimabedingungen gemacht werden und infolgedessen die Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Entwicklung von Gletschern abgeschätzt werden.

Literatur

- [1] Oerlemans, J. (2005): Extracting a climate signal from 169 glacier records. Science, 308, 675-677.
- [2] Anderson, B.; Machintosh, A.; Stumm, D.; Laurel, G.; Kerr, T.; Winter-Billington, A.; Fitzsimons, S. (2010): Climate sensitivity of a high-precipitation glacier in New Zealand. Journal of Glaciology, 56, Issue 195, 114-128.
- [3] Jomelli, V.; Khodri, M.; Favier, V.; Brunstein, D.; Ledru, M.P.; Wagnon, P.; Blard, P.H.; Sicart, J.E.; Braucher, R.; Grancher, D.; Bourlès, D.L.; Braconnot, P.; Vuille, M. (2011): Irregular tropical glacier retreat over the Holocene epoch driven by progressive warming. Nature, 474, 196-199.
- [4] Hertl, A. (2001): Untersuchungen zur spätglazialen Gletscher- und Klimageschichte der österreichischen Silvrettagruppe. [Diss.]. University of Innsbruck.
- [5] Schaefer, J.M.; Denton, G.H.; Kaplan, M.; Putnam, A.; Finkel, R.C.; Barrell, D.J.A., Andersen, B.G.; Schwartz, R.; Mackintosh, A.; Chinn, T.; Schlüchter, C. (2009): High-Frequency Holocene Glacier Fluctuations in New Zealand Differ from the Northern Signature. Science, 324, 622-625.
- [6] Schimmelpfennig, I.; Schaefer, J.M.; Akçar, N.; Ivy-Ochs, S.; Finkel, R.C., Schluechter, C. (2012): Holocene glacier culmination in the Western Alps and their hemispheric relevance. Geology, 40, Issue 10, 891-894.
- [7] Goehring, B.M.; Schaefer, J.M.; Schluechter, C.; Lifton, N.; Finkel, R.C.; Jull, A.J.T.; Akçar, N.; Alley, R.B. (2011): The Rhone Glacier was smaller than today for most of the Holocene. Geology, 39, Issue 7, 679-682.
- [8] Ivy-Ochs, S.; Kernscher, H.; Reuther, A.; Preusser, F.; Heine, K.; Maisch, M.; Kubik, P.W.; Schluechter, C. (2008): Chronology of the last glacial cycle in the European Alps. Journal of Quaternary Science, 23 (6-7), 559-573.
- [9] Oerlemans, J. (2011): Minimal glacier models. Second Print. Igitur, Utrecht Publishing & Archiving Services, Universiteitsbibliotheek Utrecht, 2011.
- [10] Rupper, S.; Roe, G.; Gillespie, A. (2009): Spatial patterns of Holocene glacier advance and retreat in Central Asia. Quaternary Research, 72 (3), 337-346.

- [11] Keeler, D.; Rupper, S.; Schaefer, J.M.; Finkel, R.C. (2014): Climate Reconstructions for the Younger Dryas in Graubünden, Swiss Alps: Using Glacier Geometry and Hypsometry to Estimate Equilibrium Line Altitude [abstract]. AGU Fall Meeting 2014, 15-19 December 2014, C53C-0326.
- [12] Keeler, D.; Rupper, S.; Schaefer, J.M.; Finkel, R.C. (2015): Climate Reconstructions of the Younger Dryas: An ELA Model Investigating Variability in ELA Depressions, Temperature, and Precipitation Changes for the Graubünden Alps [poster]. AGU Fall Meeting 2015, 14-18 December 2015, PP31C-2267.
- [13] Rupper, S.; Roe, G., (2008): Glacier Changes and Regional Climate: A Mass and Energy Balance Approach. Journal of Climate, 21, 5384-5401.
- [14] Sagredo, E.A.; Rupper, S.; Lowell, T. V. (2014): Sensitivities of the equilibrium line altitude to temperature and precipitation changes along the Andes. Quaternary Research, 81(2), 355-366.

Autor/PhD:



Sandra M. Braumann

Betreuerteam:

- Prof. Dr. Markus FIEBIG
- Prof. Dr. Jörg M. SCHÄFER
- Dr. Mag. Stephanie NEUHUBER

Prof. Dr. Summer RUPPER

Dr. Jürgen M. REITNER



Julia Krenn

Optimizing the choice and parameterization of modelling tools for the motion of rapid mass movements

Computermodelle werden im Bereich der Naturgefahren-prozesse generell verwendet um durch Massenbewegungen betroffene Gebiete abgrenzen zu können. Zum einen existieren einfache Modellansätze um großräumige Studien durchzuführen, zum anderen wird die Verwendung von komplexeren Modellen für Detailstudien empfohlen.

Unabhängig von Modellansatz und Komplexität des Modells, bleibt die Herausforderung der Wahl der Modellparameter bestehen. Im Speziellen ist die Ermittlung der Parameter für physikalisch basierte Modelle zum Teil mit erheblichem Aufwand durch Feldmessungen oder Laboranalysen verbunden oder auch gänzlich unmöglich. Eine zunehmend Anwendung findende Methode ist deshalb die Rückrechnung der Parameter durch Vergleich von Modellrechnung und Beobachtung verschiedener Ereignisse. Ein Kritikpunkt dieses Ansatzes liegt in der Umwandlung von physikalischen Parametern hin zu statistischen Größen. Dennoch stellt dies einen pragmatischen Weg dar um in weiterer Folge auch Vorwärtsberechnungen anstellen zu können.

Die vorliegende Arbeit hat zum Ziel eine Reihe von Parameterkombinationen für ausgewählte Modellierungstools zu ermitteln, welche als Eingangswerte für die Simulation verschiedener Prozessarten angesehen werden können. Eine Analyse der Parametersensitivität, sowie die Optimierung verschiedener Parameter je nach Prozesstyp werden mit den Tools r.randomwalk und r.avaflow - zwei gegensätzlichen Modellansätzen - ausgeführt. Anhand von Fallbeispielen werden zunächst systematisch sämtliche Eingangsparameter getestet und in weiterer Folge hinsichtlich ihrer Werte bzw. Wertbereiche analysiert. Im nächsten Schritt erfolgt die Validierung der Werte durch die Anwendung auf weitere Fallbeispiele. Zusätzlich soll die Funktionalität von einfachen Modellansätzen im Vergleich zu physikalisch-basierten Modellen anhand der oben genannten Tools analysiert werden. Eine Abschätzung der Eignung im Hinblick auf den Betrachtungsmaßstab, die Prozesstypen sowie die Ereignismagnitude wird ebenfalls durchgeführt.

Das Ergebnis der Arbeit soll (i) eine Verbesserung des Basiswissens über die Vorhersagequalität der Modelle bringen sowie (ii) die Wahl des Modellansatzes und der Eingangsparameter vereinfachen.

Autorin/PhD Kandidatin:

DI Julia Krenn

julie.krenn@gmail.com

Betreuerteam:

Priv.-Doz. Dr. Martin Mergili

Univ.-Prof. Dr. Christian Zangerl

Univ.-Prof. Dr. Thomas Glade

I Putu Krishna Wijaya

Contribution of Engineering Geology to Landslide Hazard Assessment in Volcanic Rock

Volcanic regions often exhibit significant landslide hazard. Typically, such areas are characterized by a mountainous topography, low-strength volcanic rocks due to hydrothermal alteration processes, substantial seismic activities, and a high amount of precipitation. Landslides in volcanic terrain possess a high risk to the population due to their large volumes and runout distances.

Several case studies in Java (Indonesia) are selected to investigate the processes and mechanism of landslides in volcanic rock. A first study area is located in volcanic rock which is influenced by hydrothermal alteration processes. It is situated in the geothermal area of Kamojang (Java) and characterised by high relief volcanic terrain where landslides frequently occur. Landslides in a geothermal area are hazards that can adversely affect roads, pipelines, as well as injection and geothermal wells. Hydrothermal alteration of volcanic rock is an important geological process that reduce slope stability due to weakening of the rock mass strength. Intensive hydrothermal alteration along conductive brittle fault zones and interlinked discontinuities in combination with weathering processes changed the mineralogy of andesitic lava and pyroclastic breccia. Hence, new clay minerals were formed which led to a considerable reduction of the slope stability, especially during high rainfall events. Within the sliding surface the clay-rich soil was sheared and the mineral grains were aligned along the plane in the direction of shear.

The second study case is located in Banjarnegara, Central Java. The Banjarnegara landslide occurred in 2014 and was one of the worst and deadliest landslide in Indonesia since 2006. The landslide caused 95 victims, 13 people are still missing and thousands of people were evacuated to safer places. Around 105 houses were buried by the landslide.

In spite of the destructive potential, there are only a few comprehensive studies focussing on landslides in volcanic rock masses with or without the influence of hydrothermal alteration processes. In the framework of this study an integrated approach based on engineering geology, remote sensing, mineralogy, geophysics and geomechanics were carried out to enhance the understanding of landslide mechanism. Particular focus is given on the factors affecting slope stability due to hydrothermal alteration. For both study areas preliminary geological landslide models have been constructed by the compilation and sampling of geological and geomechanical data. The in-situ investigation program includes geological field mapping, areal image analyses (based on UAV data, DEM, SRTM), geophysical surveys. Rock and soil samples from natural and artificial outcrops in the study area were collected and studied. In the laboratory, samples will be analysed with regard to their petrography (e.g. X-ray diffraction), mineralogy (e.g. X-ray diffraction), and geotechnical properties (grain size distribution, shear test, compression tests, hydraulic conductivity tests). Results from field and laboratory analysis will be compared and discussed between hydrothermally unaltered and altered volcanic rocks. Generally, the study areas in Indonesia are characterized by high annual precipitation rates. The hydrological and hydrogeological situation is highly relevant for this landslides and thus a further part of this study. Monthly and daily rainfall data were analysed. Numerical modelling techniques and GIS approaches will be applied in combination with data from the laboratory and field investigations, to study the landslide processes in the research areas.

Autor/PhD:

I Putu Krishna Wijaya

Betreuerteam:

Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.sc.nat. Christian Zangerl

Mag.Dr.rer.nat. Wolfgang Straka

Ao.Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.nat.techn.Frans Ottner

Xiaogang Guo

Hypoplastic constitutive model for debris materials

Abstract: Debris flow is a very common natural hazard that represents the gravity-driven flow of a mixture of various sizes of sediment, water and air, down a steep slope, often initiated by heavy rainfall or snow melting. In order to avoid or mitigate the catastrophic events caused by debris flows, research on the initiation mechanism and flow characteristics is required in the design of the preventive measures. The study in this thesis is focusing on the material property and trying to develop more sophisticated constitutive model for numerical simulations. In the process of initiation, excess pore water pressure is regarded as the most significant triggering factor. This factor should be well described by the model for debris materals. In this thesis, we are trying to combine the rate-independent constitutive theories of statics and the rate-dependent dynamic theories to yield a multi-scale and unified constitutive model for debris materials. Hypoplasticity and rheological theories are employed as the static and dynamic portion of the unified model, respectively. The unified model is applied in some element tests and further implemented in a Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) code to simulate some boundary value problems of granular flows. Some phenomenons, such as liquefaction and steady flows observed over a range of inclination, are well captured in the simulations.

Keywords debris flow; granular-fluid flow; hypoplastic model; rheology; solid volume fraction; SPH

1 Introduction

Debris flow is a very common natural hazard that represents the gravity-driven flow of a mixture of various sizes of sediment, water and air, down a steep slope, often initiated by heavy rainfall or snow melting. The mud carrying large items, such as boulders and trees, rushes out the channel and accumulates in a thick deposit that can wreak havoc in developed areas and cause serious casualties and property losses. In order to avoid or mitigate such catastrophic events, research on the initiation mechanism and flow characteristics of debris materials is required in the design of the preventive measures. In our minds, there are mainly two directions about research of debris flows. The first one is focusing on the macroscopic characteristics of debris flows to establish some empirical relationships based on the statistics of a large number of debris flows. The second direction of debris flow research is focusing on the material property and trying to develop more sophisticated constitutive model for numerical simulations. The study in this thesis is moving forward in the second direction, which needs well understanding of initiation and flowing mechanisms of debris flows.

The main factors influencing the initiation of debris flow are, among others, the topography, material parameters, water and the initial stress state in the affected slope. The water from heavy rainfall or snow melting triggers an upland landslide which may develop into a hillside debris flow when the water in the sliding mass cannot be discharged quickly and therefore gives rise to excessive pore water pressure. Upon initiation of debris flow, debris material shows fluid-like behavior. In these processes, the development of high pore water pressure is regarded as the most significant triggering factor. In addition, excess pore water is also observed during the period of runout and depositing of debris flows. Numerical simulation is an important tool in the analyses of debris flow triggering and runnout distance. In the simulations, a competent constitutive model is required to capture the conversion between the solidlike and fluid-like behaviors and to describe the developing of pore water pressure (or effective stresses) in the initiation stage and flowing stage.

In the constitutive modelling, debris materials are normally simplified as solid spherical particle-viscous fluid mixture and treated as a fluid continuum with microstructural effect. In most conventional models, constitutive equations for the static and dynamic regimes are formulated and applied separately. Although some models for granular-fluid flows have taken the stress state of the quasi-static stage into account, the employed theories for the static regime still fail to determine the evolving of pore water pressure (or effective stress) from the deformation directly. Effective stress is a concept from soil mechanics in which the constitutive theories for the static regimes of saturated granular materials are well established. Hypoplasticity is one of them, which was originally proposed as an alternative to plasticity for describing the solid-like behavior of granular materials. Effective stress can be directly determined from deformation by hypoplastic models.

In this thesis, we are trying to combine the rate-independent constitutive theories of statics and the rate-dependent dynamic theories to yield a multi-scale and unified constitutive model for debris materials. Hypoplasticity and rheological theories are the candidates for the static and dynamic portion of the unified model, respectively. A framework which consists of a static portion for the frictional behavior and a dynamic portion for the viscous behavior is proposed at first. Bagnold's constitutive theory was then slightly modified and employed as the

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

dynamic portion of the framework. The Mohr-Coulomb criterion is used as the static portion and combined with the modified Bagnold's model to obtain a complete simple-shearing model. It is further extended to be a three-dimensional constitutive model for granular-fluid flows. Simulations of two annular shear tests verified the capability of the modified Bagnold's model to predict exact stress state in the flowing stage and pointing out the shortcoming of the Mohr-Coulomb criterion to capture liquefaction in the initiation stage. Then, the applicability of a specific hypoplastic model for describing the quasi-static state of granular-fluid flows is validated in the simulation of undrained simple shear test of saturated granular materials. A concrete constitutive model for debris materials is obtained by using the hypoplastic model to replace the Mohr-Coulomb criterion in the unified model. In the simulations of the former used annular shear tests, partial and full liquefaction of the specimens with different compactness are exactly predicted by the hypoplastic portion. The predicted stress-strain curves agree well with the experimental data. Finally, the unified model is implemented in a Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) code and verified by simulating some boundary value problems of granular flows. In the case of granular flow down an inclined plane, steady dense granular flow is observed over a range of inclinations, which is consistent with the theoretical analysis. For the granular pile collapse and the granular flow in the rotating drum, the numerical results show wealth of various behaviors, i.e. quasi-static motion, shear band, flow initiation, fully developed granular flow and granular deposition. The implementation of the unified model in SPH is promising to handle the complex behavior of granular flow in a consistent numerical model. It should be noted that all the numerical simulations by SPH in this thesis are focus on dry granular flows. Since some aspects, such as hydro-mechanical coupling and particle segregation, still need further investigation to be considered in the numerical and constitutive model, applying the unified model to the numerical simulation of debris flow in nature is an interesting challenge in our future work.

2 Hypoplastic constitutive model for debris materials

2.1 Framework for the constutive modelling

Based on Bagnold's pioneer work [1] about a gravity-free dispersion of solid spheres sheared in Newtonian liquids, the model for the flowing stage of granular-fluid mixture is proposed as

$$T_r = T_v + T_i,\tag{1a}$$

$$P_r = P_v + P_i \tag{1b}$$

Here, T_r is the shear stress of gravity-free suspension based on rheology; P_r is the rheological normal stress for the entire flow process.

Since effect of gravity was eliminated in Bagnold's experiments, stress in the quasi-static stage of granular-fluid mixture was not taken into account in Bagnold's models. By combining the stress in the quasi-static state, which satisfies a generalized Mohr-Coulomb yield criterion, with the rheological stresses, the framework for constitutive modelling of granular-fluid flows is built as

$$T = T_0 + T_r \tag{2a}$$

$$P = P_0 + P_r \tag{2b}$$

where T_0 and P_0 are the shear and normal stresses in the quasistatic state and corresponding to the concepts, yield stress and confining pressure, respectively. The new framework implies that the contributions of contact friction, fluid viscosity and particle collisions coexist in the entire flow process. P_0 and T_0 are regarded as the static portion; T_r and P_r are termed the dynamic portion.

The framework is extended to the three dimentional form as

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_s + \mathbf{T}_d \tag{3}$$

where **T** is the total effective stress tensor; \mathbf{T}_s is the static stress tensor and \mathbf{T}_d is the dynamic stress tensor.

2.2 The dynamic portion

Inspired by the form of a simplest model describing the non-Newtonian fluid (see e.g. [2]), the slightly modified Bagnold'd model is extended to three-dimensional form as

$$\mathbf{T}_{d} = -\left(\frac{2K_{1}}{\tan\alpha_{v}}\sqrt{|II_{D^{*}}|} + \frac{4K_{2}}{\tan\alpha_{i}}|II_{D^{*}}|\right)\mathbf{1} + \left(2K_{1} + 4K_{2}\sqrt{|II_{D^{*}}|}\right)\mathbf{D^{*}}$$

$$(4)$$

where

$$\mathbf{D}^* = \mathbf{D} - \frac{\mathrm{tr}(\mathbf{D})}{3}\mathbf{1}$$
(5)

is the deviator tensor of the strain rate tensor ${\bf D}$ and

$$II_{D^*} = \frac{1}{2}((tr\mathbf{D}^*)^2 - tr(\mathbf{D}^{*2}))$$
(6)

is the second invariant of \mathbf{D}^* ; \mathbf{T}_d is dynamic stress tensor; K_1 and K_2 are coefficients related to the material properties and expressed as

$$K_1 = \left[(1+\lambda) \left(1 + \frac{1}{2}\lambda \right) - \frac{1}{1+\lambda} \right] \mu \left(1 - \frac{C}{C_c} \right)^{-n}$$
(7)

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

and

$$K_2 = 0.042 R_v \rho_s (\lambda d)^2 \sin \alpha_i \tag{8}$$

where *C* is solid volume fraction; C_c is the critical solid volume fraction for a full shearing to occur in annular shear tests or channel flows; *n* is a fitting parameter; λ is termed linear concentration and has the expression as

$$\lambda = \left[\left(\frac{c_{\infty}}{c} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^{-1} \tag{9}$$

in which C_{∞} is the asymptotic limit of the maximum measured solid volume fraction in a specific apparatus. ρ_s is the density of solid particles; *d* is the diameter of solid particles; the tangent of α_i is the ratio between shear and normal stresses in the grain-inertia regime in Bagnold's theory; R_v is a correction factor expressed as

$$R_{\nu} = \frac{\kappa_1}{k_1} \tag{10}$$

and

$$k_1 = 2.25\lambda^{1.5}.$$
 (11)

2.3 The static portion

As pointed out before, the increasing of pore water pressure is the main initiation mechanism of debris flows. The static portion of the model for debris materials should be capable to describe the shear softening (or liquefaction) of granular-fluid mixtures in the undrained simple shearing which is particularly relevant for the initiation of debris flows. In other words, the static stresses P_0 and T_0 , which are not constant in this case, should be determined exactly by the static portion. Now we try to study the applicability of a prospective theory, hypoplasticity, for the description of partial or full liquefaction of saturated granular materials. The first hypoplastic model with critical state proposed by Wu et al. [3] is expressed as

$$\overset{\circ}{\mathbf{T}}_{h} = c_{1}(tr\mathbf{T}_{h})\mathbf{D} + c_{2}\frac{tr(\mathbf{T}_{h}\mathbf{D})\mathbf{T}_{h}}{tr\mathbf{T}_{h}} + (c_{3}\frac{\mathbf{T}_{h}^{2}}{tr\mathbf{T}_{h}} + c_{4}\frac{\mathbf{T}_{h}^{*2}}{tr\mathbf{T}_{h}}) \parallel \mathbf{D} \parallel I_{e},$$
(12)

where the subscript $h\$ is used to distinguish the hypoplastic portion from the dynamic portion in the model which will be developed for debris materials; $\mathbf{\hat{T}}_h$ is the Jaumann stress rate tensor and \mathbf{T}_h is the static stress tensor determined by hypoplastic model; $c_1 \sim c_4$ are dimensionless material parameters; the factor I_e is called density function and defined as

$$I_e = (a - 1)D_c + 1$$
(13)

where a is a material parameter related to the stress level and

$$D_c = \frac{e_{crt} - e}{e_{crt} - e_{min}} \tag{14}$$

is the modified relative density; e denotes the void ratio; e_{min} and e_{crt} are the minimum and the critical void ratio, respectively. The effect of void ratio and stress level on the behavior of granular materials is taken into account in the model (12) by using the following expressions,

$$e_{crt} = p_1 + p_2 \exp(p_3 \mid tr \mathbf{T}_h \mid), \tag{15}$$

and

$$a = q_1 + q_2 \exp(q_3 \mid tr \mathbf{T}_h \mid) \tag{16}$$

where p_i (i=1, 2, 3) and q_i (i=1, 2, 3) are material parameters and can be determined by fitting the experimental data of drained triaxial tests under different confining pressure.

The hypoplastic model (12) is employed to simulate undrained simple shear tests. Three typical stress-strain behaviors in undrained simple shear tests as indicated in Fig. 1 are reproduced in element tests by the model (12) which verified the applicability of the hypoplastic model in capturing partial or full liquefaction of saturated granular materials.



Fig. 1 Three typical stress-strain behaviors in undrained simple shear tests

2.4 The hypoplastic model for debris materials

Based on the framework (3), the hypoplastic model for debris materials is developed as

$$\mathbf{T} = \int \dot{\mathbf{T}}_{h} dt - \left(\frac{2K_{1}}{\tan \alpha_{v}} \sqrt{|II_{D^{*}}|} + \frac{4K_{2}}{\tan \alpha_{i}} |II_{D^{*}}|\right) \mathbf{1} + \left(2K_{1} + 4K_{2} \sqrt{|II_{D^{*}}|}\right) \mathbf{D}^{*}$$
(17)

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

The structure of the new model is demonstrated by simulating an undrained simple shearing flow. As shown in Fig. 2, the static shear stress determined by the hypoplastic model (12) is combined with a dynamic portion to get the total shear stress.



Fig. 2 Schematics of the new model (17): shear rate vs shear stress

3 Performence of the new model

The new model, (17), is applied to predict the stress-strain relations of granular-fluid flows in element tests. It is further implemented in a SPH code to solve some boundary value problems.

3.1 Element tests

In the element tests, Hanes & Inman's experiments [4] about spherical particles sheared in water are simulated. The data for particles with diameter 1.85 mm which were stated as good quality ones are chosen to verify the new model. The simulation results are shown in Fig. 3.

The stress states of the two specimens are reproduced based on the rational prediction of the residual stresses by the static portion. The sample with C = 0.51 has residual strength after failure in the undrained simple shearing and the looser sample shows full liquefaction. Comparing to dry granular flows, the effect of the interstitial fluid in a granular-fluid flow is nonnegligible.

3.2 Boundary value problems

The new constitutive model is implemented in a SPH code and applied in the simulations of some boundary value problems.

a) Collapse of a granular pile

The collapse of a granular pile on a flat surface is studied at

first. The initial geometry and boundary conditions are shown in Fig. 4.

Fig. 5 shows the process of the collapse together with the evolution of the equivalent viscosity η which is expressed as

$$\eta = 2K_2 \sqrt{|II_{D^*}|}$$
(18)

The proposed unified model can account for the rate-independent solid state accurately with its hypoplastic component. Material behaviors inside yield surface are well-defined. In simulations with the Bingham model or pure Bagnold-type models, materials will never reach the final static state, creeping is usually observed. However, in simulations with the unified model, material can reach the final static state because the final solidstate is considered with the hypoplastic model. Fig. 6 gives the evolution of runout distance in time. It is observed that the granular pile reaches final state in about 0.5 second. From then on the granular media is at rest, no creep is observed.



Fig. 4 Initial geometry and boundary conditions

b) Granular flow in a rotating drum

A granular mass rotating in a drum is modelled in this section. The numerical setup is shown in Fig. 7.

Three simulations with different angular velocities $\Omega = 0.5$, 1.0 and 2.0 s^{-1} are performed. The rotating process of $\Omega = 1.0 s^{-1}$ is shown in Fig. 8.

In the drum the surface flow moves over the solid-like granular body, so both static and flow states coexist in the computational domain. In the simulations the dynamic part is always taken into account. However in the quasi-static zone the calculated collisional stress is negligible that the dynamic part has no realistic effect on the mechanical response of the material. From the simulations, we can see that the solid-like and flow behaviors of granular material are successfully modelled by the unified constitutive model. The explicit determination of the solid/flow states is unnecessary. The solid/fluid transition is achieved naturally in the computation. We do not make use of concepts such as yield stress or flow initiation criterion. Therefore, the numerical implementation is greatly simplified.

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren



(b)

Fig. 3 Element test results for the granular-water flows with different solid volume fraction: (a) shear rate vs normal stress (b) shear rate vs shear stress. The experimental data are indicated by various symbols. The solid lines denote the shear stresses and the dashed lines are the normal stresses.



Fig. 5 The collapse process of the granular pile. The figures are colored by equivalent viscosity η

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren



Fig. 6 Evolution of runout distance



Fig. 7 Numerical setups for the simulation of granular in a rotating drum: (a) initial state; (b) steady flow state.



Fig. 8 Developing process of steady surface flow in the rotating drum, $\Omega = 1.0 \ s^{-1}$

4 Conclusions and outlook

Debris flow is normally simplified as granular-fluid flow in constitutive modelling. The increasing of excess pore water pressure which corresponds to the former mentioned process of shear softening is considered as the most significant triggering factor in the initiation of debris flows. The hypoplastic model is combined with the modified Bagnold's model to obtain a complete model for debris materials. Statics and dynamics are unified in the new model. The unified model for debris materials is implemented in numerical methods and further verified in the simulations of some boundary value problems.

In our future work, the unified model will be used to simulate boundary value problems of granular-fluid flows by fulfilling hydro-mechanical coupling. On the other side, finding more suitable and concise hypoplastic models for the static portion will be an interesting exploration to refine the new model.

References

- [1] BAGNOLD, R. A.: EXPERIMENTS ON A GRAVITY-FREE DISPERSION OF LARGE SOLID SPHERES IN A NEWTONIAN FLUID UNDER SHEAR. PROC. R. SOC. LOND. A MATH. PHYS. SCI.. 225 (1954), 49-63.
- [2] WANG, Y.; HUTTER, K.: GRANULAR MATERIAL THEORIES REVISITED. IN: BALMFORTH, N. J.; PROVENZALE, A. (EDS.) GEOMORPHOLOGICAL FLUID MECHANICS. SPRINGER, (2001), 79-107.
- [3] WU, W.; BAUER, E.; KOLYMBAS, D.: HYPOPLASTIC CONSTITUTIVE MODEL WITH CRITICAL STATE FOR GRANULAR MATERIALS. MECHANICS OF MATERI-ALS. 23 (1996), 45-69.
- [4] HANES, D. M.; INMAN, D. L.: OBSERVATIONS OF RAPIDLY FLOWING GRANULAR-FLUID MATERIALS. JOURNAL OF FLUID MECHANICS. 150 (1985), 357-380.

Autor/PhD:



M.Sc Xiaogang Guo

Feistmantelstr. 4

1180 Wien

xiaogang.guo@boku.ac.at

Guoping Lei

Landslide reinforced by piles

Analytical, numerical analysis and centrifuge tests

<Abstract > Rows of vertical discrete piles are widely used to stabilize landslides and potential unstable slopes. The sliding soil between two neighboring piles is prevented by soil arching effect, which plays a major role in soil-pile interaction. Various methods, namely analytical method, numerical method and centrifuge tests, are employed to study the pilesoil interaction. Centrifuge tests of two typical cases of slope stabilized by piles have been performed. Different failure modes, related to parameters like pile spacing ratio, slenderness, embedment, etc., were observed. By numerical modelling, the soil arching effect was studied using simplified horizontal slice model and full 3D model. At last, a modified strain wedge model for piles under lateral soil movement was proposed to calculate the stress distribution on piles.

Keywords <landslide, slope stabilization, pile, centrifuge, numerical modelling, strain wedge model>

<Zusammenfassung> Vertikale Pfahlreihen sind weit verbreitet zur Stabilisierung potenzieller Rutschhängen. Zwischen zwei benachbarten Pfählen wird das Gleiten des Hanges durch die Gewölbewirkung verhindert, welches eine wichtige Rolle bei der Interaktion Boden-Pfahl spielt. Um die Interaktion zwischen Boden und Pfahl zu untersuchen wird ein analytisches sowie ein numerisches Verfahren eingesetzt, und mit experimentellen Modelversuchen in der geotechnischen Zentrifuge verglichen. Die Zentrifugenversuche untersuchen zwei typische Fälle vom mit Pfählen stabilisierten Hängen. Unterschiedliche Versagensmechanismen wurden beobachtet, in Abhängigkeit des Pfahlabstands, der Schlankheit und der Randbedingung, wie der Einspannung, des Pfahls. Die numerische Modellierung untersucht die Gewölbewirkung anhand eines vereinfachten horizontalen Schnittmodels und eines 3D-Models. Abschließend wird ein modifiziertes Keilmodel für Pfähle unter Belastung horizontaler Bodenbewegung vorgeschlagen, um die Spannungsverteilung auf Pfählen zu berechnen.

Keywords < *Erdrusch*, *Hangstabilisierung*, *Pfahl*, *Zentrifuge*, *numerische Modellierung*, *Keilmodell* >

1 Introduction

Rows of vertical discrete piles are widely used to stabilize landslides and potential unstable slopes. Piles are usually installed with a certain spacing to penetrate through the sliding mass and embedded in the stable layer underneath. The essence of piling is to transfer the sliding force from the failing mass to the stable soil layer. Each pile behaves as a single vertical beam structure with interaction with adjacent piles governed by the existence of the well-known arching effect. The stabilizing row of piles must be conceived keeping pile spacing as large as possible for cost effectiveness, but not so large to make them unable to mutually interact and therefor non-effective. Numerous methods have been developed for the analysis of slopes stabilized by piles.

There are two steps in the design of stabilizing piles: First, a stability analysis of slope is performed to evaluate the required additional lateral resisting force that is needed to increase the safety factor of the slope to the desired value. Second, a pile configuration which can provide the required resisting force and serve appropriately in the work duration is selected. The major challenge of the design process lies in the evaluation of driving force exerted on the piles, which originally should be

transferred to the soil slice at the same location, depends on the relative pile-soil movement. The piles usually work as flexible cantilever beams. This enables the driving force to cause further non-uniform pile displacement, which in return affects the deformation of the failing soil mass and therefore the driving force. This complex coupled problem must be solved simultaneously.

The aim of this thesis is to reveal the working mechanism of stabilizing piles by using various techniques and provide valuable conclusion for engineering practice.

2 Methodology

Three methods are used to address the complex problem from different perspectives. The centrifuge tests reveal the soil and pile behavior intuitively and give reference data for the analysis. The numerical method is used to study the soil arching effect between the piles and its three-dimensional behavior. At last the analytical method provides a simply solution which can also capture the most important features in the soil-pile interaction.

2.1 Centrifuge tests

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Two series of centrifuge tests have been performed considering two typical cases of slope stabilized by piles.

The first test series is a 90-degree slope reinforced by a row of discrete piles as illustrated in fig. 1. The number of the piles varies in different tests. The model should represent an infinite slope along the pile row, therefore the boundaries need to be the symmetry plane of the infinite pile row, which is either at the middle between two adjacent piles or at the axis of a pile. The former is adopted in this study in order to capture the arching effect from the exposed side boundary. No restriction is applied between the piles. Generally, the model was constructed in three steps: (1) The compaction of the mixed soil via moist tamping; (2) The installation of piles; (3) The cutting of the slope to prescribed geometry. Since the only reason that triggers the failure of the piled slope is gravity, G-up test procedure, which means continuous increase of the gravity-induced stress field, was employed. The stress increase in the model slope corresponds to the increase of prototype slope height. The g-up tests ended when the slope-pile system failed or 50 g was reached. The increase of centrifugal acceleration was conducted at a low rate of 0.1 rpm per second by a computer program. In-flight photography from both the side and the top was used to monitor the movements of the slope. PIV analysis (white 2003) was employed to quantitatively study the soil deformation.



Fig. 1 The geometry of the first centrifuge test series (unit: mm).

Figure 2 shows the total maximum shear strain of the unreinforced slope before failure. The failure started at the toe and propagated to the crest. Even though a nearly plane shear band was formed before the failure, the final failure from the top surface to about a half height of the slope didn't occur along the shear band but along an almost vertical plane. The final failure mode for this steep slope is a combination of toppling and sliding.



Fig. 2 The total maximum shear strain (%) of the unreinforced slope before failure

Figure 3 shows the total maximum shear strain of a piled slope with the pile spacing ratio (s/d) of 3.88. A Multi-shear-band phenomenon was observed. The biggest shear band is induced by the integrated deformation of the unstable slope and the others are the local shear band developed by the arching effect, which also distinguish the soil zones along depth. For slopes with small pile spacing, the shearing effect among the three soil zones was well captured. For slopes with big pile spacing, smaller shear band did not form in the exposed cross section, which indicates weak arching effect from the piles.



Fig. 3 The total maximum shear strain (%) of a piled slope (s/d = 3.88) before failure

The second test series modeled a soil layer sliding above a bedrock along a plane surface as illustrated in fig.4. A row of piles were installed near the toe of the slope. Same soil from the first test series was used. Figure 5 and 6 exhibit the vertical displacement of the sliding soil mass at 25G for unreinforced and reinforced slopes, respectively. For an unreinforced slope, twostage deformation process was observed. In the first stage, the sliding soil layer deformed along the bedrock surface with soil compaction from the crest to the toe. After about 25G started the second stage of the process: a local surface failure took place. When the reinforcement of piles was installed, a much smaller quantity of soil displacement was observed and the second stage of deformation was also postponed. The vertical displacement of the piled slope (fig.6) shows significant influence of the piles on the surrounded soil.

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren



Fig. 4 The geometry of the second centrifuge test series (unit: mm).



Fig. 5 The y displacement of an unreinforced slope at 25G (unit: mm).



Fig. 6 The y displacement of a piled slope at 25G (unit: mm).

2.2 Numerical method

A horizontal slice of pile and moving soil layer was considered as a basic unit to study the load sharing ratio of the piles. Figure 7 shows the numerical model in FLAC^{3D}. Taking advantage of geometry symmetry, a half model was implemented to shorten the calculation time. Parameters like overburden stress, pile spacing ratio and soil properties were considered.





Figure 8 shows the loading process in the numerical test. At the beginning the push stress at the boundary increases with boundary displacement until a certain value is reached, after which the push stress remains constant and failure takes place. For the load shearing ratio (fig.9), the maximum shearing percentage by the piles is reached at a negligible displacement, and it decreases rapidly with further boundary displacement until a certain value is reached. The final value of load shearing ratio seems independent with the overburden stress but related with pile spacing ratio. Full 3D model analysis is also conducted to reveal the pile-soil interaction along depth.



Fig. 8 Applied boundary stress (s=4d)



Fig. 9 Load shearing ratio (s=4d)

2.3 Analytical method

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

The Strain Wedge Model (SWM) by Norris (1986) is often used to predict the response of flexible pile under lateral load. The strain wedge method is based on the assumption of a passive soil wedge induced by the pile. Later on the applicability of SWM has been extended from piles in uniform sand to piles in different ground conditions and configurations, e.g., in layered soil, liquefied sand and from single pile to pile groups.

The first attempt to apply strain wedge model to slope stabilizing piles was made by Ashour (2012), in which the complex pile-soil interaction is modeled by a single mobilized strain wedge above the slip surface. However, large discrepancy was observed between the predicted results and observed data, because the single wedge model ignored the interaction between the pile top and the down-slope soil. In this study, the interaction between the pile and surrounding soil above the slip surface is modeled by an inverted "stabilized strain wedge" in the up-slope soil and a "mobilized strain wedge" in the down-slope soil (fig.10). The "stabilized strain wedge" refers to the soil zone in the up-slope, where the movement is harnessed by the pile and hence the term "stabilized", while the "mobilized strain wedge" refers to the soil zone in the down-slope, where the soil is pushed by the pile and hence the term "mobilized".



Fig. 10 Soil wedge induced by lateral soil movement

The lateral load applied on the piles is calculated through the assumption of stress equilibrium illustrated in fig.11. The stress level in the soil is empirically related to the strain of the soil wedge, which depends on the deformation of piles. Thus, the solution can only be obtained through iteration. A Matlab code is written to perform the calculation. The modified strain wedge model for piles under lateral soil movement was validated by a situ experiment of stabilizing piles in the Masseria Marino landslide (Italy) reported by Lirer (2012). Good agreement of calculated and measured bending moment in pile was obtained (fig.12). The proposed model is also able to capture the possible failure mode of the pile-soil system. Parameter study shows that the pile slenderness ratio and pile flexibility have the largest effect on the pile response, followed by pile spacing and pile embedment.



Fig. 11 Horizontal equilibrium of stresses (after Ashour 2012)



Fig. 12 Comparison of calculated and measured bending moment

3 Summary

The stabilizing piles are often used to prevent the landslides, but the mechanism is so far not clear. Various methods, namely analytical method, numerical method and centrifuge test, are employed to study the pile-soil interaction. Centrifuge tests of two typical cases of slope stabilized by piles have been performed. Different failure modes, related to parameters like pile spacing ratio, slenderness, embedment, etc., were observed. Through numerical modelling, the soil arching effect was further studied. The horizontal capacity of piled-soil system was found to increase with higher overburden stress and lower pile spacing. The final load shearing ratio of pile was found to be constant for fixed pile spacing. The effect of soil arching along pile depth was also studied by 3D numerical modelling. At last a modified strain wedge model for piles under lateral soil movement was proposed to calculate the stress distribution on piles. The proposed model can distinguish the possible failure modes and is validated by published in-situ monitoring data.

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

References

- [1] White, D.J.; Take, W.A.; Bolton, M.D.: *Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry*. Geotechnique 53 (2003) ,7,619–632.
- [2] Norris, G. *Theoretically based BEF laterally loaded pile analysis*. Proc. 3rd Int. Conf. on Numerical Methods in Offshore Piling, 1986, 361-386.
- [3] Ashour, M.; Ardalan, H. *Analysis of pile stabilized slopes based on soil-pile interaction*. Computer and Geotechnics. 2012,39,85-97.
- [4] Lirer, S. Landslide stabilizing piles: Experimental evidences and numerical interpretation. Engineering Geology,2012,149,70-77.

Autor/PhD:



Guoping Lei

Feistmantelstraße 4

1180 Wien

guoping.lei@students.boku.ac.at

Betreuerteam: Univ. Prof. Dr. Ing. Wei Wu

Shun Wang

A visco-hypoplastic constitutive model for soil creep

Zusammenfassung: Böden zeigen variable Verformungsgeschwindigkeiten beim Kriechen. Bei einer relativ niedrigen Belastung weist der Boden Reibungsverhalten auf und bleibt im statischen Zustand, während er mit höherer Kriechbelastung viskoses Verhalten zeigt und in den dynamischen Strömungszustand übergehen kann. Daher wird ein Stoffgesetz benötigt, um das Reibungs- und Viskositätsverhalten zu beschreiben. In dieser Arbeit wird eine kurze Einführung eines visko-hypoplastischen konstitutiven Modells vorgestellt. Dieses Modell besteht aus einem hypoplastischen konstitutiven Modell und einem viskosen Modell. Das viskose Modell enthält einen Term hoher Ordnung, der die Beschleunigung der Dehnung darstellt. Mit Hilfe des viskosen Modells ist dieses vereinheitlichte Modell in der Lage, den Geschwindigkeitseffekt und das Kriechverhalten des Bodens zu modellieren.

Keywords Kriechverhalten; Hypoplastizität; vereinheitlichtes Modell; viskoses Modell; Geschwindigkeitseffekte

1 Introduction

In geotechnical engineering, the theories of two types of materials have been mainly considered, those of solid-like material and fluid-like material. It is common knowledge that there are many materials of great importance which cannot be classified under either aspect. Some of these materials exhibit both solidlike or statical and fluid-like or dynamical properties. They may show elastoplastic deformation under the influence of statical stresses, but under dynamic stresses, many of their deformation would transfer from solid-like regime to fluid-like regime. The dominating mechanism in the solid-like regime is frictional, while the fluid-like property is primarily viscous[1]. The interaction of friction and viscosity give rise to the time-dependent behavior, which is of importance for the evaluation of some engineering problems, e.g. slope creep, failure of retaining wall, long-term soil settlement under load and tunnel deformation due to surrounding rock creep. A unified hypoplastic model should consider both the frictional behavior and the viscous behavior in the same framework. A straightforward method is introducing the viscous effects into hypoplasticity. With this approach, one can incorporate the time effects in the analysis, thus can study the time-dependent behavior(rheology) of the geomaterials. Obviously, a simultaneous description of the viscous and plastic effects in the framework of hypoplasticity would have many advantages. This is the subject matter of visco-hypoplastcity.

To date, procedures to incorporate viscosity into hypoplasticity is theoretically and technically available . Some notable visco-

Abstract: Soil particles may show variable strain rate in the process of creep. With relatively low creep stress, soil exhibits mainly frictional behavior and stays in the statical regime, while it can transfer to the dynamic flow state with higher creep stress and displays viscous behavior. Therefore, a unified constitutive model is needed to describe the frictional and viscous behavior respectively. In this work, a brief introduction of a visco-hypoplastic constitutive model is presented. This model is composed of a hypoplastic constitutive model and a viscous model. The viscous model contains a highorder term, which represents the acceleration of strain. This unified model is capable of modeling the rate effect and creep behavior of soil.

Keywords Creep behavior; hypoplasticity; unified model; viscous model; rate effect

hypoplastic models have been proposed by numerous researchers[2,3,4], in which the strain rate is assumed to be the sum of elastic strain rate and viscous strain rate. In a certain sense, these constitutive models may be regarded as an adaptation of the classical viscoplasticity to the hypoplastic constitutive model, where the viscous strain rate depends on the stress and possibly on some structure tensors but not on their rates[4]. The visco-hypoplastic constitutive models can describe the mechanical behavior of cohesive soils, allowing for viscous effects, i.e. creep, relaxation and rate-dependence of stiffness. Practical application of the visco-hypoplastic to simulate the slope movements of a slow-moving landslide[5] and to approximate the stress-strain behavior of a collapsible loess[6] are available.

On the one hand, there are several different ways for rate-independent hypoplastic model to incorporate viscous effects. One of the most used possibility is the decomposition of the total strain rate into elastic and viscous portions. To describe the intensity viscous flow, the Norton's creep law for the intensity of viscous flow and the direction of hypoplastic flow have been adopted by Niemunis[7,8]. The viscous strain rate is assumed to be a function of the Cauchy stress ,the void ratio and the over-consolidation ratio as well. This form of visco-hypoplasticity has been shown to enable a remarkably good description of rate-dependency, creep, and relaxation[2]. Another approach to describe viscous strain rate can be found literture[4] ,where the concept of over-stress has been adopted. On the other hand, a rate-dependent hypoplastic constitutive model can be used to account for viscous effects in soils as well. For University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

example, an extended model proposed by Wu[4], with an appropriate choice of the viscous function, can describe creep, relaxation as well as the rate-dependent behavior of cohesive soils.

In this work, a brief introduction of a unified model is presented. This model is composed of a hypoplastic constitutive model together with a viscous model, which represent the soillike and fluid-like response of soil, respectively.

2 The framework of viscous model

The mathematical theories of fluid-like behavior developed independently from that of solid-like behavior. Traditionally, the rheological models are based on a superposition principle.

This indicates that the response at any time is directly proportional to the value of the initiating signal. The response of strain, for example, will proportionally increase with the applied initiating stress. Following the above concept, we can write down a general differential education for rheological models: $\sigma + \alpha_1 + \alpha_2 \overline{\partial} \frac{\partial \sigma}{\partial t^2} + \dots + \alpha_n \frac{\partial \sigma}{\partial t^n} =$

$$\beta_0 \boldsymbol{\varepsilon} + \beta_1 \frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t} + \beta_2 \frac{\partial^2 \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t^2} + \dots + \beta_m \frac{\partial^m \boldsymbol{\varepsilon}}{\partial t^m}$$
(1)

Where n = m or n = m - 1, α_j and β_j are time differentials

coefficients constants. These constants are material parameters, such as viscosity coefficient and rigidity modulus. Noted that in Eq.satisfies , σ and ε are the Cauchy stress tensor and the strain tensor, respectively. However, other types of deformation could be included without difficulties, with the stress and strain referring to that particular deformation process. For example, the stress tensor and strain tensor can be replaced in terms of shear stress τ and shear strain γ , respectively, relevant to a simple shear.

The basic fluid-like behavior of a material can be expressed in terms of unaxial models or mechanical elements, one of the simplest case, Hookean model, is the spring element, which is capable to represent the elastic characteristic of the continuous medium. In Eq.satisfies, if $\beta_1(=\mu_1)$ is the only non-zero parameter, we have:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\mu}_{\mathrm{l}} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \tag{2}$$

in our notation, this represents Newtonian viscous flow, with $\dot{\epsilon}$ being the stretching tensor and μ_1 being the viscosity coefficient. The above equation can be regarded as the simplest rehological model for fluid-like behavior. Let us then consider some other basic rheological models based on the general Eq.satisfies. in which if $\beta_0 (= \mu_0)$ and $\beta_1 (= \mu_1)$ are both nonzero, whilst the other constants are zero, Kelvin model, one of the basic rheological models, can be obtained:

$$=\mu_0\varepsilon + \mu_1\varepsilon \tag{3}$$

where μ_0 is a modulus of elasticity. Kelvin model, also known as Voigt model, represents a viscoelastic material having the properties both of elasticity and viscosity. It can be regarded as a combination of the Hookean model and the Newtonian model as well. Another very simple model is so-called Maxwell model. The differential equation of the model is obtained by making $\alpha_1(=\lambda_1)$ and $\beta_1(=\mu_1)$ the only non-zero parameters

$$\boldsymbol{\sigma} + \lambda_1 \boldsymbol{\dot{\sigma}} = \mu_1 \boldsymbol{\varepsilon} \tag{4}$$

with strain rate $\dot{\varepsilon}$ in Eq.(4) being zero, equation represents a relaxation test. Therefore, the meaning of λ_1 can be identified as relaxation time. Noted that the hypoplastic equation has a similar construction with Maxwell viscous flow. The next level of complexity in the framework of Eq.satisfies is to make three of the material parameters non zero. More specifically, if α_1, β_1 and β_2 are taken to be non-zero, the Jeffreys model has been obtained. In the present notation, the equation is presented in the following form.

$$\boldsymbol{\sigma} + \lambda_1 \dot{\boldsymbol{\sigma}} = \mu(\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} + \lambda_2 \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}}) \tag{5}$$

where λ_1 , λ_2 is retardation time. It is worth to note that the Kelvin model and Maxwell model can be regarded as special cases of the Jeffreys model obtained by setting $\lambda_1 = \lambda_2 = 0$ and $\lambda_2 = 0$, respectively. We note with interest that Jeffreys model has been used for a dilute suspension of solid elastic spheres in a viscous liquid by Frohlich and Sack [9] and a dilute emulsion of incompressible viscous liquid by Oldroyd[10].

3 The unified model for soil creep

Two primary consideration of soil in the process of creep is friction and viscosity. It is believed that the soil particles experience accelerated and decelerated motion with time. Though the interparticle velocity of soil is usually very slow, the interactions between individual particle display both Coulomb-type plastic and viscous behavior, and there is no transfer from the static regime to dynamic flow state in the process of creep. In other words, the friction and viscosity are interactional in the whole process, so we cannot consider either frictional response or rheological response independently. A unified model cosidering both the frictional behavior and the viscous behavior is needed.

Recently, a formulation of unified model has been proposed by Wu [1].It assumes that the total stress can be decomposed into two independent parts: the solid part for frictional behavior, and the fluid part for viscous behavior, viz. $\sigma = \sigma_{fric} + \sigma_{vis}$

It can be anticipated that combination of an appropriate model representing the fluid part of the above equation, we can obtain a unified constitutive model accounting for both solid-like and fluid-like behaviors of geomaterials. As the solid part of the visco-hypoplastic model represents the solid-like behavior, it is informative to make certain assumptions to the fluid part
model that it can only represent the fluid-like behavior of the material. It, therefore, can be classified as a viscous model. Based on this, the fluid part of this visco-hypoplastic model can be constituted based on the framework of viscous models.

3.1 The hypoplastic model for frictional response

The basic idea of hypoplasticity can be traced back to the pioneering work of Kolymbas on the description the behavior of an elastic material by using a nonlinear tensorial function of the rate-type[11,12]. Since then different versions of hypoplasticity have been independently established for an alternative description of the soil behavior, without an explicit definition of yield and potential surfaces The original hypoplastic equation given by Kolymbas[11] in 1977 is too complex (at those days the name of hypoplasticity is not introduced). Later some improved versions have been presented[13,14,15]. Wu and Kolymbas give the general hypoplastic constitutive equation in 1990[15]. We recapitulate the main ingredients of hypoplasticity and begin with a relatively general formulation by writing the hypoplastic rate-constitutive equation as the sum of linear and nonlinear terms of the strain rate:

$$\boldsymbol{\sigma} = L(\boldsymbol{\sigma}) : \boldsymbol{\varepsilon} - N(\boldsymbol{\sigma}) \parallel \boldsymbol{\varepsilon} \parallel \tag{7}$$

where the terms L and N denote the linear and nonlinear components representing reversible and irreversible behavior of the material.

Based on the general hypoplastic constitutive equation, a simple hypoplastic constitutive model for sand is proposed by Wu and Bauer [14] in 1994. Recent hypoplastic models include the concept of critical states[16] to account for the effects of density and stress level. However, this model shows excessive contraction (volume reduction) in triaxial extension. In order to remedy this, the constitutive model is updated by including a new term into the constitutive model [17], which is expressed as follow:

$$C_{3} \frac{\operatorname{tr}(\boldsymbol{\sigma}\boldsymbol{\varepsilon})}{\operatorname{tr}\boldsymbol{\sigma}} \boldsymbol{\sigma} + C_{4}(\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\sigma}^{*}) \| \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \|$$
(8)

where $C_i(i=1,...4)$ are dimensionless material parameters. The deviatoric stress tensor σ^* in the Eq.(8) is defined by $\sigma^* = \sigma^{-1/3}(\mathrm{tr}\sigma) \delta_{ij}$, with δ_{ij} being Kronecker delta. The four parameters. $\|\dot{\epsilon}\|$ stands for the Euclidean norman .The four material parameters can be identified with a single triaxial compression test. Details of the calibration procedure using parameters of Mohr-Coulomb criterion: the initial tangential stiffness E_i Ei, the initial Poisson ratio V_i , the internal friction angle φ and the dilatancy angle Ψ to identify the material parameters can be found in the work by Wu and Bauer (1994). The updated model has been successfully used in some computations of boundary value problems within Finite Different Method (FDM) code[17]. Recently, micro-polar theory has been successfully incorporated into this updated constitutive model to model evaluation of shear band[18], and it has been implemented into smoothed particle hydrodynamics code(SPH) for debris flow materials as well[19]. The hypoplastic Eq.(8) is mainly developed for cohesionless soils. In practice, however, most soils show cohesion to some extent. The updated constitutive model is also able to take cohesion into consideration by simply replacing the stress tensor σ with the following translated stress tensor[17]. $\sigma_c = \sigma - p_t \sigma_{ii}$ (0)

where $p_t = c / \tan \varphi$, the cohesion *c* and friction angle φ are parameters of Mohr-Coulomb yield criterion.

To enhance the capability of the proposed model to account for the strain-softening, the concept of strain path should be incorporated into the constitutive model. The stress-strain response of the constitutive Eq.(8) is governed by the interaction between the linear and nonlinear terms. The linear term can be viewed as constructive, whereas the nonlinear term can be considered as destructive. It can be anticipated that any change of either the linear part or the nonlinear part at failure will bring the constitutive equation away from its equilibrium position and give rise to either hardening or softening. By making using of the concept, a scale factor is introduced to Eq.(8) to account for strain softening. Thus the modified model takes the following form: $\dot{\sigma} = C_1 tr(\sigma) \dot{\varepsilon} + C_2 tr(\dot{\varepsilon}) \sigma +$

$$C_{3} \frac{\operatorname{tr}(\boldsymbol{\sigma} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}})}{\operatorname{tr}\boldsymbol{\sigma}} \boldsymbol{\sigma} + f_{d} C_{4}(\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\sigma}^{*}) \| \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \|$$
(10)

where f_d represents the effect of strain-path. In the present study f_d is assumed to be:

$$f_d = (1 - r)e^{-al} + r$$
(11)

in which the constant r relates to the ratio of peak stress to residual stress in the strain-stress curve, thus r > 1 for stain softening and the scale factor $f_d = 1$ if r = 1. The length of strain path can be updated during the deformation process according to the following evolution equation: $l = \int_{t_0}^{t_0} |\varepsilon| dt$ (12)

The constant α is a positive parameter which is dependent on the stress level and can be expressed as :

$$a = \alpha \operatorname{tr} \boldsymbol{\sigma} / p_a \tag{13}$$

where P_a is atmosphere pressure(101.3kPa). It can be anticipated that the constant a relates to the speed of the strain softening.

To demonstrate the influence of the scale factor f_d on the response of the constitutive equation (10), a numerical triaxial compression test on cohesionless soil with a constant confining pressure 100kPa was conducted. The parameters shown in Table 1 and different constants for Eq.(11) were used in this simulation. The results are presented in Fig.1.

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

The essential effects of the scale factor f_d illustrated above seem to have been produced by the extended hypoplastic constitutive model equation (10). Unlike a constant stress remained in post-failure condition, a peak can be observed in the strain-stress curve. After the peak, there is a gradual reduction of the stress over strain history and a larger value of r can give rise to a more pronounced reduction of the stress. Eventually, the stress reduces to a constant value, which is controlled by the parameter r. The volumetric strain response can be affected by the scale factor as well. As illustrated in Fig.1, the volumetric strain rate decreases with the constant r and α .

Tab. 1 Parameters of the hypoplastic constitutive model



Fig.1 The influence of the scale factor fd on the response of numerical triaxial compression test

3.2 The viscous model for dynamic flow state

Following the framework of the viscous model. We propose a possible form of the viscous mode, which is presented as follows:

$$\dot{\sigma}_{vis} = (\eta_1 \sqrt{\eta_2} + \|\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}\|) \hat{\boldsymbol{\varepsilon}}$$
(14)

where $\ddot{\varepsilon}$ denotes the acceleration of strain rate in the dynamic flow state. The parameters η_1 and η_2 are viscous constant.

3.3 The creep constitutive model

Combining the frictional and viscous contributions Eq.(10) and Eq.(14). We obtain the following unified constitutive model

$$\sigma = C_1 \operatorname{tr}(\sigma) \varepsilon + C_2 \operatorname{tr}(\varepsilon) \sigma + C_3 \frac{\operatorname{tr}(\sigma \dot{\varepsilon})}{\operatorname{tr}\sigma} \sigma + f_d C_4(\sigma + \sigma^*) \|\dot{\varepsilon}\| + (\eta_1 \sqrt{\eta_2 + \|\dot{\varepsilon}\|}) \ddot{\varepsilon}$$
(15)

It is worth to note that the viscous model gives rise to change of dynamic stress in any variable flow phase. This means it is rate-dependent. A similar model was proposed by Xu[20,21] for frozen soil. However, the model presented here can be applied to all cohesive soils.

Within the framework of Eq.(15), we consider the variation of deformation with vanish stress rate($\dot{\sigma} = 0$), namely creep, and the strain rate of creep can be obtained by integration of the acceleration of strain rate c = c $tr(\sigma \dot{\epsilon}) = c + c - c$

$$\dot{\varepsilon}_{c} = \int \frac{\mathcal{C}_{1} \operatorname{tr}(\boldsymbol{\sigma}) \boldsymbol{\varepsilon}^{*} + \mathcal{C}_{2} \operatorname{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}) \boldsymbol{\sigma} + \mathcal{C}_{3}}{(\eta_{1} \sqrt{\eta_{2} + \|\boldsymbol{\dot{\varepsilon}}\|}) \boldsymbol{\varepsilon}} d\tau d\tau$$
(16)

Parameters C_i (i = 1,...4) in constitutive Eq.(16) are first identified for the case with scale factor $f_d = 1$. The other parameters such as r and α for calculation of scale factor, viscous parameters η_1 and η_2 can be identified by fitting experimental data. One example of the parameters for the Eq.(16) is given in Table 1 and Table 2.

Tab. 2 Parameters of the viscous model

Parameter	r	α	η_1	η_2
Value	2.0	0.28	1.33×10 ¹⁰	1.0×10 ⁻¹²

In the creep test, the creep failure is defined as a point where the minimum creep rate is obtained in the strain-time curve, meanwhile from which the strain rate begins to accelerate. Two concepts such as minimum rate and the time to the minimum rate are often used to describe creep failure. Before passing into the specification, let us consider a numerical creep test. In this numerical simulation, the specimen is first confined with 100 kPa of confining pressure, it follows, then, an accelerated compression in the axial direction until the prescribed axial stress is reached. Then we start the creep test in which the specimen is subjected to radial stress(100kPa) and axial stress(303 kPa).

The creep strain rate and creep strain against creep time have been presented in Fig.2. As can be observed in this figure, the strain rate is relatively high in the initial stage while it eventually reaches a minimum and becomes nearly constant. Noting that the minimum strain rate has been marked in this plot as well. Correspondingly, the creep strain rapidly increases in the primary creep stage and then evaluates gently in time. However, no tertiary creep takes place in this test. According to the definition of creep failure, we know that creep failure may occur when the minimum creep rate is obtained, or equivalently, when the creep acceleration vanishes. So the creep acceleration of a value of zero can be regarded as the symbol of creep failure. Fig.3 depicts the evolution of strain acceleration with time, where the acceleration experiences a considerable rise in the initial creep stage and then remains stable over the rest of creep time. Additionally, a magnified segment of the curve has been

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

plotted in this figure as well. This plot reveals that the acceleration gradually increases and surpasses zero, where the creep failure occurs. This implies the strain rate will slightly increase after failure.



Fig.2 Creep strain and strain rate against creep time. The red point denotes the minimum creep strain rate



Fig.3 Creep acceleration against creep time with magnified segment where acceleration approchs to zero

4 Conclusion

In the process of creep in soil, the soil particle experiences accelerated and decelerated motion, in which the interactions of friction and viscosity give rise to both solid-like behavior and fluid-like behavior in the material. Since there is no physical state transfer in the creep process, we cannot consider either frictional response or rheological response independently .In this work, a unified constitutive model considering both the friction and viscosity is introduced. This model is composed of a hypoplastic constitutive model and a viscous model . The viscous model contains a high order term representing the stretching-acceleration tensor. With the help of the viscous model, the unified model is capable of modeling the rate effect of soil. Moreover, by integration of the high order term, this model can be used to model creep . The numerical application of this model will be presented in the future work.

References

- Wu, W. On high-order hypoplastic models for granular materials. Journal of engineering mathematics, 56(1):23–34, 2006.
- [2]. Gudehus, G. A visco-hypoplastic constitutive relation for soft soils. Soils and Foundations, 44(4):11–25, 2004.
- [3]. Niemunis, A.; Krieg, S. *Viscous behavior of soil under oedometric conditions*.Canadian Geotechnical Journal, 33(1):159–168, 1996.
- [4]. Wu, W.; Bauer, E.; Niemunis, A. and Herle, I. Viscohypoplastic models for cohesive soils. Modern Approaches to Plasticity, pages 365–383, 1993.
- [5]. Henke, S. ; Grabe, J.Numerical investigation of soil plugging inside open-ended piles with respect to the installation method.Acta Geotechnica, Springer, 2008, 3, 215-223
- [6]. Lizcano, A.; Rinaldi, Vi. and Fuentes, W. M.Visco-hypoplastic model for Pampean Loess.Mechanics Research Communicationsnica Computacional, 2007, 26, 2646-2655
- [7]. Niemunis, A. A visco-plastic model for clay and its FEimplementation. Recent results in mechanics of soils and rocks, pages 151–162, 1996.
- [8]. Niemunis, A. Extended hypoplastic models for soils, volume 34. Inst. fur Grundbau und Bodenmechanik, 2003.
- [9]. Frohlich, H; Sack, R. Theory of the rheological properties of dispersions. In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, volume 185, pages 415–430. The Royal Society, 1946.
- [10]. Oldroyd, J.G. The elastic and viscous properties of emulsions and suspensions. In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, volume 218, pages 122– 132. The Royal Society, 1953.
- [11]. Kolymbas, D. A rate-dependent constitutive equation for soils. Mechanics Research Communications, Elsevier, 1977, 4, 367-372
- [12]. Kolymbas, D. A generalized hypoelastic constitutive law.Proceedings of XI International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering. AA Balkema, San Francisco, 1985
- [13]. Bauer, E.Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials. Soils and Foundations, Soils and Foundations, 1996, 36, 13-26

- [14]. Wu, W. ; Bauer, E.A simple hypoplastic constitutive model for sand. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Wiley Online Library, 1994, 18, 833-862
- [15]. Wu, W. ;Kolymbas, D.Numerical testing of the stability criterion for hypoplastic constitutive equations. Mechanics of Materials, Elsevier, 1990, 9, 245-253
- [16]. Wu, W.; Bauer, E. and Kolymbas, D.Hypoplastic constitutive model with critical state for granular materials. Mechanics of materials, Elsevier, 1996, 23, 45-69
- [17]. Wang,X.T.;Wu,W.An Updated Hypoplastic Constitutive Model, Its Implementation and Application.Bifurcations, Instabilities and Degradations in Geomaterials, Springer, 2011, 133-143
- [18]. Lin, J.; Wu, W. and Borja, R. I. Micropolar hypoplasticity for persistent shear band in heterogeneous granular materialsComputer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Elsevier, 2015, 289, 24-43
- [19]. Peng, C.; Wu, W.; Yu, H.S. and Wang, C.A SPH approach for large deformation analysis with hypoplastic constitutive model. Acta Geotechnica, Springer, 2015, 1-15

- [20]. Xu,G.F. *Hypoplastic constitutive models for frozen soil*. PhD thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, 2013.
- [21]. Xu,G.F.; Wu,W.; and Qi,J.L. *Modeling the viscous behavior of frozen soil with hypoplasticity.* International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2016.

Autor/PhD:



Dr.-Ing. Shun WANG Feistmantelstraße 4 1180 Wien Shun.wang@boku.ac.at

Jakob Grohmann

Systematische Gehölzpflanzung bei Infrastrukturprojekten

Die Gestaltung von Infrastrukturbauten stellt eine planerische und bauliche Aufgabe für Landschaftsgestaltung und Landschaftsbau dar. Einer fachgerechten Bepflanzung der jeweiligen Flächen mit Gehölzen kommt dabei eine besondere Bedeutung zu. Das Forschungsvorhaben will untersuchen, welche Methoden zur Bepflanzungsplanung sich bei Infrastrukturbauten bewährt haben. Wie genau und detailliert sollen in der Planung Vorgaben für die Ausführung der Bepflanzung gegeben werden? Worin liegen die Vorzüge einer systematischen, geometrischen Planung von Gehölzpflanzungen? Sind dabei gestalterische, wirtschaftlich-technische und ökologische Vorteile erkennbar? Beispielhafte Bauprojekte werden dabei analysiert, der Stand des Wissens zusammengefasst und innovative, tragfähige Lösungsansätze do-Über vorliegende Fachliteratur kumentiert. werden unterschiedliche Ansätze zur Bepflanzungsplanung dargelegt. Über die gelebte Praxis in Planung und Bau soll ein repräsentativer Überblick gegeben werden. Anhand einzelner, ausgewählter Projekte wird die Forschungsfrage abgearbeitet und die Hypothese überprüft. Als Prüfkriterien werden unter anderem das Maß der Abweichung zwischen planerischer Zielsetzung und Zustand der Anlage, der pflegerische Zustand der Gehölzpflanzen und die Entwicklung hinsichtlich Dominanz, Konkurrenz und Unterdrückung herangezogen.

Keywords Landschaftsbau; Vegetationstechnik; Infrastruktur; Landschaftsplanung; Detailplanung; Bepflanzung; Gehölzverwendung; Grünflächenmanagement;

1 Fragestellung

Große Verkehrs-Infrastrukturvorhaben führen zu einem Eingriff und einer Veränderung des Landschaftsgefüges. In Europa müssen diese Projekte daher im Zuge der Planung strenge umweltrechtliche Genehmigungsverfahren durchlaufen. Daraus resultierend sind behördliche Vorgaben und Auflagen umzusetzen, die den Schutz und die Wiederherstellung der landschaftlichen Integrität sicherstellen sollen.

Die Gestaltung des Verkehrsbauwerkes mit seinen Dämmen, Einschnittsböschungen und Verkehrsgrünflächen sowie den allenfalls erforderlichen, angrenzenden Ausgleichsflächen stellt eine planerische und bauliche Aufgabe für Landschaftsgestaltung und Landschaftsbau dar. Einer fachgerechten Bepflanzung der jeweiligen Flächen mit Gehölzen (Sträuchern, Bäumen) kommt dabei eine besondere Bedeutung zu.

Designing green road and railway infrastructures and its green areas is a challenging task for landscape planning and landscape construction. A professional planting of all green surfaces with shrubs and trees is of great importance. This thesis tries to find out, which methods of planning and designing green surfaces on infrastructures have succeeded. How precise and detailed should be the design of planting of trees and shrubs? Are there merits in a very systematic, geometric style of designing and arranging shrubs and trees? Are there substantial and visible advantages regarding esthetics, economics, technic and ecology? Selected built infrastructures are analyzed, state of the scientific and technical knowledge will be summed up and innovative, sustainable approaches and solutions will be expounded. Existing technical literature shows different paths and procedures in designing green areas with shrubs and trees in the large scale of infrastructures. A representative survey is given by showing how landscape designing and landscape construction is practiced on infrastructure projects. On the basis of some elected projects research questions and hypothesis will be tested and checked. A set of criteria as deviation of planning and status quo of the green area, the green surface care, the pruning, the development regarding dominance, competition and suppression will be taken into consideration.

Keywords landscape construction; vegetation technology; infrastructure, landscape architecture; planting design; coppice; landscape management;

An die Planung der Bepflanzung werden verschiedene Anforderungen gestellt. Es sind gestalterisch-ästhetische, technische als auch ökologische Zielsetzungen zu erfüllen. Die fachgerecht geplante Anlage von Baum- und Strauchpflanzungen stellt das Gerüst bei der Anlage von Grünflächen am Verkehrsbauwerk und in seinem Umfeld dar. Welchen planerischen Grundsätzen hinsichtlich Struktur, Geometrie und System kann hier gefolgt werden? In der Planungspraxis werden verschiedene Zugänge gelebt und ausgeführt. Unterschiedliche Planungsprinzipien und stark divergierende Planungstiefen sind erkennbar.

Welche Methoden zur Bepflanzungsplanung haben sich bei Infrastrukturbauten bewährt? Wie präzise und detailliert sollen im Zuge der Planung Vorgaben für die Ausführung gegeben werden? Worin liegt der gestalterische, wirtschaftlich-technische und ökologische Vorteil und Mehrwert einer systematischen, geometrischen Planung von Gehölzpflanzungen?

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Der innovative Ansatz einer geordneten, systematischen Detailplanung und Umsetzung von Gehölzpflanzungen mit geometrischen, standörtlichen, ästhetischen und ökologischen Prinzipien wird in der Literatur nur selten beschrieben und diskutiert. Eine Überprüfung der verschiedenen Ansätze im Rahmen einer Nachbetrachtung umgesetzter Bauvorhaben hat bisher nur in geringem Ausmaß stattgefunden. Anhand von in der eigenen Berufspraxis entwickelten Ansätzen und ausgeführten Werken sowie Beispielen von vergleichbaren Projekten sollen der Stand des Wissens und der Technik dazu zusammengefasst und innovative, tragbare Lösungsansätze dokumentiert werden.

2 Hypothesen

Aufbauend auf den Fragestellungen werden Thesen gegenüber gestellt, welche im Zuge der Dissertation wissenschaftlich überprüft werden sollen.

- 1. Eine strukturierte Vorgehensweise mit planerischen Grundsätzen und geometrischen Vorgaben zur Pflanzung von Gehölzen stellt einen Lösungsansatz dar. Sie wird in der Planungs- und Baupraxis mit unterschiedlicher Qualität gelebt und stellt den Stand der Technik dar.
- Mit nachvollziehbaren Prinzipien entwickelte Gehölzkombinationen ermöglichen eine überprüfbare und ökonomisch sinnvolle Planung und Umsetzung von Gehölzpflanzungen.
- 3. Systematische und nach geometrisch-technischen Prinzipien geplante und gepflanzte Gehölze sind kostengünstig, zeigen hohe Erfolgsraten hinsichtlich Anwuchs und Entwicklung und sind maschinell leichter zu pflegen.
- Systematische und nach geometrisch-technischen Prinzipien geplante und gepflanzte Gehölze erfüllen die technisch-wirtschaftlichen, ästhetisch-visuellen und ökologischen Ansprüche an die Umweltverträglichkeit des Infrastrukturbauwerks.
- 5. Rein ästhetisch- gestalterischen Ansprüchen an eine Gehölzpflanzung kann mit dem System einer modularen Gehölzpflanzung optimal entsprochen werden.

Die formulierten Hypothesen sollen vor dem Hintergrund der gelebten Praxis der Landschaftsplanung durchleuchtet werden. Die Rolle der Landschaftsplanung bei der Eingliederung von großen Infrastruktur-Bauwerken in Landschaft soll dabei hervorgehoben werden. Dem oftmals geringen Kostenanteil der Landschaftsplanung und deren Umsetzung im Landschaftsbau steht eine sehr hohe visuelle Wirkung der Grünflächen am Infrastrukturbauwerk gegenüber.

3 Methodischer Zugang

Der zum Thema vorliegende Wissensstand soll aufbereitet und zusammengefasst werden. Im deutschsprachigen Raum liegt dazu relativ wenig konkrete **Literatur** vor. Zwar werden planerische Ansätze in verschiedenen Quellen dargelegt, eine umfassende Betrachtung unter Berücksichtigung der gebauten Anlage und der effektiven Wirkungen und Erfolge nach der Umsetzung ist bisher kaum systematisch aufbereitet worden.

Ein Überblick über die gebaute **Praxis** kann über verschiedene Berichte und Veröffentlichungen zu Einzelanlagen gewonnen werden. Hier sind vielfach weniger wissenschaftliche Quellen heranzuziehen und auszuwerten. Direkte Berichte über Planungen und umgesetzte Bauvorhaben von Fachleuten werden zur Erhellung der Sachlage und zur Dokumentation herangezogen.

Darauf aufbauend wird eine **Auswahl** von gebauten Infrastruktur-Projekten näher untersucht. Ziel ist, anhand von ausgewählten Objekten eine vertiefende Sicht zu den Fragestellungen und den formulierten Hypothesen zu gewinnen.

Bisher wurde eine Vorauswahl von gebauten Infrastruktur-Vorhaben in Österreich getroffen. Davon umfasst sind unter anderem beispielgebende wesentliche, landschaftsverändernde Straßen-, Schienen- und Wasserbauten wie zum Beispiel die

- Außenring-Schnellstraße S1-Süd Vösendorf Schwechat
- Marchfeldkanal Langenzersdorf Deutsch Wagram
- Eisenbahn-Hochleistungsstrecke Wien St.Pölten
- Koralmbahn Graz Klagenfurt

Die Motive zur Auswahl der näher untersuchten, gebauten Infrastruktur-Projekte werden in der gegenständlichen Forschungsarbeit dargelegt.

Die Untersuchung und Prüfung der ausgewählten Projekte wird anhand von Prüfkriterien durchgeführt, welche nach planerischen, vegetationstechnischen, ökologischen und logistisch-wirtschaftlichen Aspekten festgelegt werden wie:

- Inhalt, Umfang, Maßstab und Qualität der Planungsunterlagen aus der Detailplanung
- Aktueller Zustand der Anlage generell im gesamtheitlichen Erscheinungsbild
- Zielerfüllung der planerischen Vorgaben zur Funktion der Fläche
- Zustand der Gehölzpflanzen
- Maß der nach der Bauherstellung wirkenden Einflussfaktoren durch die Entwicklungs- und Erhaltungspflege
- Bestandsentwicklung hinsichtlich Dominanz, Konkurrenz und Unterdrückung von Individuen und Arten

Ergänzt wird die Prüfung der Anlagen anhand der genannten Kriterien durch **Interviews** mit verantwortlichen Fachleuten. Dabei wird eine gut gestreute Auswahl von verschiedenen Zuständigkeiten vorgenommen, um unterschiedliche Sichtweisen darzustellen und ein umfassendes Gesamtbild erzeugen zu können.

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

4 Ergebnisse

Die Erhebungen und Untersuchungen zum gegenständlichen Forschungsvorhaben befinden sich noch in einer Anfangsphase. Der konzeptive Rahmen wurde abgesteckt und mit dem Betreuerteam diskutiert und abgeklärt. Erste Ergebnisse werden 2017 vorliegen. Der Abschluss der Arbeit ist für 2018 vorgesehen.

Ziel ist, den Stand des Wissens bei der Planung und baulichen Umsetzung von Gehölzpflanzungen bei Infrastruktur-Bauten darzulegen und weiter zu entwickeln. Neue, innovative Ansätze zu einer Systematisierung der Planung mit dem Ziel einer besseren Nachvollziehbarkeit, Prüfbarkeit und einer erfolgreichen Entwicklung der gepflanzten Anlagen sollen aufgegriffen und überprüft werden.

Abbildung 1: Systematische, modulare Gehölzpflanzung an einer Eisenbahn-Neubaustrecke in Österreich; Foto: Grohmann J., 2013



Abbildung 2: Planausschnitt aus der Bepflanzungsplanung an einer Eisenbahn-Neubaustrecke in Österreich; Planskizze: Grohmann J., 2013



Literatur

- [1] Borchardt, W.: Pflanzenverwendung im Gartenund Landschaftsbau: (Der Gärtner, Band 6). Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart 1997
- [2] GROHMANN J.: Modulare Gehölzpflanzung bei der Eisenbahn-Neubaustrecke Wien – St.Pölten; in: Bouillon J. (H.), Hochschule Osnabrück, 2014: Tagungsband zu den 32. Baumpflegetage Osnabrück;
- [3] PEUCKER, H.: Gehölzpflege: Bewirtschaftung von Gehölzbeständen in der freien Landschaft. Berlin: Parey, 1996
- [4] BUSCH, D.: Gestaltungs- und Entwicklungsgrundsätze für die Verkehrswegeböschungen und ihre Vegetation unter den Gesichtspunkten Naturhaushalt, Landschaftsbild, Fahrsicherheit und Unterhaltungsaufwand an Thüringer Autobahnen; in: Ingenieurbiologie – Sicherungen an Verkehrswegeböschungen; Jahrbuch 9 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie e.V. Aachen, Selbstverlag, Aachen, 2000

Autor/PhD:



Dipl.-Ing. Jakob Grohmann Kardinal Rauscher Platz 3/12, 1150 Wien Jakob.grohmann@boku.ac.at

Betreuerteam:

- Em.Univ.Prof. Dr. Florin Florineth, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau;
- Prof. Dr. Andreas Roloff, Technische Universität Dresden, Institut f
 ür Forstbotanik und Forstzoologie
- Prof. Dr. Norbert Kühn, Technische Universität Berlin, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung, Fachgebiet Vegetationstechnik und Pflanzenverwendung
- Dr. Helmut Pirc, Höhere Bundeslehr- und Versuchsanstalt für Gartenbau Schönbrunn, Wien

Stephan Hörbinger

Ökosystemdienstleistungen ingenieurbiologischer Maßnahmen auf unterschiedlichen Skalierungsebenen

Vegetationsbestände, die sich aus ingenieurbiologischen Bauweisen entwickeln, können eine Vielzahl an Ökosystemdienstleistungen (ÖSD) bereitstellen. Aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsbereiche und der räumlich differenzierten Nachfrage besteht eine der wesentlichen Herausforderungen dieser Arbeit in der methodischen Herangehensweise zur Darstellung der unterschiedlichen ÖSD. Die initiierten Vegetationsbestände können auf unterschiedlichen Ebenen und je nach Einsatzgebiet regulierende, versorgende und soziokulturelle Leistungen bieten. Es werden daher unterschiedliche Skalierungsebenen in die Betrachtung integriert. Anhand von zwei Beispielen werden hier die Vorgehensweise der Implementierung des ÖSD-Konzepts auf konkrete ingenieurbiologische Fragestellungen dargestellt. Ziel der Dissertation ist es, ÖSD-Potenziale und die Multifunktionalität von ingenieurbiologischen Bauweisen anhand von konkreten Fallbeispielen darzustellen.

Keywords Ingenieurbiologie, Ökosystemdienstleistungen, Multifunktionalität ingenieurbiologischer Bauwerke

1. Inhaltliche Beschreibung und Forschungsziel

Als Basis und methodischer Ansatz der Dissertation dient das Konzept der Ökosystemdienstleistungen (ÖSD). Dieses umfasst sämtliche Leistungen eines Ökosystems, durch die ein Nutzen für den Menschen entsteht. Leistungen ohne den direkten anthropogenen Nutzen, werden den Ökosystemfunktionen zugeordnet [1].

Als Bautechnik orientiert sich die Ingenieurbiologie stark am menschlichen Nutzen und umfasst die technische Sicherung, Erhaltung und gewünschte Entwicklung der behandelten Flächen. In vielen Fällen sind dies anthropogene Flächen wie Infrastrukturböschungen, modifizierte Fließgewässer oder Deponien. Das Konzept der ÖSD wurde für diese Arbeit gewählt, um die Leistungen, die durch die Anwendung der ingenieurbiologischen Bautechnik entstehen, zu klassifizieren und darzustellen. Durch ingenieurbiologische Maßnahmen initiierte Vegetationsbestände können neben den angestrebten technischen Eigenschaften, auch ökologische und landschaftsästhetische Funktionen erfüllen. Der daraus generierte Nutzen steht in direktem Zusammenhang mit der Nachfrage an ÖSD.

Ein wesentliches Ziel der Ingenieurbiologie ist es, durch ökologisch-technische Wirkungskomplexe degradierte oder modifizierte Landschaften durch gezielte bautechnische Maßnahmen möglichst schnell wieder in einen natürlichen Zustand zu

Vegetation, developed from soil bioengineering applications can provide multiple ecosystem services. Due to the different extent of the effective area and the spatially differentiated demand, one of the main challenges of this work lies in the methodical approach to the representation of the different ecosystem services. The vegetation that is initiated can offer different levels of provisioning, regulating and sociocultural services, depending on the area of application. Therefore, different scaling planes are integrated into the approach. On the basis of two examples, the implementation of the ecosystem service concept is presented in this article for specific soil bioengineering issues. The objective of the dissertation is to visualize ecosystem service potentials and the multifunctionality of soil bioengineering structures by conducting concrete case studies.

Keywords Soil Bioengineering, Ecosystem Services, Multifuncionality of Soil Bioenginerring Structures

bringen. Neben den gewünschten technischen Funktionen kann daraus eine Vielzahl an ökologischen Nutzen entstehen.

Der räumlichen und zeitlichen Ebene kommt bei der Betrachtung von ÖSD eine zentrale Bedeutung zu. Die ÖSD liegen auf unterschiedlichen räumlichen Skalierungsebenen. Ingenieurbiologische Bauwerke sind dynamisch Systeme, deren Eigenschaften sich über den Lebenszyklus verändern und deren Leistungen sich in den einzelnen Lebensphasen stark unterscheiden können. Insbesondere die technische Funktionalität steht in enger Verbindung mit der Entwicklung der als Baustoff verwendeten Pflanzen. Mit Hilfe von Zielvegetationstypen sollen Vegetationssysteme definiert werden, die gewünschte ÖSD über den Lebenszyklus effektiv erbringen können.

2. Forschungsfragen und Hypothesen

- Für die Arbeit ergeben sich folgende Fragestellungen:
- Wie können ÖSD-Angebot und ÖSD-Nachfrage klassifiziert und bewertet werden?
- Kann mit Hilfe von definierten Zielvegetationssystemen das Angebot an ÖSD gezielt über den Lebenszyklus gefördert werden und wie lässt sich die zeitliche Komponente in die Betrachtung integrieren?
- Wie können die unterschiedlichen Skalierungsebenen auf einer einheitlichen Betrachtungsebene verbunden werden?

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

- Hypothesen:
- Das Konzept der ÖSD kann die Grundlage für ein praxisnahes Instrument zur Darstellung von ÖSD-Angebot und ÖSD-Nachfrage von ingenieurbiologischen Ma
 ßnahmen bereitstellen.
- Durch die kombinierte Anwendung von GIS-Systemen, Techniken der Fernerkundung und Kleinversuchen können ÖSD-Angebot und ÖSD-Nachfrage der unterschiedlichen Skalierungsebenen integral untersucht werden.

5 3. Theorie und allgemeiner Überblick über den Stand des Wissens

Eine Ökosystemdienstleistung (ÖSD) kann als Schnittstelle zwischen den Ökosystemen und der Gesellschaft verstanden werden, wobei den einzelnen ÖSD ein bestimmter Wert zugeordnet wird [4]. Das Konzept der ÖSD wird aber auch kritisch betrachtet. Muraca, 2012 sieht die Reduktion von Biodiversiät und ÖSD auf marktförmige Größen kritisch, da viele der natürlichen Dienstleistungen gar nicht quantitativ messbar sind und der zeitliche Rahmen ihres Nutzens sich über einen Zeitraum erstreckt, der weit über den Zeitraum der ökonomischen Relevanz hinausgeht [3]. Hein et al. 2006 wiesen auch auf die Maßstabsabhängigkeit von ÖSD hin, die noch relativ wenig untersucht worden ist [2].

In dem hier präsentierten Vorhaben werden Ingenieurbauwerke untersucht. D.h. es werden stark anthropogen beeinflusste und keine natürlich entwickelten Ökosysteme betrachtet. Es wird versucht, das Konzept der ÖSD auf eine bautechnische Maßnahme anzuwenden, um gezielt das Angebot an ÖSD über den Lebenszyklus der Maßnahme zu untersuchen.

4. Vorgehensweise und Darstellung der geplanten Methoden

Im Rahmen der Dissertation werden ingenieurbiologische Bauwerke in unterschiedlichen Anwendungsfeldern untersucht. Die Vorgehensweise und Methodik wird anhand von zwei Beispielen erläutert:

Im Süden Brasiliens kommt es im ländlichen Bereich aufgrund des Rückgangs der Terrassenbewirtschaftung und durch die Flurbereinigung zu massiven Erosionsschäden. Konventionelle Techniken zur Restaurierung sind kosten-, ressourcenund flächenintensiv. Mit Hilfe von Fragebögen und durch Interpretation von Luftbildern wird die Nachfrage an Erosionsschutz in der Region quantifiziert. Anhand eines Fallbeispiels wird eine großflächige Rinnenerosion, mit den bisher in der Region unbekannten Techniken der Ingenieurbiologie, restauriert. Ziel der Arbeit ist es, regulierende, versorgende und soziokulturelle ÖSD von ingenieurbiologischen Maßnahmen zu quantifizieren. In einer zweiten Studie wird die Begleitvegetation von Bahnstrecken untersucht. Es wird ein GIS-basiertes Systems zur Identifizierung der lokalen ÖSD-Nachfrage und des ÖSD-Angebots entwickelt. Ziel ist es, die Multifunktionalität von Bahnbegleitvegetation aufzuzeigen und eine Grundlage zur Entwicklung von Zielvegetationssystemen bereitzustellen.

Literatur

- GRUNEWALD, K.; BASTIAN, O. (HRSG.): ÖKOSYS-TEMDIENSTLEISTUNGEN - KONZEPT, METHODEN UND FALLBEISPIELE. BERLIN; HEIDELBERG: SPRINGER 2013.
- [2] HEIN L; VAN KOPPEN K; DE GROOT RS; VAN IERLAND E.C.: SPATIAL SCALES, STAKEHOLDERS AND THE VAL-UATION OF ECOSYSTEM SERVICES. ECOLOGICAL ECO-NOMICS 57 (2006), S. 209–228.
- [3] MURACA B.: EINE FRAGE DER GERECHTIGKEIT PHILO-SOPHIN HINTERFRAGT DIE MONETARISIERUNG VON ÖKOSYSTEMLEISTUNGEN. URL: HTTP://WWW.UNI-JENA.DE/-P-345076.PDF, (01.12.2016).
- [4] TEEB: THE ECONOMICS OF ECOSYSTEMS AND BIODI-VERSITY: ECOLOGICAL AND ECONOMIC FOUNDA-TIONS, EDITED BY PUSHPAM KUMAR, LONDON AND WASHINGTON D.C., EARTHSCAN, (2010A)

Autor/PhD:

Dipl.-Ing. Stephan Hörbinger

Peter-Jordan-Straße 82

1190 Wien

stephan.hoerbinger@boku.ac.at

Betreuerteam:

- Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Hans Peter Rauch
- Prof. Dipl.-Ing. Dr. Fabrício Jaques Sutili,
- Dipl.-Ing. Dr. Michael Obriejetan
- M.Sc. Paola Sangalli

Alexandra Medl

,Green Walls'

Materialien und Methodik zu Vegetationsentwicklung und Mikroklima an begrünten Spritzbetonwänden in Tirol

Der fortwährende Ausbau von Verkehrs- und Transportsystemen im Zuge von Großinfrastrukturprojekten, speziell in alpinen Regionen, macht die Errichtung von Steilböschungen aus Gründen des sparsamen Umgangs mit Vegetationsflächen unumgänglich. Diese Steilböschungen sind jedoch meistens optisch nur wenig ansprechend, weshalb nach ökologisch vertretbaren sowie nachhaltigen Lösungen gesucht wird, um eine optimale Integration ins Landschaftsbild zu erreichen. Diese Dissertation beschäftigt sich mit der Begrünung von Spritzbetonwänden entlang von Verkehrsinfrastrukturen des Brenner Basistunnels. Im Zuge der Forschungsarbeiten wird die Entwicklung der Vegetation auf einem speziell für diese Zwecke ausgewählten Begrünungssystem dokumentiert und analysiert, sowie auf die Begrünung zurückzuführende Veränderungen des Mikroklimas untersucht. Die größte Herausforderung stellt aufgrund der extremen Umweltbedingungen für die Pflanzen (extreme Neigung der Böschung, unmittelbare Nähe zur Straße, Staub- und Salzbelastung etc.) vor allem die nachhaltige Etablierung einer flächendeckenden Vegetation dar. Der Untersuchungsstandort befindet sich in Plon, Steinach am Brenner, Tirol.

Keywords <Spritzbetonwand; Begrünungssystem; Vegetation; Landschaftsästhetik>

1 Einleitung

Der Spritzbeton hat den Zweck, senkrechte Felsböschungen gegen Steinschlag an Verkehrsinfrastrukturen zu sichern. Neben ihrer Funktion der Standsicherheit zeigen derartige Steilwälle auch ein landschaftsästhetisches und mikroklimatisches Potential. Durch die Kombination der technischen Bauwerke mit biologischen Komponenten (Vegetation) kann dieses vorhandene Potential voll ausgeschöpft werden. Die Herausforderung in diesem Zusammenhang besteht vor allem darin, geeignete Vegetationsstrukturen zu etablieren und sie trotz der lokal extremen Klimabedingungen und starker Beanspruchung nachhaltig zu erhalten.

Ziel der Dissertation ist, unter Verwendung eines speziell für diese Zwecke geeigneten Begrünungssystems eine nachhaltige Begrünung der Spritzbetonwände der BBT (Brenner Basistunnelgesellschaft) im Bereich Plon in Steinach am Brenner zu erreichen. Die Leistungsfähigkeit des Begrünungssystems an diesen Extremstandorten soll durch die Forschungsarbeit, insbesondere hinsichtlich ihres biologischen und mikroklimatischen Potentials, quantifiziert werden.

The continuing expansion of traffic and transport systems in the course of major infrastructure projects, particularly in mountainous regions, is accompanied by a rise in the number of steep slopes, which represent a widely visible disturbance in the landscape. Thus, an ecologically oriented and sustainable solution to integrate these slopes in the natural environment is needed. This thesis focuses on the greening of shotcrete walls along traffic infrastructure of the Brenner Base tunnel and documents implementation and development of an innovative greenery system, chosen especially for this purpose. Additionally, expected microclimatic changes due to the greenery system are going to be analyzed. A major challenge represents the establishment of a sustainable vegetation layer due to the extreme environmental conditions (high inclination, direct vicinity to the street...) for plants. Study site is located in Plon, Steinach am Brenner, Tyrol.

Keywords <shotcrete wall; greenery system; vegetation; land-scape aesthetics >

Folgende Fragestellungen sollen daher im Zuge der Dissertation beantwortet werden:

- Wie entwickelt sich die Vegetationsstruktur auf den Versuchsflächen in der ersten und der darauffolgenden Vegetationsperiode? Gibt es signifikante Unterschiede bezüglich der Keimfähigkeit verschiedener Bodensubstrate? Können zusätzlich verschiedene Entwicklungen festgestellt werden, welche auf unterschiedliche Erosionsschutzmaßnahmen zurückzuführen sind?
- Inwiefern verändert sich die Artenzusammensetzung der Vegetation mittelfristig? Sind Abweichungen zwischen den Bodensubstraten erkennbar?
- Haben die extremen Standortbedingungen, insbesondere die starke Neigung und damit verbundene Auswirkungen auf die Wasserverteilung im Begrünungssystem, Folgen für den Wasserhaushalt ausgewählter Pflanzenarten? Stehen die Pflanzen eventuell unter Stress?

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

 Welche mikroklimatischen Unterschiede bestehen zwischen einer "konventionellen" Spritzbetonwand und einer "grünen" Spritzbetonwand?

2 Methodik

2.1 Versuchstrecke

Im Juni 2015 wurde eine Versuchsstrecke (Länge: 36 m, Höhe: 4 m) in Plon, im Bereich Steinach am Brenner (Tirol, Österreich, 1048 m ü.A., 47° 6'N, 11° 28'O), errichtet , um eine Untersuchung der 'Green Wall' unter realistischen Bedingungen zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wurde ein süd-östlich exponierter Teilbereich der Spritzbetonwand ausgewählt und mit dem Begrünungssystem versehen. Die Versuchsstrecke besteht aus insgesamt 3 verschiedenen Versuchsfeldern, wobei die Unterscheidung durch die Bodensubstrate erfolgt. Zur Verwendung kamen dabei drei verschiedene Gesteinsmaterialien (Innsbrucker Quarzphyllit, Bündnerschiefer, Zentralgneis), welche mit Kompost vermischt und ins Begrünungssystem eingebaut wurden. Zu einer zusätzlichen Unterteilung der Versuchsfelder kam es durch die Verwendung von jeweils fünf unterschiedlichen Geotextilien: Geogitter (4x4mm), Geogitter (9x10mm), Kokosnetz, Kokosmatte, Geomatte.

Die verwendete Stahlgitterkonstruktion (Krismer GmbH, Rum, Österreich) besteht aus zwei Gitterlagen, welche mit grobem Gesteinsmaterial (Innsbrucker Quarzphyllit, Bündnerschiefer oder Zentralgneis) gefüllt wurden. Bewässert wird automatisch mittels zwischen den beiden Gitterlagen eingebauten Bewässerungsschläuchen. Begrünt wurde die gesamte Versuchsstrecke durch Hydrosaat, wobei für alle Versuchsfelder dieselbe Saatgutmischung zur Anwendung kam. Als letzter Schritt erfolgte die Anbringung unterschiedlicher Geotextilien, welche zum Zwecke der statistischen Analyse in ungeordneter Reihenfolge montiert wurden.

Saatgutmischung														
Bodensubstrat 1			Bodensubstrat 2				Bodensubstrat 3							
Geotextil 1	Geotextil 2	Geotextil 3	Geotextil 4	Geotextil 5	Geotextil 3	Gcotextil 5	Geotextil 1	Geotextil 2	Geotextil 4	Geotextil 5	Geotextil 4	Geotextil 3	Geotextil 1	Geotextil 2

Bild 1: Schematische Darstellung der Anordnung der Versuchsstrecke.



Bild 2: Versuchsstrecke nach dem Mähen in der zweiten Vegetationsperiode im September 2016.

2.2 Bodensubstrat

Bei dem für die Auffüllung des Begrünungssystems verwendeten Gesteinsmaterial handelt es sich im Fall von Innsbrucker Quarzphyllit und Bündnerschiefer um Ausbruchmaterial, welches im Zuge der Tunnelbaumaßnahmen des Brenner Basistunnels gewonnen wird und auf ein eventuelles Recycling für Begrünungszwecke getestet werden soll. Der Zentralgneis stammt aus einem Steinbruch in unmittelbarer Nähe zum Versuchsstandort.

Die unterschiedlichen Gesteinsmaterialien dienen als Basis für das in das "Green Wall'-System eingefüllte Bodensubstrat, dem zusätzlich Kompost beigemischt wird. Getestet werden Innsbrucker Quarzphyllit, Bündnerschiefer und Zentralgneis.

2.2.1 Lithologie der Gesteinsmaterialien

Voit (2013) beschreibt die mineralische Zusammensetzung der ausgewählten Gesteinsarten wie folgt:

Der Innsbrucker Quarzphyllit wird durch eine geringere Härte und einen erhöhten Feinanteil charakterisiert. Der Bündnerschiefer weist ähnliche Merkmale auf, unterscheidet sich vom Innsbrucker Quarzphyllit und vom Zentralgneis jedoch vor allem durch seine hohen Kalkanteile. Der Zentralgneis weist aufgrund des hohen Quarzanteils eine hohe Gesteinshärte auf. University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

2.3 Geotextilien

Auf der Versuchsstrecke wurden insgesamt fünf verschiedene Geotextilien (sowohl netzartig, als auch flächendeckend aufgebracht, welche aus organischen (Kokosnetz, Kokosmatte) oder synthetischen Materialien (Geogitter (4x4mm), Geogitter (9x10mm), Geomatte) bestehen.

2.4 Saatgutmischung

Die Saatgutmischung wurde eigens für diesen Zweck erstellt und besteht aus Gräsern (Dactylis glomerata, Festuca ovina, Festuca rubra, Lolium perenne, Phleum pratense, Poa pratensis), Leguminosen (Anthyllis vulneraria, Lotus corniculatus, Medicago lupulina, Onobrychis viciifolia, Trifolium repens, Trifolium pratense) und Kräutern (Achillea millefolium, Dianthus carthusianorium, Galium verum, Hieracium pilosella, Petrorhagia saxifraga, Plantago lanceolata, Salvia pratensis, Sanguisorba minor, Silene vulgaris, Thymus pulegioides).

2.5 Deckungsgrad der Vegetation

Der Grad der Vegetationsdeckung wird durch visuelle Schätzung ermittelt. Neben dem ,top cover', welcher den Anteil der Vegetation repräsentiert, der den Boden bedeckt, wird der Deckungsgrad noch ein zweites Mal, nach der Mahd, geschätzt, um eine Verfälschung durch die überhängende Vegetation zu vermeiden (Greig-Smith, 1983).

2.6 Artenzusammensetzung

Die Artenzusammensetzung wird unter Anwendung der Punkt-Quadrat-Methode erhoben. Dabei wird mit Hilfe eines Frequenzrahmens und einer Nadel das Vorhandensein oder Nicht-Vorhandensein einer Art erhoben (Greig-Smith, 1983). Die Frequenz repräsentiert dabei das prozentuelle Vorkommen einer Art an einer bestimmten Anzahl an Aufnahmepunkten und kann dementsprechend ausgewertet werden (Peratoner and Pötsch, 2015).

2.7 Biomasse

Zur Bestimmung der oberirdischen Biomasse wird das im Zuge der Mäharbeiten gewonnene Pflanzmaterial aufbereitet. Das Material wird in ,Gräser' und ,Kräuter' geteilt und für 24h bei 105°C im Trockenschrank getrocknet. Danach wird das Trockengewicht dokumentiert und interpretiert.

2.8 Relativer Wassergehalt der Pflanzen

Um festzustellen, ob die Pflanzen auf der Versuchsstrecke gestresst sind oder nicht, wird der relative Wassergehalt (der Pflanzen) analysiert. Um Transpiration am Transportweg zu verhindern, werden die Proben in Alufolie verpackt und ins Labor gebracht, wo das Frischgewicht (FG), Sättigungsgewicht (SG) und Trockengewicht (TG) ermittelt werden. Anschließend wird der relative Wassergehalt der Pflanzen laut nachfolgender Formel ermittelt (Lassoie and Hinckley, 1991):

$$RWG = \frac{FG - TG}{SG - TG} \cdot 100$$

2.9 Mikroklimatische Untersuchungen

Zur Erhebung der mikroklimatischen Unterschiede zwischen der 'konventionellen' unbegrünten Spritzbetonwand und der mit dem Begrünungssystem versehenen ,Green Wall' wurde ein Mess-Setup installiert, wodurch folgende Parameter untersucht werden konnten: Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, kurzwellige Solarstrahlung, Temperatur des Bodensubstrats und Oberflächentemperatur der nackten Betonfläche, sowie der Betonfläche unter dem Begrünungssystem. Die über der Versuchsstrecke aufgebaute Klimastation dient der Messung von meteorologischen Standarddaten (Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Solarstrahlung, Wind).

2.10 Ergebnisse

Nach Ablauf der ersten Vegetationsperiode (2015) kann hinsichtlich der Vegetationsdecke und des Begrünungserfolges eine deutliche Tendenz zum Bündnerschiefer erkannt werden. Insbesondere in Kombination mit netzartigen Geotextilen konnten gute Resultate erzielt werden.

Die mikroklimatischen Untersuchungen zeigen eine deutliche, auf das Begrünungssystem zurückzuführende Kühlwirkung in den heißen Sommermonaten, sowie einen starken Dämmeffekt durch die ,Green Wall' im Winter.

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Literatur

- [1] GREIG-SMITH, P.: *Quantitative plant ecology*. Los Angeles, Berkely: University of California Press 1983.
- [2] PERATONER, G., PÖTSCH, E. M.: *Erhebungsmethoden des Pflanzenbestands im Grünland.* 20. Alpenländisches Expertenforum 2015, 15 – 22.
- [3] VOIT, K.: *Einsatz und Optimierung von Tunnelausbruchsmaterial des Brenner Basistunnels*. Dissertation. Universität für Bodenkultur Wien 2013.
- [4] LASSOIE, J. P., HINCKLEY, T.M.: Techniques and approaches in forest tree ecophysiology. CRC Press, United States 1991.

Autor/PhD:



Dipl.-Ing. Alexandra Medl

Peter-Jordan-Straße 82

1190 Wien

Alexandra.medl@boku.ac.at

Betreuerteam:

Betreuer: Em.O.Univ.Prof. Dr.phil. Florin Florineth

Berater: O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. MSc. Ph.D. Dr.phil. Dr.techn. Konrad Bergmeister

Ao.Univ.Prof. Dr.phil. Silvia Kikuta

Mag.Dr. Stefan Mayr

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Johann Peter Rauch

Omarova Dinara

Das Wurzelwachstum von *Salix purpurea* in Böden verschiedener Korngrößen

In dieser Arbeit wird die Wurzelentwicklung der Salix purpurea in Quarzsanden unterschiedlicher Korngrößen beobachtet und dokumentiert. Die Untersuchungen sind in 30 Rhizoboxen im Versuchsgarten Essling der Universität für Bodenkultur über jeweils 3 Monate im Jahr 2014 und 2015 durchgeführt worden. Die Entwicklung der Wurzeln wurde einerseits anhand einer nicht-zerstörenden Bildanalyse und anhand einer zerstörenden Methode durchgeführt.

Der Versuch hat gezeigt, dass die Bodenkorngröße die Entwicklung der einzelnen Wurzelparameter sehr wohl beeinflusst und dass feinere Korngrößen ein besseres Wurzelwachstum zeigen.

Keywords: *Salix purpurea*, Purpurweide, Erosionsschutz, Tugay-Kasachstan, Rhizobox, nicht-zerstörende Methode, Wurzel-Architektur, Korngröße, Wurzelbild

1 Einleitung

In Steppengebieten Mittelasiens (Kasachstan) spielen natürliche Wälder eine bedeutende Rolle als Wind- und Wassererosionsschutz. Die Weide ist ein Pioniergehölz, welches vor allem dazu dient, die Böden für andere Gehölze besiedelbar zu machen. Ein Teil von waldbildenden Gehölzen in Tugay (ein Waldtyp am Flussrand in ariden Gebieten Kasachstans) ist abgestorben, weil diese keine entsprechenden Vermehrungs- und Regenerationsbedingungen vorfinden. Um das Waldökosystem im lebensfähigen Zustand zu erhalten, muss dem Wachstum der Weide als Pioniergehölz mehr Aufmerksamkeit gewidmet werden.





This thesis focuses on the observation and documentation of the root development of purple Salix purpurea in quartz sand, covering the following grain sizes. The studies have been conducted from 2014 to 2015 with 30 rhizotrones in the experimental garden "Essling" of the University of Natural Resources and Life Sciences in Vienna. The root development has been evaluated through image analysis by a non-destructive method on the one hand and through a destructive method on the other hand. Apart from image analysis, the evaluation of grain size distribution and the determination of the water holding capacity are important factors in this survey.

In conclusion it can be stated, that different grain size causes variation in root development and that roots in rhizotrones with finer grain sizes show better growth in comparison to rhizotrones with bigger grain size.

Keywords: *Salix purpurea*, willow-cuttings, erosion protection, Tugay-Kazahstan, thizotron, non-destructive method, root architecture, grain sizes, root image

Die Problematik hat bisher wenig Aufmerksamkeit in Untersuchungen zum Thema Erosionsschutz erhalten, trotz seiner wahrscheinlich großen Bedeutung. Für einen ausreichenden Erosionsschutz ist ein genaues Bild über den Zustand des Wurzelsystems notwendig (Bild 1).

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist, die Entwicklung der Weidenwurzelarchitektur in Böden unterschiedlicher Korngröße und ihre Beziehung zu oberirdischen Pflanzenteilen zu untersuchen.

2 Hypothese

Die Bodenkorngröße beeinflusst die Wurzelarchitektur von Salix purpurea und diese kann mit Hilfe der Rhizoboxen untersucht werden.

Auf Basis der vorliegenden Arbeit zeigt erstens eine einfache Beobachtung, dass unter verschiedenen Einflussfaktoren die Wurzelarchitektur gleicher Pflanzenart und Sorte unterschiedliche Entwicklungscharakteristika aufweist. So hat zum Beispiel ein verdichteter Boden mit einem großen Anteil an Feinporen zur Folge, dass eine stärkere Entwicklung der Seitenwurzeln im Vergleich zur Hauptwurzel zu beobachten ist [1].

Zweitens zeigen die Untersuchungen, dass mit Hilfe von Rhizoboxen für die quantitative Messung der Wurzel-Architektur-Parameter in 2D und die Wurzel-Sprossbiomasse-Auswertung (bis zu 80 cm Höhe) bei Gehölzen möglich ist [2].

Eine Rhizobox wird normalerweise mit jungen bzw. einjährigen Pflanzen bestückt, da die Box ein begrenztes Volumen hat und daher für große Pflanzen zu wenig Platz bietet [3].

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Drittens zeigen die bisherigen Tests, dass zur Zeit mehrere effiziente Software-Produkte für die Auswertung des Wurzelbildes zur Verfügung stehen und damit ein genaues Bild über die Wurzelarchitekturentwicklung in Zeit und Raum darstellen [4].

Die Dissertation beantwortet auf Basis der aufgeführten Argumentationen folgende Forschungsfragen:

1. Zum Rhizoboxmodell

- Welches Rhizoboxmodell ist f
 ür die Weiden-Untersuchung geeignet?
- 2. Zum Wurzelbild
 - Wie gewinnt man das Wurzelbild in besserer Qualität, da diese als Hauptdatenlieferant dient?
- 3. Im Hinblick auf die Softwareauswahl
 - Welche Software-Produkte sind zum Auswerten des Wurzelbildes am besten geeignet?
- 4. Zu den Wurzeldaten
 - Wie entwickelt sich die Wurzelarchitektur von Salix purpurea in Zeit und Raum quantitativ und qualitativ in Tiefen von 0 bis 80 cm (was in etwa dem Grundwasserspiegel im Weidenbereich am Fließgewässer entspricht)?
 - Wie unterscheidet sich die Wurzelarchitekturentwicklung der Purpurweide in Böden verschiedener Korngrößen in Bezug auf Biomasse, bewurzelte Fläche, Bewurzelungsgrad, Gesamtlänge und Länge der Wurzeln mit verschiedenen Durchmessern?
 - Wo liegt der Unterschied bei der Entwicklung des oberirdischen Teiles von *Salix purpurea* in Böden verschiedener Korngröße?
 - Wie hoch ist die oberirdische Biomasse der Purpurweide in Böden verschiedener Korngröße?
 - Wie groß ist das Wurzel- Spross Verhältnis bei der Purpurweide?

3 Material und Methode

Die Wurzeluntersuchung an der Purpurweide wurde als Modellversuch auf 5 Böden verschiedener Korngrößen durchgeführt, mit welchem die Dynamik des Wurzelwachstums, die Biomasse, die Wurzel-Architektur und die Dynamik des Sprosswachstums dargestellt werden.

Im Speziellen werden in dieser Arbeit Rhizobox-bezogene Untersuchungs- und Analysemethoden vorgestellt und die für die angeführten Fragestellungen passende Methode ausgewählt. Dazu wurden Rhizoboxen entwickelt und aufgebaut, die die präzise Erforschung des Wurzelsystems ermöglichen. Als Pflanzenmaterial für die Untersuchung dient Purpurweide (*Salix purpurea*) aus dem Versuchsgarten/Wien, Essling. Steckhölzer mit einer Länge von 15cm und einem Durchmesser von 0,5cm kamen zur Verwendung (Bild 3). Als Bodenmaterial wurde Quarzsand mit folgenden Korngrößen eingesetzt: 0-1 mm, 0-4 mm, 0,1-0,3 mm, 0,3-1 mm, 0,5-2 mm.

Purpurweide wurde aufgrund ihrer ausgezeichneten vegetativen Vermehrbarkeit und ihres raschen Wachstums als Versuchspflanze ausgewählt. Sie gilt auch als Pflanze mit Pioniercharakter und besitzt die Fähigkeit Sprosswurzeln auszubilden [5]. Diese Weidenart ist eine der robustesten und verträgt sowohl Hitze und Trockenheit als auch Nässe, und kommt auch in den natürlichen Beständen von Tugay vor. Aus diesen genannten Gründen und wegen ihrer Biegsamkeit ist *Salix purpurea* eine der am häufigsten verwendeten Pflanzen in der Ingenieurbiologie [6].



Bild 2: Rhizoboxanlage, Versuchsgarten Wien/Essling

Universität für Bodenkultur Wien University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren



Bild 3: Steckhölzer mit einer Länge von 15cm und einem Durchmesser von 0,5 cm

Die Versuche zum Wurzelwachstum der Purpurweiden-Steckhölzer erfolgten im Versuchsgarten in Wien/Essling. In einem 10 m langen und 4 m breiten Folientunnel wurde die Rhizoboxanlage (30 Boxen) in Nord-Süd-Richtung aufgestellt. Dies gewährleistet eine gleichmä-Bige Lichtausnutzung von allen Seiten (Bild 2).

Pro Box wurden 2 Steckhölzer eingepflanzt. Zum einen war ausreichend Platz vorhanden, zum anderen diente das zweite Steckholz zur Absicherung im Falle eines Ausfalles. Beim feinen Sand musste das Steckloch mit einem Holzstiel vorgestochen werden, damit die Rinde der Hölzer nicht beschädigt wird. Alle *Salix purpurea* Steckhölzer wurden entsprechend der Wuchsrichtung in die Rhizobox eingesteckt, sodass ihr Ende ca. 1 cm aus dem Sand herausragte. Zum Abdunkeln der Sichtfenster wurde für den Versuch eine Styroporplatte (50 x 70 cm) vorgelagert.

Für die Befüllung der Rhizobox stand feuergetrockneter Quarz-Sand von der Firma Herzer Bau- und Transport GmbH aus 1220 Wien mit folgenden Korngrößen zur Verfügung:

- 0 1 mm
- 0-4 mm
- 0,1 0,3 mm
- 0,3-1 mm
- 0,5 -2 mm

Die Rhizobox-Untersuchung als nicht-zerstörende Methode bietet die Möglichkeit, am Wurzelsystem das Wachstum zeitlich und räumlich zu beobachten.

Insgesamt sind 33 (mit Vorversuchen) Rhizoboxen in der Größe von 50cm x 75cm x 5cm mit einer Glaswand gebaut worden. Eine Versuchsreihe dauert 3 Monate. Die Konstruktion ist leicht auf- und nachzubauen, weil auch alle Teile ersetzbar sind.

Da die Rhizoboxen um 45 Grad gekippt sind, wird auch der Geotropismus von Wurzeln und Sprossen gemessen. In dieser Arbeit wurden die Wurzeln von geneigt sowie aufrecht eingepflanzten Steckhölzern miteinander verglichen.

Alle Rhizobox-Untersuchungen werden im Folientunnel unter gleichen Klimabedingungen wie Temperatur und Licht durchgeführt.

Der gesamte Aufbau wurde nach dem Stecken der Weiden von Hand

bewässert. Bereits nach einer Woche waren am Steckholz die ersten Knospen sowie die ersten Wurzeln am Sichtfenster (der geneigten Rhizoboxen) zu beobachten.

Die bepflanzten Rhizoboxen wurden nun einmal in der Woche kontrolliert und dabei mit je zwei Liter Wasser versorgt. An allen 60 Steckhölzern zeigte sich ein sehr guter Anwuchserfolg.

Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse zur Wurzelarchitektur wurden als Fotodokumentation dargestellt (Bild 4). Zudem wurden der Wurzel-Typ, die Farbe, der Durchmesser und die Länge gemessen und aufgezeigt. Die Daten wurden jede dritte Woche aufgenommen. Die Bearbeitung von Rasterbildern ersetzt die Methode des Nachzeichnens von Wurzeln [7]. Das im Adobe Photoshop und SAI bearbeitete Wurzelbild dient als Hauptdatenlieferant (Bild 5).

Die Wurzelbilder wurden im nächsten Schritt mit der Software GI-ARoot analysiert. Mittels eines Punkte Modells wird ein charakteristisches Bild der Wurzeln erstellt. Damit kann die Verbreitung der Wurzeln im Boden dargestellt und ausgewertet werden [8]. [9]

Danach folgte die zerstörende Methode bei der die angewachsenen Steckhölzer ausgewaschen werden. Die Sprosse wurden mit Hilfe der Software WinFOLIA analysiert, die ausgewaschenen Wurzeln mit Hilfe von WinRHIZO gescannt, danach getrocknet und abgewogen.



Bild 4: Wurzelbild (Salix purpurea), 3 Monate

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren



Bild 5: Im Adobe Photoshop bearbeitetes Wurzelbild (Nachzeichenmethode)

4 Literatur

- POLOMSKI, J., & KUHN, N. (1998): WURZELSYSTEME. BIRMENSDORF, EIDGENÖSSISCHE FORSCHUNGSANSTALT FÜR WALD, SCHNEE UND LANDSCHAFT. BERN, STUTTGART, WIEN.
 - [2] NAGEL K. 2012: GROWSCREEN-RHIZO IS A NOVEL PHENOTYPING ROBOT ENABLING SIMULTA-NEOUS MEASUREMENTS OF ROOT AND SHOOT GROWTH FOR PLANTS GROWN IN SOIL-FILLED RHI-ZOTRONS, 891-892.
 - [3] NEUMANN, G., TIMOTHY, S. G., & PLASSARD, C. (2009): STRATEGIES AND METH-ODS FOR STUDYING THE RHIZOSPHERE- THE PLANT SCIENCE TOOLBOX. PLANT SOIL.
 - [4] GREGORY PJ. (2009): MEASURING ROOT SYSTEM ARCHITECTURE: OPPORTUNITIES AND CHAL-LENGES. INTERNATIONAL SYMPOSIUM "ROOT RE-SEARCH AND APPLICATIONS" ROOTRAP, SEPTEM-BER 2009, BOKU – WIEN, AUSTRIA.

- [5] HÖRANDL E., FLORINETH F., HADACEK F. (2012): WEIDEN IN ÖSTERREICH UND ANGRENZEN-DEN GEBIETEN; EIGENVERLAG DES ARBEITSBE-REICHS INGENIEURBIOLOGIE UND LANDSCHAFTS-BAU, 2. AUFLAGE. UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR. WIEN.
- [6] SCHENKENBACH, N. (2012): STECKHOLZENT-WICKLUNG VON SALIX PURPUREA L. MIT UNTER-SCHIEDLICHEN DURCHMESSERN. DIPL., UNIVERSI-TÄT FÜR BODENKULTUR WIEN, WIEN.
- [7] GUPTA DUTTA S., IBARAKI Y. (2015): PLANT IMAGE ANALYSIS: FUNDAMENTALS AND APPLICA-TIONS. TAYLOR & FRANCIS GROUP, FLORIDA.
- [8] GIA ROOTS MANUAL (2011): GEORGIA TECH RE-SEARCH CORPORATION AND DUKE UNIVERSITY.
- [9] RISTOVA D., 2013: ROOTSCAPE: A LAND-MARK-BASED SYSTEM FOR RAPID SCREEN-ING OF ROOT ARCHITECTURE IN ARABIDOPSIS, 1087-1088.

Autor/PhD:



Mag. S. Omarova Dinara

Institute of Soil Bioengineering and Landscape Construction

Department of Civil Engineering and Natural Hazards

Peter Jordanstr. 82

1190 Wien

dinara_oma@mail.ru

dinara.omarova@students.boku.ac.at

Betreuerteam: Em.Univ.Prof. Dr. Florin Florineth, Prof. Dr. Eva Hacker, Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Willibald Loiskandl , Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Rosemarie Stangl

Manuel Sokopp

Untersuchungen von Weidenspreitlagen an schiffbaren Binnenfließgewässern

Weidenspreitlagen haben sich als Uferschutzmaßnahme an kleineren Fließgewässern bereits bewährt. Belastbarkeit und Schutzfunktion an befahrenen Wasserstraßen sind allerdings noch nicht ausreichend erforscht. Im Zuge dieser Dissertation soll mit Vegetationsaufnahmen an einer ingenieurbiologischen Versuchsstrecke am Rhein sowie mit Hilfe von Modellversuchen am Gelände der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe untersucht werden, ob diese naturnahe Ufersicherungsmaßnahme den besonderen hydraulischen Belastungen an einem schiffbaren Fließgewässer standhalten, den erforderlichen Uferschutz bieten und somit die weit verbreitete Steinschüttung ersetzen kann.

Keywords Ingenieurbiologie; naturnaher Wasserbau; Uferschutz; Erosionsschutz; Weidenspreitlage

1 Einleitung

Die Ufer schiffbarer Binnenfließgewässer sind infolge Schifffahrt und Hochwasser starken hydraulischen Belastungen wie Schiffswellen, dadurch entstehenden Schwall und Absunk, häufigen Wasserspiegelschwankungen sowie hohen Strömungsgeschwindigkeiten ausgesetzt. Aufgrund der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie aus dem Jahr 2000 sollen naturnahe, technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen die üblichen Steinschüttungen ablösen bzw. ökologisch aufwerten [1].

2004 wurde das Forschungs- und Entwicklungsprojekt "Untersuchungen zu alternativen, technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen" von der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe (BAW) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz (BfG) ins Leben gerufen um alternative Ufersicherungen auf ihre technische Wirksamkeit zur Gewährleistung der Uferstabilität, die hydraulische Belastbarkeit, die ökologische Wirksamkeit sowie den erforderlichen Unterhaltungsaufwand zu untersuchen und um Grundlagen und Empfehlungen zu deren Bemessung und Anwendung erstellen zu können [2].

Im Zuge des Projekts wurde in Zusammenarbeit der BAW, der BfG und des Wasser- und Schifffahrtsamts Mannheim (WSA-MA) Ende 2011 an einem 130 m langen Rheinuferabschnitt bei Worms die vorhandene Steinschüttung entfernt und zwei unterschiedliche Weidenspreitlagen zur Ufersicherung errichtet [3].

Zusätzlich zu den Untersuchungen an der Versuchsstrecke am

Investigations of willow brush mattresses at navigable waterways: Willow brush mattresses are already proven as bank protection at small rivers. But their resilience and protective function at navigable waterways have not yet been investigated sufficiently. By means of vegetation surveys at the soil bioengineering test track at the river Rhine as well as model tests at the grounds of the Federal Waterways Engineering and Research Institute in Karlsruhe this doctoral dissertation seeks to show if this near nature bank protection method can resist those special hydraulic loads while providing the required bank protection and thus can replace the wide spread rock fill.

Keywords Soil bioengineering; near nature river engineering; river bank protection; erosion control; willow brush mattress

Rhein wurden von der BAW Karlsruhe unterschiedliche Modellversuche zur Belastbarkeit und Schutzfunktion von Weidenspreitlagen in Auftrag gegeben. Dabei sollen einerseits die Entwicklung während der kritischen Anwuchsphase, in welcher noch keine tiefreichende Durchwurzelung und ausreichende Sprossbildung stattgefunden hat, aber auch die langfristige Eignung, Wirkung und Unterhaltung von Weidenspreitlagen an Wasserstraßen erforscht werden.

Besonderes Augenmerk liegt bei den Untersuchungen auf den Unterschieden zwischen Baum- und Strauchweiden. Daher ergibt sich folgende Forschungsfrage:

Welche Unterschiede gibt es zwischen Baum- und Strauchweiden in Form einer Spreitlage an stark frequentierten Wasserstraßen hinsichtlich Strömungsbelastung in unterschiedlichen Böschungsbereichen, Oberflächenerosion, Scherfestigkeit des bewurzelten Bodens, Filterstabilität und Pflegebedarf?

2 Methodik

2.1 Versuchsstrecke am Rhein bei Worms

An der Versuchsstrecke am Rhein bei Worms wurden Ende 2011 zwei unterschiedliche Varianten der Weidenspreitlage errichtet. In einem der beiden Versuchsfelder wurden die Weidenäste diagonal und im anderen Versuchsfeld quer zur Fließrichtung verbaut. Verwendet wurden mit absteigendem Anteil Purpurweide (*Salix purpurea*), Silberweide (*Salix alba*) und Korbweide (*Salix viminalis*) [3].

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren



Bild 1 Weidenspreitlage am Rhein bei Worms am Ende der ersten Vegetationsperiode (11.09.2012) Willow brush mattress at the river Rhine near Worms at the end of the first

vegetation period (11.09.2012)

Die Vegetationsaufnahmen liefen von April 2012 bis September 2016. Hierfür wurden pro Spreitlagenvariante zwei 1 m breite Transekte vom Böschungsfuß bis zur Böschungsoberkante als Dauerbeobachtungsflächen markiert und in drei Böschungsbereiche unterteilt.

In den ersten beiden Vegetationsperioden (2012 und 2013) fanden jeweils sechs Vegetationsaufnahmen statt, da in dieser Zeit mit besonders starkem Zuwachs zu rechnen war. Im Zuge dieser Aufnahmen wurde jeder Weidenspross innerhalb der Transekte bestimmt, dessen Länge gemessen und die Anzahl pro Weidenart und Quadratmeter ermittelt. Zusätzlich wurde für jeden Böschungsbereich pro Transekt die durchschnittliche Vitalität und der Gesamtdeckungsgrad bestimmt sowie Erosionserscheinungen dokumentiert. Ab der dritten Vegetationsperiode (2014 bis 2016) wurden die beiden Spreitlagen jedes Jahr jeweils in der Mitte und am Ende der Vegetationsperiode untersucht, wobei nicht mehr jeder einzelne Spross, sondern in den unterschiedlichen Böschungsbereichen die Sprosse jeder Weidenart ausgezählt und deren maximale Sprosslänge gemessen sowie die mediane Sprosslänge aller Weidensprosse geschätzt wurde.

2.2 Modellversuche

2.2.1 Belastbarkeit im Wellenbecken

In einem Wellenbecken am Gelände der BAW Karlsruhe wurde im Mai 2011 im Zuge der Untersuchungen von Jeannine EISENMANN [4] eine Spreitlage aus Korb- und Purpurweide (strauchförmig) angelegt. Das Becken kann mit Wasser befüllt werden und mit Hilfe eines Tauchkörpers der bemessungsrelevante Absunk eines vorbeifahrenden Schiffes simuliert werden.

Im Herbst 2015 wurde die bestehende Spreitlage erneut mittels

entsprechender Messtechnik in unterschiedlichen Böschungsbereichen hinsichtlich Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses (induktive Strömungsmesser), Porenwasserdrücke in der Böschung in unterschiedlichen Bodentiefen sowie an der Böschungsoberfläche (absolute Druckaufnehmer) und Böschungsverformungen (Ketteninklinometer) während des Absunks in vier verschiedenen Systemzuständen bzw. Versuchsreihen untersucht. Pro Versuchsreihe wurden mindestens 15 Absunke erzeugt.



Bild 2 Ausgangszustand der Weidenspreitlage im Wellenbecken (24.09.2015) Initial state of the willow brush mattress in the wave basin (24.09.2015)

Zunächst wurde im unveränderten Weidenbestand gemessen, danach aus der bestehenden Spreitlage die Hälfte der Sprosse sowie anschließend der gesamte Bestand entnommen. Um den Vergleich zu baumförmigen Weiden herzustellen, wurden zum Abschluss starre Holzstangen zu 4 Stk./m² als Simulation einer älteren Spreitlage in den durchwurzelten Boden eingebracht. Der Stangendurchmesser betrug 4 cm, da nach FLORINETH [5] die nötige Elastizität der Weidensprosse ab diesem Durchmesser abnimmt.

Neben Schutzfunktion und Belastbarkeit sollen diese Versuche auch Aufschluss über den Pflegebedarf einer Spreitlage geben.

2.2.2 Scherfestigkeit

Zur Messung der Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens wurden im März 2015 sechs Versuchskästen mit Spreitlagen aus Silberweide (*Salix alba*) bepflanzt. Jeder Versuchskasten bestand aus drei übereinander liegenden Rahmen mit einer Höhe von jeweils 30 cm und einer Fläche von 50x50 cm. Im Oktober 2015 wurden nacheinander die drei Proben jedes Versuchskastens in ein Großrahmenschergerät eingebaut und jeweils in der Mitte der einzelnen Proben, was einer Bodentiefe von 15, 45 bzw. 75 cm entspricht, bei sechs unterschiedlichen Normalspannungen abgeschert und die Kohäsion c, der Reibungswinkel φ und die Gesamtscherfestigkeit τ ermittelt.

Diese Scherversuche bauen auf die Untersuchungen mit den Arten Purpurweide (*Salix purpurea*) und Korbweide (*Salix viminalis*) von Jeannine EISENMANN [4]. Die Ergebnisse werden verglichen und somit die Unterschiede zwischen strauchund baumförmigen Weiden hinsichtlich der Durchwurzelung und Scherfestigkeit erarbeitet.

2.2.3 Filterstabilität

Nach Richtlinien der BAW [6] müssen durch- und unterströmbare Bauwerke an Wasserstraßen vor Bodenverlagerungen sicher sein. Daher wurden Weidenspreitlagen in einem eigens entwickelten Verfahren, basierend auf der Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau [7] bzw. den Versuchen von Jürgen STEIN [8] zur Filterstabilität grober Gesteinskörnungen, auf ihre Filterstabilität getestet. Hierfür wurden im März 2016 Weidenspreitlagen aus Silber- (*Salix alba*) bzw. Korbweiden (*Salix viminalis*) in jeweils 16 Versuchskästen mit einer Querschnittsfläche von 30x30 cm angelegt. Für die Versuche zur Filterstabilität wurden die oberen 20 cm des Kastens abgetrennt und verkehrt in eine Vorrichtung gesetzt, in welcher der Probenkasten von unten durchströmt werden konnte.

Bei Erreichen einer Wassersäule von 50 cm oberhalb der Probe wurde der Wasserauslass geöffnet und die Probe in Gegenrichtung durchströmt und somit Absunk simuliert. Durch Drucksensoren oberhalb und unterhalb der Probe konnte der Durchsickerungsbeiwert k des durchwurzelten Bodens während des Absunks berechnet werden.

Nach diesem Absunkzyklus wurde das durch die Spreitlagenäste ausgespülte Bodenmaterial aufgefangen, nach Trocknung auf Gewichtskonstanz gewogen und mit der Trockenmasse des zurückgehaltenen Bodenmaterials verglichen um den Anteil an der Gesamtmasse zu berechnen.

Diese Filterstabilitätsversuche wurden direkt nach Einbau bzw. ein, drei und sechs Monate nach Einbau der Spreitlagen mit jeweils vier Wiederholungen pro Weidenart durchgeführt.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse befinden sich noch in Bearbeitung und können daher an dieser Stelle nicht dargestellt werden.

Literatur

- EISENMANN, J.; FLEISCHER, P.: Möglichkeiten und Grenzen pflanzlicher Ufersicherungen an Wasserstraßen. IN: BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (HRSG.): BAW-Mitteilungen Nr. 95. S. 21-40. Karlsruhe: Eigenverlag 2012.
- [2] FLEISCHER, P.; LIEBENSTEIN, H.: Untersuchungen

zu alternativen technisch-biologischen Ufersicherungen an Bundeswasserstraßen. IN: BUNDESMI-NISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENT-WICKLUNG (HRSG.): Wasserstraßen – Verkehrswege und Lebensraum in der Kulturlandschaft. S. 88-93. Bonn: Eigenverlag 2008.

- [3] BAW, BFG & WSA-MA: Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen. Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer. Erster Zwischenbericht. Randbedingungen, Einbaudokumentation, Monitoring. Karlsruhe/Koblenz: Eigenverlag 2012.
- [4] EISENMANN, J.: Weidenspreitlagen an Binnenwasserstraßen. Untersuchungen zur geotechnischen Standsicherheit. Wien: Dissertation an der Universität für Bodenkultur Wien 2015.
- [5] FLORINETH, F.: *Pflanzen statt Beton. Sichern und Gestalten mit Pflanzen (2. Aufl.).* Berlin/Hannover: Patzer Verlag 2012.
- [6] BAW: *Merkblatt Materialtransport im Boden*. Karlsruhe: Eigenverlag 2013.
- [7] BAW: Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau. Karlsruhe: Eigenverlag 1994.
- [8] STEIN, J.: Filterstabilität grober Gesteinskörnungen. IN: BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (HRSG.): Forschungskompendium Verkehrswasserbau. S. 132-134. Karlsruhe: Eigenverlag 2012.

Universität für Bodenkultur Wien University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Autor/PhD:



Dipl.-Ing. Manuel Sokopp Peter-Jordan-Straße 82/III 1190 Wien manuel.sokopp@boku.ac.at

Betreuerteam:

Betreuung:

Em.O.Univ.Prof. Dr.phil. Florin Florineth

Beratung:

Prof.Dr. Eva Hacker

Univ.-Prof. i.R. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Willibald Loiskandl

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Johann Peter Rauch

Magdalena von der Thannen

Ein Life Cycle Assessment Modell für Ingenieurbiologie

Entwicklung einer Bewertungsstrategie ingenieurbiologischer Bauwerke

Auf Grund der immer präsenter werdenden Thematik des Klimawandels ist ein Trend zu umweltfreundlicheren Systemen deutlich zu erkennen. Auch im Bauwesen wird immer mehr darauf geachtet, nicht nur die technischen Aspekte zu berücksichtigen, sondern auch ästhetische und ökologische. Vor allem im Tiefbau entwickelt sich die Ingenieurbiologie zu einer willkommenen Alternative, da sie, unter Verwendung natürlicher Materialien, die gleichen Ziele wie der konventionelle Ingenieurbau verfolgt. Trotz einer langen Tradition des ingenieurbiologischen Bauhandwerks. gibt es noch kein bestehendes Bewertungssystem, welches den Energieaufwand, die CO2-Bilanz bzw. den ganzen Lebenszyklus eines Bauwerks berücksichtigt. Aus diesem Grund wird anhand dieses Projektes ein Life Cycle Assessment Modell für den Fachbereich Ingenieurbiologie entwickelt und anwendbar gemacht.

Keywords Ingenieurbiologie, Life Cycle Assessment (LCA), Ökobilanz, Hoch-/Tiefbau

1 Einleitung

Unter dem Begriff Ingenieurbiologie versteht man eine Bautechnik, die mit Hilfe von lebenden Pflanzen Sicherungsarbeiten durchführt. Historisch betrachtet, hat die Anwendung solcher Sicherungsmaßnahmen eine lange Tradition. Die ersten Aufzeichnungen über die Verwendung ingenieurbiologischer Maßnahmen stammen aus der römischen Kaiserzeit (30 v. - 400 n. Chr.). Auch Leonardo da Vinci (1452 - 1519) hinterließ Dokumente, die eine Anwendung ingenieurbiologischer Bauwerke bezeugen. Die bis heute verwendeten Materialien sind neben den lebenden Pflanzen, auch totes Material (zum Beispiel Steine und Holz) aber auch andere Hilfsmaterialien [1]. Die dabei verfolgten Ziele der Ingenieurbiologie sind denen des Tiefbaus sehr ähnlich. Es werden hydraulische und erdbauliche Lösungen verfolgt. Als Anwendungsgebiete der Ingenieurbiologie können Hänge und Gräben und Böschungen, auch oberhalb der Waldgrenze, aber auch Uferbereiche an Flüssen und (Wild-)Bächen genannt werden. Somit kann die Ingenieurbiologie als ökologische Variante für herkömmliche Sicherungsarbeiten gesehen werden.

SCHIECHTL und STERN ([2], S. 14) definieren Ingenieurbiologie wie folgt: "Die Ingenieurbiologie ist eine Bautechnik, die sich biologischer Erkenntnisse bei der Errichtung von Erd- und Wasserbauten und bei der Sicherung

A Life Cycle Assessment Model for soil bioengineering - development of an evaluation management for soil bioengineering structures: In the last period of time the topic "climate change" is getting more and more important and a trend to more climate-friendly systems is already apparent. So there is a high demand on engineering solutions considering not only technical aspects but also ecological and aesthetic values. Therefore soil bioengineering constructions are a preferred alternative to conventional protective structures. Although the field of soil bioengineering has a long tradition, no assessment scheme exists, that analyses consumed energy, the carbon footprint or the whole life cycle of a soil bioengineering construction. For this reason a Life Cycle Assessment model is developed for the discipline of soil bioengineering, within the project and will be applicable for the future.

Keywords soil bioengineering, Life Cycle Assessment (LCA), civil engineering

instabiler Hänge und Ufer bedient. Kennzeichnend dafür sind Pflanzen und Pflanzenteile, die so eingesetzt werden, daß sie als lebende Baustoffe im Laufe ihrer Entwicklung für sich, aber auch in Verbindung mit unbelebten Baustoffen eine dauerhafte Sicherung der Bauwerke erreichen. Die Ingenieurbiologie ist nicht als Ersatz, sondern als notwendige und sinnvolle Ergänzung zu rein technischen Ingenieurbauweisen zu verstehen."

Als ein Nachteil der Ingenieurbiologie, welcher in jeder Hinsicht berücksichtigt werden muss, beschreibt GERSTGRASER [3] die Schwierigkeit, dass sich lebende Pflanzen kaum normieren lassen. Auch STERN [4] erklärt, dass es selten ein Fachgebiet gibt, das so schwer in eine Norm zu zwingen ist, wie die Ingenieurbiologie. Für die Dissertation wird dieses Thema vor allem in der Nutzungsphase relevant erscheinen.

Trotz der langen Tradition und Erfahrung mit dem ingenieurbiologischen Handwerk, gibt es bis heute keine Bewertungsmethode, die den gesamten Lebenszyklus eines ingenieurbiologischen Bauwerks berücksichtigt. Aus diesem Grund beschäftigt sich diese Dissertation mit der Entwicklung eines solchen Modells. Das heißt es soll ein Life Cycle Assessment Modell (welches sich im Hochbau schon sehr gut etabliert hat) für die Ingenieurbiologie entwickelt werden. Dabei werden die einzelnen Lebensphasen, Errichtungsphase, University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Nutzungsphase und Lebensendphase, berücksichtigt und die CO₂-Bilanz wie auch der kumulative Energieaufwand analysiert. Ziele der Dissertation sind:

- ein Konzept f
 ür die Anwendung von LCA in der Ingenieurbiologie zu entwickeln
- die relevanten Materialien zu identifizieren und in der bestehenden Datenbank zu ergänzen
- das Wachstum der Pflanzen zu analysieren um die Nutzungsphase besser abbilden zu können
- verstehen und analysieren der einzelnen Lebensphasen (Errichtungs-, Nutzungs- und Lebensendphase) eines Bauwerks, um diese dann abbilden zu können
- effizientere Planung und Ausführung von ingenieurbiologischen Bauwerken durch die Anwendung des LCA Modells.

2 Methodik

2.1 Life Cycle Assessment

Life Cycle Assessment, im Deutschen auch Ökobilanz genannt, ist ein Werkzeug um ein Produkt oder auch Dienstleistungen hinsichtlich ihrer Umweltaspekte und den potenziellen Umweltauswirkungen zu bewerten. Dabei wird der ganze Lebensweg des Produktes oder der Dienstleistung analysiert, beginnend mit der Rohstoffgewinnung über die Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling, bis hin zur endgültigen Entsorgung bzw. Beseitigung. Die Anforderungen an die Erstellung einer Ökobilanz sind in der ISO 14040 für den Anwender bzw. Ersteller einer Ökobilanz detailliert dargestellt [5].

Anhand von Ökobilanzen können Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie die Umwelteigenschaften von Produkten verbessert werden können; sie dienen zur Information von Entscheidungsträgern, helfen beim Auswählen von relevanten Indikatoren der Umwelteigenschaften und unterstützen beim Marketing [5].



Bild 1 Darstellung der vier Phasen einer Ökobilanz-Studie [5].

Wie Bild 1 zeigt ist eine Ökobilanz-Studie in vier Phasen eingeteilt. Zu Beginn werden Ziel und Untersuchungsrahmen festgelegt, dann eine Sachbilanz definiert, weiters eine Wirkungsabschätzung erstellt und zum Schluss eine Auswertung durchgeführt. Durch die Erstellung des Produktsystems wird der Lebensweg eines Produktes abgebildet (siehe Bild 2) [5]. Dabei sind die Rohstoffgewinnung, Transporte und Energieversorgung, die drei wichtigen Phasen Errichtungs-, Nutzungsund Lebensendphase, sowie die Abfallbehandlung enthalten.



Bild 2 Darstellung eines Produktsystems mit Systemgrenze [5].

Im Rahmen der Dissertation wird eine solche Ökobilanz mit Hilfe der Software OpenLCA erstellt. Als Datenbasis dient in erster Linie die Ecoinvent Datenbank, welche vor allem im Hochbau sehr etabliert ist.

2.2 Erhebung der Daten

Da die verwendete Datenbank Ecoinvent zwar eine gute Basis für gewisse Baumaterialien darstellt, aber nicht die spezifisch ingenieurbiologischen Materialien beinhaltet, müssen die fehlenden Datensätze ergänzt werden. Dafür werden alle ingenieurbiologischen Bauwerke aufgelistet und in ein neues Schema, sortiert nach Einsatzbereich und technischer Funktion, eingeteilt. Dabei werden zum Schluss zu jedem Bauwerk die dazugehörigen Materialien angeführt. Auf Basis dieser Materialliste, können die bereits in Ecoinvent vorhandenen Materialien gefunden und die fehlenden ergänzt werden.

Um die Prozesse, Transporte und den Maschineneinsatz besser abschätzen zu können, werden unter anderem Bauberichte von ingenieurbiologischen Baupraktika analysiert.

2.3 Erhebung der Biomasse

Um die Nutzungsphase von Ingenieurbiologischen Bauwerken besser abbilden zu können, werden bestehende Bauwerke unterschiedlichen Alters untersucht. Dabei soll die Biomasse der eingebauten, lebenden Pflanzen ermittelt werden. Ziel ist es, die Entwicklung der Pflanzen besser

Universität für Bodenkultur Wien University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

einschätzen zu können und eventuell Tendenzen abzuleiten.

3 Ergebnisse

Die ersten Ergebnisse zeigen sich im Konzept des Environmental Life Cycle Assessment Modells für die Ingenieurbiologie, im neu arrangierten Schema der ingenieurbiologischen Bauwerke, in der Darstellung eines ingenieurbiologischen Lebenszyklus sowie der Ergänzung der Datenbank.

Weitere Ergebnisse können mit Ende des Projektes 2018 erwartet werden.

Literatur

- [1] FLORINETH, F. (2012): *Pflanzen statt Beton. Sichern und Gestalten mit Pflanzen.* 2. Auflage. Patzer Verlag, Berlin-Hannover.
- [2] SCHIECHTL, H.M., STERN, R. (1992): Handbuch für naturnahen Wasserbau. Österreichischer Agrarverlag, Wien.
- [3] GERSTGRASER, C. (2000): Ingenieurbiologische Bauweisen an Fließgewässern. Grundlagen zu Bau, Belastbarkeiten und Wirkungsweisen. Dissertationen der Universität für Bodenkultur in Wien, Band 52. Österreichischer kunst- und Kulturverlag, Wien.
- [4] STERN, R. (1993): Kritische Anmerkungen zur Ingenieurbiologie. Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft, Bd. 11, Hrsg. Prof. H. Renner, Inst. f. Siedlungswasserwirtschaft u. Lanschaftswasserbau, TU -Graz, S. 101-111.
- [5] ISO 14040 (2009): Umweltmanagement Ökobilanz. Grundsätze und Rahmenbedingungen; deutsche und englische Fassung EN ISO 14040:2006, Berlin, Beuth.

Autor/PhD:



DI DI Magdalena von der Thannen Peter-Jordan-Straße 82 1190 Wien

m.v-d-thannen@boku.ac.at

Betreuerteam:

Betreuer: Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Johann Peter Rauch

Beraterteam: Dr. phil. Lampalzer Thomas

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Johannes Hübl

Assoc. Prof. Dr. Alfred Strauss

Clemens Weissteiner

Characterizing riparian vegetation by means of physically based plant parameters

Ingenieurbiologie als bautechnische Die Disziplin verwendet lebende Pflanzen und lokal verfügbare Hilfsstoffe wie Holz und Steine als Baustoffe, um die Böschungsstabilität zu erhöhen und erosive Prozesse zu verhindern. Die für die Ingenieurbiologie in Frage kommenden Pflanzen müssen für die extremen standörtlichen Bedingungen bestimmte Voraussetzungen erfüllen können. Für die Entwicklung dieser "grünen" Technologie müssen die hydro- und aerodynamischen Belastungen und die biomechanischen Eigenschaften der Pflanzen erfasst werden. Die Reaktionen auf diese Belastungen sind von der zeitlichen Entwicklung und von den damit verbundenen Änderungen der integralen strukturellen und biomechanischen Eigenschaften der Pflanzen Mit abhängig. dem gegenständigen Dissertationsprojekt wird das systematische Verformungsverhalten von verschiedenen Pioniergehölzen untersucht. Schwingungs- und Dämpfungseffekte sowie die Kontraktion der Gehöze werden untersucht, um das systematische Verformungsverhalten zu charakterisieren.

Keywords Ingenieurbiologie; Ufervegetation; Biomechanik; Kontraktion; Dynamisches Verhalten;

1 Background

Soil bioengineering is a technique for civil engineering purposes. It combines living plants and local natural auxiliary materials such as wooden logs and stones to improve slope stability and prevent erosion. Plants eligible for soil bioengineering purposes have to meet all requirements to resist the unfavourable conditions at the local construction site. Characteristic requirements are pull-out resistance, sprouting and rooting capacity, adaptability to prolonged flooding periods, resistance against shear strength etc.. In nature, woody pioneer plant species, which have these properties, are generally found along rivers or in harsh alpine areas e.g. willows, poplars, alders and tamarisks and grow in shape of trees or shrubs. To develop an efficient biological engineering system, forces acting on the system and the technical properties of the plants have to be characterized. Especially in the case of near-nature river engineering it is of crucial importance to identify the plants' response to hydrodynamic processes. Vegetation-flow interactions are central to many problems of hydrologists and hydraulic engineers including flood risk assessment, sediment transport studies and eco-hydraulic studies.

Soil bioengineering is a construction technique, which combines living plants and local natural auxiliary materials such as wooden logs and stones to improve slope stability and prevent erosion. Plants eligible for soil bioengineering purposes have to meet all requirements to resist the unfavourable conditions at the local construction site. As a precondition to develop an efficient biological engineering system, hydro- and aerodynamic forces acting on the system and the biomechanical properties of the plants have to be determined. Furthermore, the response to these forces also depends on the changes of the trees due to the stage of development of the integrating structural and bio-mechanic properties of the plants. The doctoral project aims at investigating the systematic behaviour of various woody riparian plant species under applied loads. The reconfiguration of plants as well as their natural frequency and damping effects will be investigated to characterize the interaction of applied forces and riparian trees

Keywords Soil Bio Engineering; Riparian Vegetation; Biomechanics; Reconfiguration; Dynamics;

2 State of the art

Vegetation-flow interaction has been investigated for decades. Based on the balance of forces in which gravity forces are opposed to boundary shear stress and vegetation drag, first attempts were made to quantify these processes [1;2]. However, ongoing research in hydrodynamics focused mainly on the impact of plants on hydraulic aspects rather than on the plants behaviour under loading. Whereas investigations in atmospheric flows have focused on the plants' response to dynamic loads [3;4;5;6]. From a systematic point of view the interaction between plants and aerodynamic as well as hydrodynamic loads are subjected to the same physical processes. However, according to the law of resistance the main difference consists in the density of air respectively water.

The following literature review summarizes the main works related to the topic, and is divided into two sections (1) response to hydrodynamic loads and (2) response to aerodynamic loads.

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Response to hydrodynamic loads

The hydraulic interaction of flow and plants not only depends on geometrical properties (e.g. stem and branch diameter, length, leaf area), but also on the dynamic response of plants under flood conditions (stem/branch/leaf bending and horizontal and vertical contraction processes; e.g. [7;8;9;10]). Several studies investigated the impact of plants on discharge capacity. In most lab studies artificial obstructions [11;12;13;14;15;], plant saplings, plant parts (branches) [16;17;18) or whole plants [8;19;20] were used. However, most studies focused more on hydraulic aspects than on biomechanical and structural parameters of plants. Beside plant architecture, mechanical properties like flexural stiffness, modulus of elasticity and plastic deformation are indicators to assess the impact of plants on hydraulic conditions [21].

Response to aerodynamic loads

Vegetation-flow interaction has also been investigated intensely in several studies in the context of plant exposure to aerodynamic loads [e.g.22;23;24].

In order to describe the plants response to wind loads, biomechanical properties of different plant species have largely been investigated [e.g. 25;26;27]. By analysing a tree's deformation under static loads, failure occurs when the maximal bending moment exceeds the maximal resistive moment. In nature, trees act as dynamic systems, oscillating and streamlining under applied loads. [28] comes to the conclusion that models applying static loads on trees are insufficient to predict mechanical stability. In fact, much lower dynamic loads than those predicted by static tests can lead to failure. Investigations in this field of research included static pulling tests [e.g.29;30], dynamic swaying experiments [3;4;5;24] as well as wind tunnel experiments [31,32].

[29] was the first to propose a theoretical model for a tree submitted to dynamic wind loading. Papesch's model was based on beam theory, drag forces are assumed to apply all around the tree and wind force varied sinusoidal at frequencies similar to trees natural frequencies. [33] as well as [34] introduced models discretizing the geometry of trees. Those studies have all focused on the stem of the plant while simplifying the rest of the aerial system. [35] stated in their work that branches need to be considered as individual damped harmonic oscillators coupled to the main stem and not simply as lumped masses. [36] report in their experiments on young Pinus saplings foliage as the major source of damping in the structure. [17] summarizes that each branch is a mass that sways in the wind and interacts dynamically with other branches and the trunk in a complex way.

However, most of the studies regarding wind on trees, or forest stands investigate tree species, which are interesting from a silviculture point of view. Plants used in soil bioengineering haven't been subject of these types of studies yet. Within soil bioengineering particularly pioneer plants are used to reinforce slopes and riverbanks. These plants are capable to grow on poor stands under adverse circumstances. Riparian vegetation shows biomechanical properties to withstand strong dynamic loads, young plants are able to streamline and adapt gradually after floods even if the elastic range was by far exceeded. Therefore, biomechanical tests, in combination with static and dynamic loading tests of typical plants used in soil bioengineering are absolutely essential for a better understanding and quantification of the systems impact.

3 Problem identification and aims

Although international research activities have been carried out on hydraulics of vegetated flow over the past decades, many aspects are still poorly understood. The situation arises from knowledge gaps and hence a lack of suitable models integrating structural properties of flexible riparian vegetation cover, biomechanical properties of individual plants and hydrodynamic characteristics of flow.

While in civil engineering calculation of stability against collapse represents the state of the art, engineers using plants as stabilizing elements are faced with problems to dimension the mechanical effects of this complex multilevel system in a temporal and spatial context. Generally speaking, dimensioning complex plants as engineering elements is a key issue and a precondition to develop standards in the field of soil bioengineering respectively near nature river engineering. The geometric representation of plants, the interaction of plants with loads (static as well as dynamic) and the resulting forces are of crucial importance to dimension biomechanical systems. However, the plant – load interaction in soil bioengineering systems rises in complexity because typical young, woody riparian vegetation has specific capability to bend.

In order to model a force on a plant, first of all the plant has to be represented geometrically in a high detailed 3D computer model. The architecture of a plant is, at any given time, the expression of equilibrium between endogenous growth processes and exogenous constraints exerted by the environment [37].

Until now research focused mainly on forest plants under wind load at single plant scale and forest stand scale as well as on decurrent solitary trees and the drag exerted on plants. However, these results of wind studies can hardly be applied to soil bioengineering systems because plant material properties and their architecture are rather different. The drag force exerted on plants is of crucial importance, but without the missing link of the plants' deformation, (horizontal and vertical contraction) results are limited. Furthermore, plants behave differently in water or air if considering the effect of viscosity of both media in relation to their dynamic response.

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Therefore this study aims to fill these gaps by:

• Modelling the architecture of riparian shrubs

• Determining material properties of different plant structural components typically used in soil bioengineering (e.g. willows)

• Investigating the bending behaviour and the dynamic response of whole plants under applied loads in water and air

• Developing an integrated approach including plant architecture and material properties to model the dynamic response of riparian shrubs on loads

Literature

- LI, R.-M.; SHEN, H.W.: EFFECT OF TALL VEGETA-TIONS ON FLOW AND SEDIMENT. J HYDRAULICS DI-VISION, 99 (1973), PP. 793–814.
- [2] PETRYK, S.; BOSMAJIAN, G.B.: ANALYSIS OF FLOW THROUGH VEGETATION. J HYDRAULICS DIVISION, 101 (1975), 871–884.
- [3] MILNE , R.: DYNAMICS OF SWAYING PICEA SITCH-ENSIS . TREE PHYSIOL. 9 (1991), 383 – 399.
- [4] GARDINER, B.A.: WIND TREE INTERACTIONS. IN WIND AND TREES. M. COUTTS AND J. GRACE (EDS). CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, CAMBRIDGE (1995), 41–59.
- [5] MOORE, J.R.; MAGUIRE, D.A.: SIMULATING THE DYNAMIC BEHAVIOR OF DOUGLAS-FIR TREES UN-DER APPLIED LOADS BY THE FINITE ELEMENT METHOD. TREE PHYSIOLOGY 28(2007), 75-83
- [6] SELLIER, D.; FOURCAUD, T.: CROWN STRUCTURE AND WOOD PROPERTIES: INFLUENCE ON TREE SWAY AND RESPONSE TO HIGH WINDS. AMERICAN JOUR-NAL OF BOTANY 96(5)(2009): 885-896.
- [7] FATHI-MOGHADAM, M.; KOUWEN, N.: NONRIGID, NONSUBMERGED, VEGETATIVE ROUGHNESS ON FLOODPLAINS. JOURNAL OF HYDRAULIC ENGI-NEERING 123(1)(1997): 51-57.
- [8] OPLATKA, M.: STABILITÄT VON WEIDENVERBAU-UNGEN AN FLUSSUFERN.. MITTEILUNGEN 156. VER-SUCHSANSTALT FÜR WASSERBAU, HYDROLOGIE UND GLAZIOLOGIE. ETH ZÜRICH (1998).
- [9] GERSTGRASER, C.; RAUCH, H.P.: EFFECT OF VEGE-TATION ON RIVERBANK STABILITY. EUROPEAN GE-

OPHYSICAL SOCIETY (ED.): GEOPHYSICAL RE-SEARCH ABSTRACTS, VOL.2, 25TH GENERAL AS-SEMBLY (2000).

- [10] RAUCH, H.P.: EFFECTS OF A VEGETATED RIVER BANK ON THE FLOW FIELD. EUROPEAN GEOSCI-ENCES UNION: EUROPEAN GEOSCIENCES UNION GENERAL ASSEMBLY 2005, VIENNA; GEOPHYSI-CAL RESEARCH ABSTRACTS, VOLUME 7.
- [11] SHIMIZU, Y.; TSUJIMOTO, T.: NUMERICAL ANALY-SIS OF TURBULENT OPEN-CHANNEL FLOW OVER VEGETATION LAYER USING A KTURBULENCE MODEL. J. OF HYDROSCIENCE AND HYDRAULIC EN-GRG., JSCE, 11 (2)(1994): 57-67.
- [12] TSUJIMOTO, T., KITAMURA, T., FUJII, Y., NAK-AGAWA, H.: HYDRAULIC RESISTANCE OF FLOW WITH FLEXIBLE VEGETATION IN OPEN CHANNEL. JOURNAL OF HYDROSCIENCE AND HYDRAULIC EN-GINEERING 14(1)(1996): 47-56
- [13] NEPF, H.M.: DRAG, TURBULENCE, AND DIFFUSION IN FLOW THROUGH EMERGENT VEGETATION. WA-TER RESOURCES RESEARCH 35(2)(1999): 479-489.
- [14] LÓPEZ, F. AND GARCÍA, M.H.: MEAN FLOW AND TURBULENCE STRUCTURE OF OPEN-CHANNEL FLOW THROUGH NON-EMERGENT VEGETATION. JOURNAL OF HYDRAULIC ENGINEERING. 127 (5)(2001): 392-402.
- [15] Poggi, D.; Porporato, A.; Ridolfi, L.; Albertson, J. D.; Katul, G. G.: The effect of vegetation density on canopy sublayer turbulence. Boundary-Layer Meteorology (111)(2004): 565–587.
- [16] ARMANI, A.; RIGHETTI, M. AND GRISENTI, P.: DI-RECT MEASUREMENT OF VEGETATION RESISTANCE IN PROTOTYPE SCALE. JOURNAL OF HYDRAULIC RE-SEARCH 43(5)(2005): 481-487.
- [17] JAMES, K.R.; HARITOS, N.; ADES, P.A.: MECHANI-CAL STABILITY OF TREES UNDER DYNAMIC LOADS, AMERICAN JOURNAL OF BOTANY 93 (10)(2006): 1522-1530.
- [18] WILSON, C.A.M.E., XAVIER, P.; SCHONEBOOM, T.; ABERLE, J.; RAUCH, H.P.; LAMMERANNER, W.; WEISSTEINER, C.; THOMAS, H.: THE HYDRODY-NAMIC DRAG OF FULL SCALE TREES. IN: PROCEED-INGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON FLUVIAL HYDRAULICS; VOLUME 1 (2010); 453-460.

- [19] FREEMAN, G. E.; RAYMEYER, W. J. AND COPLAND, R. R.: DETERMINATION OF RESISTANCE DUE TO SHRUBS AND WOODY VEGETATION. US ARMY CORPS OF ENGINEERS. REPORT ERDC/CHLTR-00-25 (2000).
- [20] XAVIER, P.; WILSON, C.A.M.E.; ABERLE, J.; RAUCH, H.P.; SCHONEBOOM, T.; LAMMERANNER, W.; THOMAS, H.: "DRAG FORCE OF FLEXIBLE SUB-MERGED TREES." PROC. HYDRALAB CLOSING EVENT, HANNOVER (2010).
- [21] ISHIKAWA, H.; AMANO S. AND YAKUSHIJI, K.: FLOW AROUND A LIVING TREE, JSME INTERNA-TIONAL JOURNAL SERIES B, VOL. 49 (2006), NO. 4 SPECIAL ISSUE ON JETS, WAKES AND SEPARATED FLOWS, 1064-1069.
- [22] PELTOLA, H.; KELLOMÄKI, S.; HASSINEN, A.; LEMETTINEN, M.; AHO, J.: SWAYING OF TREES AS CAUSED BY WIND: ANALYSES OF FIELD MEASURE-MENTS. SILVA FENN., 27(2)(1993): 113-127.
- [23] GAFFREY, D.; KNIEMAYER, O.: THE ELASTO-ME-CHANICAL BEHAVIOUR OF DOUGLAS FIR, ITS SENSI-TIVITY TO TREE-SPECIFIC PROPERTIES, WIND AND SNOW LOADS, AND IMPLICATIONS FOR STABILITY – A SIMULATION STUDY. JOURNAL OF FOREST SCI-ENCE, 48, (2)(2002): 49-69
- [24] Sellier, D.; Brunet, Y. And Forcaud, T.: A Nu-Merical model of tree aerodynamic response to a turbulent airflow. Forestry (2008), Vol 81, No. 3.
- [25] SPATZ H.-CH.; KÖHLER, L. AND NIKLAS, K.J.: ME-CHANICAL BEHAVIOUR OF PLANT TISSUES: COMPO-SITE MATERIALS OR STRUCTURES? , JOURNAL OF EXPERIMENTAL BIOLOGY 202(1999), 3269-3272.
- [26] BRÜCHERT, F.; GALLENMÜLLER, F.; BOGEN-RIEDER, A.; SPECK, T.: STEM MECHANICS, FUNC-TIONAL ANATOMY AND ECOLOGY OF ALNUS VIRIDIS AND ALNUS GLUTINOSA, FEDDES REPERTORIUM (2003) 114, 3/4: 181 – 197.
- [27] SONE, K., NOGUCHI, K., TERASHIMA, I.: MECHANI-CAL AND ECOPHYSIOLOGICAL SIGNIFICANCE OF THE FORM OF A YOUNG ACER RUFINERVE TREE: VERTI-CAL GRADIENT IN BRANCH MECHANICAL PROPER-TIES. TREE PHYSIOLOGY 26 (2006), 1549-1558
- [28] PELTOLA, H.M.: MECHNICAL STABILITY OF TREES UNDER STATIC LOADS. AMERICAN JOURNAL OF BOTANY 93(2006) (10), 1501-1511.

- [29] PAPESCH, A. J. G.; MOORE, J.R.; HAWKE, A.E.: ME-CHANICAL STABILITY OF PINUS RADIATA TREES AT EYREWELL FOREST INVESTIGATED USING STATIC TESTS. NEW ZEALAND JOURNAL OF FORESTRY SCI-ENCE 27 (1997): 188–204.
- [30] PELTOLA, H.; KELLOMÄKI, S.; HASSINEN, A.; GRANANDER, M.: MECHANICAL STABILITY OF SCOTS PINE, NORWAY SPRUCE AND BIRCH: AN ANALYSIS OF TREE-PULLING EXPERIMENTS IN FIN-LAND. FOREST ECOLOGY AND MANAGEMENT (2000) 135 : 143 – 153.
- [31] RUDNICKI, M.; MITCHELL, S.J. AND NOVAK, M.D.: WIND TUNNEL MEASUREMENTS OF CROWN STREAMLINING AND DRAG RELATIONSHIPS FOR THREE CONIFER SPECIES. CANADIAN JOURNAL OF FOREST RESEARCH 34(2004): 666–676.
- [32] VOLLSINGER, S.; MITCHELL, S.J.; BYRNE, K.E.; NOVAK, M.D.; RUDNICKI, M.: WIND TUNNEL MEASUREMENTS OF CROWN STREAMLINING AND DRAG RELATIONSHIPS FOR SEVERAL HARDWOOD SPECIES. CANADIAN JOURNAL OF FOREST RE-SEARCH 35 (2005): 1238–1249.
- [33] GUITARD, D. AND CASTÉRA, P.: EXPERIMENTAL ANALYSIS AND MECHANICAL MODELLING OF WIND-INDUCED TREE SWAYS. IN WIND AND TREES. M.P. COUTTS AND J. GRACE (EDS). CAMBRIDGE UNIVER-SITY PRESS (1995), 182 – 194.
- [34] KERZENMACHER, T. AND GARDINER, B.A.: A MATHEMATICAL MODEL TO DESCRIBE THE DY-NAMIC RESPONSE OF A SPRUCE TREE TO THE WIND. TREES. 12(1998), 385 – 394
- [35] MOORE, J.R. AND MAGUIRE, D.A.: NATURAL SWAY FREQUENCIES AND DAMPING RATIOS OF TREES: IN-FLUENCE OF CROWN STRUCTURE. TREES. 19 (2005), 363 – 373.
- [36] SELLIER, D. AND FORCAUD, T.: A MECHANICAL ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP BETWEEN FREE OS-CILLATIONS OF PINUS PINASTERAIT. SAPLINGS AND THEIR AERIAL ARCHITECTURE. JOURNAL OF EXPER-IMENTAL BOTANY, VOL. 56 (2005)NO. 416, 1563-1573.
- [37] BARTHELEMY, D. AND CARAGLIO, Y.: PLANT AR-CHITECTURE: A DYNAMIC, MULTILEVEL AND COM-PREHENSIVE APPROACH TO PLANT FORM, STRUC-TURE AND ONTOGENY, ANNALS OF BOTANY 99(2007): 375–407.

Universität für Bodenkultur Wien University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Autor:

DI Clemens Weissteiner

clemens.weissteiner@boku.ac.at

Betreuerteam:

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Johann Peter Rauch Em.O.Univ.Prof. Dr.phil. Florin Florineth Prof. Dr. Eva Hacker Assoc. Prof. Phd. João Paulo Fernandes

Pablo Castillo Ruano



Innovative circular fiber reinforced elastomeric isolation devices

Erdbebenisolationen auf Basis einer flexiblen horizontalen Schicht im Gründungsniveau einer Struktur tragen zu einer deutlichen Verringerung der seismischen Einwirkung auf die Struktur bei. Für derartige Isolationsschichten können u.a. mehrschichtig stahlblech- oder faserbewehrte Elastomerlager zum Einsatz kommen. In diesem Zusammenhang wurden bereits verschiedene Formen von Lagern untersucht, wie z.B. auch kreisförmige Lager, welche die Fähigkeit haben, multidirektional belastet zu werden. Darüber hinaus könnten Lager mit mehreren Materialeigenschaften eine breite Palette von Anwendungen finden, weil sie als Multi-Dämpfungssysteme funktionieren können. Ihre Fähigkeit, mehrere Frequenzen zu absorbieren, führt zu einer Sicheren Isolationsausbildung unter Erdbebeneinwirkungen. In der Literatur und in den Normen sind zwar für oben genannte Isolationslager zum Teil geschlossene Formulierungen vorhanden, jedoch bieten diese zum Großteil nur eine grobe Annäherung des tatsächlichen mechanischen Verhaltens, insbesondere des Verhaltens von kreisförmigen Lagern. Das Ziel dieser Dissertation ist es, die mechanischen Eigenschaften, auf Basis von experimentellen und numerischen Untersuchungen, für kleine und große horizontale Auslenkungen, realitätsnah für kreisförmige faserbewehrte Elastomerlager analytische zu erfassen und diese analytischen Formulierung den Bemessungsvorschriften zugänglich zu machen.

Keywords < Basisisolierung, faserbewehrte elastomerlager, numerische analyse mechanischer Eigenschaften>

1 Introduction

Elastomeric bearings have been used widely in the past in bridge engineering with a further use extension in damping of vibrations induced in buildings. This type of bearings consists of reinforcement layers, mainly steel, embedded and vulcanized between rubber layers. Recent experimental and theoretical studies tend to develop and analyze new reinforcement materials as carbon and glass fibers. Fiber reinforced elastomeric bearings are much lighter and easy to produce as conventional steel bearings, as large sheets can be manufactured and then cut to the requested size. This would lead to a cost reduction that would enable the use of seismic isolation systems in currently not cost efficient applications [1], [2]. Also the production of bearings with non standard geometries is facilitated. The elimination of steel reduces also the risk of corrosion and improves the behavior of the bearings in locations with high humidity. Regarding the mechanical behavior, one of the advantages of elastomeric bearings is to sustain very high vertical loads with a simultaneous flexibility in the horizontal direction, which enables the structure to bear large lateral deformations caused by

Seismic base isolation by introducing a flexible horizontal layer at the foundation level of a structure has proven to significantly reduce the seismic demand. Recently, multilayer reinforced elastomeric bearings, consisting of elastomeric layers reinforced by thin steel plates or fiber sheets, have been extensively used as isolation devises. Various shapes of bearings have been investigated. Circular bearings have the ability to be subjected to multidirectional loading. Moreover, bearings with multiple material properties, acting as multi-damping systems, could find a wide range of application. Their ability to absorb multiple frequencies leads to an improved behaviour under seismic actions. The formulas in literature and in design codes provide a rough approximation of the mechanical behaviour of circular bearings. The aim of the proposed thesis is to develop analytical formulations describing realistically the performance of such bearing types.

Keywords < base isolation, fiber reinforced elastomeric bearings, numerical analysis of mechanical properties, experimental analysis of mechanical properties>

strong ground motions [3]. The possibility of discarding the thick end steel plates used for fixing the elastomeric bearing to the structure has been analyzed in most recent investigations. The resulting elastomeric bearings present an unique behavior called rollover deformations at high horizontal displacements. In a first phase the upper and lower contact layers detach from the supports of the structural system, increasing the lateral flexibility and energy dissipation capacity of the system. If the lateral displacement increases a second phase called stable rollover deformation arises, the lateral faces of the bearings contact with the structural supports, what leads to an overall increase of the system's horizontal stiffness [4], [5]. At that state of lateral displacements, unfixed fiber reinforced elastomeric bearings are expected to perform more efficiently that the fixed version.

The current study aims to extend the result of previous numerical investigations on square fiber reinforced elastomeric bearings [6], [7], focusing on the accurate definition of the materials that form the analyzed part and transferring the developed numerical model to a new planform geometry. To capture the nonlinear mechanical behavior of rubber material, an advanced

material model accounting for its hyperelastic and viscoelastic properties has been calibrated and validated. Furthermore nonlinearities caused by large deflections and contact conditions have been taken into account during the development of the numerical model.

2 Methodology

The following methodology was used to numerically evaluate the shear force response under several horizontal displacements.

2.1 Constitutive Models for Elastomer and fiber reinforcement

In the current study a phenomenological material model is utilized to represent the non-linear hyper-viscoelastic mechanical behaviour of the elastomer.Based on a framework available in the commercial code ABAQUS the model is validated comparing the response of a single element simulation with data available from experiments. The carbon fiber reinforcement mechanical behaviour is simplified to orthotropic linear elastic in order to reduce the complexity of the overall model

2.2 Finite Element Model and Validation

Finite Element Analysis is the selected tool to evaluate the lateral behavior of the bearings under combined vertical and horizontal loads.

A model for the square shaped bearing has been realized. Mesh refinement analysis to ensure the quality of the model has been conducted and the results validated by comparison with available experimental data. Then a model for a round shaped bearing has been developed based on the square model results.

3 Constitutive Models

3.1 Rubber Constitutive Model

Elastomeric materials have a complex nonlinear mechanical behavior that includes rate dependence, hyperelasticity and damage dependent on preloads, among others. To consider all these effects a phenomenological, rheological based framework implemented on the commercial code ABAQUS is used in this work. This Parallel Rheological Framework consists of several viscoelastic networks and a pure elastic network connected in parallel, as depicted in Figure 1 and accounts for hyperelasticity, non-linear viscoelasticity and the stress softening caused after the first loading of the specimen, known as Mullins effect [8].



Figure 1 Representation of the Parallel Rheological Framework

3.1.1 Elastic Behavior

In this work a hyperelastic polynomial model based on the Yeoh form of the strain energy potential [9] is assumed for the equilibrium and the elastic portion of the viscoelastic networks. This model depends only on the first strain invariant and its strain energy potential is based on a series expansion. For an incompresible material the strain energy is defined by

$$W = \sum_{i=1}^{3} C_{i0} \cdot (I_1 - 3)^i \tag{1}$$

Where C_{i0} are material parameters.

Yeoh model provides a good fit over a large strain range and can predict mechanical behavior under deformation modes that differ from the one used to obtain the calibration data.

3.1.2 Mullins effect

Filled elastomeric materials under quasi-static cyclic loading present stress softening, i.e. the stress applied to stretch the material during the reloading is less than the required for the initial loading [8]. This phenomenom, associated to the damage produced by previous loads, is referred as Mullins effect. In this work a modified Ogden & Roxburg model as described by [10] is used.

$$W_0 = \eta \cdot W + \phi(\eta) \tag{2}$$

Where $\phi(\eta)$ is the damage function that depends on the deviatoric part of the strain energy in the initial loading and three material parameters.



University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

3.1.3 Viscous Behavior

As described in [11] and [12] viscous behavior is modeled by assuming the multiplicative split of the deformation gradient and the existence of the creep potential, G^{cr} . The flow rule is derived from this potential and has following form:

$$D^{cr} = \dot{\bar{\varepsilon}}^{cr} n \tag{3}$$

In this work we define the equivalent creep strain rate using the in ABAQUS implemented strain hardening power law that has the form:

$$\dot{\varepsilon}^{cr} = (Aq^n [(m+1)\bar{\varepsilon}^{cr}]^m)^{\frac{1}{m+1}}$$
(4)

where A, m and n are material parameters.

3.1.4 Model Validation

To validate the optimized model the results of a single element simulation were compared with a set of experiments that were not used to calibrate the model. Good agreement is observed, as far as stress-strain behavior is concerned. Regarding the damping properties of the elastomer, further dynamic and stress relaxation experiments are desirable to improve the accuracy of the viscous response of the model.



Figure 2 Virtual and real simple shear experiment comparison

3.2 Material Model for Reinforcement

Uniaxial experiments on the carbon fiber fabric used as reinforcement in the analyzed bearing show hysteretical behavior. Nevertheless the amount of energy dissipated by the reinforcement in comparison with the elastomer is negligible as demonstrated by [6]. Based on this information an orthotropic linear elastic material model is employed to describe the behavior of the reinforcement.

BOKU

4 Finite Element Model and Validation

The commercial finite element analysis code ABAQUS was used to create a numerical model for a square and a round bearing.

4.1 Model Description

First order, reduced integration hexahedral elements have been chosen for the elastomeric part of the bearing as their properties allow reducing detrimental effects caused by shear locking. In order to reduce the potential hourglassing effect, the enhanced hourglass control available in ABAQUS was employed and three elements were distributed along the height of an elastomeric layer. The carbon fiber reinforcement are modeled with first order membrane elements according to [6].



Figure 3 Meshed models for round and square devices under a 200% horizontal deflection

A biased meshing strategy was employed to improve the accuracy of the model at points of interest. Several mesh densities were analyzed to determine the element size achieving a balanced relationship between computation time and accuracy of the model. To reduce the computational cost the symmetry properties of the model were used. Two rigid plates in contact with the bearing were defined and load and displacement boundary conditions were applied to them, in order to investigate lateral deflections up to 200% of the total rubber thickness

 t_r . In addition, to model the bearings fixed to the support tie constraint condition was imposed between the upper and lower horizontal surfaces and the rigid plates. In the case of unfixed bearings the contact surface is variable what increases the complexity of the problem. Due to the high nonlinear character of the problem explicit dynamic solution methods were chosen.

4.2 Validation using Experimental Data

Experimental data for lateral deflection for bearings is available from previous and current investigations. To evaluate the accuracy of the model, numerical simulations replicating the experiments were run and critical mechanical properties for isolation devices as effective shear modulus G_{eff} and equivalent damping coefficient ξ were calculated according to [13] and [14] using equations (5) and (6) respectively.

$$G_{eff} = \frac{\tau_{s,max} - \tau_{s,min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}} = \frac{F_{x,max} - F_{x,min}}{A} \cdot \frac{t_r}{\nu_{x,max} - \nu_{x,min}} = \frac{K_{h,eff} \cdot t_r}{A} \quad (5)$$

$$\xi = \frac{2W}{\pi \cdot K_{h,eff} \cdot (\nu_{x,max} - \nu_{x,min})^2} \tag{6}$$

where τ , γ , F, and ν refer to shear stress, shear strain, load and horizontal displacement, respectively, A to the area of the bearing, W to the area of the hysteresis loop and $K_{h,eff}$ is the secant stiffness given by:

$$K_{h,eff} = \frac{F_{x,max} - F_{x,min}}{\nu_{x,max} - \nu_{x,min}}$$
(7)

Predicted and experimental load-displacement behavior for a bearing is compared in Figure 4.

The predicted results capture reasonably the trends of the mechanical properties and match previous results available in the literature [4]. Nevertheless the experimental data exhibit an unexpected effect when comparing fixed and unfixed bearings, as unfixed bearings showed higher G_{eff} values [7], which, according to [5] should occur only after the stable rollover deformation. This effect points to the fact that further experimental work should be accomplish in order to extract data for deflections levels higher than 100% of bearing thickness and to analyze the unexpected effect found.



Figure 4 Predicted and experimental load-displacement behavior for square bearing under lateral deflection

5 Conclusions and further steps

In this work the mechanical behavior and characteristics of fiber reinforced elastomeric bearings which bring advantages for their use as base isolation devices are presented. A numerical model for this devices aiming to capture the typical critical properties of an isolation system's response is introduced. To accurately represent the bearing's behavior, focus is set on the detailed selection of an adequate numerical model, its calibration and validation for its component materials. Nonlinearities as hyperelasticity and nonlinear viscoelasticity are accounted for the rubber part and fiber reinforcement is assumed as orthotropic material. Although further development of the model must be done to fine tune the response, realistic trends in the analyzed parameters could be captured. The results can be used to verify and extend the formulations obtained by [10] as well as to analyze further geometrical possibilities and combinations of elastomeric materials to absorb different range of frequencies.

6 Acknowledgements

This work is financially supported by the FWF, Austrian Science Fund, through the research project "Innovative Circular Fiber Reinforced Elastomeric Isolation Devices". Specimens for the experimental program were facilitated by company Maurer Söhne Gmbh & Co. KG, whose contribution is gratefully acknowledged.

Literatur

Die Literaturverweise sind am Schluss des Beitrags zusammenzustellen. Die Quellenangaben werden fortlaufend arabisch nummeriert, *in der Reihenfolge ihres Erscheinens innerhalb des Texts (Keine alphabetische Sortierung!)*, die



University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Zitatnummer wird im Text in eckigen Klammern angegeben. Die einzelnen Quellen sind in der gekürzten Form nach DIN 1505 zu zitieren. Innerhalb dieser Dokumentenvorlage steht dafür die Formatvorlage *Liste: Literatur* zur Verfügung.

Hier jeweils ein Beispiel für Zitate einer Monographie und eines Zeitschriftenaufsatzes:

- MOON, BY.; KANG, GJ.; KANG, BS.; KELLY, JM.: Design and manufacturing of fiber reinforced elastomeric isolator for seismic isolation. Journal of Materials Processing Technology (2002), 145–150
- [2] NAEIM, F.; KELLY, JM.: Design of Seismic Isolated Structures (1999). John Wiley & Sons, Inc.
- [3] KELLY, JM.: Earthquake-Resistant Design with Rubber. (1997). London: Springer London.
- [4] TOOPCHI-NEZHAD, H., M. J. TAIT, & R. G. DRYS-DALE (2008). Testing and modeling of square carbon fiber-reinforced elastomeric seismic isolators. Structural Control and Health Monitoring 15(6), 876–900.
- [5] TOOPCHI-NEZHAD, H., M. J. TAIT, & R. G. DRYS-DALE Bonded versus unbonded strip fiber reinforced elastomeric isolators: finite element analysis. Composite Structures 93(2) (2011)., 850–859.
- [6] GERHAHER, U. Faserverstrke Elastomerlager -Konzeption und Bemessung. Ph. D. thesis, (2010) Universität für Bodenkultur Wien.
- [7] STRAUSS, A., E. APOSTOLIDI, T. ZIMMERMANN, U. GERHAHER, & S. DRITSOS : Experimental investigations of fiber and steel reinforced elastomeric bearings: Shear modulus and damping coefficient. Experimental investigations of fiber and steel reinforced elastomeric bearings: Shear modulus and damping coefficient 75, (2014).
- [8] MULLINS, L. Softening of Rubber by Deformation. Rubber Chemistry and Technology 42(1), (1969). 339–362.
- [9] YEOH, O. H.: Some Forms of the Strain Energy Function for Rubber. Rubber Chemistry and Technology 66(5) (1993), 754–771.

- [10] BOSE, K., J. HURTADO, M. SNYMAN, W. MARS, & J. CHEN :Modelling of stress softening in filled elastomers. Constitutive Models for Rubber (2003), 223–230.
- [11] HURTADO, J., I. LAPCZYK, & S. GOVINDARAJAN (2013). Parallel rheological framework to model non-linear viscoelasticity, permanent set, and mullins effect in elastomers. Constitutive Models for Rubber VIII 95.
- [12] SIMULIA: *ABAQUS analysis user's manual.* (2014). Simulia.
- [13] EN1337-3 Structural bearings part3: Elastomeric bearings. European code. (2005).
- [14] EN15129 Anti-seismic devices. European code. (2009).

Autor/PhD:



Pablo Castillo Ruano

Peter-Jordan-Straße 82

1190 Wien

pablo.castillo@boku.ac.at

Betreuerteam: Assoc. Prof. Dr. Alfred Strauss (Betreuer), Dr. Christian Braun, Prof. Konrad Bergmeister, Prof. Gerald Pinter, Johann Distl



Marco Marcon



Experimental and numerical study of bonded anchors behavior

Fastening elements such as bonded anchors are decisive in construction industry. They allow strengthening of buildings and connection of load bearing structural members with each other. Bonded anchors are post-installed fastening systems which have been widely used in the recent years. The complex behavior of such systems during their life-time is up to now not fully understood and needs to be further studied. Numerical simulations are needed to get information not available from the only experiments. Since a large share of anchors is placed in concrete, a good concrete model is a prerequisite. Starting with the evaluation of the concrete properties which are required to calibrate a comprehensive numerical model. The model of choice needs to be versatile and capable to predict the correct failure mechanisms. To select it, a comparison among the ones available needs to be performed. Prior the study of the bonded anchor, a study on the failure of anchors in general and its dependency from the mix design has been performed. The numerical model had been developed in a discrete framework and has been calibrated, validated and used for numerical investigations such as: capacity of a bonded anchor installed in ASR damaged concrete. To obtain a deeper understanding of the problem, the scale on which such a problem needs to be studied sometimes need to be smaller. For this reason, a lower scale model is intended to be implemented. The model accounts not only for the properties of the adhesive mortar but also for the curing history that led to that specific properties development.

1. Experimental concrete test data for model calibration and validation

To calibrate and validate any constitutive model, experimental data covering different experimental setups are quintessential. Concrete calibration requires confined and unconfined compressive tests, direct or indirect tension tests and tests for detection of fracture energy. Only if post-peak data are available, the softening behavior and damage evolution can be calibrated. A large collection of concrete tests have been analyzed to verify the completeness of the data. All the specimens were cast from the same batch. 128 three-point bending tests of 400 day old beams of four sizes, notched with four relative notch depths and un-notched, 12 standard ASTM tests for modulus of rupture with 31 and 400 day old beams and 24 uniaxial compression tests on 31 and 400 day old cylinders are available. To carry out additional extended investigations, 105 specimens were cut from the remaining shards.



The additional experimental campaign included 12 centrally and eccentrically loaded three-point bending tests with 466 day old beams, 40 Brazilian splitting tests with 475 day old prismatic specimens of 5 sizes, 22 uniaxial compression tests with 470 day old cubes, 6 uniaxial compression (tension) tests with 950 days old cubes (prisms), 4 confined compression tests with 560 day old cored cylinders and 11 torsion tests with prisms.



Figure 6 - Response of notched specimens in three point bending set-up

For all the specimens, nominal stress-strain curves and crack patterns are provided. The set-up of the test will be numerically reproduced and the calibration is performed approximating as well as possible the resulting stress strain curves. Some of the curves as well as the crack pattern will be used as validation. Figure 1 shows some of the specimens tested in the experimental campaign. Figure 2 shows some of the results of the experimental campaign in terms of nominal stress – nominal strain.

2. Comparison of concrete models based on a large collection of tests

Many different constitutive models have been developed in the last years to describe behavior failure of concrete. Good quality experimental data covering different experimental setups are required. Some of the models used to describe concrete are damage plasticity models e.g. the Grassl-Jirasek Model or the model available in ATENA, Microplane models M4 and M7, and discrete models such as the Lattice-Discrete-Particle-Model (LDPM).



Figure 7 - Comparison of numerical and experimental results

These models were compared based on a large set of experimental data of specimens cast from the same batch. The comparison regarded the number of input parameters, their physical meaning, the ease of calibration and, ultimately, their predictive capabilities. The models are calibrated using the mean value nominal stress strain curves for passively confined and unconfined compression, and notched 3-point bending of one size. Predictions for 3-point bending tests of 4 sizes with vari-



ous notch depths, splitting tests of 5 sizes, torsion tests and direct tensions was performed.



Figure 8 - Example of a finite element model of a three point bending test



Figure 9 - Example of a discrete element model of a three point bending test

Figure 3 shows an example of a comparison between experimental and numerical results. Figures 4 and 5 show some of the model used and underline the difference between a finite element model and a discrete model.

3. Effect of the aggregate on concrete cone capacity

Aggregate type shape and size influence concrete properties and failure mechanisms. Being the fastening systems such as anchors generally placed in concrete, their capacity is influenced by the concrete aggregates.



Figure 10 - Concrete cone failure for mechanical anchor
University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Concrete compressive strength, fracture energy and elastic modulus are the input for equations used for the estimation of concrete cone. Depending on the anchor working principle, the aggregates could have an additional effect on the anchor capacity other than the direct one which is the influence on concrete properties above mentioned. Figure 6 shows a typical concrete cone failure with a headed stud anchor. Three concrete batches with different aggregates but otherwise same concrete mix design were used to verify the presence of this secondary effect of the aggregate. The results are normalized by the concrete properties and a comparison on the mean values of the results is performed. Also a statistical method was used to enforce the result based on the mean value providing not just a normal value but also a standard deviation, to better compare the results from concrete with different aggregate.

4. Numerical analysis of pull-out tests of bonded anchor by Discrete Particle Model

Fastening elements such as bonded anchors are crucial in the construction industry consenting connection of structural members with each other. The mechanical behavior of this system is influenced by the involved materials which are concrete, steel and adhesive mortar. To be able to represent numerically this structural element, material models for the three components need to be used. The failure mechanisms and capacity depend on the direction of load and strength of each of the involved materials. The problem is approached focusing on the behavior of anchors under tension loading and a numerical model for bonded anchors installed in un-cracked concrete is created. Different strategies can be used for this porpoise depending on the level of detail and the accepted problem complexity.



Figure 11 - Discrete model for bonded anchor





Figure 12 - Numerical and experimental results for confined configuration

Each of the components of the system has been calibrated on independent test results. For the concrete, a discrete particle model has been used and for the mortar layer, a stress –slip law. The stress-slip law was calibrated on close support pull-out tests as can be seen in figure 8. Model validation was performed on unconfined pull-out test and the result is presented in figure 9. The validation on unconfined configuration shows very good result in terms of peak load and displacement at the peak.



Figure 13 - Numerical and experimental results for unconfined configuration

Additional validation is performed on crack pattern and concrete cone shape obtained by photogrammetric tools.



5. Effect of ASR damaged concrete on bonded anchors

In course of the life-time of a structure, post-installed anchors are key elements in all types of rehabilitation and restoration efforts. Deterioration of concrete structures due to alkali silica reaction (ASR) has become a concern in many fields of structural engineering ranging from nuclear containment to bridges. Of interest is also the influence of the ASR on long-term load carrying capacity of bonded anchors. The experimental campaign is preceded by a numerical investigation based on established models. The study is performed on the effect of pre-existing ASR induced damage, and ongoing ASR damage after anchor installation.



Figure 14 - Pull-out with and without ASR damage

For each scenario, close support pull-out tests are performed on two typical adhesive mortars accompanying the reference case of a standard cast-in rebar. Additionally, wide support pull-out tests are performed allowing concrete cone failure. The latter which would serve as validation once the experimental results will be available, is representing the real life possible scenario. A model parameter sensitivity analysis completes the study to identify the relevant parameters or processes for such a configuration.

6. Lower-scale model for bond behavior

Any problem can be simplify or make it complex as much as one wants. The proper balance between complex and accuracy of results is not always clear and changes with the goal of the study. Bonded anchors have been studied on a system scale in order to understand the system response, also long term once. Of interest is also the interaction of the materials at the interface, the behavior of the adhesive mortar in time and in relation with temperature and loading rate. Furthermore, the adhesive mortar has properties which heavily are dependent on the curing process and its boundary conditions. According to the preliminary experiments, the investigated epoxy based system is characterized by a pronounced ductile behavior whereas the vinyl-ester based system is quite brittle. The proposed numerical approach, formulated in the framework of discrete particle and continuum models, is utilized to capture the aforementioned characteristics. The numerical results obtained by the proposed models are compared with the available experimental data.



Figure 15 - Curing and pre-stress model which includes aggregates.



Figure 16 - Lower scale model for bonded anchors

Nincevic Kresimir



Time dependent performance of fastening systems

Abstract: The efficient design and utilization of fastening system require a fundamental understanding of the behavior of all involved materials, such as concrete, steel, and adhesive mortars, and their interaction. It is very important to understand and to account their potential change in course of lifetime due to deterioration (curing, creep, and shrinkage of concrete) and material ageing. The aim of this study is to experimentally investigate concrete cone failure dependence on the concrete mix composition and its evolution due to concrete aging. In an experimental campaign several concrete batches were casted and characterized fully in terms of tensile and compressive strength, modulus, and fracture properties. Structural tests on concrete slabs for anchors in tension and shear were performed. The obtained data is used to examine current codes and predictive equations, and as well to develop and build reliable numerical discrete models. A well-established discrete particle model, LDPM, is used to calibrate concrete parameters, based on standard uniaxial compression and fracture tests. The calibrated concrete models are used to develop predictive numerical models, validated on experimentally obtained results. Apart from load-displacement curves, DIC strain measurements and photogrammetrically obtained crack patterns are used to evaluate the predictive quality of the investigated models.

Keywords: fastening systems, life-time design, pull-out, shear, concrete cone failure, Lattice-Discrete-Particle-Model

1 Introduction

In the last decade, the construction industry saw a shift towards rehabilitation and modular construction in order to address the growing demand for faster construction on one side, and change in usage and sustainability on the other side. Consequently, post installed fastening systems have become an important part of civil engineering structures and see increasingly wider application. Therefore, it is important to improve the basic understanding regarding the working principles of different types of fasteners depending on the material of the structural member and the time-dependent processes the system undergoes.

In the present work, the dependence of concrete capacity (concrete failure under tensile and shear loading) on the concrete composition and building reliable discrete models with relevant mechanisms are investigated. As it is customary in reinforced concrete design also the concrete cone capacity is typically predicted in terms of concrete compressive strength. Yet, the mix design of concretes around the world varies widely. As composite and aging material, the most important ingredient next to cement are the coarse aggregates which can differ in their mineralogical composition, depending on the geographic location where the material is obtained, but also aggregate size distribution, shape, and surface roughness. Further influence factors are cement replacement products and additives. Due to the differences in mix design it can be assumed that the material properties of concretes with the same compressive strength may scatter widely. As a consequence, also the concrete load capacity, which is determined by fracture mechanics, may not be fully predictable by an empirical equation in terms of compressive strength. In order to shed light on these questions an experimental campaign and concrete castings were performed. In total several normal strength concrete batches composed by the same mix designs but different aggregate types are fully characterized in terms of tensile and compressive strength, and fracture properties.

Apart from material characterization tests, pull-out and shear tests for mechanical and bonded anchors on concrete slabs were performed. Based on the experimentally obtained data the current design codes and guidelines for pull-out and shear prediction are checked and are used to evaluate the predictive quality of the investigated models. In case of bonded anchors, one set of data ('confined' tests) is used to calibrate the bond law while an independent second set allowing cone failure serves for the model validation.

2 Fastening systems

2.1 General

Modern fastening systems are becoming more important in civil engineering constructions and the field of application of modern fastening technique is expanding.



University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren



Fasteners are structural elements that connect members with each other or with second structural member. Typically, anchor systems can be differentiated by the way they are installed and according to the working principles [2]. They can be either cast-in concrete, which means they are placed in the formwork before the concrete is poured, or post-installed, which which means they are installed in hardened concrete or masonry. Fastenings can be loaded by tension, shear loads, bending moment or as combinations of the above loads, as it is shown in Figure 2.



Figure 2 Actions on fasteners

To ensure reliable and well-functioning fastening system it is very important to understand the behavior of each involved material and their interaction. Since we focus on fasteners in concrete as a base material, it is very crucial to take into account the time-dependent properties of concrete. The behavior of the fastening system can be influenced by many parameters that have to be considered, such is environmental condition (temperature and relative humidity) and chemical attack or fire exposure that lead to damage of materials.

2.2 Working principles

Fasteners, as members that connect other structural elements, have a role to transfer applied loads to the base material. The most important load-transfer mechanisms employed by the fasteners are mechanical interlock, friction and bond, or a combination. Regardless of the load-transfer mechanism, fastening systems rely on the tensile strength of the base material.

Headed anchors, anchor channels, screw anchors and undercut anchors are typically mechanical anchors where the applied load is transferred with mechanical interlock between fastener and the base material, which results in locally high bearing stresses.

In case of friction mechanisms, the load is transferred to the concrete mainly by friction, where the friction force is in equilibrium with the external tensile force. During the installation the anchors expand and an expansion force is generated that activates the friction force between fastener and the bore hole.



The load transfer in case of bonded anchors, is ensured by adhesion between base material surface and mortar, and between mortar and anchor (threaded bar) along the embedment depth.



Figure 3 Load-transfer mechanisms: a) mechanical interlock b) friction c) bond

2.3 Failure modes

During the service life different failure modes can occur when anchors are loaded in tension or in shear. For anchors loaded in tension, usually there are four possible failure modes: pullout or/and pull-through failure, concrete cone failure, splitting failure and steel failure. Failure mechanisms for mechanical and bonded anchors which involve concrete failure are the focus of this study.



Figure 4 Failure modes considered in this study

3 Experimental program

The experimental program was carried out to characterize several standard normal strength concretes. Especially the early age mechanical behavior is investigated. The data of the experimental program has been used to calibrate and validate the early age model [3, 4]. In order to determine mechanical properties different kinds of tests were performed including compressive strength tests for cubes and cylinders (unconfined), brazilian splitting tests, three-point bending and wedge splitting tests. Apart from the evolution of strength, modulus and fracture energy, also the creep and shrinkage behaviour in sealed and unsealed conditions, loaded at different ages are of interest. As essential input information for numerical modelling attempts also the hydration energy will be determined by a differential-calorimeter and the evolution of internal humidity and temperature at early age will be performed. Available data will be used in the next phase in order to calibrate hygro-



thermal-chemo-mechanical model to be able to investigate advanced problems. Structural tests on the slabs, pull-out and shear tests with mechanical and bonded anchors were performed.



Figure 5 Experimental tests setup and failures

During the tests, Digital Image Correlation (DIC) is used to obtain displacement field and strain development. Terrestrial photogrammetry provides the necessary input information about the structural geometry, failure surfaces and is an essential element of post processing. The commercial software Photo-Modeller scanner is used in order to gain insights into the activated concrete volume, into crack spacing, and newly created fracture surfaces with the additional advantage to possibly recreate the complete setup.



Figure 6 Digital image correlation (DIC) method to measure displacement and to obtain strain field



Figure 7 Possibilities using sophistical photogrammetry tool to recreate fracture surface and get insight into failure mechanisms

4 Numerical framework

The Lattice Discrete Particle Model (LDPM) [5, 6] presents a suitable discrete model to simulate the systems governed by the concrete failure modes and simulates concrete at the meso-scale. Coarse aggregates are assumed to be spherically shaped in this model and are enclosed in a cementitious matrix. The connection of the aggregate centers is obtained by Delaunay tetrahedralization. The utilization of boundary conditions is ensured by randomly placed zero-radius aggregate pieces over the surfaces. The full description of the LDPM geometry is reported in [4, 5]. The material constitutive model is calibrated based on standard uniaxial compression and three-point bending tests. After validation reliable and predictive models for mechanical and bonded anchors, loaded in tension and shear are useful tools to study the failure mechanisms and derive simplified design models.



Figure 8 Discrete model for shear test



Figure 9 Discrete models for pull-out test

Conclusion

The results of the experimental studies are used to develop, calibrate and validate numerical models. Based on these investigations, the aim is to improve the knowledge of the very complex mechanical and chemical behaviour of fastening systems (mechanical and bonded anchors) and their interaction through experimental and numerical investigations taking in account different failure modes. Calibrated and validated nonlinear simulations provide important insights into mechanisms that ultimately will allow the improvement of simplified analytical design formulations based on existing equations given by codes and further improvements of mechanical models and



constitutive laws. Consequently, it will be possible to predict the evolution of anchor pull-out and shear loads with concrete failure from material calibration.

Literatur

- [15] ELIGEHAUSEN, R., HOFACKER I., AND LET-TOW, S. : Fastening technique–current status and future trends, Ernst & Sohn, Berlin, 2006.
- [16] ELIGEHAUSEN, R., MALLÉE, R. AND SILVA, J. F.: Anchorage in Concrete Construction, Ernst & Sohn, Berlin, 2006.
- [17] DI LUZIO, G.; CUSATIS, G.: Hygro-thermo-chemical modeling of high-performance concrete. II: Numerical implementation, calibration, and validation CEM. CONCR. COMPOS. 31, 309-324
- [18] DI LUZIO, G.; CUSATIS, G.: Hygro-thermo-chemical modeling of high-performance concrete. I: Theory. CEM. CONCR. COMPOS. 31, 301-308
- [19] G.CUSATIS, D.PELESSONE, AND A.MEN-CARELLI.: Lattice discrete particle model (LDPM) for failure behavior of concrete. I: Theory. Cement Concrete Composites, 33(9), 881-890, (2011).
- [20] G.CUSATIS, D.PELESSONE, AND A.MEN-CARELLI.: Lattice discrete particle model

bration and validation. Cement Concrete Composites, 33(9), 891-905, (2011).

(LDPM) for failure behavior of concrete. II: Cali-

Autor/PhD:



Kresimir Nincevic M.Sc.

Peter Jordan Straße 82

Institute of Structural Engineering (IKI)

1190 Wien

kresimir.nincevic@boku.ac.at

Advisor team: Priv. Doz. Dipl. Ing. Dr. nat. tech. Roman Wendner

Roman Paratscha

Environmental Life Cycle Assessment of Alpine Protective Structures

In modern protective engineering approaches, additionally to the effective protection of human life and material assets, also socio-economic aspects, environmental impacts and potential should be considered for a holistic planning process. The research project E-Protect aims at developing Environmental Life Cycle Assessment (LCA) models for the special field of alpine protective structures. Both, the Cumulative Energy Demand (CED) and the Global Warming Potential (GWP) should be considered in an Environmental LCA. These innovative Environmental LCA models will provide a new planning and decision support tool for responsible planners, by pointing out the environmental impact over the entire lifecycle.

Keywords: Life Cycle; Environment; Alpine protective structures

1 Introduction

The Alpine region is particularly affected by the climate change. Results from various research works show that besides Alpine temperatures, also precipitation, global radiation, relative humidity and closely related impacts like floods, droughts, snow cover and natural hazards will be affected by global warming. Natural hazards related to glacier and permafrost retreat are expected to become more frequent (Gobiet et al. 2013) and the increase in anthropogenic pressure and extreme weather events attributed to climate change will likely augment the frequency and intensity of landslides (Field et al. 2012).

Around 75 % of the federal territory of Austria consists of Alpine areas. Actually 58 % of the federal territory (83,855 km²) are zones of intensive protection against Alpine natural hazards, another 17 % are extensively threatened by torrents, avalanches and erosion. In the year 2006, 12,294 torrents, 5,980 avalanches and 861 risk areas (slides, rock-fall) were recorded. Therefore 67 % of the federal territory is subject to the care of the Austrian Service for Torrent and Avalanche Control (WLV) (BMLFUW, 2014).

The first efforts of an ecological way of thinking emerged in the seventies because of energy crisis. In 1978 the first concept of LCA appeared in studies of EMPA (Fink et al. 1992). The Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) was a leader to standardize the procedure and the setting of standards for LCA (Klöpffer W. at al. 2005). This standardization has been finally set in the nineties by the EN ISO 14040.

The presently used assessment methods for protective struc-

tures, particularly for its benefits and the need for its establishment and maintenance expenses, are referencing monetarily and economically. The benefits and costs are given in the currency unit Euro. Possible ecological considerations relate solely to specific effects of the buildings, but exclude the material formation processes. For example, under the primacy of the economy, transport distances of building materials are not considered relevant if these materials are offered accordingly cheap.

Examples for LCA in civil engineering can be found in road construction projects (Birgisdottir H. et al. 2006). Mroueh U. et al. (2001) has carried out a similar study on life-cycle impacts of road and earth constructions. Also at the "International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering" this topic is discussed.

By developing a new Environmental LCA model, an instrument that supports the institutional feasibility to realise policy strategies (e.g. Green Public Procurement) in the field of natural hazard protection, will be provided. Quantifying the environmental pillar of sustainability enables the implementation of ecological thought in the respective planning processes.

The challenge is to adapt the existing requirements of EN ISO 14040 to the specific field of alpine protective constructions in order to develop a viable method of life cycle assessment. This development offers a comparison of different variants of buildings and is therefore a helpful decision support in early planning stages.

2 Scientific research question

The project achieves an interdisciplinary and holistic approach

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

by connecting disciplines of structural engineering and soil bioengineering with a specific focus on the field of alpine protective structures. The main focus of the project is related to "ENERGY" in terms of cumulative energy demand (CED) and Global Warming Potential (GWP). The scope of the project covers the whole life cycle of protective structures starting with raw material production and operational phase up to the end of life phase. Analysis of existing data bases and of field data collected from alpine protective structures cumulate in an integrated Environmental Life Cycle Assessment (LCA) model applying a multitude of research methods. The model will be tested in close accordance between the developers and stakeholders.

3 Questions to be addressed

- How much CED and GWP are caused during construction, operation and end of life phase?
- Which service life time can be assumed for alpine protective structures?
- Which functional unit is suitable for protective structures?
- How can the developed Environmental LCA scenarios be adapted to alpine protective structures?
- How much CED and GWP can be reduced by life cycle optimized constructions?
- How can a general LCA approach for alpine protective structures look like?

4 Methodology

4.1 General concept of LCA for protective alpine constructions

A specific conceptual approach for alpine protective structures will be developed on the basis of existing LCA methodology for buildings (EN 15978, EN 15804). Processes cover all relevant life cycle stages including transports from cradle to grave: production, construction, use and end of life as well as benefits and loads beyond the system boundary. A functional unit based on the benefit of the structures will be defined. The reference service life for the protective construction type (temporal system boundary) will be determined. Cut-off rules exclusions and generalizations will be proposed and tested to support an efficient calculation procedure. Allocation rules for co-products, multi-input-processes, recycling and recovery will be determined. Impact assessment will be carried out for CED (renewable and non-renewable energy) and GWP100. The objective is to determine a methodical framework for the database and case studies within four main stages: Goal and Scope definition (G&S), Life Cycle Inventory (LCI), Life Cycle Impact Assessment (LCIA), Life Cycle Interpretation (LCIN).

4.2 Goal and scope definition

The iterative process of target definition and scoping is mandatory to act according to standards. The ISO 14044 §5.2.1.2 states:

"The scope should be sufficiently well defined to ensure that the breadth, depth and detail of the study are compatible and sufficient to address the stated goal. LCA is an iterative technique, and as data and information are collected, various aspects of the scope may require modification in order to meet the original goal of the study."

4.3 System boundary

In the construction field, there are similar system boundaries as in the field of other products. The system boundaries can be cradle-to-grave (whole building), cradle-to-gate (building materials) or gate-to-gate (construction process) according to EN 15978. To create a holistic LCA of alpine protective structures the cradle-to-grave system has been selected.

The system boundaries of building construction can only be partly adopted though because Engineering structures have no energy consumption during the use phase. In the use phase, a replacement is only necessary in case of damage (see Fig. 1).

4.4 Functional unit

The functional unit defines the quantification of processes to make them more understandable (ISO 14040). Because of the different designs and the uniqueness of each building, it is difficult to find a clear reference. In housing, the functional unit is usually square meter floor area. The transfer of this reference unit to alpine protective structures is not possible.

The Functional unit is specified in the current state as square meter surface area. This reference unit can be used for classic transverse structures or ripraps. By the iterative process of LCA and by incorporating other building types this can still change or be supplemented.

4.5 Service life

The lifespan of a building has a significant impact on the overall in the course of a life cycle assessment. Various lifespans of materials used lead to different replacement cycles and therefore different overall results.

For residential and commercial building the observed lifespan depends on the useful life. Various uses include various actors and this means different viewing horizons of lifespan (König H. et al. 2009).

The lifespan of protective structures and in particular of torrent control is particularly interesting. The lifetime of these buildings is in fact not depending on the viewing horizon of users but only on the suitability for use. For alpine protective structures, the protective function is more important. Therefore economic viewpoints according to the lifespan can be neglected but if the structure is anymore able to fulfill the protective function it has to be replaced or has exceeded its lifespan (see Fig. 1).

University of Natural Resources and Life Sicences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren



Fig. 1 Representation of the performance of protective structures with regular and neglected maintenance over the life (adopted from Suda, 2012)

References

- [21] GOBIET, A.; KOTLARSKI, S.; BENISTON, M.; HEIN-RICH, G.; RAJCZAK, J. & STOFFEL, M.: 21st century climate change in the European Alps-A review. Science of the Total Environment, 493, 1138-1151, 2014.
- [22] FIELD, C.: Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation, special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge, Cambridge Univ. Press 2012.
- [23] BMLFUW: *Daten, Zahlen & Fakten 2014;* Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien 2014.
- [24] FINK, P.: Ökobilanzen Grenzen und Möglichkeiten. IN INSTITUT, G. D. (Ed. GDI - Fachtagung Ökobilanzen. Zürich 1992.
- [25] KLÖPFFER, W.: *The Role of SETAC in the Development of LCA*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 11, 116-122, 2005.
- [26] BIRGISDOTTIR, H.; PIHL, K.; BHADER, G.; HAUSCHILD, M. & CHRISTENSEN, T.: Environmental assessment of roads constructed with and without bottom ash from municipal solid waste incineration. Transportation Research Part D-Transport and Environment, 11, 358-368, 2006.
- [27] MROUEH, U.; ESKOLA, P. & LAINE-YLIJOKI, J.:

Life-cycle impacts of the use of industrial by-products in road and earth construction. Waste Management, 21, 271-277, 2001.

Author/PhD:

- Dipl.-Ing. Roman Paratscha
- Roman.paratscha@boku.ac.at

Advisorteam:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Treberspurg

O.Univ.Prof.Dipl.-Ing.MSc.Ph.D.Dr.phil.Dr.techn.Konrad Bergmeister

Assoc. Prof. Dr. Alfred Strauss Priv.-Doz.

Dipl.-Ing. Dr. Johannes Peter Rauch

Dipl.-Ing. Roman Smutny

Stefan Sattler

Photovoltaic – part of the Paris Climate Protection Agreement

Photovoltaic Rooftop Garden - Innovative Systems for the Future

Due the climate change, the urban heat island effect becomes more and more of a problem in our cities. They get denser each day and therefore green space is often neglected. But this green spaces are an effective way the improve the microclimate in urban areas by cooling the air with the help of transpiration.

The research project "PV-Rooftop Garden – Innovative Systems for the Future" had the focus on the following fields and how those fields can be combined on a single rooftop:

- roof greening
- energy production by photovoltaic
- recreation room
- retention of storm water

Therefore green roof technology and translucent photovoltaic panels were combined to produce energy and give shadow to the users of the roof at the same time.

Different prototype-systems of the PV-pergola were developed and studied and their statics calculated. For designing the green rooftop garden a comprehensive analyses regarding the users needs, including the legally conditions, was done.

The PV rooftop garden provides a comfortable and enjoyable atmosphere, the PV-pergola with semi-transparent glassglass modules offers shading and produces green electricity. It combines some qualities which are quite rare in our cities and it is suitable for existing and new buildings.

New regulations like the EU building directive 2018/20 establishes that the zero energy standard becomes the new requirement and so producing energy directly on each building becomes very important if these guidelines are to be met.

With one unit of the PV rooftop garden - approximately 56m2 of ground area - 5.500 kWh of green energy can be produced each year. That's enough for 1-2 households.

The shading of the PV modules improves the perceived temperature by about 3-5°C during summer and also during winter. This is not only perceptible for the humans but also has an impact on the plants.

Because of the opportunity to collect the rainwater directly from the PV modules storing it is much easier and no electric power is needed to pump the water up to the roof. With special plant troughs it is even possible to water the plants automatically.

It was possible to design a solution for the PV rooftop garden, where no penetration of the roof and the sealing layer is necessary. The weight of the green roof is enough that the static requirements are fulfilled. Also no sound can be transferred from the steal construction of the PV into the concrete building structure. Because of the absence of a direct connection to the building structure, it can be also used on existing buildings.

Keywords Photovoltaic, green roof, ecological urbanism, decentralized energy production, living space

Janez Schellander

Theoretische Grundlagen und experimentelle sowie numerische Verifikation von Flüssigkeitsdämpfern

Der stetige Fortschritt im Bauingenieurwesen führt zu immer höheren Anforderungen in Bereichen wie Lebenszyklus-Management, Ermüdung von Strukturen und Sicherheit. Bei ungünstigen dynamischen Einwirkungen wie z. B. Wind, Verkehr oder auch Erdbeben, kann es bei Erregerfrequenzen im Bereich der Eigenfrequenz der betroffenen Struktur, zu hohen Schwingungsamplituden bzw. Systemantworten der Struktur kommen. Diese Schwingungen haben wesentlichen Einfluss auf Parameter wie Sicherheit, Lebensdauer, Gebrauchstauglichkeit und die Standsicherheit diverser Ingenieurbauten. Folglich ist die Reduktion respektive Dämpfung ungewollter Schwingungen von großer Bedeutung. Diese werden in der Regel durch sogenannte Isolatoren oder Dissipatoren bzw. mit Hilfe von Masse-Feder-Dämpfern (TMD) realisiert. Isolatoren und Dissipatoren arbeiten ohne zusätzliche Masse, TMD Systeme besitzen eine zusätzliche Masse welche über eine Feder und meist einen viskosen Dämpfer mit dem Hauptsystem gekoppelt ist. Eine weitere Möglichkeit der Schwingungsdämpfung ist der Einsatz sogenannter Flüssigkeitsdämpfer - aktiver wie auch passiver. Die Verwendung von Flüssigkeitsdämpfersystemen (liquid column vibration absorbers – LCVA) zur Dämpfung unerwünschter Strukturschwingungen, stellt eine gute Alternative zu herkömmlichen Dämpfungssystemen dar. Vor allem aus konstruktiver und wirtschaftlicher Sicht bieten sie Vorteile gegenüber herkömmlichen Dämpfungssystemen. Sowohl der Masse-Feder-Dämpfer als auch der Flüssigkeitsdämpfer können mit Hilfe des Ein-Massen-Schwingers beschrieben werden. Gekoppelt an die zu dämpfende Hauptstruktur kann das System vereinfacht als ein Zwei-Massen-Schwinger betrachtet werden. Hierbei wird die Amplitude des schwingenden Hauptsystems durch die gegenläufig schwingende Masse des Dämpfers minimiert. Die effektive Dämpfung des Hauptsystems, hängt wesentlich von Parametern wie der Masse des Tilgers m2, den Eigenfrequenzen beider Systeme f_T und f_m, von den Steifigkeiten k₁, k₂, den Dämpfungsparametern c₁ und c₂ sowie der Geometrie des Dämpfers selbst ab. Um eine möglichst effiziente Funktion und Dämpfung des Systems zu gewährleisten, sind die Kenntnis und die Abstimmung dieser Parameter zueinander von größter Bedeutung. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt vor allem auf den Parametern, Eigenfrequenz, Dämpfung und die von der Flüssigkeitssäule verursachten Rückstellkräfte. Dazu sollen theoretische Grundlagen recherchiert und präzisiert sowie Experimente und CFD (computational fluid dynamics) Simulationen durchgeführt werden. Dies soll am Ende eine bessere Vorhersagbarkeit, Genauigkeit und Effizienz von Flüssigkeitsdämpfern ermöglichen.

The progression of architecture as well as civil engineering techniques, increases the demand for innovative solutions in terms of life cycle management, lifetime of buildings, fatigue, safety and other important factors. Several load processes such as wind, earthquakes or traffic loads can cause severe dynamic effects on engineering systems and so have a significant impact on the lifetime (and design) of a structure (concrete fatigue etc.). Especially in case of excitation frequencies corresponding to the structure's natural frequency, unwanted and high amplitudes occur. These oscillations can lead to material fatigue, severe damage of the structure (SLS), in worst cases collapse of the whole system (ULS). The reduction of those effects is the main goal of many scientific investigations and contributions. This can be achieved by using different types of damping systems. One of these damping systems, is the liquid column vibration absorber – LCVA. It represents a simple yet effective method for mitigating unwanted oscillations. Furthermore it is rather low in costs and the maintenance effort is low as well, especially compared to other solutions. The LCVA-system uses a moving mass (e.g. fluids) which moves towards the oscillating mass of the engineering structure. It uses the working principles of a spring mass damper system as described by Den Hartog. To obtain an effective and proper functioning damper, several parameters must be adjusted as perfect and exact as possible. The parameters are the mass m_2 of the damper. natural frequencies f_T and f_{main} , the stiffnesses k_1 and k_2 , damping parameters c_1 , c_2 and the geometry of the damper. As it is very difficult to adapt or change the main systems parameters such as natural frequency f, the mass m_1 , stiffness k_1 , and damping c_1 , it is of high interest to design a secondary system (damper) which is tuned exactly to the needs of the main structure. The main focus is therefor on the dampers natural frequency, the damping itself and the restoring forces caused by the moving liquid column. For this, theoretical basics will be investigated and examined and vibration experiments as well as CFD (computational fluid dynamics) simulations will be carried out. Those should help to improve the possibilities, of designing predictable dampers with high accuracy and efficiency.

Autor/PhD:

Dipl.-Ing. Janez Schellander

Betreuer:

Assoc. Prof. Dr. Alfred Strauss

Roman, Smutny



Planung von Lebenszyklusoptimierten Gebäuden

Methoden für die Lebenszyklus-Bewertung in frühen Planungsphasen

Ziel war es, ein Instrument für frühe Planungsphasen von Gebäuden zu entwickeln um die Lebenszyklusperformance zu optimieren. Dazu wurden Planungsunterlagen und Messwerte von Referenzgebäuden analysiert und Szenarien- und Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Derzeit erfolgt die Auswertung der Analysen und die Entwicklung des Werkzeugs für den Praxistest.

Keywords Lebenszyklusbewertung; Ökobilanz; Lebenszykluskosten; Gebäude; frühe Planungsphase; Nachhaltiges Bauen

1 Hintergrund und Motivation

Der Bausektor leistet einen wesentlichen Beitrag für eine Nachhaltige Entwicklung. Dies betrifft sowohl ökologische Kriterien für Ressourcenbedarf und Klimaschutz, als auch ökonomische Kriterien für Lebenszykluskosten und Wertbeständigkeit und auch soziokulturelle Kriterien für gesundes Raumklima. Die Bewertung der Nachhaltigkeitsperformance von Gebäuden beruht auf dem Lebenszykluskonzept und erfolgt gleichzeitig und gleichberechtigt für die drei Säulen der Nachhaltigkeit (EN 15643 Teil 1-4).

Für die Optimierung der Nachhaltigkeit von Gebäuden besteht in frühen Planungsphasen der größte Entscheidungsspielraum. Es werden grundlegende Entscheidungen getroffen, die einerseits die Nachhaltigkeit der zu errichtenden Gebäude maßgeblich beeinflussen und die andererseits im Zuge der weiteren Planung nur unter hohem Kostenaufwand korrigiert werden können. Es existieren jedoch noch keine praktikablen Werkzeuge um die Nachhaltigkeit in frühen Planungsphasen zu bewerten und zu optimieren.

2 Ziel und Fragestellungen

Ziel der Arbeit war die Entwicklung von Planungstools für die Bewertung ausgewählter Nachhaltigkeitskriterien in frühen Planungsphasen von Projektentwicklung bis Vorentwurf. Der Fokus lag auf der Bewertung der ökologischen und ökonomischen Lebenszyklusperformance. Als Zielgruppe wurden sowohl Planer als auch Bauherren, Investoren und Projektsteuerer anvisiert, wobei die erarbeiteten Werkzeuge sowohl zur Optimierung als auch zur Qualitätssicherung und zur Kommunikation dienen. Folgende Fragestellungen wurden behandelt:

 Welche methodischen Ansätze und Werkzeuge existieren f
ür die Nachhaltigkeitsbewertung von Geb
äuden und wie eignen sich diese f
ür fr
ühe Planungsphasen?

The overall objective was to develop a tool for early design stages in order to optimize life-cycle performance of buildings. For this purpose, planning documents and measured values of reference buildings have been analyzed and scenarios and sensitivity analysis conducted. Currently data is evaluated and the tool is developed to be tested in practice.

Keywords life-cycle assessment; life-cycle analysis; life-cycle cost; buildings; early planning stage; sustainable building

- Welche Parameter beeinflussen die Lebenszyklusperformance am stärksten und welche Vereinfachungen eignen sich für die Bewertung in frühen Planungsphasen?
- Welche Erfahrungen und Empfehlungen können aus dem Praxistest der entwickelten Methoden und Instrumente abgeleitet werden?

3 Resultate

Die Recherche des State-of-the-Art von Lebenszyklusbewertungen in frühen Planungsphasen ergab, dass für Teilaspekte bereits Methoden und Werkzeugen entwickelt wurden jedoch noch kein umfassendes praktikables Instrument besteht.

Die Sensitivitätsanalyse für die Lebenszyklusperformance wurde in mehreren Forschungsstudien unter Beteiligung des Autors durchgeführt und durch gezielte Literaturrecherche ergänzt. Es wurden sowohl Planungsunterlagen analysiert als auch Messungen der Nutzungsphase berücksichtigt und auch Szenarien für die End-of-Life-Phase bewertet. Für einige Lebenszyklusindikatoren stellt die Betriebsphase der Gebäude den dominierenden Einfluss dar. Daher wurde für ausgewählte Gebäude der Einfluss der Gesamtenergieeffizienz anhand von folgenden Szenarien näher untersucht:

- Unterschiedliche Energiestandards: Niedrigenergiehaus, Niedrigstenergiehaus, Passivhaus, (Nahezu-)Nullenergiehaus, Plusenergiehaus.
- Unterschiedliche Bauweisen: Massivbau in Ziegel und Stahlbeton, Ziegel und Porenbeton; Stahlbeton-Skelettbau mit Holzleichtbauelementen; Holzbau massiv und Holzleichtbau.
- Weitere Arbeitsschritte sind am Laufen und der Abschluss der Arbeit ist für Mitte 2017 geplant

Elisabeth Stierschneider

Verbindungstechniken von Faserverbundwerkstoffen

Kurzfassung:

Faserverbundwerkstoffe finden aufgrund ihrer vielseitigen Einsatzmöglichkeiten auf den verschiedensten Gebieten der Technik Verwendung. In den letzten Jahren werden diese auch vermehrt im Bauwesen eingesetzt. Der große Vorteil von Faserverbundwerkstoffen liegt darin, dass durch die zweckmäßige Kombination der verwendeten Werkstoffe die Eigenschaften zielgerichtet an den vorgesehenen Verwendungszweck angepasst werden können.

Allgemein bestehen diese Verbundwerkstoffe aus dem formgebenden Matrixwerkstoff und den darin eingebetteten Fasern. Die Werkstoffeigenschaften werden durch das Fasermaterial, die Faserorientierung und das Bettungsmaterial (Matrix) gesteuert. Die verwendeten Fasern bestimmen die mechanischen Eigenschaften wie Zug- und Biegefestigkeit, Duktilität und Schlagzähigkeit und dienen der Aufnahme bzw. Abtragung der Lasten. Die Aufgabe der Matrix besteht darin die äußeren Kräfte in die Fasern einzuleiten, diese vor mechanischer Beschädigung zu schützen und die Position der Fasern zu fixieren. Die Herstellung von Faserverbundwerkstoffen erfolgt kontinuierlich mittels des Strangziehverfahrens in sogenannten Pultrusionsanlagen.

Als Fasermaterialien können die im Folgenden aufgezählten Werkstoffe verwendet werden:

- Organische Fasern: Kohlenstoff, Aramid, Polyethylen(PE), Polypropylen (PP)
- Anorganische Fasern: Glas, Basalt, Quarz
- Metallische Fasern: Stahl, Aluminium, Kupfer, Nickel
- Natürliche Fasern: Zellulose, Baumwolle, Jute, Hanf, Sisal

Als umschließende Matrix eignen sich die nachstehenden Materialien:

- Organische Matrices: Kunststoff, Kohlenstoff, Zellulose
- Metallische Matrices: Aluminium, Magnesium, Stahl, Titan
- Mineralische Matrices: Beton, Glas, Keramik

Am häufigsten werden im Bauwesen Fasern aus Kohlenstoff, Stahl, Polypropylen und Glas verwendet, für die Matrix kommt am häufigsten Kunststoff zum Einsatz. In Bild 1 ist eine Übersicht des Spannungs-Dehnungsverhaltens von verschiedenen Faserverbundwerkstoffen dargestellt.



Bild 1 Spannungs-Dehnungsverhalten ausgewählter im Bauwesen eingesetzter Faserverbundwerkstoffe, modifiziert nach [1]

Als Alternative zu herkömmlichen Stahlbewehrungsstäben für Stahlbeton geht der Trend zur Verwendung von Faserverbundwerkstoffen und hier vor allem zu glasfaserverstärkten Kunststoffen, welche sehr vielversprechende Eigenschaften aufweisen. Diese aus glasfaserverstärktem Kunststoff hergestellten Bewehrungsstäbe besitzen eine Matrix aus Vinyl-Ester Harz. Der Vorteil von aus glasfaserverstärkten Kunststoffen hergestellten Bewehrungsstäben liegt in der höheren Korrosions- sowie Chemikalienbeständigkeit, der geringen Wärmeleitfähigkeit, der guten Zerspanbarkeit und der Tatsache, dass diese weder elektrisch leitfähig noch magnetisch sind. Allerdings gibt es bei diesem Material noch Nachteile in Bezug auf das Brand- sowie Verformungsverhalten.

Ziel der Dissertation ist es das Verformungsverhalten dieser glasfaserverstärkten Bewehrungsstäbe zu verbessern. Hier gilt es die Verbundeigenschaften zwischen Beton und den Glasfaserstäben zu näher zu untersuchen und auch die Verbindung dieser Glasfaserstäbe untereinander soll Thema der Arbeit sein.

University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Literatur:

 DEHN, F.; HOLSCHEMACHER, K.; TUE, N.: Faserverbundwerkstoffe – Innovationen im Bauwesen. Berlin: Bauwerk Verlag 2005.

Autor/PhD:



Dipl.-Ing. Elisabeth Stierschneider

Peter-Jordan-Straße 82

1190 Wien

elisabeth.stierschneider@boku.ac.at

Betreuer:

o.Univ.-Prof. DI DDr. Dr.-Ing.e.h. Konrad Bergmeister, MSc., PhD

Ivan Zambon

Assessment of existing concrete structures via innovative frameworks

Abstract

This doctoral thesis is envisaged to contribute to the next generation of codes for the assessment procedures of existing concrete structures by providing an innovative assessment framework and by dealing with problematics of some of the used assessment methodologies. The thesis is envisaged as cumulative thesis, consisting of introduction and several published manuscripts.

Condition assessment is a process of reviewing information gathered about the current condition of a structure or its components, its service environment and general circumstances, allowing a prognosis to be made of current and future performance, taking account of active deterioration mechanisms and, if appropriate, predictions of potential future damage. Condition evaluation is similar to condition assessment, but is concerned with establishing the adequacy of the structure for future service, judged by its ability to comply with specified performance requirements comprising a defined set of loadings and environmental circumstances.

Unfortunately, existing codes are mainly prepared for the design of new structures, where little care was given to assessment of existing structures. The provisions concerning the existing structures are mainly of descriptive nature. Therefore in the last decades, assessment of existing structures has been a topic of significant scientific and practical interest and relevance.

Since the assessment methods currently used can generally be divided into mathematical (stochastic) and physical, the flow of this doctorate consists of the work on this two different methodologies, respectively. The student is currently in his second half of envisaged time for doctoral studies, which means that some of the tasks described in this PhD Research Proposal have already been done.

Statistical models are formed by analysing data that describe condition of a greater number of structures or a comprehensive data regarding particular structure or structural part. On the basis of the input data, the assessment of current behaviour and prediction of future condition is made with the help of mathematical models. Most commonly used models are Markov chain, Markov continuous process, neural networks, Bayesian updating procedures, gamma process models etc. Therefore, the first part of research focused on the stochastic models used for the assessment of existing reinforced concrete structures. In this part student participated in several works dealing with assessment of reinforced concrete structures wit mathematical models, starting with the work based on the fatigue assessment with emphasis on a reinforced concrete wind turbine foundation. Next part of the research of statistical models was connected to assessment of creep and shrinkage of long-spanned prestressed concrete bridge with the use of gamma model. The research of statistical models was concluded with the work on prediction of condition of database of around 3000 concrete bridge decks of Portuguese roadway operator "Infraestruturas de Portugal".

Second part of the research is in physical models of assessment of structural behaviour. Physical models are based on knowledge and modelling of damage-causing processes, such as corrosion caused by chloride ingress or carbonation, freeze-thaw, fatigue, alkali-silica reaction etc. The student focuses on the research of the models of carbonation and chloride induced corrosion in evaluation of performance of existing reinforced concrete structures. First part of the work consists of benchmarking of historical deemed-to-satisfy provision in Austria for the chloride induced corrosion. Here, the special attention is given to accessibility of material and environmental parameters which govern physical process of chloride ingress (taking into account conditions specific for Austria). Analysis is performed in order to present the achieved reliability of reinforced concrete structures for combination of different exposure classes and material characteristics when considering the limit state of depassivation. In this way, the engineers performing assessment of reinforced concrete structures can get a rough concept about the reliability of structures, without performing high levels of testing or inspection. Second part of the work is similar as the first, but focuses on the carbonation model. Crucial part of service life design is the definition of limit states against the structure should be evaluated for. Unfortunately, currently used codes do not offer clear description of targeted reliability for limit state of depassivation caused by carbonation or chloride induced corrosion. Thus, the last part of the work in physical models tries to answer the question which reliability levels for the state of depassivation should guarantee that the subsequent ultimate limit state targeted reliabilities are not passed.

Since the assessment methodologies have not yet been clearly standardized, the main aim of this doctoral research

University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna

Department für Bautechnik und Naturgefahren

is to identify the possibility of standardizing these methodologies.

Keywords existing structures, assessment, stochastic models, deterioration, chloride ingress, carbonation

Moreover, the general differences and shortcomings of the models are compared, described and comprehensively studied. In this way a firm basis for the future codes can be established.

Author:



Ivan Zambon MSc Matrikel Nummer: 1341971

Institut für Konstruktiver Ingenieurbau (IKI)

Peter Jordan Straße 82

1190 Wien

ivan.zambon@boku.ac.at

Supervisor:	Alfred Strauss
Advisors:	Jose Campos e Matos
	Rade Hajdin
	Mitsuyoshi Akiyama

Oliver Zeman

Versuchstechnische Bestimmung der Eignung von Befestigungselementen unter seismischer Beanspruchung

Das bisher im europäischen Raum gebräuchliche Zulassungssystem von Befestigungssystemen auf Grundlage der European Technical Approval Guideline 001 (ETAG 001, Erstaus-1997) für statische und quasi-statische gabe Belastungssituationen berücksichtigt Versuche mit wechselnder Rissöffnung bzw. wechselnder zentrischer Belastung nur am Rande. Darüber hinausgehende seismische Beanspruchungen, wie sie bei der Anwendung von nachträglich angebrachten Befestigungen in Zonen erhöhter seismischer Aktivität zu berücksichtigen sind, wurden durch das gegenwärtige europäische Zulassungsverfahren - im Gegensatz zum amerikanischen Zulassungsverfahren nicht abgedeckt. Unter diesem Gesichtspunkt und den bereits gewonnenen Erfahrungen mit Zulassungsverfahren nach ACI 355.2 wurde im heurigen Jahr nun auch im europäischen Zulassungsverfahren eine dahingehende Entwicklung vollzogen. Mit Ausarbeitung des Annex E zur ETAG 001, der mit April 2013 noch vor Inkraftreten der Bauprodukteverordnung als Europäisch Technische Zulassungsrichtline verabschiedet wurde, wird diese bislang fehlende Komponente im europäischen Verfahren auf Grundlage der Bestimmungen der Eurocodes ergänzt.

In Tabelle 1 wird das nun nach Annex E der ETAG 001 hinsichtlich *Performance Class* 2 erforderliche Prüfprogramm angeführt. Aufgrund von durchgeführten Forschungs- als auch Zulassungsversuchen, lässt sich auch die Anwendbarkeit und Durchführbarkeit von Festlegungen in der Richtlinie bewerten. Am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau wurden im vergangenen Jahr jene Versuche durchgeführt, welche die Grundlage für die Erteilung der ersten Europäisch Technischen Zulassung von nachträglichen Verankerungssystemen für seismische Belastungssituationen in Kategorie 2 nach Annex E der ETAG 001 darstellten.

 Tab. 1
 Erforderliche zusätzliche Versuche für eine Qualifizierung für Kategorie

 C2.

Test	Versuchsbeschreibung	∆w[mm]
C2.1, C2.2	Versuche im statischen Riss	0,8
C2.3	pulsierende zentrische Last, statischer Riss	0,5/0,8
C2.4	alternierende Querlast, statischer Riss	0,8
C2.5	wechselnder Riss (Rissschließung) und kon- stante Dauerlast	0,0-0,8

The current European approval system for anchors for use in concrete is based on the European Technical Approval Guideline 001 (ETAG 001, first edition from 1997) and is valid for static and quasi-static loading situations and considers tests with cycling or alternating loading situations. Thereby, tests with crack movement and pulsating tension load are just taken into account in a quite reduced range. Explicit seismic loadings are not covered by this European approval system, in contrast to the US. Within the US system tests under pulsating tension load und tests under alternating shear load cycling are required. By means of the experience, taken from approvals according to ACI 355.2, the Annex E of ETAG 001 was elaborated for the consideration of seismic aspects in the European approval procedure. The Annex E was released in April 2013 before the European Construction Products Regulation (CPR) became valid in the European Union.

Table 1 shows in an overview the required testing program for qualification of a post installed anchorage system for anchor seismic performance category C2. As a result of the already conducted research work and the approval tests at the testing laboratory of the Institute of Structural Engineering the practicability of the actual version of Annex E can be assessed. Within the last year, at the testing laboratory of the Institute for Structural Engineering, those tests were performed which lead to the first European Technical Approval for post installed anchors in concrete for anchor seismic performance category C2 according to Annex E of ETAG 001 in Europe.

Autor/PhD:

Dipl.-Ing. Oliver Zeman

Betreuer:

o.Univ.-Prof. DI DDr. Dr.-Ing.e.h. Konrad Bergmeister, MSc., PhD