

**Technisches Infrastrukturmanagement
Einblicke**

**Technical Infrastructure Management
Insights**

Ingo Weidlich (Editor * Hrsg.)

HafenCity Universität HafenCity University

Technisches Infrastrukturmanagement Einblicke

Technical Infrastructure Management Insights

Ingo Weidlich (Editor * Hrsg.)
HafenCity Universität HafenCity University

Hamburg - 2022

Authors:

Dr.-Ing. Gersena BANUSHI
Dipl.-Ing. Sven BÜSCHKEN
M.Sc. Stefan DOLLHOPF
M.Sc. Lucia DOYLE
Dipl.-Ing. Dennis LOTTIS
M.Sc. Violeta MADAN & Dipl.-Ing. Marcus ILLGUTH
M.Sc. Pakdad POURBOZORGI LANGROUDI
M.Eng. Marcel RAMLER
Prof. Dr.-Ing. Ingo WEIDLICH

Peer Review Committee:

Dr.-Ing. Michael ANDRETZKY
Dipl.-Ing. Stefan HAY
Dr.-Ing. Anna KALLERT
Prof. Ernesto Di MAIO, PhD
Dipl.-Wi.-Ing. Matthias OTTO
Dipl.-Ing. Thomas PREIN
Prof. Dr.-Ing. Jürgen QUARG-VONSCHEIDT
Dipl.-Ing. Hartmut SOLAS
Dr.-Ing. Bernd WAGNER
Dipl.-Ing. Ingo WOLF

Composition and layout:

Abhishek SHARMA
Iva STEFANI

ISBN: 978-3-947972-33-3

DOI: 10.34712/142.21

Dieses Dokument ist urheberrechtlich geschützt. Er darf, auch auszugsweise, ohne vorherige Genehmigung des Autors/der Autoren nicht vervielfältigt oder veröffentlicht werden. Alle Angaben dieses Berichts sind nach bestem Gewissen unter Anwendung aller gebotenen Sorgfalt erstellt worden. Trotzdem kann von dem Autor/den Autoren keine Haftung für etwaige Fehler übernommen werden.

Inhalt

Content

- 05 Einleitung
Introduction
- 13 Performance of operating district heating pipelines subjected to thermal aging and fatigue
by Gersena Banushi
- 17 Nachhaltigkeit im Tiefbau – zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe unter Verwendung von Recycling-Material
by Sven Büschken
- 25 Vergleichende Bilanzierung des Treibhauspotenzials und des Primärenergiebedarfs verschiedener Rohrwerkstoffe bei dem Bau von Abwasserkanälen
by Stefan Dollhopf
- 33 Determination of the melting point depression of PB-1-CO₂ solutions through image analysis
by Lucía Doyle
- 41 A Digital Twin for the “District LAB” Test Facility: Background, Ideas and current Activities. An Overview.
by Dennis Lottis
- 49 Wärmeverluste von Kunststoffmantelrohrverbindungen
by Violeta Madan and Marcus Illguth
- 59 An Analysis of the most Frequent Operational Temperature of four District Heating Networks of Germany
by Pakdad Pourbozorgi Langroudi
- 67 Struktur als Parameter zur ganzheitlichen Beschreibung des Materialverhaltens fließfähiger Baustoffe
by Marcel Ramler
- 75 Erddruckmessung in einer Sandkiste nach EN 489
Earth pressure measurement in a sandbox according to EN 489
by Ingo Weidlich

Einleitung

Introduction

Der Arbeitsbereich „Technisches Infrastrukturmanagement“ an der HafenCity Universität ist kein klassisches Feld des Bauingenieurwesens und damit nicht so klar definiert wie andere Disziplinen dieser Ingenieurwissenschaft. Folglich ist Aufklärungsarbeit über dieses Themenfeld notwendig. Im Gegensatz zu Superstrukturen, die dem Hochbau zuzuordnen sind, sind Infrastrukturen (infra = lat. unterhalb / darunter) dem Wort nach darunterliegende Gebilde, die – bezogen auf die Geländeoberfläche – im Erdreich anzutreffen sind. Dabei sind die Grenzen durchaus fließend. So gibt es zuweilen auch überirdische Infrastruktur, die normalerweise erdverlegt wird, und Hochbauten, die in den Untergrund reichen.

Das „Technisches Infrastrukturmanagement“ soll in diesem Zusammenhang als die Beschäftigung mit den Ver- und Entsorgungsbauwerken für alle Formen von Energie und Wasser unter vorrangig technischen Gesichtspunkten verstanden werden. Dabei sind fast alle Disziplinen des Bauingenieurwesens gefordert einen Beitrag für die Bewältigung der sich hieraus ergebenden Fragestellungen zu leisten. Im Rohrleitungsbau sind Rohrkonstruktionen aus Stahl und Beton und anderen Materialien üblich, für die die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit unter zum Teil hohen Belastungen nachgewiesen werden müssen. Kenntnisse in der Baustoffkunde, im Stahlbau und im Massivbau sind daher unerlässlich. Für die Berechnung rohrhydraulischer Zusammenhänge sind Kenntnisse aus dem Wasserbau nötig, während die zahlenmäßige Auseinandersetzung mit den Aufgaben des Energietransports und der Einschätzung der Bedarfe sich stark mit den Themenfeldern der Bauphysik überschneiden. Als erdverlegte Systeme sind auch Kenntnisse aus dem Bereich Geotechnik und Bodenkunde extrem wichtig. Zuweilen werden auch Themenbereiche des Maschinenbaus, der Stadtplanung, des Chemieingenieurwesens, und andere berührt, sodass der Arbeitsbereich „Technisches Infrastrukturmanagement“ trotz des oben genannten sehr klaren inhaltlichen Fokus als sehr interdisziplinär eingeschätzt werden darf. Das breite Verständnis um technische und nichttechnische Zusammenhänge für Ingenieurbauwerke der Ver- und Entsorgung von Siedlungsgebieten ist mit Sicherheit eine wichtige Fähigkeit des heutigen und zukünftigen Berufsbildes des Bauingenieurwesens.

Entsprechend vielfältig sind auch die Anknüpfungspunkte und auch die Freiheiten für Forschungsaktivitäten in unserem Arbeitsbereich. Das vorliegende Dokument dient daher einerseits der transparenten Kommunikation der aktuell stattfindenden Forschungsanstrengungen und dem Wissenstransfer

The working area „Technical Infrastructure Management“ at the HafenCity University is not a classical field of civil engineering and thus not as clearly defined as other disciplines of engineering science. Consequently, clarification on this subject area is necessary. In contrast to superstructures, which can be assigned to building construction, infrastructures (infra = lat. below / underneath) are, according to the word, underlying structures, which- in relation to the surface of the ground- are to be found in the earth. The boundaries are quite blurry. For example, there are sometimes above-ground infrastructures, which are normally buried underground, and buildings that extend into the underground.

In this context, “technical infrastructure management” should be understood as dealing with supply and disposal structures for all forms of energy and water from a primarily technical point of view. In this context, almost all disciplines of civil engineering are required to contribute to the management of the resulting issues. In pipeline construction, pipe structures made of steel and concrete and other materials are common, for which the load-bearing capacity and serviceability must be verified for high loads. Knowledge of building materials, concrete and steel construction is therefore essential.

For the calculation of pipe-hydraulics, knowledge from hydraulic engineering is necessary, while the quantitative examination of the tasks of energy transport and the assessment of the energy demands overlap strongly with the topics of building physics. As buried systems, knowledge from the fields of geotechnical engineering and soil science is also extremely important. At times, topics from mechanical engineering, urban planning, chemical engineering, and others are also touched, so that the field of work “Technical Infrastructure Management” may be assessed as highly interdisciplinary despite the very clear focus mentioned above. The broad understanding of technical and non-technical interrelationships for engineering structures for the supply and disposal in settlement areas is certainly an important skill of the future profession of civil engineering.

The contact points and the freedom for research activities in our field of work are correspondingly diverse. This document therefore serves, on the one hand, to transparently communicate the research efforts currently taking place and the transfer of knowledge in the field of “Technical Infrastructure Management”. On the other hand, it is intended to provide an insight into recent events and developments.

im Bereich „Technisches Infrastrukturmanagement“. Andererseits soll ein Einblick in die letzten Geschehnisse geboten werden.

Wenn es gelingt, einen Teil der Wissenschaftsbegeisterung, die ich in unserem Team antreffe, auf die Leser zu übertragen, dann haben wir viel erreicht. In diesem Sinne wünsche ich viel Spaß beim Lesen

Drittmittelforschung

Nachdem sich im Jahre 2020 die Drittmittelforschungsaktivitäten vorrangig durch die bereits laufenden Projekte „Instandhaltung-FW-Entwicklung von neuen und verbesserten Instandhaltungsstrategien für kleine und große Wärmeverteilnetze durch Kombination statistischer Alterungsmodelle mit materialbasierten Nutzungsdauermodellen“ (BMW FKZ: 03ET1625B, Bearbeitung: M.Sc. Pakdad Pourbozorgi Langroudi) und „Zustandsbewertung von erdverlegter systemrelevanter Infrastruktur zur proaktiven Charakterisierung von Schäden und Gewinnung von technisch realen Entscheidungshilfen“ (BMBF FKZ: 03G0886C, Bearbeitung: Dr.-Ing. Gersena Banushi) charakterisieren ließen, wurde durch die Bewilligung weiterer Projekte der Ausbau der Forschungsaktivitäten im Drittmittelbereich in Aussicht gestellt. So erhielten wir die Förderbescheide für die Projekte „Fernwärmeleitungsbau 4.0 mit zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen für niedrige und hohe Betriebstemperaturen“ (BMW FKZ: 03EN3022D) und „Urban Turn- Wandelung der urbanen leitungsgelundenen Wärmeversorgung“ (BMW FKZ: 03EN3029F).

Der Jahresstart 2021 war daraufhin leider durch Schwierigkeiten bei der Besetzung der dazugehörigen Stellen gezeichnet. Während noch 2020 das Baulabor durch die Stellenbesetzung von Frau Dana Schmetkamp aus dem Projekt „Fernwärmeleitungsbau 4.0 mit zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen“ für die anstehenden Laborarbeiten verstärkt werden konnte, war bereits Mitte 2021 erreicht bis die neuen Kollegen Dipl.-Ing. Sven Büschken und M.Sc. Stefan Dollhopf die Arbeit als wissenschaftliche Mitarbeiter in den neuen Forschungsvorhaben aufnehmen konnten und das Team auf die erforderliche Größe verstärkten. Wir möchten auch an dieser Stelle die neuen Mitarbeiter noch einmal in aller Form an der HafenCity Universität begrüßen und ich bin froh, dass es mit deren Dienstantritt mit den staatlich geförderten Forschungsprojekten voll losgehen konnte.

Als ein weiteres inhaltlich wichtiges Drittmittelforschungsvorhaben im Bereich Technisches Infrastrukturmanagement sei das Projekt „Qualitätsprüfung an Mantelrohrverbindungen für Fernwärmeleitungen nach EN489“ genannt, welches durch den AGFW e.V. bei der HafenCity Universität 2021 als Auftragsforschung gefördert wird. Nachdem

If we can transfer some of the enthusiasm for science that I encounter in our team to the readers, then we will have achieved a lot. In this spirit, I hope you enjoy reading.

Third-party-funded research

After the third-party funded research activities in 2020 were primarily characterized by the already ongoing projects “Maintenance-FW: Development of new and improved maintenance strategies for small and large heat distribution networks by combining statistical ageing models with material-based service life models” (BMW FKZ: 03ET1625B, responsible: M.Sc. Pakdad Pourbozorgi Langroudi) and “Condition assessment of underground system-relevant infrastructure for proactive characterisation of damage and extraction of technically real decision-making tools” (BMBF FKZ: 03G0886C, responsible: Dr.-Ing. Gersena Banushi), the approval of further third-party funding projects was in prospect. We received funding decisions for the projects “District heating pipeline construction 4.0 with temporarily flowable self-compacting backfill materials for low and high operating temperatures” (BMW FKZ: 03EN3022D) and “Urban Turn- transformation of urban pipeline-based heat supply” (BMW FKZ: 03EN3029F).

Unfortunately, the start of 2021 was then marked by difficulties in filling the associated positions. While the laboratory was strengthened in 2020 with the appointment of Ms. Dana Schmetkamp from the project “District Heating Pipeline Construction 4.0 with Temporarily Flowable Self-Compacting Backfill Construction Materials” for the upcoming laboratory work, the middle of 2021 was already reached before the new colleagues Dipl.-Ing. Sven Büschken and M.Sc. Stefan Dollhopf were able to take up work as research associates in the new research projects and strengthen the team to the required size. We would like to take this opportunity to once again extend a warm welcome to these new staff members at HafenCity University, and I am glad that the research projects were able to set off to a full start when they took up their positions.

Another important third-party-funded research project in the area of Technical Infrastructure Management is the project “Quality testing of jacket pipe connections for district heating pipelines in accordance with EN489”, which is funded by AGFW e.V. as contract research at HafenCity University 2021. After HafenCity University was able to secure the contract over other providers in a call for tenders, new knowledge and experience was gained through the intensive scientific examination of the test procedures for DH pipe connections, so that the HafenCity University construction laboratory is now able to offer

sich die HafenCity Universität in einer Ausschreibung gegenüber anderen Anbietern durchsetzen konnte, wurden durch die intensive wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den Prüfverfahren für Mantelrohrverbindungen neue Erkenntnisse und Erfahrungen gesammelt, sodass das Baulabor der HafenCity Universität heute alle gängigen Prüfungen nach EN489 und EN253 anbieten kann. Darüber hinaus wurden viele Forschungsfragestellungen identifiziert, die zukünftig, z.B. im IEA DHC TS6 "Status Assessment, Ageing, Lifetime Prediction and Asset Management of DH pipes" weiterverfolgt werden sollen.

Forschung mit Eigenmitteln der HafenCity Universität

Einige Forschungsaktivitäten werden selbstfinanziert. Hierzu gehören die Finanzierung und Durchführung von Voruntersuchungen, die Ermöglichung von Anschaffungen und Aktivitäten für die internen Promotionen an der HafenCity, sowie auch der Aufwand für die Betreuung externer Promotionen.

Im Frühjahr 2021 kam dies insbesondere durch den Abschluss der Promotion von Maria Greitzer mit dem Thema „Energy Forecasting. Focus: Natural Gas“ zum Ausdruck. Die Promotion verdeutlicht, wie auch hier für die Bearbeitung eines Promotionsthemas im Bereich Technisches Infrastrukturmanagement unterschiedliche Ingenieurdisziplinen, in diesem Fall Wirtschaft, Geopolitik, Statistik und elektronischer Datenverarbeitung, zusammen beherrscht und bearbeitet werden müssen. Inzwischen hat Maria Greitzer den Ruf an die Internationale Hochschule IU für die Professur „Wirtschaftsingenieurwesen“ angenommen. Wir gratulieren Prof. Dr.-Ing. Mgr. Maria Greitzer MA herzlich zu diesem konsequenten, weiteren akademischen Karriereschritt.

Ein wichtiges Forschungsfeld im Bereich Technisches Infrastrukturmanagement wurde in den letzten Jahren von M.Sc. Lucia Doyle im Bereich umweltfreundlicher Dämmung für die Wärmeverteilung erschlossen. Dies geschieht vor dem Hintergrund der Gesundheitsgefahren bei der Herstellung der sonst üblichen Polyurethanschäume und deren schlechte Wiederverwertbarkeit für geschlossene Materialkreisläufe. Nachdem bereits einige Veröffentlichungen aus selbstfinanzierten Voruntersuchungen getätigt wurden, wurde mit den Berufungsmitteln aus dem Bereich Technisches Infrastrukturmanagement ein Autoklav angeschafft und im März 2021 in Betrieb genommen. Mit dieser Versuchseinrichtung können Schaumproben erstellt werden, die im Nachgang auf Eignung für die Anforderungen des jeweiligen Einsatzgebietes geprüft werden können. Der Autoklav ist eine Spezialanfertigung und kann im Druckbereich von 0- 150 bar und 0 - 250°C betrieben werden. Er arbeitet derzeit mit zwei Gaseinlässen, um verschiedene Treibgasgemischungen zu testen und verfügt

all common tests according to EN489 and EN253. In addition, many research questions were identified that will be pursued in the future, e.g. in IEA DHC TS6 "Status Assessment, Ageing, Lifetime Prediction and Asset Management of DH pipes".

Self-financed research at the HafenCity University

Some research activities are self-financed. These include financing and conducting preliminary research, enabling purchases and activities for internal doctorates at HafenCity, as well as the expenses of supervising external doctorates.

In spring 2021, this was evident in particular by the completion of Maria Greitzer's doctorate with the topic "Energy Forecasting. Focus: Natural Gas". The PhD thesis illustrates how different engineering disciplines, in this case economics, geopolitics, statistics and electronic data processing, must be mastered in order to work on a doctoral topic in the field of technical infrastructure management. In the meantime, Maria Greitzer has accepted the role of professorship "Industrial Engineering" at the International University of Applied Sciences IU. We warmly congratulate Prof. Dr.-Ing. Mgr. Maria Greitzer MA on this consistent further academic career step.

An important field of research in the area of Technical Infrastructure Management has been developed in recent years by M.Sc. Lucia Doyle in the area of environmentally friendly insulation for heat distribution. This is done against the background of the health hazards in the production of the otherwise common polyurethane foams and their poor recyclability for closed material cycles. After a number of publications from self-financed preliminary investigations were already made, an autoclave was purchased with the appeal funds from the Technical Infrastructure Management department and put into operation in March 2021. This test facility can be used to create foam samples that can subsequently be tested for suitability for the requirements of the respective area of application. The autoclave is a special design and can be operated in the pressure range of 0-150 bar and 0-250°C. The autoclave currently operates with two gas inlets to test different blowing agents. It has two view cells that allow in-situ visualisation of melts, sorption and foams and corresponding data acquisition through image processing. In addition, the autoclave has been designed to maximise the pressure drop rate. It is in the range of 120 bar/s. The aim is to influence the microstructure of the foam by tailoring the process conditions. Numerous test series

über zwei Sichtzellen, die die In-situ-Visualisierung von Schmelzen, Sorption und Schäumen und die entsprechende Datenerfassung durch Bildverarbeitung ermöglichen. Außerdem wurde der Autoklav konzipiert, um die Druckabfallrate zu maximieren. Sie liegt im Bereich von 120 bar/s. Ziel ist es, die Mikrostruktur des Schaums durch die Wahl der Prozessbedingungen zu beeinflussen. Mit dieser Versuchseinrichtung werden derzeit zahlreiche Versuchsreihen durchgeführt, welche das Promotionsvorhaben „Insulated district heating pipes for the circular economy“ von Frau Doyle stützen werden. Auf diese Weise wird an der HafenCity Universität ein wichtiger Beitrag geleistet, zukünftige Wärmenetze nachhaltiger zu errichten. Es ist aber auch davon auszugehen, dass die geleisteten Grundsatzuntersuchungen auf andere Anwendungsbereiche, in denen eine Wärmedämmung erforderlich ist, übertragbar sind.

Einen weiteren Forschungsbereich des Technischen Infrastrukturmanagements eröffnete M.Sc. Violeta Madan durch das Promotionsvorhaben „Untersuchung der anisotropen Wärmeströme in Doppelrohren für die Anwendung in einem innovativen Nahwärmesystem“. Das gleichnamige Exposé wurde von der Promotionskommission der HafenCity Universität 2021 angenommen und die Arbeiten wurden begonnen. Im Bereich der Lehre hat Violeta Madan Lehranteile in REAP „Urban Energy Flows“, BIW „Energie-Infrastruktur“ und BIW „Interdisziplinäres Projekt“ übernommen. In der Drittmittelforschung unterstützt Violeta Madan durch die Bearbeitung des bereits oben erwähnten Projektes „Qualitätsprüfung an Mantelrohrverbindungen für Fernwärmeleitungen nach EN489“. Sowohl für das Promotionsvorhaben als auch für das AGFW-Projekt steht mittlerweile ein Integrales Prozessthermostat der Firma LAUDA im Labor zur Verfügung, das 2021 mit Berufungsmitteln aus dem Arbeitsbereich Technisches Infrastrukturmanagement angeschafft wurde. Mit dem Gerät kann ein externer Kreislauf dynamisch in den Grenzen -45°C bis $+220^{\circ}\text{C}$ temperiert werden, sodass an definierten Rohrabschnitten im Labor der HCU alle gängigen Betriebsszenarien nachgestellt werden können.

Externe Promotionskooperationen wurden auch im Jahre 2021 gepflegt. So wurde sich mehrfach im Promotionsverfahren „Analytische Beschreibung rheologischer Fließvorgänge für den Einsatz fließfähiger Baustoffe im Leitungsbau“ von Dipl.-Ing. Marcel Ramler inhaltlich ausgetauscht und Herr Ramler wurde auch in der Lehre an der HafenCity Universität durch die Übernahme einzelner Lehrveranstaltungen einbezogen. Darüber hinaus wurde die durch gemeinsame Drittmittelforschung bestehende Kooperation mit dem Fraunhofer IEE in Kassel durch die Aufnahme des Promovenden Dipl.-Ing. Dennis Lottis verstärkt. 2021 hat Dennis Lottis sein Exposé „Prädiktive Optimierung der Betriebsstrategie von dezentralen und multivalenten Wärmenetzen mithilfe eines digitalen Zwillings

are currently being carried out with this test facility, which will support Ms Doyle's PhD project "Insulated district heating pipes for the circular economy". In this way, HafenCity University is making an important contribution to making future heating networks more sustainable. However, it can also be assumed that the basic research carried out can be transferred to other areas of application in which thermal insulation is required.

Another research area of Technical Infrastructure Management was initiated by M.Sc. Violeta Madan through the PhD project "Investigation of anisotropic heat flows in twin pipes for application in an innovative local heating system". The exposé was accepted by the PhD committee of HafenCity University 2021 and the work was started. In the area of teaching, Violeta Madan has taken on teaching shares in REAP "Urban Energy Flows", BIW "Energy Infrastructure" and BIW "Interdisciplinary Project". In the area of third-party funded research, Violeta Madan is supporting the project "Quality testing of casing pipe connections for district heating pipelines according to EN489" mentioned above. Both for the doctoral project and the AGFW project, an integral process thermostat from the company LAUDA is now available in the laboratory, which was purchased in 2021 with the Professorship funds from the Technical Infrastructure Management department. With this device, an external circuit can be dynamically tempered within the limits of -45°C to $+220^{\circ}\text{C}$, so that all common operating scenarios can be simulated on defined pipe sections in the HCU laboratory.

External doctoral cooperation was also maintained in 2021. For example, there were several exchanges in the content of Dipl.-Ing. Marcel Ramler's doctoral thesis on "Analytical description of rheological flow processes for the use of flowable building materials in pipeline construction", and Mr. Ramler was also involved in teaching at HafenCity University by taking on individual courses. In addition, the existing cooperation with Fraunhofer IEE in Kassel, which is based on joint third-party funded research, was strengthened by the inclusion of the doctoral student Dipl.-Ing. Dennis Lottis. This year, Dennis Lottis submitted his exposé "Predictive optimisation of the operating strategy of decentralised and multivalent district heating systems by using a digital twin of the "District LAB" test facility" to the PhD committee of HafenCity University and the exposé was accepted. Further investigations were initiated with own funds in the area of steel quality for district heating medium pipes.

After extensive research, it was found that there are currently no published studies on the stress-strain curves for steel service pipes of the used steel grade P253GH. It is now planned to carry out these investigations in the next months. The medium pipes for this have already been ordered and delivered. It is

der Versuchseinrichtung „District LAB“ bei der Promotionskommission der HafenCity Universität eingereicht und das Exposé wurde angenommen.

Weitere Voruntersuchungen wurden mit Eigenmitteln im Bereich der Stahlgüte für Fernwärmemediumrohre angeschoben. Nach ausführlicher Recherche musste festgestellt werden, dass derzeit keine publizierten Untersuchungen zu den Spannungs-Dehnungskurven für Stahlmediumrohre der üblichen Stahlgüte P253GH vorliegen. Es ist nun geplant diese Untersuchungen in den nächsten Monaten durchzuführen. Die Mediumrohre hierfür wurden bestellt und angeliefert. Es ist zudem geplant die Ergebnisse laufenden Forschungsvorhaben zuzuführen. Hierdurch sollen Synergieeffekte genutzt werden.

Danksagung

In der experimentellen Forschung lässt sich eben nicht jede Arbeitsstunde absehen, wie es zum Zeitpunkt der Antragsstellung in der Regel erwartet wird. Unser besonderer Dank soll daher Herrn Dipl.-Ing. Marcus Illguth und seinem Baulaborteam zum Ausdruck gebracht werden. Ohne die unermüdliche Unterstützung durch das Baulabor der HCU wären viele Untersuchungen und die erforderliche wissenschaftliche Qualität nicht möglich.

Abschließend soll angemerkt werden, dass die Rückmeldungen unseres Peer Review Committees zu unseren Artikeln außerordentlich hilfreich waren. Sie haben unsere Arbeit um wichtige Hinweise und zusätzliche Aspekte bereichert. Durch die mit Fachexpertise verbundene, konstruktive Kritik konnte die Qualität der Artikel noch weiter gesteigert werden. Für diese wertvolle Arbeit möchten wir uns sehr herzlich bei unserem Peer Review Committee bedanken.

also planned to feed the results into the ongoing research projects at the T.I.M. department. Synergy effects are to be used in this way.

Acknowledgement

In experimental research, not every working hour can be foreseen, as is usually expected at the time the application is submitted. Our special thanks should therefore go to Dipl.-Ing. Marcus Illguth and his construction laboratory team. Many investigations and the required scientific quality would not have been possible without the tireless support of the HCU construction laboratory.

Finally, it should be mentioned that the feedback from our Peer Review Committee on our articles has been extremely helpful. They have enriched our work with important hints and additional aspects. The quality of the articles was then improved even further through the constructive criticism based on the technical expertise of this committee. Therefore, we would like to thank our Peer Review Committee very much for their valuable work.

Publikationen 2021

Publications 2021

Doyle, L. (2021). "Extrusion foaming behavior of polybutene-1. Toward single-material multifunctional sandwich structures". Applied Polymer Science, Wiley Online Library. onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/app.51816

Doyle, L. & Weidlich, I. (2021). "Sustainable Insulation for Sustainable DHC". Energy Reports 2021. DOI: [10.1016/j.egy.2021.08.161](https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.161)

Greitzer, M. (2021). "Energy Forecasting. Focus: Natural gas". Dissertation HafenCity Universität Hamburg, 2021. Direktlink: repositorio.hcu-hamburg.de/handle/hcu/560

Kallert, A., Lottis, D., Shan, M., & Schmidt, D. (2021). "New experimental facility for innovative district heating systems—District LAB". Energy Reports, 7, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.039>

Andre Kunigk K., Huther H., Kallert, A., Saab S., Shan M., Weidlich, I. & Ziegler, R. (2021). "Urban Turn: Wandelung der urbanen leitungsgebundenen Wärmeversorgung". Danfoss-BRUGG Pipes Fernwärmekonferenz 2021, 23.-25. März 2021

Madan V. & Weidlich, I. (2021). "Investigation on relative heat losses and gains of heating and cooling networks". Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT). 12-14 May 2021, Riga, Latvia

Dochev I., Peters I., & Weidlich, I. (2021). "Diskussion um die Fernwärmeversorgung in Hamburg". EuroHeat&Power, 9-2021, pp. 20-23. ISSN 0949-166X-D9790F

Pourbozorgi Langroudi, P., Stefan, H & Weidlich, I. (2021). "Backward simulation of temperature changes of District Heating networks for enabling loading history in predictive maintenance." In: Energy Reports. Online verfügbar unter <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.031>.

Illguth, M., Kapteina, G. & Pourbozorgi Langroudi, P. (2021). "Automated Distinction between Cement Paste and Aggregates of Concrete Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy". MDPI Journal Materials, Vol. 14, Issue 16, 4624, doi.org/10.3390/ma14164624

Dochev, I., Doyle, L., Peters I., Pourbozorgi Langroudi, P., & Weidlich I., (2021). "Fernwärmeforschung an der HafenCity Universität - vom Hamburger Wärmekataster bis zum innovativen Leitungsbau", (2021), bbr Leitungsbau, Brunnenbau, Geothermie, 02-2021, 72. Jahrgang, p. 24-27, ISSN 1611-1478

Master- und Bachelorarbeiten 2021

Master and Bachelor Theses 2021

Masterarbeiten

Master Theses

BIM as a Tool for Sustainable Material Decision-Making

The influence of non-temperature weather variables on heat demand of buildings

Wasserstoffverträglichkeit von Gasnetzen

Systematischer Marktüberblick und Analyse der Einflussfaktoren auf die Marktdurchdringung von Fernwärme im deutschen Wärmemarkt

Quantification of Greenhouse Gases Emissions and Urban Climate Governance

Life Cycle Assessment of the manufacturing of District Heating pipes: comparison between standard steel pipes with polyurethane insulation and PET insulated pipe.

Ansätze zur Energie- und CO₂-Bilanzierung bei dem Bau von Entwässerungssystemen

Proposal of a demolition and disassembly methodology for old municipal buildings in order to maximize the material recovery potential based on the LCA results

Advanced Asset Management of Electricity Grids

Photovoltaic System Integration in Mid-Rise Apartment Building

Bachelorarbeiten

Bachelor Theses

Beitrag zur Berechnung zulässiger Betriebsdrücke erdverlegter Fernwärmeleitungen

Erddruckberechnung auf Abwasserrohrleitungen unter besonderer Berücksichtigung des Siloeffekts

Untersuchung des Wärmedurchgangs mehrschichtiger Rohre unter verschiedenen Betriebsbedingungen

Bodenreaktionskräfte beim Einziehvorgang von Verbindungsmuffen im HDD-Verfahren

Wärmeverlust von erdverlegten Fernwärmeleitungen

Der Einfluss von Frost auf Verfüllungsmaterialien im Rohrleitungsbau - Ein Vergleich von ZFSV mit konventionellen Materialien und anderen Baustoffen

Kälteverluste und -gewinne von Fernkälteleitungen

Untersuchung der Freigrabelängen von Kunststoffmantelrohren (KMR) für erdverlegte Fernwärmenetze unter Betriebsbedingungen

Wer welche Arbeit erstellt hat, ist aufgrund der Bestimmungen des Datenschutzes nicht angegeben. Grundsätzlich besteht allerdings die Möglichkeit auch für Studierende Ihre Abschlussarbeiten über den Publikationsserver der HCU zu veröffentlichen. Die ein oder andere Arbeit wird dort zu finden sein.

Performance of operating district heating pipelines subjected to thermal aging and fatigue

Gersena Banushi
gersena.banushi@hcu-hamburg.de

HafenCity University, Hamburg

The service life of district heating (DH) pipelines depends on the level of operating temperature and the amount of cyclic loading, that influence thermal aging and fatigue of the system components. Fourth generation district heating networks (4GDH) integrate renewable volatile energy sources, like wind and solar thermal, operating at lower temperatures and greater fluctuation. These have asset management of the 4th generation district heating networks” funded by the International Energy Agency Technology (Wedlich et al., 2020). It discusses the influence of combined mechanical and thermal loading on the service life of pre-insulated bonded single pipes, representing the majority of currently operating DH pipelines, based on the 3rd generation technology (3GDH).

To minimize heat losses, these pipes have a composite cross-section with three different material layers, including the steel pipe for the water supply, the insulation foam of polyurethane (PUR), and an outer coating of High Density Polyethylene (HDPE), interacting with the surrounding soil. The stiffness of the PUR foam and its constant adhesion to the steel pipe are essential to properly transmit at the HDPE coating the friction stresses from the surrounding soil, counteracting pipeline thermal expansion (Banushi and Weidlich 2018; Nilsson 2016; Frederiksen and Werner 2013), as schematically illustrated in Figure 1.

Indeed, 3GDH pipes undergo large temperature variations, associated with significant cyclic loading at the soil-pipe interface, as well as within the pre-insulated DH pipe system, leading to accumulated material damage and ageing.

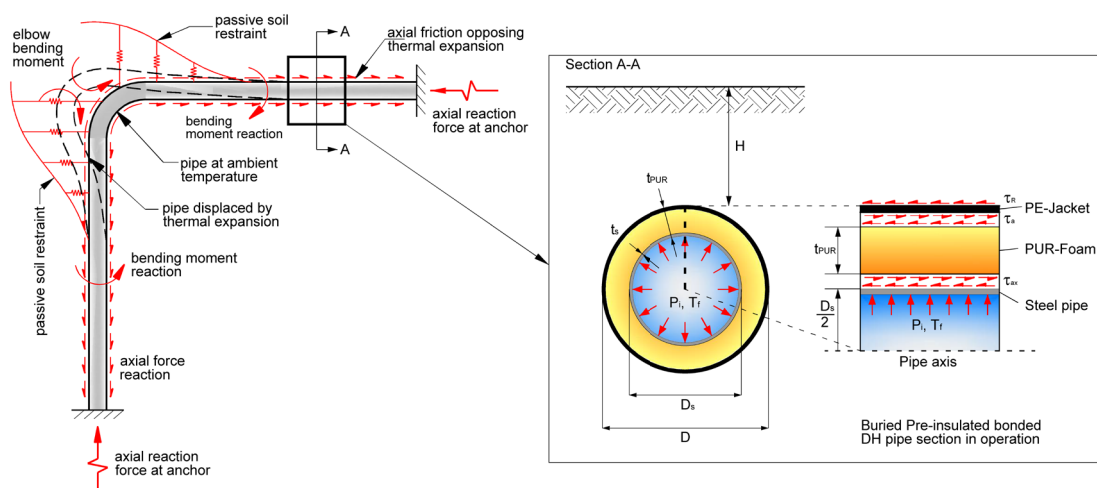


Fig. 1: Response of buried operating DH pipeline at the bend expansion zone (Banushi et al., 2021).

Conversely, 4th generation DH networks (4GDH) operate at lower temperatures, also integrating renewable energy sources, that are more volatile than the traditional 3GDH systems. The lower levels of operating temperature and the increased amount of cyclic loading influence ageing and the service life of 4GDH networks, requiring proper analysis of the system performance. Moreover, current European standards (CEN 2009; 2019) do not address either the testing nor the design of 4GDH, highlighting the need to further investigate the combined effect of increased volatility, and decreased thermal loading associated with the integration of renewable energy sources in the DH network. Hence, it is fundamental to assess the combined effect of increased

volatility and decreased thermal loading on the strength of the pipe components, including the fatigue resistance of the service pipe, the cohesion strength of the insulation, and the adhesion strength at their interface.

To evaluate the material strength of traditional and 4GDH pipelines, we have investigated the behaviour of the service steel pipe, the insulation foam, and their adhesive interaction, adopting an innovative analytical and experimental approach, as schematically illustrated in Figure 2.

First, the steel pipe material accumulated damage is estimated through the Palmgren–Miner rule, evaluating the number of equivalent full temperature cycles (CEN 2019), regarding temperature history data collected from operating DH pipelines in Germany, Sweden, Norway, and South Korea. Then, the response of the insulation foam is investigated experimentally, through shear tests on DH supply and return pipe samples, subjected to natural and accelerated aging under the combined effect of thermal aging and cyclic mechanical loading.

The fatigue performance, in terms of number of equivalent full temperature cycles for each gathered temperature history data has been assessed using the rain flow cycle counting algorithm, according to the ASTM E1049 standard, implemented in MATLAB (Mathworks 2018), as shown in Figure 2(a). These results are compared with the design criteria indicated in EN 13941 (CEN 2019), recommending that the number of full temperature cycles, equivalent to 30 years operation at the reference temperature 110°C, for transmission, distribution, and house connection pipelines should be within the range 100–250, 250–500, and 1,000–2,500, respectively.

The accelerated aging tests, performed at RISE (Research Institutes of Sweden), investigated whether the deterioration rate in the pipe in the expansion zone, subjected to thermal and mechanical loads, is greater than in the rest of the system, as schematically illustrated in Figure 1. Specifically, five DN 50=160 mm pipes were tested, with service pipe nominal diameter DN 50, outer casing diameter 160 mm, and pipe length of 3.4 m. While one pipe was kept at room temperature as a reference, four pipes were connected to the electrical installation for thermal aging, and two of them were additionally connected to the axial loading equipment during thermal aging.

The selected aging temperatures are 130°C and 140°C, whereas the cyclic axial load was applied through the piston, connected to the electrical cylinders, with a range 20 kN, and time period of 1 h. All pipes were tested for mechanical adhesive strength using the plug method [Figure 2(b)], and some of the obtained PUR samples were analyzed using Fourier transform infrared (FTIR) technique (Banushi et al. 2021, Vega et al. 2020; 2021, Weidlich et al. 2020).

Finally, we examined the material deterioration of naturally aged DH pipes, gathered from four DH branches of KDHC (Korea District Heating Corporation) in South Korea [Figure 2(c)]. The minimum length of collected pipe specimens is 1,000 mm, to obtain at least three specimens (SPMs) for axial shear test, and one SPM for gas analysis. The shear strength tests were performed according to EN 253 (CEN 2009), where the pipe samples were cut to 200 mm length. In total, 36 SPMs were analyzed for axial shear test, and one SPM for gas analysis. Thereafter, the plug testing method and FTIR analysis was performed on naturally aged DH pipe samples, and the results were further compared with those from accelerated aging tests.

The fatigue analysis results indicated that the lifetime of 4GDH pipelines is expected to increase, compared to conventional DH, because of the lower operating temperature, and the diminished impact of thermal loading volatility in the network. To accurately estimate the fatigue damage, the measuring time interval in the temperature data should be sufficiently small, requiring proper data logging.

The performed artificial ageing tests revealed a greater material damage at the interface between the steel pipe and the PUR foam, undergoing larger strains and greater chemical changes. Clearly, the combined effect of mechanical loading and thermal ageing accelerates the rate of chemical degradation of the PUR foam, leading to a faster material deterioration, that should be properly considered in current design standards for lifetime assessment.

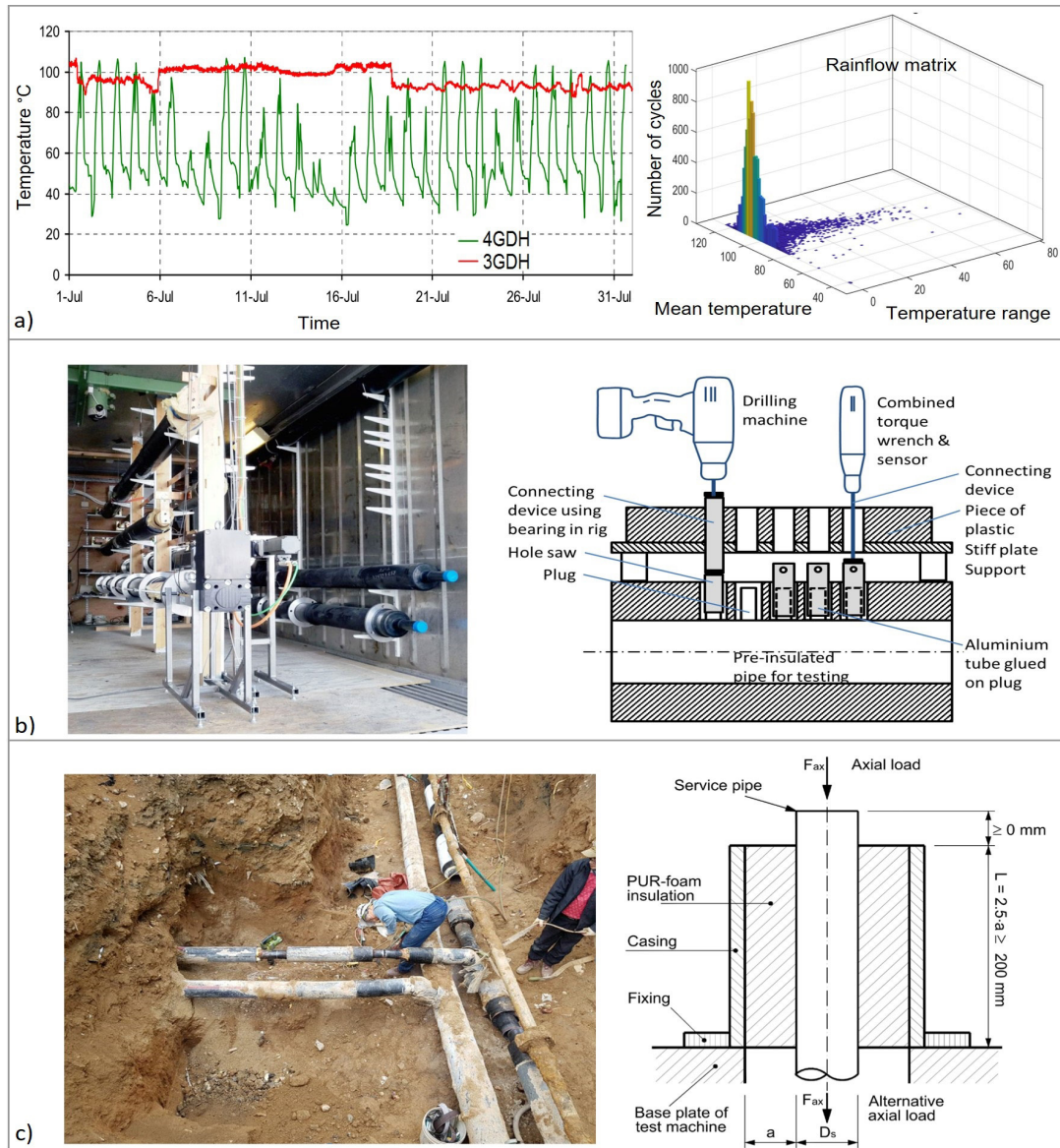


Fig. 2: Schematic representation of (a) fatigue analysis for the gathered temperature history data, using the rain flow cycle counting algorithm (ASTM 2017); (b) view of the electrical and mechanical test installation, and schematic representation of the mechanical testing using the plug method; (c) Sampling for the field test and schematic representation shear strength test set-up according to EN 253 (CEN 2009).

The analysis of the shear strength data from naturally aged pipes showed that thermal loading, as well as pipe material and geometric properties significantly influence the pipe shear strength, requiring detailed information, and monitoring of the system characteristics throughout the operational lifetime. Therefore, it is recommended to document the operating temperature history and the most important properties of the pipe system before installation, as well as during operation, contributing to better predictive maintenance, and subsequent reduction of economic risks for replacement and repair.

In conclusion, the obtained results allow a better understanding of 4GDH and traditional DH pipeline response, suggesting important recommendations for a more effective asset management since installation, and throughout the operational lifetime, contributing to a more energy efficient infrastructure.

Literature

ASTM. (2017). *Standard practices for cycle counting in fatigue analysis*. ASTM E1049-85. West Conshohocken, PA: ASTM.

Banushi, G., & Weidlich, I. (2018). "Seismic analysis of a district heating pipeline." *Energy Procedia* 149: 216–225. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.186>.

Banushi, G., Vega, A., Weidlich, I., Yarahmadi, N., Kim, J., Jakubowicz, I., & Sällström, J. H. (2021). *Durability of District Heating Pipelines Exposed to Thermal Aging and Cyclic Operational Loads*. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 12(1), 04020067.

CEN (European Committee for Standardization). (2009). *District heating pipes—Preinsulated bonded pipe systems for directly buried water networks—Pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and outer casing of polyethylene*. EN 253. Brussels, Belgium: CEN.

CEN (European Committee for Standardization). (2019). *Design and installation of preinsulated bonded pipe systems for district heating*. EN 13941. Brussels, Belgium: CEN.

Frederiksen, S., & S. Werner. (2013). *District heating and cooling*, 697. Stockholm, Sweden: Studentlitteratur.

Mathworks. (2018). "Matlab documentation." Accessed September 12, 2018.

Nilsson, S. F. (2016). "New developments in pipes and related network components for district heating." In *Advanced district heating and cooling (DHC) systems*, 191–214. Cambridge, UK: Woodhead Publishing.

Vega, A., Yarahmadi, N., Sällström, J. H., & Jakubowicz, I. (2020). *Effects of cyclic mechanical loads and thermal ageing on district heating pipes*. *Polymer Degradation and Stability*, 182, 109385.

Vega, A., Yarahmadi, N., & Jakubowicz, I. (2021). *Cyclic axial loads and thermal ageing of district heating pipes*. *Energy Reports*, 7, 105-109.

Weidlich, I., et al. (2020). *Effects of loads on asset management of the 4th generation district heating networks*. Final Rep. Frankfurt, Germany: IEA DHC/CHP Annex XII.

Nachhaltigkeit im Tiefbau – zeitweise fließfähige, selbstverdichtende Verfüllbaustoffe unter Verwendung von Recycling-Material

Sven Büschken
sven.bueschken@hcu-hamburg.de

HafenCity University, Hamburg

Kurzfassung

Im konventionellen Tiefbau werden Baugruben und -gräben mit Sand verfüllt und dieser beim Einbau verdichtet. Hierfür wird Sand als Bodenaustauschmaterial bereitgestellt, wenn das Aushubmaterial dem Abfallkreislauf zugeführt und aufbereitet oder entsorgt werden muss. Dieses Vorgehen ist logistisch mit einem hohen Aufwand verbunden und kann sowohl ökologisch, als auch ökonomisch hinterfragt werden. So werden begrenzte Sandressourcen in Anspruch genommen und durch An- und Abtransport des Materials vermeidbare Treibhausgase produziert. Ein möglicher Ansatz, diesem Trend entgegenzuwirken ist die Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV) als Alternative zu Sand. An der HafenCity Universität (HCU) läuft aktuell ein Forschungsprojekt zu ZFSV, mit einem speziellen Fokus auf den Einsatz von Recycling-Material.

In diesem Bericht soll der aktuelle Forschungsstand an der HCU auszugsweise vorgestellt und das Potenzial der Ressourcenschonung durch ZFSV angesprochen werden.

Ausgewählte Aspekte zu Recycling-Material

Einen Anreiz für die Wirtschaft, Alternativen aus Recycling-Material (RC-Material) zu nutzen, schafft das 2012 in Deutschland verabschiedete Kreislaufwirtschaftsgesetz. „Zweck des Gesetzes ist es, die Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen zu fördern und den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen sicherzustellen.“ (BMU 2021)

Recycling-Baustoffe sind zwar bereits ein fester Bestandteil in der Deckung des Bedarfs an Gesteinskörnungen (Fig. 1), liegen mit 13% aber weit hinter dem Anteil an Rohstoffen wie Naturstein, Kies und Sand mit insgesamt 82%.

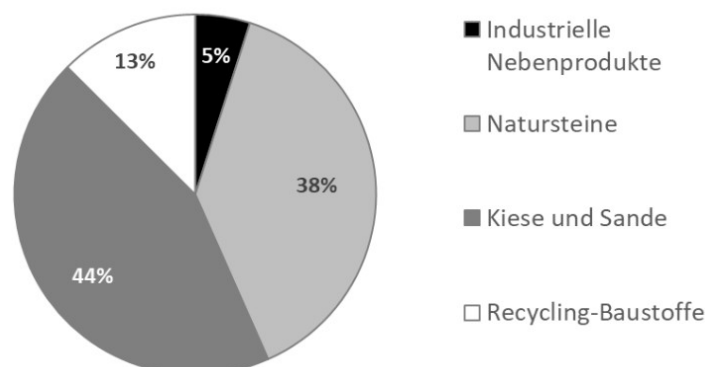


Fig. 1: Deckung des Bedarfs an Gesteinskörnungen 2018 in Prozent
[Datenbasis:(Kreislaufwirtschaft Bau 2018)]

Mit der vom BMU verabschiedeten Ersatzbaustoffverordnung (EBV)/Mantelverordnung 2021 (Inkrafttreten: 25.06.2023) wird es erstmals bundesweit gültige Vorgaben für den Einsatz mineralischer Abfälle geben (BMU 2021).

Ausgewählte Aspekte zu ZFSV

Bei ZFSV handelt es sich um „Böden und Baustoffe mit Bindemitteln, die insbesondere in schwer zugänglichen oder schwer verdichtbaren Bereichen zur Verfüllung verwendet werden. Sie fließen ohne Einwirkung zusätzlicher Verdichtungsenergie und füllen Hohl- und Zwischenräume vollständig aus.“ (FGSV 2012). Dies ermöglicht schmalere Gräben, eine schnellere Befüllung des Grabens, sowie eine Minimierung der Erschütterungsimmissionen für die angrenzende Baustruktur. Eine Besonderheit gegenüber anderen, fließfähigen Verfüllbaustoffen ist die spätere Möglichkeit des einfachen Wiederaushubs und der anschließenden Wiederverwendung Vorort (AGFW 2019).

ZFSV setzen sich aus Erdstoff, Wasser, hydraulischem Bindemittel und Additiven zusammen (Fig. 2). Je nach Anforderung an das Verfüllmaterial, gibt es verschiedene ZFSV-Rezepturen. Durch Variation der Anteile der Bestandteile lassen sich unterschiedlichen Eigenschaften, wie z.B. Wasserdurchlässigkeit, Tragfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit beeinflussen.

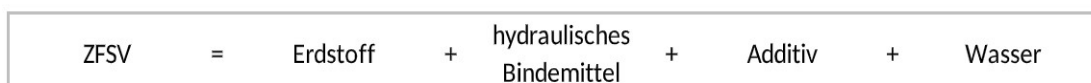


Fig. 2: Grundrezeptur von ZFSV

In der Praxis werden beim Herstellungsprozess von ZFSV und der Bereitstellung des Verfüllmaterials Vorort zwei Ansätze unterschieden (Fig. 3).

- Zum einen die Anmischung des Aushub-Materials Vorort. Hierbei dient das in situ ausgehobene Material als Grundmaterial für die jeweilige Rezeptur und wird entsprechend wieder als Verfüll- bzw. Bettungsmaterial verwendet. Selbst belasteter Boden kann teilweise wiederverwendet werden, da bestimmte ZFSV-Rezepturen die Bindung von Schadstoffen ermöglichen (RAL 2014).
- Zum anderen die Anmischung des ZFSV im Werk und der anschließende Transport zur Baustelle.

Vor allem der zweite Ansatz bietet sich für die Verwendung von Recycling-Baustoff als Grundmaterial an, worauf im Folgenden näher eingegangen wird.

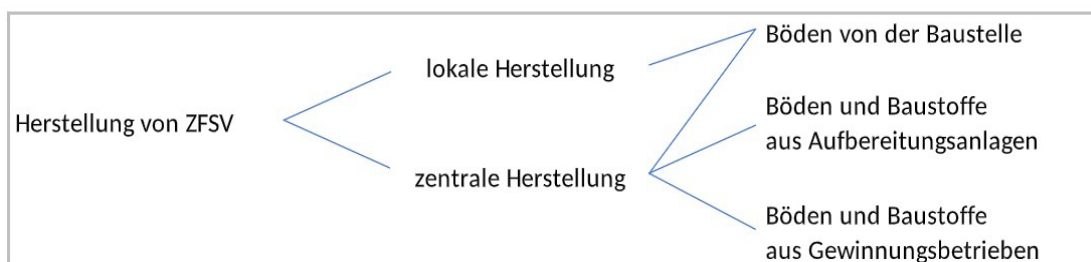


Fig. 3: Herstellung von ZFSV und Herkunft der Ausgangsmaterialien [Datenbasis: (AGFW 2017)]

ZFSV aus Recycling-Material

Eine Möglichkeit, den Einsatz von mineralischen Ressourcen im Bausektor zu reduzieren bietet der Einsatz von ZFSV im Allgemeinen und im Speziellen in Verbindung mit Recycling-Baustoffen. ZFSV in Verbindung mit RC-Baustoffen sind bis dato noch wenig erforscht und bedürfen weiterer Untersuchungen und Erfahrungswerte, um eine ausreichende Akzeptanz bei potenziellen Anwendern zu schaffen.

Neben den technischen Anforderungen, die ZFSV erfüllen müssen, müssen auch die Umweltaspekte betrachtet werden. Es muss sichergestellt sein, dass weder der Boden noch das Grundwasser durch den Einsatz von ZFSV schädlich verändert werden. Es sind also auch die chemischen, stofflichen und standortspezifischen Anforderungen zu berücksichtigen.

Tabelle 1* zeigt eine Übersicht von Regelwerken, die für die Herstellung von ZFSV bzw. den darin verwendeten Materialien relevant sind.

Anforderungen	Regelwerk	Geltungsbereich
technisch	Technisches Regelwerk (H ZFSV)	Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau
	Technische Lieferbedingungen für Bodenmaterialien und Baustoffe für den Erdbau im Straßenbau (TL BuB E-StB)	Stoffspezifische, erdbautechnische und umweltrelevante Anforderungen an Bodenmaterialien und Baustoffe, die zur Herstellung von Erdbauwerken eingesetzt werden
umweltrelevant	Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) & Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)	Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten
	Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall - Mitteilung 20 (LAGA M 20)	Bewertung der Schadloosigkeit der Verwertung von mineralischen Abfällen und Böden bei bestimmten Anwendungsfällen
	Wasserhaushaltsgesetz (WHG)	Schutz der Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut

*Hinweis: Die Tabelle hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Je nach Anwendung und Einsatzort, können weitere Richtlinien, technische Lieferbedingungen (TL), zusätzliche technische Vertragsbedingungen (ZTV) oder technische Prüfvorschriften (TP) zu beachten sein (Remex 2012).

Tab. 1: Relevante Regelwerke für die Herstellung von ZFSV und die Verwendung von RC-Baustoffen [Datenbasis: (FGSV 2012/2020)]

Ob, in welchem Umfang und unter welchen Rahmenbedingungen ein Baustoff wiederverwertet werden darf, regeln aktuell die Technischen Lieferbedingungen für Bodenmaterialien und Baustoffe für den Erdbau im Straßenbau (TL BuB E-StB).

Die Umweltaspekte sind in der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) festgesetzt, die auf Länderebene durch die Mitteilung der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA M20) ergänzt wird. So werden in der LAGA M20 die unterschiedlichen Materialien sog. Einbauklassen zugeordnet (Tab. 2).

Einbauklasse	Zuordnung	Beschreibung
0	$\leq Z 0$	uneingeschränkter Einbau
1	$\leq Z 1.1$	eingeschränkter offener Einbau
	$\leq Z 1.2$	eingeschränkter offener Einbau bei hydrologisch günstigem Gebiet
2	$\leq Z 2$	eingeschränkter Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen
3-5	$> Z 2$	Einbau/Ablagerung in Deponien

Tab. 2: Einbauklassen nach LAGA M 20 [Datenbasis: (Handbuch ZTV E-StB 2017)]

Untersuchungen an der HCU

Um auf dem Gebiet der ZFSV in Kombination mit Recycling-Baustoffen neue Erkenntnisse zu gewinnen, arbeitet die HafenCity Universität Hamburg (HCU) mit anderen Forschungspartnern an der weiteren Erforschung von ZFSV, mit einem Schwerpunkt auf der Verwendung von RC-Baustoffen. Diese Forschungsaktivitäten sind u.a. Bestandteil des Projektes "FW-ZFSV 4.0 - Fernwärmeleitungsbau 4.0 mit zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen für niedrige und hohe Betriebstemperaturen".

Neben klassischen Abbruchmaterialien wie Betonbruch, Ziegelbruch und Asphaltfräsgut werden auch Materialien untersucht, die zwar per Definition nicht zu Recycling-Material gezählt werden, aber lokal in großer Menge anfallen, ohne einem Verwendungszweck zugeführt zu werden und somit als Abfall gelten. Für den Raum Hamburg wäre das z.B. Hafenschlick. Hierbei handelt es sich um ein Ausgangsprodukt natürlicher Herkunft, welches anthropogene Schadstoffbelastungen aufweist. Es findet bereits Anwendung als Ersatzbaustoff für Dichtungsmaterial im Deponie- und Deichbau und als Ausgangsmaterial in der Ziegel- und Pelletherstellung. (HPA 2021).

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 3) zeigt, welche Materialien an der HCU im Rahmen des Projektes bereits untersucht wurden und sich nach den bisher durchgeführten Versuchen, die noch zu erweitern sind, grundsätzlich als geeignet erwiesen haben.

RC -Material	Beschreibung	bekannte Anwendungsfälle	potenzielle Verwendung in ZFSV	Herausforderung für Anwendung mit ZFSV
Betonbruch	vorwiegend Beton	Straßen- und Wegebau (hohe Tragfähigkeit)	Erdstoff	Nachhärtung aufgrund z.B. puzzolanische Reaktionen
Ziegelbruch	gebrochenem Bauschutt, Ziegel sowie Kalk-Sandstein	Unterbau von Tragschichten mit geringen Tragfähigkeiten	Erdstoff	Nachhärtung aufgrund z.B. puzzolanische Reaktionen, Zulassung für Graben- und Wegebau aufgrund der hohen Materialvielfalt und geringen Frostbeständigkeit
Hafenschlick	feinkörnige Gewässersedimentfraktion	Dichtungsmaterial Deponie-/Deichbau, Ausgangsmaterial Ziegel- und Pelletherstellung	Erdstoff / Additiv	Zulassung für den Graben- und Wegebau aufgrund der anthropogene Schadstoffbelastungen

Tab. 3: An der HCU untersuchte Recycling-/Abfallmaterialien [Datenbasis: (HPA 2021), (Buhck 2021)]

In Fig. 4 sind die Korngrößenverteilungen der jeweiligen Materialien dargestellt. Durch eine Kombination der unterschiedlichen Materialien lässt sich die gewünschte Korngrößenverteilung erzielen.

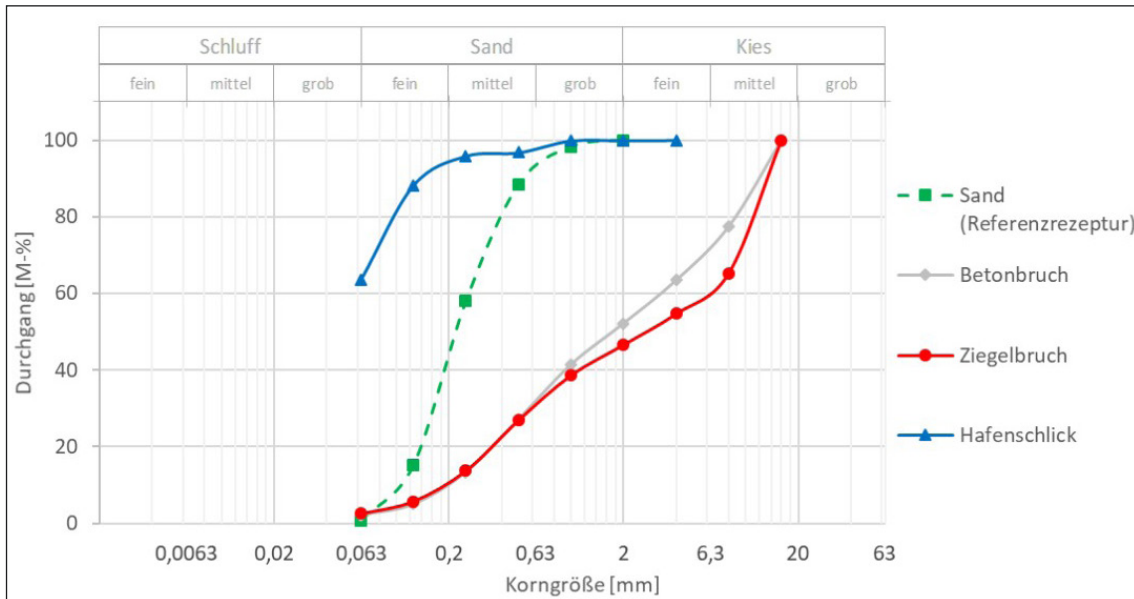


Fig. 4: Sieblinien des verwendeten Recycling-Materials (in Anlehnung an DIN EN ISO 17892-4)

Als Referenzrezept für die im Rahmen des Forschungsprojektes durchzuführenden Versuchsreihen wird an der HCU die in Fig. 5 aufgeführte Zusammensetzung ZFSV_1 verwendet, wobei Sand und Wasser den Hauptanteil ausmachen. Die Materialien Betonbruch, Ziegelbruch und Hafenschlick werden dabei entsprechend den Rezepturen ZFSV_2 und ZFSV_3 eingesetzt.

ZFSV	=	Erdstoff	+	hydraulisches Bindemittel	+	Additiv	+	Wasser		
	↓	↓		↓		↓		↓		
ZFSV_1	=	Sand		Zement	+	Bentonit	+	Wasser		
ZFSV_2	=	Hafenschlick	+	(Sand)	+	Zement	+	(Bentonit)	+	Wasser
ZFSV_3	=	RC-Material	+	(Sand)	+	Zement	+	Bentonit	+	Wasser

Hinweis: die in Klammern () gesetzten Bestandteile werden, je nach Rezeptur, nur optional eingesetzt. Somit ergeben sich zu den hier aufgeführten Rezepturen weitere Variationen.

Fig. 5: ZFSV Rezepturen an der HCU

Fig. 6 zeigt die Probekörper der unterschiedlichen ZFSV-Rezepturen. Besonders die beiden Probekörper in der Mitte (ZFSV_3- Beton- und Ziegelbruch ohne Sand) zeigen eine inhomogene Struktur mit verhältnismäßig vielen Lufteinschlüssen, was wahrscheinlich auf den fehlenden Feinanteil zurückzuführen ist. Die Probekörper mit einer gleichmäßigen Korngrößenverteilung, Beton- und Ziegelbruch mit Sand (ZFSV_3- links) und Hafenschlick mit Sand (ZFSV_2- rechts) weisen eine homogenere Struktur auf.

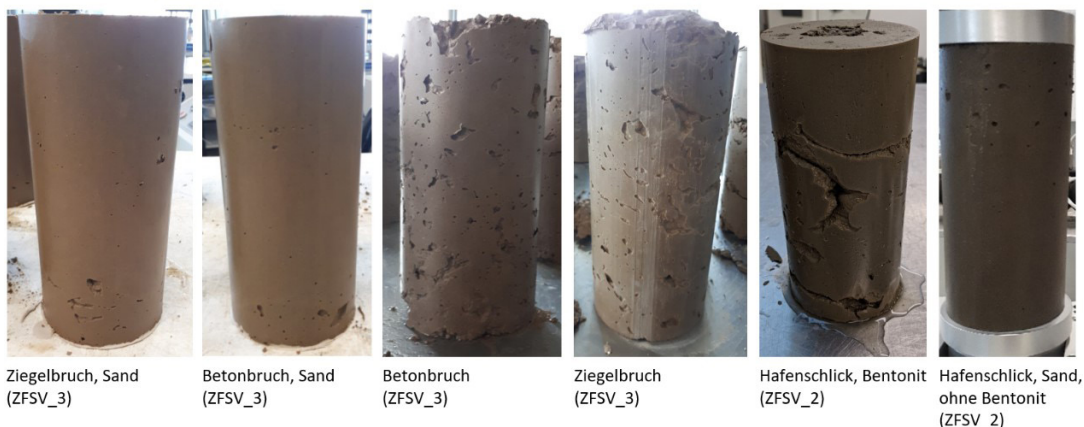


Fig.6: ZFSV-Probekörper aus Recycling-Material

Die Anforderung der leichten Wiederaushubfähigkeit in Kombination mit einer erforderlichen Tragfähigkeit für entsprechende Aufbauten sind eine der wesentlichen technischen Herausforderung bei der Ermittlung einer geeigneten ZFSV-Rezeptur. Die leichte Wiederaushubfähigkeit nach H ZFSV mittels des Verfestigungsverlaufs wird anhand der Druckfestigkeit im ein-axialen Druckversuch gemäß DIN 18136 geprüft. Dafür sollen die Werte in einem definierten Bereich (Fig. 7) liegen.

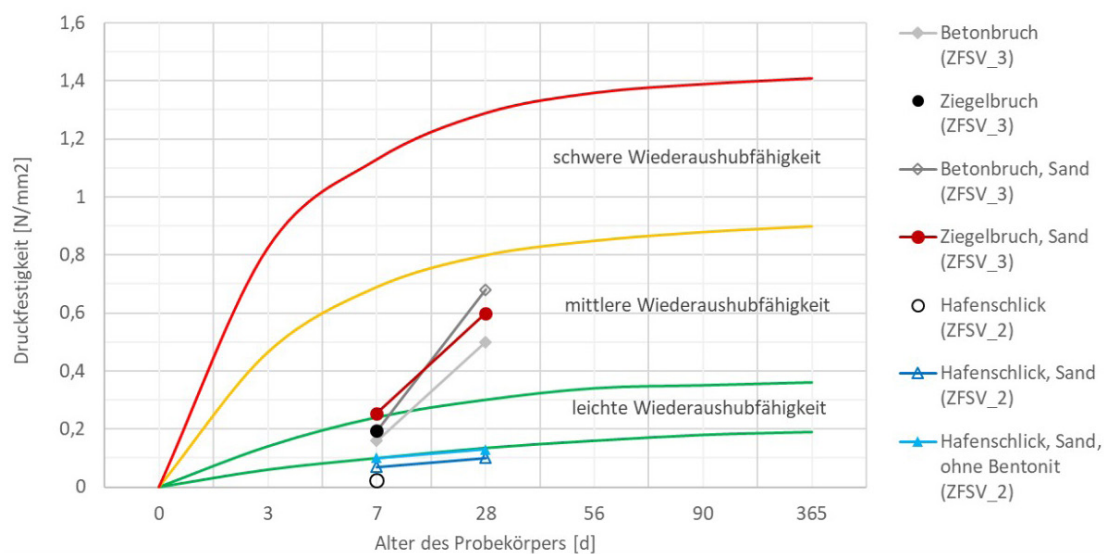


Fig. 7: Schematische Darstellung des Verfestigungsverlaufs [Datenbasis: (FGSV 2012)] und Messwerte von Recycling-Rezepturen (Fig. 6)

Erste Versuche haben ergeben, dass bei den Recycling-Materialien Beton- und Ziegelbruch starke Nachverfestigungen auftreten. Während die Druckfestigkeiten nach 7 Tagen noch innerhalb der leichten Wiederaushubfähigkeit lagen, liegen sie bereits nach 28 Tagen im oberen Bereich der mittleren Wiederaushubfähigkeit.

Hafenschlick verhält sich hier deutlich anders. Verwendet man reinen Hafenschlick als Grundmaterial (Fig. 5) erhält man einen Probekörper mit einer geringen Festigkeit. Kombiniert man die Erdstoffe Hafenschlick und Sand, erhält man sowohl mit als auch ohne Bentonit höhere Druckfestigkeiten, die bei den ersten Versuchen nur knapp unter der Grenze zur leichten Wiederaushubfähigkeit liegen.

Interpretation der ersten Ergebnisse

Grundsätzlich lassen die bisher gesammelten Erkenntnisse den Schluss zu, dass die untersuchten Materialien für die Herstellung von ZFSV geeignet sind. Die starke Nachverfestigung der Mischungen mit Beton- und Ziegelbruch sind vermutlich auf puzzolanische Reaktionen zurückzuführen. Mit einer Reduzierung des Zementanteils in der Rezeptur kann man den Verlauf der Verfestigung abflachen, genaue Aussagen lassen sich aber erst nach umfangreicheren Untersuchungen und Langzeitversuchen treffen. Der Verfestigungsverlauf der Hafenschlick-Rezepturen lässt sich mit einer Erhöhung des Zement- bzw. Sandanteils verbessern, so dass für entsprechende Langzeituntersuchungen auch mit dem gewünschten Verfestigungsverlauf zu rechnen ist. Hafenschlick bindet viel Wasser, was auch die wesentliche Aufgabe von Bentonit als Additiv in ZFSV ist. Hafenschlick kann daher ggf. Bentonit als Additiv ersetzen. Auch hier müssen weitere Untersuchungen zeigen, ob diese Rezeptur alle Anforderungen erfüllt und sich für die Praxisanwendung eignet.

Bei den bisherigen Druckfestigkeitsprüfungen konnte beobachtet werden, dass die Streuung der Ergebnisse bei den grobkörnigeren Recycling-Materialien höher war, als beispielsweise bei den Probekörpern der Referenz-Rezeptur. Gründe hierfür könnten eine inhomogenere Struktur des ZFSV und eine größere Neigung zu Lufteinschlüssen im Probekörper sein. In weiteren und über einen längeren Zeitraum laufenden Versuchsreihen, müssen daher mehr Probekörper abgedrückt werden, um eine belastbare Datengrundlage zu erhalten.

Fazit

Die aus den bisherigen Untersuchungen gesammelten Erkenntnisse zeigen, dass die Verwendung von Recycling-Material zur ZFSV-Herstellung eine interessante Alternative zu klassischen ZFSV und konventioneller Sandverfüllung ist.

Auch Hafenschlick zeigt in den ersten Versuchen vielversprechende Ergebnisse und rechtfertigt eine weitere und genauere Untersuchung. Die Verwendung von Hafenschlick als Baumaterial ist bis dato noch eine Ausnahme, da die anthropogene Schadstoffbelastung einen Einbau nur unter bestimmten Randbedingungen zulässt. Wenn die ZFSV-Rezeptur diese Schadstoffe ausreichend immobilisieren kann, könnte das eine neue Verwertungsmöglichkeit für Hafenschlick bedeuten. Durch seine feinkörnigere Zusammensetzung wäre auch eine Kombination mit den grobkörnigeren Recyclingbaustoffen wie z.B. Beton- und Ziegelbruch denkbar. Hierfür werden weitere Untersuchungen erforderlich sein, um eine belastbare Aussage treffen zu können. Neben der technischen Eignung der Materialien werden vor allem die umweltrelevanten Aspekte eine entscheidende Rolle spielen.

Danksagung

An dieser Stelle sei dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die Förderung des Projektes "FW-ZFSV 4.0- Fernwärmeleitungsbau 4.0 mit zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen für niedrige und hohe Betriebstemperaturen" (FKZ 03EN3022D) gedankt. Zudem danke ich Dr. Bernd Wagner (AGFW) für das Peer-Review, sowie Dana Schmetkamp und Marcus Illguth für ihre Unterstützung bei den Laborversuchen.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literatur

AGFW (2017) - Heft 43: „EnEff: Wärme: Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung“, Juni 2017; ISBN 3-89999-068-4

AGFW (2019) - Heft 50: „Nachhaltige Sektordurchdringung von ZFSV als Bettungsmaterial im Fernwärmeleitungsbau“, November 2019; ISBN 3-89999-079-X

BMU (2021) - <https://www.bmu.de/gesetz/kreislaufwirtschaftsgesetz>, zuletzt aufgerufen: 12.11.2021

BMU (2021) - Pressemitteilung Nr. 146/21 | Kreislaufwirtschaft (25.06.2021)]

Buhck (2021) - <https://wiershop.buhck-gruppe.de/was-wir-bieten/baustoffe/rc-produkte>, zuletzt aufgerufen: 12.11.2021

DIN 18136:2003-11, Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Einaxialer Druckversuch

DIN EN ISO 17892-7:2018-05, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 7: Einaxialer Druckversuch (ISO 17892-7:2017); Deutsche Fassung EN ISO 17892-7:2018

DIN EN ISO 17892-4:2017-04, Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 17892-4:2016); Deutsche Fassung EN ISO 17892-4:2016

FGSV (2012) - H ZFSV / Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau; ISBN 978-3-86446-033-3

FGSV (2020) - TL BuB E-StB 20 / Technische Lieferbedingungen für Bodenmaterialien und Baustoffe für den Erdbau im Straßenbau; ISBN: 978-3-86446-289-4

Handbuch ZTV E-StB (2019) - Kommentar und Kompendium Erdbau | Felsbau | Landschaftsschutz für Verkehrswege; ISBN: 978-3-7812-2052-2

HPA (2021) - Produktinformationsblatt Metha-Material (12.08.2020)

Kreislaufwirtschaft Bau (2018) - Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018 / Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018, Herausgeber: Bundesverband Baustoffe–Steine und Erden e.V

RAL (2014) –Pressemitteilung „Flüssigboden: Ungeahnte Möglichkeiten rund um den Bau“ - RAL Gütegemeinschaft Flüssigboden e. V. (24.01.2014)

Remex (2012) – Fachartikel ‚Ersatzbaustoffe: Grundlagen für den Einsatz von RC-Baustoffen und HMV-Asche im Straßen- und Erdbau‘ / Dipl.-Ing. A. Onkelbach MSc, Dr. rer. nat. J Schulz, August 2012

Vergleichende Bilanzierung des Treibhauspotenzials und des Primärenergiebedarfs verschiedener Rohrwerkstoffe bei dem Bau von Abwasserkanälen

Stefan Dollhopf
stefan.dollhopf@hcu-hamburg.de

HafenCity University, Hamburg

Kurzfassung

Das politische Ziel der Klimaneutralität bis 2045 fordert eine sektorübergreifende Reduzierung von Treibhausgasemissionen, parallel dazu müssen unsere Städte und Entwässerungssysteme aus- und umgebaut werden, um neuen Herausforderungen und Randbedingungen gerecht zu werden. Baumaßnahmen gehen stets mit der Emission klimaschädlicher Treibhausgase und einem stofflichen und energetischen Ressourcenverbrauch einher. Es ist daher nötig, geeignete Baustoffe, Baumaterialien und Bautechniken für den Ausbau zu identifizieren, um negative ökologische Auswirkungen möglichst gering zu halten. Dazu wird in der vorliegenden Arbeit der Bau von Abwasserkanälen anhand seiner integralen Bestandteile und aller Lebenszyklusphasen erfasst und bilanziert. Um die ökologischen Auswirkungen zu quantifizieren, wird das Treibhauspotenzial und der Primärenergiebedarf, je laufenden Meter Kanalsystem berechnet und dabei Rohrleitungen, der Erd- und Oberbau sowie Schächte berücksichtigt. Hinsichtlich der untersuchten Umweltwirkungen stellen sich meist biegesteife Rohre aus Beton- oder Stahlbeton oder Steinzeug als beste Lösung heraus. Kunststoffrohre erzielen meist die schlechtesten Ergebnisse, jedoch variieren die Einsparpotenziale je nach den gewählten Randbedingungen und der untersuchten Wirkungskategorie deutlich.

Einleitung

Abwasserkanäle dienen dem Transport von Abwasser und tragen deshalb maßgeblich zur Gesundheit der Bevölkerung bei. In Deutschland sind nahezu alle bebauten Gebiete an die Entwässerungs-Infrastruktur angeschlossen, jedoch führt der Wandel der Lebensgewohnheiten wie beispielsweise die zunehmende Urbanisierung dazu, dass Entwässerungsstrukturen angepasst und Abwasserkanäle auch in Zukunft weiter ausgebaut werden. Dies wird aus dem 5-jährlichem Bericht zum Zustand der Kanalisation der deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) ersichtlich. Bei der Gesamtlänge der Kanalisation ist demnach seit 1995 ein jährlicher Längenzuwachs von etwa 9.200 km festzustellen (DWA, 2020d). Hinzu kommt, dass etwa 20 % des deutschen Kanalnetzes kurz- bis mittelfristig sanierungsbedürftig sind (DWA, 2020d), was einen bedeutenden baulichen Aufwand an Erneuerungsmaßnahmen zur Instandhaltung der bestehenden Infrastruktur zur Folge hat.

Abwasserkanäle bestehen zum Großteil aus kreisförmigen Rohren aus Beton bzw. Stahlbeton, Steinzeug oder Kunststoff. Dabei ist im letzten Jahrzehnt ein deutlicher Zuwachs des Anteils der Kunststoffe zu verzeichnen. Dieser stieg von etwa 7% im Jahr 2009 (DWA, 2009b) auf etwa 18% im Jahr 2019 (DWA, 2020d). Kunststoffrohre werden aus fossilen Rohstoffen gewonnen, zeichnen sich jedoch durch die leichte Handhabung beim Transport und auf der Baustelle aus. Biegesteife Rohrleitungen, aus Beton oder Steinzeug bestehen hingegen aus lokalen Rohstoffen, sind jedoch schwerer zu handhaben und zu transportieren. Diese Gegensätze bieten den Anlass, den Kanalbau hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus zu untersuchen. Das Ziel ist, geeignete Rohrwerkstoffe zu identifizieren, welche nachweislich geringere Auswirkungen auf das Treibhauspotenzial und den Primärenergiebedarf haben.

Die Umweltauswirkungen des Kanalbaus oder dessen Bestandteile waren bereits Teil zahlreicher Untersuchungen und Studien. Im deutschsprachigen Raum ist hierzu die Untersuchung von (Specht & Lorenz, 2009) zu nennen, welche jedoch nur die Herstellung der Rohrleitung und die damit verbundenen CO₂-Emissionen und Energieaufwendungen enthält. Weitere Untersuchungen von (Petit-Boixa, et al., 2014), (Akhtar, et al., 2014), (Vahidi, Jin, Das, & Singh, 2015) beinhalten ebenfalls

vergleichende Bilanzierungen von Rohrwerkstoffen. Diese Untersuchungen wurden im Ausland durchgeführt, deshalb ist der geographische Geltungsbereich in der Regel auf den jeweiligen Ort der Untersuchung begrenzt, da standortspezifische Randbedingungen berücksichtigt werden und diese sich maßgeblich auf die Ergebnisse auswirken.

Weiter unterscheiden sich auch die Wahl der Methoden, Systemgrenzen und Bewertungssysteme von der vorliegenden Untersuchung. Deshalb ergänzt die Bilanzierung hier eine bestehende Lücke, indem lokale Bau- und Konstruktionsweisen und nationale Randbedingungen wie beispielsweise die Energiebereitstellung zur Herstellung und Transportentfernungen von Baustoffen berücksichtigt werden.

Methodik

Grundlagen

Die Bilanzierung des Treibhauspotenzials (engl. global warming potential - GWP) und des Primärenergiebedarfs (PE) wird in Anlehnung an die wissenschaftlich anerkannte Methode der Ökobilanzierung nach DIN ISO 14040 (DIN EN ISO 14040, 2021) entwickelt. Da es sich beim Produktsystem um einen Teil der Entwässerungsinfrastruktur und Ingenieurbauwerke handelt, kann die Untersuchung weiter in den Themenbereich der Nachhaltigkeitsbewertung von Bauwerken, nach der Regelwerkreihe DIN EN 15643, eingeordnet werden. Die Bilanzierung des GWPs und PEs dient dazu die ökologische Qualität zu bewerten, deshalb orientiert sich die Untersuchung ergänzend an die Berechnungsverfahren nach DIN EN 15978 (DIN EN 15978, 2012). Die Berechnung der ökologischen Auswirkungen erfolgt mit Hilfe der frei zugänglichen, ökologischen Baudatenbank (Ökobaudat) des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat. Diese beinhaltet validierte Datensätze mit ökologischen Kennwerten von Baumaterialien und -techniken anhand verschiedener Wirkungsindikatoren. Ergänzend dazu dient die baubetriebliche Kalkulation des Kanalbaus dazu, das GWP und den PE der Konstruktionsphase genau zu erfassen und zu berechnen. Für die Bilanzierung wurde eine selbst entwickelte Tabellenkalkulation durchgeführt.

Zieldefinition

Das Ziel der Untersuchung ist die vergleichende Bilanzierung des GWPs und des PEs beim Kanalbau und dem Einsatz verschiedener Rohrwerkstoffe. Die Bilanzierung ermöglicht eine Bewertung der ökologischen Auswirkungen eines gebauten, typischen Schmutzwasserkanals anhand des GWPs und des PEs über den gesamten Lebenszyklus der Infrastruktur. Die Ergebnisse bieten damit entscheidungsunterstützende Informationen bei der Planung des Kanalbaus.

Funktionelle Einheit und Nutzungsdauer

Rohrleitungen stellen den zentralen Bestandteil des Kanalbaus dar, deshalb wird die funktionelle Einheit als 1m-langer Rohrleitungsabschnitt eines Kanals definiert. Die Nutzungsdauer des Kanals wird mit 50 Jahren veranschlagt, dies entspricht der unteren Grenze der Nutzungsdauer für neu-gebaute Kanäle gemäß der Kalkulationssätze nach DWA (DWA, 2012b).

Produktsystem und Alternativen

Es wird ein Transportkanal mit typischen Parametern für die Schmutzwasser-Entwässerung untersucht. Hausanschlüsse, Einläufe und weitere Bestandteile der Entwässerungsinfrastruktur werden dabei nicht berücksichtigt.

Den Kern der Untersuchung stellen die Rohrleitungen mit einem Vergleich der Werkstoffe Beton, Stahlbeton (Stb), Steinzeug (Stz) und verschiedener Kunststoffe (PVC-U, PE-HD und PP) dar. Die Nennringsteifigkeitsklasse der untersuchten Kunststoffrohre beträgt mindestens SN 8. Die untersuchten Umweltwirkungen werden für die Größenkategorien DN 300 und DN 500 berechnet, um ein breiteres Anwendungsspektrum abzubilden.

Die Alternativen, Abmessungen und längenspezifische Gewichte der Rohrleitungen sind in der Tab. 1 dargestellt. Hieraus sind Unterschiede bei Gewicht und Abmessungen von biegesteifen- und Kunststoff-Rohrleitungen auf einen Blick festzustellen.

	Beton	Stb	Stz	PVC	PEHD	PP
DN300:						
ID/AD*	300/450	300/450	300/355	297/315	285/315	293/315
kg/lfm.	243	243	72,4	12	14	12
DN500:						
ID/AD*	500/670	500/650	496/581	470/499	452/500	467/500
kg/lfm.	430	373	174	28	36	28

*Innendurchmesser (ID)/ Außendurchmesser (AD) in [mm]

Tab. 1: Abmessungen und Gewicht der Rohrleitungen

Ergänzend wird auch der Erd- und Oberbau berücksichtigt und dabei eine Sohltiefe von 3,5 m und Mindestabmessungen der Leitungsgräben mit senkrechten Grabenwänden gemäß DIN EN 1610 gewählt. Die Abmessungen des Leitungsgrabens sind demnach abhängig vom Außendurchmesser der Rohrleitungen, dabei wird angenommen, dass die Mindestabmessungen (AD + x) umgesetzt werden. Der Aufbau des Leitungsgrabens beinhaltet eine Typ-1 Bettung mit einer 20 cm dicken Bettungsschicht und eine Überdeckungshöhe über Rohrscheitel von 30 cm. Die Leitungszone (Bettung, Seitenverfüllung und Überdeckung der Rohrleitung) wird mit sandigem Liefermaterial verfüllt. Zur weiteren Verfüllung wird das Aushubmaterial verwendet und überschüssiger Aushub von der Baustelle abtransportiert. Die Dicke der abschließenden Asphaltsschicht beträgt 20 cm.

Ein weiterer integraler Bestandteil des Kanalbaus sind Kontrollschächte. Deshalb wird ein Kontrollschacht DN 1000 in Fertigteil Beton-Bauweise im Abstand von 39,1 m in die Bilanzierung einbezogen, dies entspricht dem durchschnittlichen Abstand von Schächten in Kanalnetzen in Deutschland (DWA, 2020d). Hilfsbaustoffe, wie beispielsweise der Verbau von Gräben, Baustelleneinrichtung und -sicherung werden ebenso wie die Herstellung von Baugeräten oder der Transport von Arbeitskräften und -geräten nicht berücksichtigt.

Lebenszyklusbetrachtung

Der Lebenszyklus gliedert sich gemäß DIN EN 15978 grundsätzlich in die Herstellungs-, die Errichtungs-, die Nutzungs- und Entsorgungsphase. Die Berechnung erfolgt für Module, welche diesen Phasen zugeordnet sind. Das GWP und der PE werden für die Module A1 bis A3, C2, C3 und D mit der Massenermittlung und vorhandenen Datensätzen der Ökobaudat berechnet. Die Berechnung für Modul A4 erfolgt je Baustoff und Baumaterial anhand der Massen, der Transportdistanzen und dem Transport-Datensatz der Ökobaudat. Je Baustoff und Baumaterial werden differenzierte Transportentfernungen gewählt, welche die Verfügbarkeit der Bauprodukte und deren Produktionsstandorte berücksichtigen (vgl. Tab. 2).

Sand-Kies	Asphalt	Beton/Stb	Kunststoff	Steinzeug
30	50	50	350	350

Tab. 2: Transportentfernung verschiedener Baustoffe in km

In Modul A5, Errichtung und Einbau, werden Prozesse des Baubetriebs bilanziert. Die maßgeblichen Einwirkungen auf das GWP und den PE entstehen beim Kanalbau durch den Dieserverbrauch, der bei Betrieb der Baumaschinen verursacht wird. Hierfür werden Hauptbauleistungen identifiziert und den Bestandteilen (Rohrleitungen, Erd- und Oberbau sowie Schächte) zugeordnet. Mittels baubetrieblicher Ansätze wird sowohl der Geräteeinsatz als auch der Zeitaufwand kalkuliert und daraus der Dieserverbrauch berechnet. Die Berechnung des GWP und des PE erfolgt je Bauleistung über den berechneten Dieserverbrauch und den Aushub-Datensatz der Ökobaudat.

Da es sich um eine Freispiegel-Entwässerung handelt, fällt durch den Betrieb der Infrastruktur in der Regel kein nennenswerter, energetischer und stofflicher Aufwand an. Hinsichtlich der Instandhaltung besteht für alle Alternativen die Annahme, dass während der Nutzungsdauer von 50 Jahren keine Erneuerungs- oder Sanierungsmaßnahmen erforderlich werden. Instandhaltungsmaßnahmen, wie das Spülen der Rohrleitungen, werden aufgrund des geringen Aufwands vernachlässigt. Deshalb wird die gesamte Nutzungsphase in der Bilanzierung nicht berücksichtigt. In der Entsorgungsphase wird das Modul C1, Abbruch nicht berücksichtigt, da der Aufwand für den Abbruch von Kanälen hauptsächlich aus Erd- und Oberbauarbeiten zum Freilegen der Bestandsleitung besteht. Diese werden in der Regel den Erneuerungsarbeiten oder der Verlegung neuer Rohrleitungen zugerechnet.

Ergänzend werden die Recyclingmöglichkeiten (Modul D) der ausgebauten Materialien in Form von Gutschriften in der Bilanzierung berücksichtigt, um die mögliche Wiederverwendung von Baumaterialien hinsichtlich einer Kreislaufwirtschaft zu berücksichtigen.

Datenerfassung und Wirkungsabschätzung

Für die Sachbilanz werden Kenndaten von Baustoff und -produkt Herstellern verwendet, um die erforderlichen Gewichte oder Volumina zu ermitteln. Die Erd- und Oberbaumengen werden anhand der Mindest-Grabenabmessungen nach DIN EN 1610 für einen laufenden Meter Kanal berechnet. Grundlage für die baubetriebliche Kalkulation sind Kalkulationstabellen und Leistungsansätze von Baumaschinen. Die verwendeten ökologischen Baudaten weisen bereits Wirkungskategorien auf. Der aggregierte Output des Produktsystems stellt somit die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung dar. Das GWP wird dabei in der Einheit [kgCO₂Äq.] und der PE in der Einheit [MJ] je funktioneller Einheit, also je 1m-Rohrleitung, angegeben. Die Ergebnisse werden summiert für den gesamten Lebenszyklus berechnet und verglichen.

Ergebnisse

Die Diskussion und Darstellung der Ergebnisse folgen zunächst für die Rohrleitungen als Hauptbestandteil und anschließend in Ergänzung des Erd- und Oberbaus und der Schächte.

Ergebnisse der Rohrleitungen

Die Rohrleitungs-Bilanzierung macht deutlich, dass die biegesteifen Rohrleitungen ein geringeres GWP und einen geringeren PE aufweisen. Je größer die Rohrleitung, desto größer werden auch Unterschiede in den Bilanzierungsergebnissen (vgl. Fig. 1).

In der Größenkategorie DN 300 weist die Rohrleitung aus Stz das geringste GWP auf, gefolgt von den Werkstoffen Beton und Stb. Bei den Kunststoffrohren erzielt der Werkstoff PP das geringste GWP, gefolgt von PE und PVC-U. Die quantitative Betrachtung zeigt, dass in der Größenkategorie DN 300 Stz-Rohre ein um etwa 30 % geringeres GWP aufweisen als Rohre aus Kunststoff. Die Unterschiede werden größer, wenn man die Ergebnisse der Größenkategorie DN 500 untersucht. Das geringste GWP hat hier der Werkstoff Stb, wobei das GWP dabei etwa nur 50 % des GWP der Kunststoffe ausmacht.

Bei Vergleich des PE erzielen die Werkstoffe Beton und Stb wesentlich geringere Werte als Stz und die Kunststoffe. In beiden Größenkategorien zeigt der Werkstoff Beton den geringsten PE. Dabei liegt das Einsparpotenzial in der Größenkategorie DN 300 bei etwa 50 % und in der Größenkategorie DN 500 sogar bei 70 %. Der PE der Rohrleitung aus Stz kann zwischen den Werten der Werkstoffe Beton/Stb und den Kunststoffen eingeordnet werden.

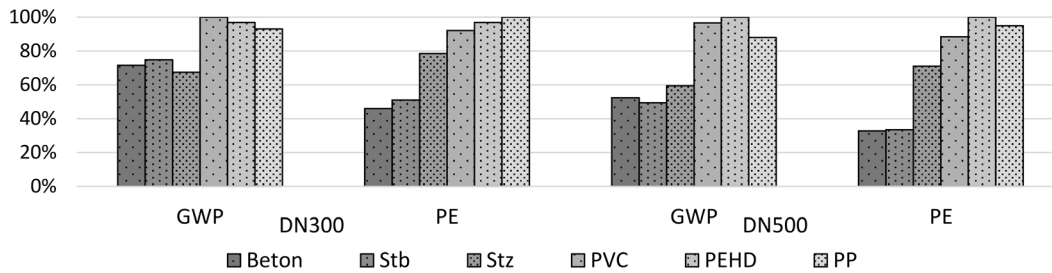


Fig. 1: Der Vergleich der Rohrleitungen zeigt Einsparpotenzial bei den biegesteifen Rohrwerkstoffen auf

Die Ergebnisse sind plausibel, da Beton- oder Stb-Rohre aus lokal verfügbaren Rohstoffen hergestellt werden und bei Produktion der Rohre vergleichsweise energiearme Prozesse, wie das Aushärten des fließfähigen Betons, stattfinden. Auch die Entsorgung der biegesteifen Rohrleitungen geht mit einem geringeren Aufwand einher. Weiter werden auch die Erkenntnisse der Studien von (Specht & Lorenz, 2009) und (Petit-Boixa, et al., 2014) bestätigt, die ebenfalls biegesteifen Rohrleitungen geringere Umweltwirkungen ausweisen.

Ergebnisse für den gesamten Kanal

Werden die Berechnungen des GWP und der PE der Rohrleitung, des Erd- und Oberbaus und der Schächte zusammengeführt, schwindet das Einsparpotenzial deutlich. Kunststoffrohre haben geringere Wandstärken als biegesteife Rohre und deshalb sind gem. DIN EN 1610 auch kleinere Leitungsgräben erforderlich. Folglich ist auch der Aufwand des Erd- und Oberbaus und damit auch das GWP und der PE geringer als bei den biegesteifen Rohrleitungen. Zusätzlich wirkt sich auch die Bilanzierung des Schachts relativierend aus, da diese trotz des Abstands von knapp 40 m einen nennenswerten Anteil der untersuchten Umweltwirkungen des Kanalsystems ausmachen.

	DN 300		DN 500	
	GWP*	PE*	GWP*	PE*
Beton	171,9	1390	245,1	2033
Stb	174,2	1436	237,6	2019
Stz	157,6	1582	244,3	3002
PVC	174,9	1663	291,5	3250
PEHD	172,6	1707	297,2	3141
PP	170,1	1736	278,5	2730

*GWP in [in [kg CO₂ Äq. / lfm.] / PE in [MJ / lfm.]

Tab. 3: Bilanzierungsergebnisse des GWP und des PE der Kanalsysteme mit verschiedenen Rohrwerkstoffen

Unter Berücksichtigung aller Bauteile erzielt in der Größenkategorie DN 300 die Variante mit Rohren aus Steinzeug das geringste GWP, während die Alternativen ein etwa um 10 % höheres GWP aufweisen (vgl. Fig. 2).

In der Größenkategorie DN 300 und unter den gewählten Randbedingungen können Einsparungen von Treibhausgasemissionen, durch die Verwendung alternativer Rohrwerkstoffe demnach als gering bezeichnet werden. In der Größenkategorie DN 500 weisen die Systeme mit biegesteifen Rohrleitungen in etwa das gleiche GWP auf. Hier besteht gegenüber den Systemen mit Kunststoff eine nennenswerte Einsparung von etwa 20 %.

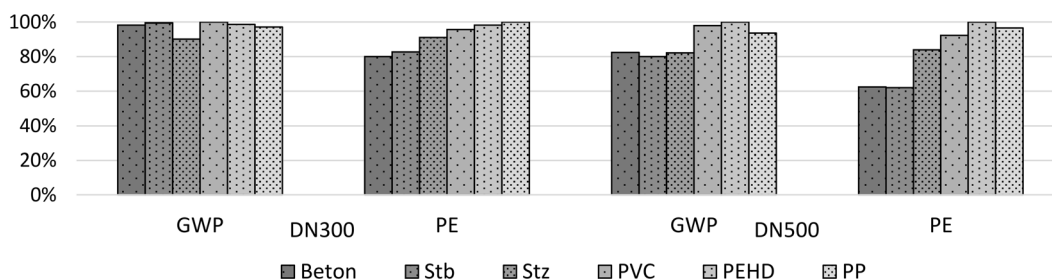


Fig. 2: Bei Bilanzierung aller Bestandteile liegen die Ergebnisse deutlich näher aneinander

Hinsichtlich des PE sind die Einsparpotenziale hingegen wesentlich größer. In der Größenkategorie DN 300 erzielen Kanalsysteme mit Beton- und Stb die besten Ergebnisse, denn der PE fällt etwa um 20 % geringer aus als bei den Kanalsystemen mit Kunststoffrohren. In der Größenkategorie DN 500 beträgt das Einsparpotenzial sogar bis zu 40 %.

Bei Betrachtung eines gesamten Kanalsystems ist der Anteil der untersuchten Bestandteile besonders interessant. Bemerkenswert ist dabei Beitrag des gesamten Erd- und Oberbaus, denn dieser macht in der Größenkategorie DN 300 bei den Systemen mit biegesteifen Rohrleitungen den Großteil des GWP und des PE aus (vgl. Fig. 3).

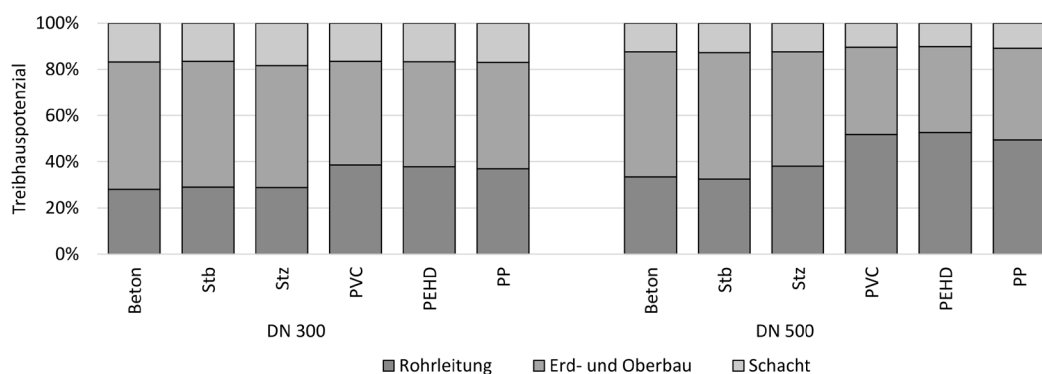


Fig. 3: Der Vergleich der Bestandteile zeigt den großen Einfluss des Erd- und Oberbaus auf das gesamte Treibhauspotenzial

Auch bei Systemen mit Kunststoffrohren kann der Erd- und Oberbau als bedeutender Treiber des GWP und des PE identifiziert werden. Die Rohrleitungen weisen einen ebenso maßgeblichen Anteil am GWP und vor allem am PE auf. Bei größeren Rohrdurchmessern verlagern sich die Anteile des GWP und des PE zur Rohrleitung und einhergehend nehmen auch die Anteile der Herstellungsphase zu. Dies kann insbesondere bei den Kunststoffrohren festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigen auch, dass der Anteil der Schächte am GWP und PE nicht zu vernachlässigen ist, was vor allem in der Größenkategorie DN 300 zu beobachten ist.

Die differenzierte Untersuchung der Konstruktionsphase zeigt, dass der Großteil auf den Einbau auf der Baustelle entfällt. Die Transporte der Bauprodukte und Baustoffe haben je nach Werkstoff einen relativ kleinen Anteil am gesamten GWP und am PE von etwa 8 bis 15%. Dies stellt einen Unterschied zu den Ergebnissen von (Petit-Boixa, et al., 2014) dar, in denen deutlich höhere Anteile der Transporte angegeben werden. Eine mögliche Begründung ist, dass bei der vorliegenden Berechnung der Transportdatensatz der ÖkobaDat angewendet wird. Dieser beinhaltet einen EURO-4 LKW mit einer 85 % Gewichtsauslastung im Speditionsverkehr. Beim Transport von Rohren ist insgesamt von einer geringeren Gewichtsauslastung auszugehen, da bedingt durch den Querschnitt, viel „Luft“ transportiert wird. Auch der Transport von Baustoffen kann sich hinsichtlich der Auslastung, der Größe der LKWs aber auch durch die Anzahl der Leerfahrten vom Speditionsverkehr unterscheiden. Um die Berechnung zu konkretisieren, sind jedoch genauere Angaben zur Gewichtsauslastung und zum Einsatz der LKWs erforderlich, daraus kann jedoch ein interessantes Forschungsfeld für zukünftige Untersuchungen des Rohrleitungsbaus abgeleitet werden.

Fazit

Die Bilanzierung umfasst den Vergleich des Treibhauspotenzials (GWP) und des Primärenergiebedarfs (PE) für den Kanalbau mit alternativen Rohrwerkstoffen, bei dem typische Randbedingungen und Parameter für den Bau eines Schmutzwasserkanals berücksichtigt werden. Dies ist von besonderem Interesse, da der Betrieb bzw. die Nutzung des Kanals geringe, bis keine Auswirkungen auf das GWP und den PE hat und negative Auswirkungen nur minimiert werden, wenn bereits bei der Planung ökologische Aspekte durch den Einsatz geeigneter Baustoffe, -materialien und -verfahren berücksichtigt werden. Bisherige Untersuchungen hierzu beziehen sich nicht auf den deutschen Raum oder beinhalten keine gesamtheitliche Betrachtung des Kanalbaus.

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass unter den gesetzten Randbedingungen der Einsatz von Beton- oder Stahlbetonrohren bei dem Bau von Abwasserkanälen meistens zu einem geringen GWP und einem deutlich geringen PE führen. Der Einsatz von Kunststoffrohren hingegen, schlägt sich laut Untersuchung in höheren Werten bei GWP und PE nieder. Dies wird damit begründet, dass die Herstellung und Entsorgung der Kunststoffrohre mit einem erhöhtem GWP und deutlich größerem PE einhergehen, welche nicht durch Einsparungen beim Transport und beim Einbau auf der Baustelle kompensiert werden. Es ist jedoch erforderlich lokale Randbedingungen, Bautechniken und den erforderlichen Baugeräteinsatz genau zu berücksichtigen, da sich beispielsweise die Dimensionen der Rohrleitungen und die Abmessungen der Leitungsgräben eindeutig auf die Ergebnisse auswirken und folglich auch die Einsparpotenziale variieren.

Bemerkenswert ist der Anteil des Erd- und Oberbaus und der Anteil der Errichtungsphase, deshalb ist eine genaue Analyse des Baubetriebs und eine differenzierte Berücksichtigung der Konstruktionsweise ebenso wichtig wie die "cradle to gate-Untersuchung" der Bauprodukte. Neben dem Einsatz ökologisch sinnvoller Bauprodukte ist es ratsam auch den Einsatz der Baugeräte und deren Dieselverbrauch zu fokussieren. Gleichzeitig bedeutet dies, dass ein besonderer Wert auf den fachgerechten Einbau gelegt werden muss, um eine lange Nutzungsdauer der Infrastruktur zu gewährleisten, denn umfangreiche Erneuerungsmaßnahmen schlagen sich wiederum deutlich auf das GWP und den PE nieder. Eine gezielte Bündelung verschiedener Bauarbeiten, wie die Erneuerung von Straßen oder parallele Leitungsarbeiten erhöhen die Effizienz und helfen insgesamt dabei bauliche Eingriffe und daraus folgende negative ökologische Auswirkungen zu minimieren.

Die Ökobilanzierung des Kanalbaus bietet vielfältige Möglichkeiten für weitere, ergänzende Untersuchungen. Diese können beispielsweise mit einer Berechnung weiterer Wirkungskategorien wie dem Versauerungspotential oder dem Wasserverbrauch ergänzt werden. Erneute, differenzierte Untersuchungen hinsichtlich der Transporte sind von besonderem Interesse, da die erzielten Ergebnisse von bisherigen Ergebnissen einer anderen Studie abweichen. Auch bieten weitere Bestandteile des Kanalbaus, wie alternative Verfüllbaustoffe oder Verbaumaßnahmen ein interessantes Forschungsfeld. Einhergehende Berechnungen der Lebenszykluskosten runden die Bewertung der Kanalsysteme hinsichtlich der Nachhaltigkeit ab und können förderlich sein, dass die erzielten Ergebnisse auch in der Praxis Anwendung finden.

Literatur

Akhtar, S., Reza, B., Hewage, K., Shahriar, A., Zargar, A., & Sadiq, R. (2014). *Life cycle sustainability assessment (LCSA) for selection of sewer pipe materials*. In *Clean Techn Environ Policy* (S. 973-992). Berlin Heidelberg: Springer Verlag.

DIN EN 15978. (2012). *DIN EN 15978:2012-10 - Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden*. Berlin: Beuth.

DIN EN ISO 14040. (2021). *DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen*. Berlin: Beuth.

DWA. (2009b). *Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2009*. Hennef.

DWA. (2012b). *Leitlinien zur Durchführung dynamischer Kostenvergleichsrechnungen*. Hennef.

DWA. (2016). *Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2015. Korrespondenz Abwasser, 6/2016*.

DWA. (2020d). *Zustand der Kanalisation in Deutschland - Ergebnisse der DWA-Umfrage 2020*. Hennef: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e. V. (DWA).

Petit-Boixa, A., Sanjuan-Delmása, D., Gasola, C. M., Villalba, G., Suárez-Ojedac, M. E., Gabarrella, X., & Josad, A. R. (2014). *Environmental Assessment of Sewer Construction in Small to Medium Sized Cities Using Life Cycle Assessment*. *Water Resources Management* 28.

Specht, E., & Lorenz, N. (2009). *Werkstoffe für den Kanalbau - Wieviel CO2 muss sein?* In 23. Oldenburger Rohrleitungsforum 5./6. Februar. Vulkan Verlag.

Vahidi, E., Jin, E., Das, M., & Singh, M. Z. (2015). *Comparative Life Cycle Analysis of Materials in Wastewater Piping Systems*. *Procedia Engineering* 118 (2015), S. 1177 – 1188.

Determination of the melting point depression of PB-1-CO₂ solutions through image analysis

Lucía Doyle
lucia.doyle@hcu-hamburg.de

HafenCity University, Hamburg

Abstract

In the context of replacing polyurethane foam in DH pre-insulated pipes due to the toxicity of the diisocyanates, and facilitating recycling by eliminating the need to separate material layers of the sandwich structure, the foaming of PB-1 with CO₂ is being studied. The assessment of the plasticization effect induced by CO₂ in the polymer melt and determination of the melting point depression is required for the establishment and optimization of the foaming processing window. In this paper, a method for the determination of the melting point through image analysis is presented, validated and used for the study of PB-1 – CO₂ solutions. The obtained results through image analysis agree with those obtained with differential scanning calorimetry, validating the method. The CO₂ - induced melting point depression of PB-1 was determined as $\Delta T = 14^{\circ}\text{C}$.

Introduction

Heating accounted for 50% of the global energy consumption in 2018, being so the largest energy end-use (IEA, 2019). The integration of renewable energy and waste heat sources could be largely facilitated by District Heating and Cooling (DHC). The backbone of DHC is the piping network, which enables the distribution and exchange of heat and cold between different producers and consumers. The use of polyurethane (PU) pre-insulated pipes has been a fundamental element for the transition from the 2nd to the 3rd Generation DHC (Lund et al., 2014). The PU acts both as insulation, ensuring and significantly increasing the energy efficiency of the system, and as bond between the heat medium pipe and the casing. The toxicity of the diisocyanates (ZAPP, 1957) required for the PU manufacturing and the recently approved restriction on their use (European Commission, 2020) challenge the continuity of PU pre-insulated pipes. With this background, the team of Technical Infrastructure Management HCU opened a research line on alternative polymeric foams which could replace PU in DHC pipelines in 2019 (Doyle, 2021; Doyle & Weidlich, 2019; Doyle & Weidlich, 2020; Doyle & Weidlich, 2021). This includes both the evaluation of commercial foams for the application as well as the foaming of other polymers. With the final goal of developing a pre-insulated pipe made out of a single material, as to facilitate recycling by eliminating the problematic of layer separation in sandwich constructions, the foaming of semicrystalline polybutene-1 (PB-1) is being studied. As for blowing agents, inert gases, mainly CO₂, are considered for environmental reasons.

The success of the foaming process and the morphology of resulting foams is strongly related to the foaming temperature. The foaming temperature window is found between the melting temperature (T_m) and the glass transition temperature (T_g) in the case of amorphous polymers, and between T_m and the crystallization temperature (T_c) for the case of semicrystalline polymers (Di Maio & Kiran, 2018; Sarver et al., 2018). The obtained expansion ratio and cell morphology are conditioned by the relative distance of the foaming temperature from the melting and crystallization temperatures of the polymer-CO₂ dissolution under equilibrium (Sarver et al., 2018). It is well known that the dissolution of CO₂ in a polymer matrix can cause a plasticization effect (Pasquali, Comi, Pucciarelli, & Bettini, 2008; Reignier, Gendron, & Champagne, 2007; Sarver et al., 2018; Takahashi, Hassler, & Kiran, 2012) resulting in a depression of T_m , T_g and T_c , causing a shift on the processing window. Energy savings also arise from the possibility to process at lower temperatures (Frerich, 2015). The determination of these temperatures under CO₂ environment is of great importance for the correct setting and optimization of the process parameters.

Different techniques have been used for the determination of the melting point depression of polymer – CO₂ mixes. Reignier et al. (2007) used high pressure differential scanning calorimetry (HP-DSC) with Poly-ε-Caprolactone (PLC) and CO₂. Kelly et al (2013) used infrared spectroscopy in a high pressure cell with PLC and CO₂. Takebayashi et al. (2014) used near infrared spectroscopy (NIR) with a high-pressure cell for biphenyl and naphthalene under high-pressure CO₂. Frerich (2015) studied the melting behavior of PLA, PBS and PLA-PHS and CO₂ with a scanning transitiometer in a high-pressure cell. Lian et al. (2006) measured the carbon dioxide-induced melting point depression of PCL and PBS though the light transmission change through a view cell. A lamp was placed on one end of the view cell and images captured on the other end via a borescope attached to a videocamera. The polymer chip was placed in the optical path blocking the light, the melting was observed by the sudden light transmission through the cell. It could not be derived if the change detection was human based or computer based. Analogously, Takahashi et al. (2012) studied the melting behavior of biodegradable polyesters in CO₂ at high pressures through changes in the light intensity through the polymer with a view cell, using a photodetector for measuring the light intensity change. Pasquali et al. (2008) studied the meting point reduction of PEG 1500 in supercritical CO₂ via photographs through a view cell. The temperature was fixed and pressure increased until the polymer melting onset, defined as the appearance of the first liquid drop. However, it is not specified how the first drop is detected.

Aside from common the high-pressure cell, the presented methods require complex equipment or rely on human decision to detect a change on a set of images. However, human-scored image analysis is qualitative (Carpenter et al., 2006), and may be exposed to subjectivity and bias, leading to non-reproducible results. Therefore, automated image analysis is preferred. In this paper, a method for the determination of the melting point of polymer CO₂ mixes through digital image analysis and processing is presented and used for the characterization of Polybutene-1 – CO₂ solutions. Tests were undertaken in an autoclave with sapphire windows which allowed for image acquisition.

Data on the melting point depression of PB-1 CO₂ binary system has not been found available in the open literature. Its determination provides valuable information for the optimization of the foaming temperature.

Methods

As materials, PB-1 kindly provided by LyondellBasell, and CO₂ of >99.8% purity purchased from Westfalen were used.

Melting experiments were conducted in an autoclave having two windows opposite each other (Eurotechnica GmbH, Bargteheide, Germany). The autoclave is heated with a heat jacket and CO₂ is injected with a piston pump. The autoclave's inner environment is monitored with a temperature sensor type K with a precision of ±1 °C and a digital pressure sensor with a precision of 0,5%. A light source with variable intensity is placed by one of the windows and a camera (Fastcam SA-X2, Photron Limited, Japan) on the opposite window. The trigger of the camera is coupled to the autoclave control system, so that pressure and temperature are logged simultaneously to the image acquisition. A sketch of the system is provided in Fig.1

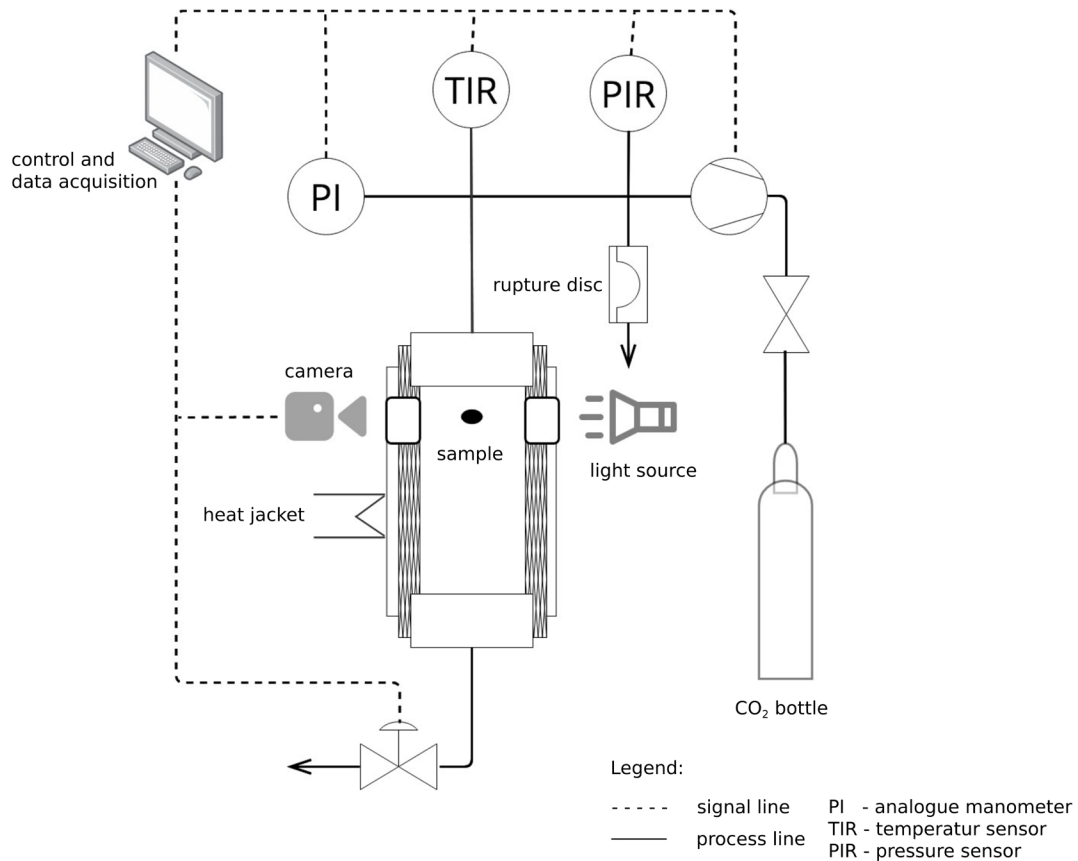


Fig. 1: Schematic representation of the autoclave with coupled image acquisition system

After reaching the required temperature, a pellet is placed centred in the optical path, on an optical glass support. The autoclave is purged 3 times with CO₂ before each trial. CO₂ is then introduced with a stepwise increase in pressure. Images are acquired in 20 s intervals and data logged accordingly. Trials were conducted in triplicate.

An image processing and analysis pipeline was developed using the open-source software Cell Profiler (Carpenter et al., 2006; Kamensky et al., 2011) version 4.1.3. The main steps included converting each image to greyscale, inverting image intensities, identifying the pellet (segmentation) and measuring the pellet. The full list of parameters measured is presented in Table 1. The pipeline is available at https://github.com/LuciaDoyle/MeltingPoint_ImageAnalysis.git

Area	Eccentricity	Median Radius
Bounding Box Area	Equivalent Diameter	Min Feret Diameter
Bounding Box Maximum X	Euler Number	Minor Axis Length
Bounding Box Maximum Y	Extent	Orientation
Bounding Box Minimum X	Form Factor	Perimeter
Bounding Box Minimum Y	Major Axis Length	Solidity
Center X	Max Feret Diameter	Center X
Center Y	Maximum Radius	Center Y
Compactness	Mean Radius	Center Z

Tab. 1: Parameters measured for the pellet in each image

Reproducibility was evaluated by running multiple sets of experiments and comparing the results. The method was validated through comparing the results of melting under atmospheric conditions obtained from the image analysis with the typical differential scanning calorimetry (DSC) curve provided by the manufacturer. For the tests under pressure, the duration of the intervals was established after running successive trials with increasing interval duration to confirm the attainment of equilibrium conditions.

Once the method was validated, the melting point depression of PB-1 was determined by executing successive runs at different temperatures. In each run the temperature would be fixed, and CO₂ pressure increased in 5 bar steps. Reported results were executed with an initial stabilization time of 2 h at the first pressure level and the successive pressure increases conducted in 1 h intervals.

Results

Method Validation

In order to validate the method, the relationship between geometrical deformation measured through the image analysis and polymer melting was proven. For this, a pellet was placed in the view cell and progressively heated up to 150 °C, which is above the melting point of PB-1, reported in the data sheet as 131°C.

The obtained sequence of image measurements is compared with the typical PB-1 DSC curve provided by the manufacturer in Fig. 2. For ease of analysis, eccentricity and major axis length were selected as reference parameters. Eccentricity is defined as the ratio of the distance between the foci of the ellipse and its major axis length, corresponding $e=0$ to a circle. Major axis length is length of the major axis of the ellipse that has the same normalized second central moments as the region, given in pixels (Rocha, Velho, & Carvalho, 2002).

It should be noted that PB-1 is polymorphic and undergoes crystal–crystal transformation at room temperature. When cooling from the melt, it crystallizes into Form II, which is metastable and characterized by a tetragonal unit cell. It then undergoes transformation into Form I stable crystals (Boor & Mitchell, 1963; Jones, 1963; Natta, Corradini, & Bassi, 1960), a process reported to have a duration of around 10 days depending on the storage conditions (Hadinata et al., 2007). Data reported corresponds to the melting of Form I.

Figure 2. (a) presents the parameters eccentricity and major axis length measured through the images (b) the DSC heating ramp, (c) the first image of the sequence, corresponding to the pellet in the solid state and (d) the last image of the sequence, corresponding to the pellet in the molten state.

A very good correlation between graphs (a) and (b) can be observed, showing how the selected geometrical parameters correlate unequivocally with the melting event. Fig.2 (c) shows the first image of the sequence, and (d) the last, where the change in geometry can be observed. The change is not abrupt enough as to determine the onset with ease through the naked eye. It can be observed that the major axis length decreases during the melting event, which seems counterintuitive. It should be noted that when the region is fitted to an ellipse, it does not necessarily have its major axis parallel to the x axis. Moreover, since the best fit ellipse is found per image, it may change its orientation between images. Indeed it does change orientation during the melting event, causing the effect of the major axis length decreasing.

For the determination of the melting point of the polymer-CO₂ solution, the selected procedure was to fix a temperature and progressively increase the pressure, which was conducted in 5 bar steps, given the constant volume of the autoclave. The melting point depression is explained in terms of solubility effect, with the CO₂ acting as diluent in the melt (Lian et al., 2006). In order to ensure equilibrium conditions, care was taken in establishing the pressure increase duration steps. Trials were conducted with increasingly longer time steps, from 30 minutes to 2 hours. Procedure was fixed at 1 h time steps after a 2 h stabilization period at the initial conditions.

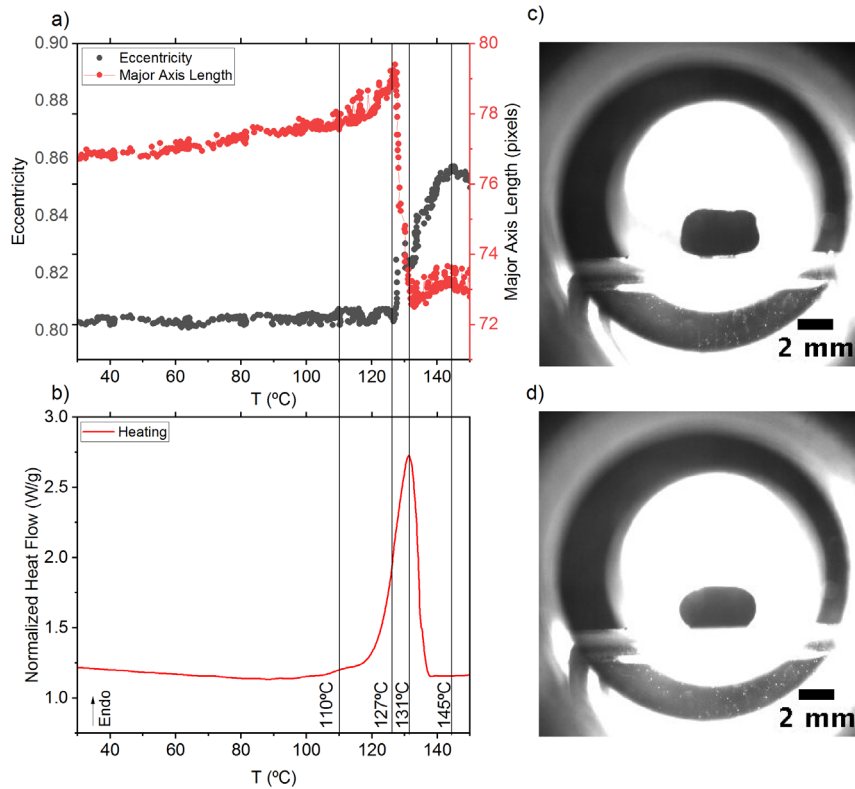


Fig. 2: (a) pellet deformation measured from the images during temperature increase. (b) DSC heating ramp. (c) initial pellet image. (d) last pellet image (molten)

Determination of melting point depression of PB-1 under CO₂

Representative runs for different set temperature are presented in Fig. 3. Additional trials at 112°C and 105°C were executed, where no melting was achieved with the pressures run up to 110 bar. The arrows highlight the melting point.

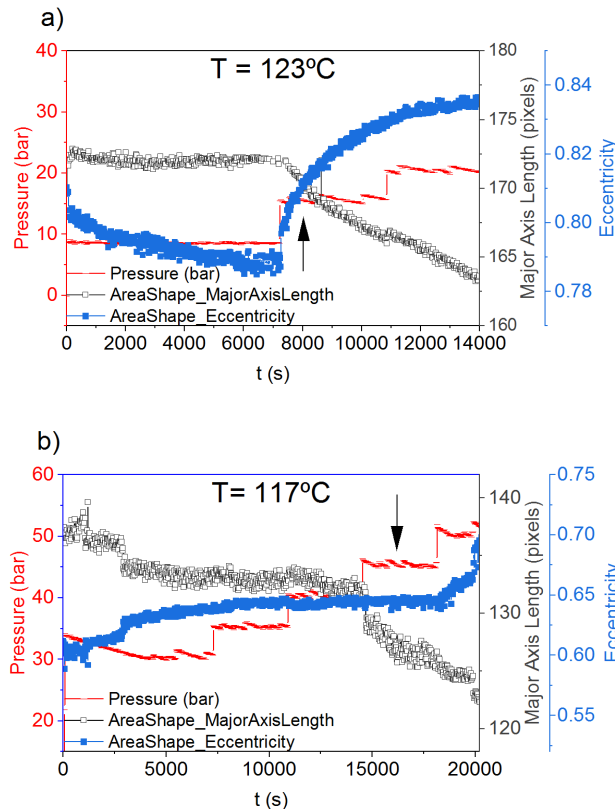


Fig. 3: Representative runs conducted at T = 123°C (a) and 117°C (b)

The obtained melting points as a function of pressure are given in Fig. 4. As can be seen, the melting point of PB-1 decreases linearly down to 117°C, with a pressure of 45 bar. This represents a ΔT_m depression of 14°C.

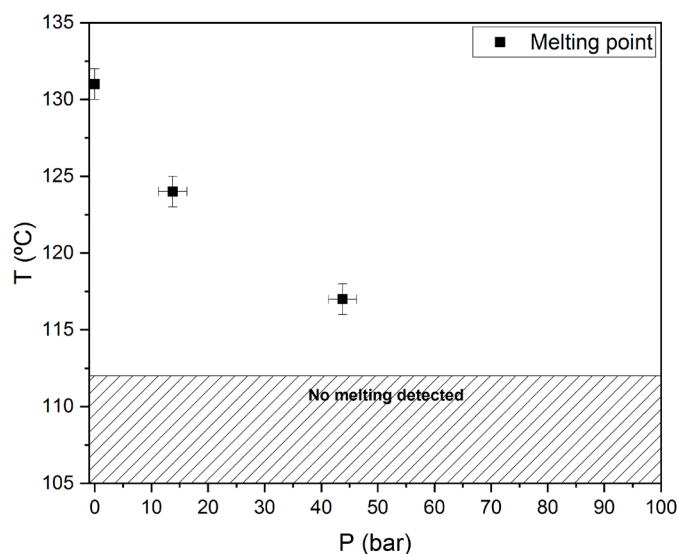


Fig. 4: Melting point of PB-1 in the presence of CO₂ at different pressures

The shape of the plot corresponds to that typically encountered in other polymer-CO₂ solutions, where the melting point decreases linearly with P until an abrupt change in slope occurs, from which the melting point remains more or less constant (Lian et al., 2006; Pasquali et al., 2008; Sarver et al., 2018; Takahashi et al., 2012). This change in behaviour is explained through solubility effects at low pressures, as the addition of low concentrations of a diluent in a melt depresses the pure component melting point, and by hydrostatic pressure effect increasing the melting temperature at higher pressures (Swaan Arons & Diepen, 1963). In order to measure the values after the kink point, a variable cell would be required, as to fix a temperature and progressively increase the pressure. The extent of the melting point depression can be correlated to the amount of absorbed CO₂ (Fukné-Kokot, König, Knez, & Škerget, 2000; Pasquali et al., 2008; Sarver et al., 2018), which is dependent on the applied pressure at a given temperature.

The CO₂ – induced plastitization effect observed in PB-1 is consistent with that reported by (Shi, Wu, Li, Liu, & Zhao, 2009) through the reduction of T_c. In their study, they report a depression of T_c from 90°C under atmospheric conditions to 60°C under supercritical CO₂ at 8 MPa when free cooling from the melt at 170°C, as detected with in-situ FTIR. This data also complements our findings towards the establishment of the processing window, since T_c cannot be detected through the here presented method. It should be however noted that unlike T_m, T_c is a second order transition and its value dependent on the cooling rate applied during the measurement (van Krevelen & Nijenhuis, 2009). The cooling rate at which the “free-cooling” occurred in the experiments by (Shi et al., 2009) is not reported. Data from the manufacturer provides a T_c of 71°C at a rate of 10°C/min, suggesting a much slower rate in the study by Shi et al.

Conclusion

This work demonstrates that the measurement of a sample’s geometrical features through image analysis is a powerful technique for the determination of the melting point in polymers and polymer-CO₂ solutions.

The melting point depression of PB-1-CO₂ mixtures was observed and quantified to $\Delta T = 14^\circ\text{C}$. This provides useful information for the study and optimization of PB-1 foaming with CO₂.

Acknowledgement

The author would like to thank Werner Rothhöft (Lyondellbasell) for providing the PB-1 and Marcus Illguth (HCU) for programming the autoclave control software and Easter Egg hunt.

Literature

Boor, J., & Mitchell, J. C. (1963). Kinetics of crystallization and a crystal-crystal transition in poly-1-butene. *Journal of Polymer Science Part A: General Papers*, 1(1), 59–84.

Carpenter, A. E., Jones, T. R., Lamprecht, M. R., Clarke, C., Kang, I. H., Friman, O., et al. (2006). CellProfiler: image analysis software for identifying and quantifying cell phenotypes. *Genome biology*, 7(10), R100.

Di Maio, E., & Kiran, E. (2018). Foaming of polymers with supercritical fluids and perspectives on the current knowledge gaps and challenges. *The Journal of Supercritical Fluids*, 134, 157–166.

Doyle, L., & Weidlich, I. (2019). Mechanical Behaviour of Polylactic Acid Foam as Insulation Under Increasing Temperature. *Environmental and Climate Technologies*, 23(3), 202–210.

Doyle, L., & Weidlich, I. (2020). Recyclable Insulating Foams for High Temperature Applications. In *Proceedings of The First International Conference on Green Polymer Materials 2020* (p. 7200).

Doyle, L. (2021). Extrusion foaming behavior of polybutene-1. Toward single-material multifunctional sandwich structures. *Journal of Applied Polymer Science*, 15, 51816.

Doyle, L., & Weidlich, I. (2021). Sustainable insulation for sustainable DHC. *Energy Reports*, 7, 150–157.

European Commission (2020). Commission Regulation (EU) 2020/1149 of 3 August 2020 amending Annex XVII to Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) as regards diisocyanates: (EU) 2020/1149. In *Official Journal of the European Union*.

Frerich, S. C. (2015). Biopolymer foaming with supercritical CO₂—Thermodynamics, foaming behaviour and mechanical characteristics. *The Journal of Supercritical Fluids*, 96, 349–358.

Fukné-Kokot, K., König, A., Knez, Ž., & Škerget, M. (2000). Comparison of different methods for determination of the S–L–G equilibrium curve of a solid component in the presence of a compressed gas. *Fluid Phase Equilibria*, 173(2), 297–310.

Hadinata, C., Boos, D., Gabriel, C., Wassner, E., Rüllmann, M., Kao, N., & Laun, M. (2007). Elongation-induced crystallization of a high molecular weight isotactic polybutene-1 melt compared to shear-induced crystallization. *Journal of Rheology*, 51(2), 195–215.

IEA (2019). *Renewables 2019*. IEA. Retrieved October 29, 2021, from <https://www.iea.org/reports/renewables-2019>.

Jones, A. T. (1963). Polybutene-1 – type II crystalline form. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Letters*, 1(8), 455–456.

Kamentsky, L., Jones, T. R., Fraser, A., Bray, M.-A., Logan, D. J., Madden, K. L., et al. (2011). Improved structure, function and compatibility for CellProfiler: modular high-throughput image analysis software. *Bioinformatics (Oxford, England)*, 27(8), 1179–1180.

Kelly, C. A., Harrison, K. L., Leeke, G. A., & Jenkins, M. J. (2013). Detection of melting point depression and crystallization of polycaprolactone (PCL) in scCO₂ by infrared spectroscopy. *Polymer Journal*, 45(2), 188–192.

- Lian, Z., Epstein, S. A., Blenk, C. W., & Shine, A. D. (2006). Carbon dioxide-induced melting point depression of biodegradable semicrystalline polymers. *The Journal of Supercritical Fluids*, 39(1), 107–117.
- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH). *Energy*, 68, 1–11.
- Natta, G., Corradini, P., & Bassi, I. W. (1960). Crystal structure of isotactic poly-alpha-butene. *Il Nuovo Cimento*, 15(S1), 52–67.
- Pasquali, I., Comi, L., Pucciarelli, F., & Bettini, R. (2008). Swelling, melting point reduction and solubility of PEG 1500 in supercritical CO₂. *International journal of pharmaceuticals*, 356(1-2), 76–81.
- Reignier, J., Gendron, R., & Champagne, M. F. (2007). Autoclave Foaming of Poly(ε-Caprolactone) Using Carbon Dioxide: Impact of Crystallization on Cell Structure. *Journal of Cellular Plastics*, 43(6), 459–489.
- Rocha, L., Velho, L., & Carvalho, P. (2002). Image moments-based structuring and tracking of objects. In L. M. G. Gonçalves & S. R. Musse (Eds.), *15th Brazilian symposium on computer graphics and image processing* (pp. 99–105). IEEE Comput. Soc.
- Sarver, J. A., Sumey, J. L., Williams, M. L., Bishop, J. P., Dean, D. M., & Kiran, E. (2018). Foaming of poly(ethylene -co- vinyl acetate) and poly(ethylene -co- vinyl acetate -co- carbon monoxide) and their blends with carbon dioxide. *Journal of Applied Polymer Science*, 135(7), 45841.
- Shi, J., Wu, P., Li, L., Liu, T., & Zhao, L. (2009). Crystalline transformation of isotactic polybutene-1 in supercritical CO₂ studied by in-situ fourier transform infrared spectroscopy. *Polymer*, 50(23), 5598–5604.
- Swaan Arons, J. de, & Diepen, G. A. M. (1963). Thermodynamic study of melting equilibria under pressure of a supercritical gas. *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas*, 82(3), 249–256.
- Takahashi, S., Hassler, J. C., & Kiran, E. (2012). Melting behavior of biodegradable polyesters in carbon dioxide at high pressures. *The Journal of Supercritical Fluids*, 72, 278–287.
- Takebayashi, Y., Sue, K., Furuya, T., Hakuta, Y., & Yoda, S. (2014). Near-infrared spectroscopic solubility measurement for thermodynamic analysis of melting point depressions of biphenyl and naphthalene under high-pressure CO₂. *The Journal of Supercritical Fluids*, 86, 91–99.
- van Krevelen, D. W., & Nijenhuis, K. t. (2009). *Properties of polymers: Their correlation with chemical structure ; their numerical estimation and prediction from additive group contributions / D.W. van Krevelen (4th, completely rev. ed. / rev. by K. te Nijenhuis)*. Amsterdam, Boston: Elsevier.
- ZAPP, J. A. (1957). Hazards of isocyanates in polyurethane foam plastic production. *A.M.A. archives of industrial health*, 15(4), 324–330.

A Digital Twin for the “District LAB” Test Facility: Background, Ideas and current Activities. An Overview.

Dennis Lottis

dennis.lottis@iee.fraunhofer.de HafenCity University, Hamburg and Fraunhofer IEE, Kassel

Abstract

District heating systems are an important element for the success of the heat transition and the associated and necessary decarbonisation of the urban heat supply. Although the expansion and transformation of district heating grids towards decentralised supply solutions based on renewable energies or waste heat is accompanied by some advantages, there are also obstacles, especially economic ones. Digitalisation measures appear to be a promising way of counteracting these. The aim of the doctoral thesis presented in this paper is to develop a solution and to test these empirically at the experimental facility “District LAB”. The methods planned to achieve these goals are primarily the creation of a simulation model that contains all the essential thermo-hydraulic components and control structures of the test facility, as well as the transfer of this model into a digital twin that has access to its hardware. Furthermore, a solution regarding the predictive optimisation of the operation strategy is to be developed and subsequently tested. In the following, the planned methods and work steps are presented in detail and the first results of theoretical investigations are shown.

Introduction

Current scientific studies show that the decarbonisation of the heating sector in Germany can only be successful with a nationwide expansion and simultaneous transformation of district heating grids (Gerhardt et al., 2019). The goal of this transformation is to transform the grids into district heating (DH) grids supplied with renewable energy, which are characterised by e.g. increased energy efficiency and low temperature levels. There are a number of measures for implementation, such as the conversion of generation plants to renewable technologies or adapted operation modes (Lund et al., 2014). However, there are also obstacles such as costs or regulatory framework conditions. Against this background, approaches of digitalisation, such as model-based planning of grid operation and optimisation through predictive methods e.g. machine learning (ML) algorithms, appear promising. Some reasons are that they are associated with low costs, provide efficiency gains and create increased transparency for further measures (Schmidt, 2020). In particular, the use of digital twins (DT), based on the definition of (Rasheed et al., 2020), seems promising, as this enables the targeted coupling of software and hardware.

Research is required regarding the question of how the transformation towards decentralised and multivalent low-temperature heating networks can be supported with the help of the DT and ML method. This need for research also became apparent during a literature review on the combined use of DT and ML, especially in the context of DH. The most important findings of this research are:

- A large number of theoretical studies exist, especially in the context of ML (Ntakolia et al., 2021).
- There are some experimental applications in the context of the EU Horizon 2020 programme (Atta & Birk, 2018; Moustakidis et al., 2019). However, these investigations are limited to conventional DH grids with a centralized structure.
- No experimental investigations were found on multivalent heating grids with decentralised volatile feed-in and feed-out of low-temperature heat and thus no investigations of transformation measures are mentioned.

The lack of studies of this kind was then taken as an opportunity to initiate a doctoral project with the working title: “Predictive optimisation of the operating strategy of decentralised and multivalent

district heating systems by using a digital twin of the “District LAB” test facility”. This takes place in the context of the publicly funded research project “UrbanTurn”, which is led by the Department of Thermal Energy System Technology of Fraunhofer IEE Kassel, and is supervised by the Department of Technical Infrastructure Management at HCU Hamburg. The planned methodological approach and some first results will be presented in this paper.

Methods

The main method to be used in the work is the experimental investigation supported by simulations. The investigations are to be carried out at the experimental facility for district heating applications “District LAB” of the Fraunhofer IEE in Kassel (Kallert et al., 2021). For this, however, it is first necessary to equip the flexible heating network of the test facility with the corresponding digital infrastructure. This is to be done within the framework of the PhD project presented here. The following working points are planned:

- Design software part of DT: Software implementation through mathematical modelling of the thermo-hydraulic state changes in the individual components and the overall system. In the course of previous analyses, MATLAB/Simulink proved to be a suitable software due to advantages in implementation. On this basis, the Carnot toolbox (Wemhöner et al., 2000) was selected as a suitable extension, as it contains most of the main component models needed, e.g. heat exchangers, heat pumps, pipes and pumps. Some of these component models will be validated and proven with data from the manufactures as a part of the work.
- Carrying out simulations of different grid configurations, such as renewable-based volatile prosumers in the heating grid.
- Create DT through implementation of the software in the test facility via the software interface (MATLAB/Simulink Coder) to the hardware interface (Beckhoff) of the District LAB. This should enable the readout and storage of the measured data from the sensors and the control of the actuators in real time. According to the definition of (Rasheed et al., 2020), this step creates the DT.
- Carrying out tests with the District LAB to ensure functionality and subsequent collection of measurement data.
- Validation of the DT using the measured data for the purpose of checking the previously determined calculation results and, if necessary, adjustment of the DT to reduce deviations.
- Creation of time series forecasts: Creation and integration of a sub-model to carry out weather-based time series forecasts for demands and availabilities of heat. The starting point for this is findings on ML methods from the literature (Ntakolia et al., 2021).
- Optimisation of the operation management strategy: Development and implementation of an algorithm for the predictive optimisation of the operation strategy within the framework of a “unit commitment” optimisation problem. For the software implementation, it is planned to start with a linear model (Mixed Integer Linear Programming (MILP)) (Tahanan et al., 2015) and to extend this successively. For example, the aim is to expand it to a multi-node system, as this enables the spatial separation of generators, consumers and storage units.
- Conducting tests in the District LAB to quantify the potential of developed solutions (which could be characterised as Model-Predictive-Control (MPC)) in different grid configurations compared to conventional control strategies.
- Interpretation and critical evaluation of the results

Results

In the course of the doctoral project, the first partial results have already been produced. A selection, namely the validation of some component models as well as a simulation model for the test scenario “conventional heating network”, will be explained in the following.

Validation of component models

So far, the Carnot Toolbox (Release 7.1, © 2020 Solar Institut Juelich) models for heat pumps and pumps have been compared with the manufacturers' characteristic diagrams with regard to their steady-state behaviour. This comparison showed operation points with good agreement, but also working points with bad agreement. For the last mentioned some potential for improvement of the component models with regard to the specific application was found. As an example, Fig. 1 shows the comparison of manufacturer specifications and the corresponding calculation results. These are pressure difference mass flow curves at different speeds of a pump used in the District LAB. The figure shows the characteristic curves for speeds of 100 % ... 40 % according to the manufacturer's data sheet and according to the calculation with the "Pump_Main" model of the Carnot-Toolbox. It can be seen that the simulation results match the manufacturer's data well at high speeds. However, this changes with decreasing speeds. Here, increasing offsets of the curves can be observed, which show an inversely proportional behaviour. The lower the speeds, the greater the errors, although the shape of the curves is well reproduced at all operating points. Since lower speeds are also to be expected in the District LAB, the equations of the original model were supplemented with terms for better consideration of the speed dependency. These "improved" simulation results can also be seen in Fig. 1. Here, good matches between the calculation results and the manufacturer's specifications can be seen for all speeds.

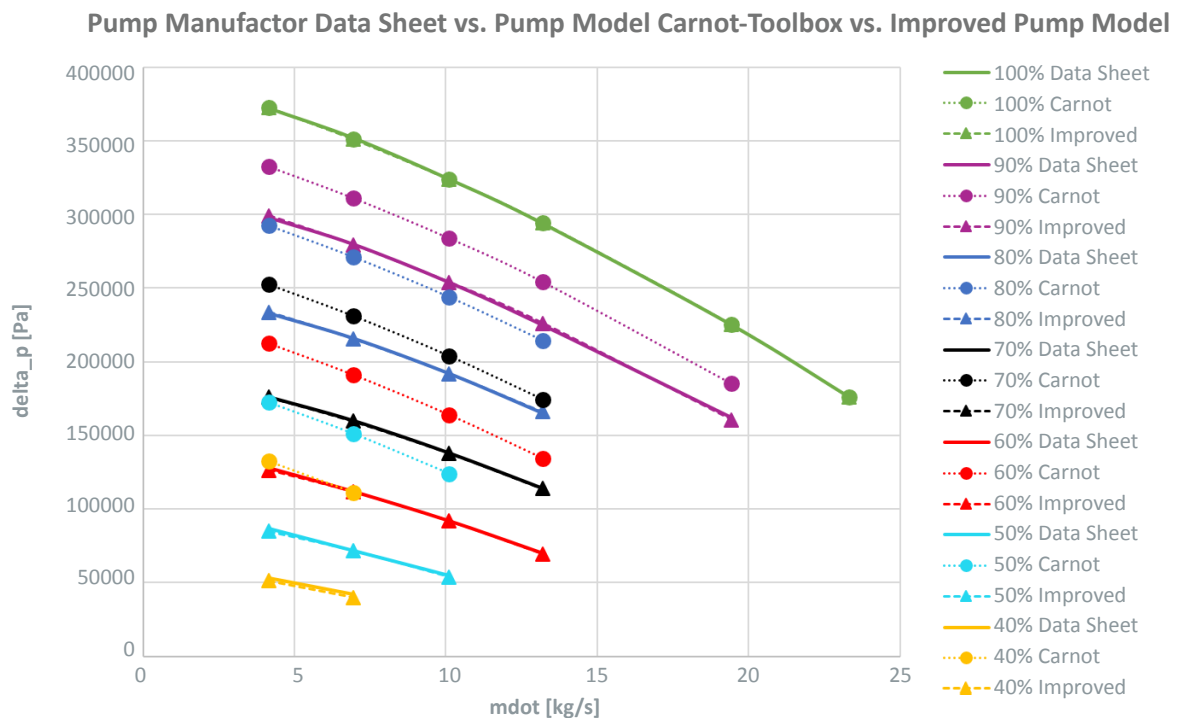


Fig. 1: Result of Pump Validation (own representation)

The identified improvements were subsequently implemented and, thus, optimised calculation models were created for the specific application. It is planned to carry out further investigations with regard to the transient behaviour. However, this will require further measurement data from the manufacturers. Furthermore, it is planned to check the models for pipelines and heat exchangers in a similar form on the basis of measurement data.

Simulation model for the "conventional heating network" scenario

Furthermore, a first simulation model for the whole system for the "conventional heating network" scenario of the District LAB test facility has already been created. The District LAB essentially consists of a building that houses the system technology (central heat sources and sinks, as well as decentralised hardware-in-the-loop (HIL) units), a pipe test section for carrying out mechanical tests and a flexible heat network (District Heat Circuit (DHC)) for system tests, which consists of several underground pipe coils. These pipe coils connect the three HIL units with each other and allow heat to be fed into or extracted from the DHC at any temperature level in a decentralised

and defined manner. To make this possible, the HIL units consist of separate hydraulic circuits and are connected to the DHC via heat exchangers (HEX). Since the District LAB does not have a supply contract, heat is dissipated via another HEX into the cold circuit (CC), which is connected to the central heat sink. Heat is fed into the DHC via the hot circuit (HC), which is connected to the HILs via another HEX. For more details on the structure and performance spectrum of the test facility, please refer to (Kallert et al., 2021).

In the scenario mentioned, heat from a central generation unit is fed into DHC at a temperature level of 90 °C- 140 °C. The HIL units represent consumers, such as residential buildings, which withdraw the heat from the DHC in a defined form which should represent the heating system of a residential buildings. Accordingly, a flow temperature of 70 °C with a spread of 15 °C is assumed here. This corresponds to the temperatures that are common in conventional heating circuits (Frederiksen & Werner, 2013). The extraction power can be set in a generic and time-variable way for each HIL unit. The CC works on a temperature level of approx. 20 °C. This basic test configuration and other specifications can be found in Fig. 2.

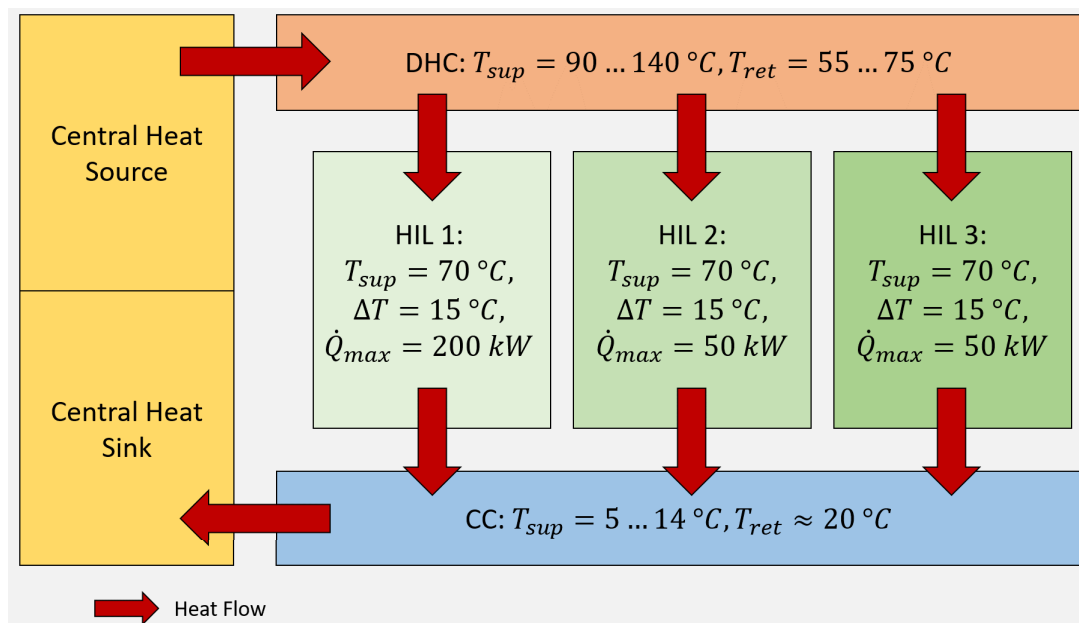


Fig. 2: Schematic representation of the test configuration in the “conventional heating network” scenario (own representation)

Each of the structures shown in Fig. 2 consist of several thermo-hydraulic components that have been mapped to create the complete simulation model of the system. Tab. 1 provides an overview of the thermo-hydraulic components that make up the structures. In addition, the dimensioning of the components is given. It should be noted that the planning process for the test facility has not yet been completed and that these are partly assumptions and initial designs.

In addition, the control structures have also been included in the simulation model. These are based on the specifications of the components to be controlled. The developed control structures can be found in the following Tab. 2. There, the components that are controlled in the model are assigned to their control and manipulated variables. In addition, the type of control used is described. The tuning of the PI-controllers has been done with the Ziegler–Nichols method (Ziegler & Nichols, 1942).

Structure	Components	Dimensioning
Central Heat Source	Boiler	Nominal Heating Power: 300 kW
	Thermal Storage (Hot)	Storage Volume: 15 m ³
	Pump	Nominal Engine Power: 0.2 kW
DHC	Pipes (HIL 1)	2 x DN80/180, Length: 80 m
	Pipes (HIL 2 & 3)	4 x DN65/160, Length: 80 m
	Pump	Nominal Engine Power: 0.8 kW
HIL 1	Heat Exchanger (DHC)	Heat Transfer Coeff.: 50 kW/K
	Valve (DHC)	Flow Coefficient: 100 m ³ /h
	Pump	Nominal Engine Power: 0.4 kW
	Heat Exchanger (CC)	Heat Transfer Coeff.: 50 kW/K
HIL 2&3	Three-Way-Valve (CC)	-
	Heat Exchanger (DHC)	Heat Transfer Coeff.: 12.5 kW/K
	Valve (DHC)	Flow Coefficient: 63 m ³ /h
	Pump	Nominal Engine Power: 0.2 kW
CC	Heat Exchanger (CC)	Heat Transfer Coeff.: 12.5 kW/K
	Three-Way-Valve (CC)	-
	Pipes (HIL 1)	2 x DN80/180, Length: 10 m
	Pipes (HIL 2 & 3)	4 x DN65/160, Length: 10 m
Central Heat Sink	Pump	Nominal Engine Power: 2.3 kW
	Central Heat Pump	Nominal Cooling Power: 300 kW
	Thermal Storage (Cold)	Storage Volume: 19 m ³
	Recooling Plant	Nominal Cooling Power: 550 kW
	Pump	Nominal Engine Power: 5.3 kW

Tab. 1: Allocation of thermo-hydraulic components and their dimensioning

Component	Controlled Variable	Manipulated Variable	Control Type
Central Heat Pump	Cold Storage Temperature	On-Off Signal	Two-Point Control
Boiler	Hot Storage Temperature	On-Off Signal	Two-Point Control
DHC Pump	Pressure Difference DHC	Pump Speed	PI Control
DHC Valve HIL	Heating Power taken from DHC	Valve opening	PI Control
HIL Pump	-	Pump Mass Flow	Feed Forward Control
CC Valve HIL	Return Temperature within HIL	Valve opening	PI Control

Tab. 2: Overview of the control structures used

Fig. 3 below shows some selected results of the described simulation model over a time of 20,000 seconds. Four plots with different focus are shown. The following observations can be made: The first plot shows the target and actual heat outputs that each of the three HIL units take from the DHC. The set points are 100 kW, 45 kW and 40 kW for HIL 1, 2 and 3 respectively. It is clear that the actual outputs reach and then maintain their set points after different transient behaviour. The second plot shows the limit values and the actual value of the supply temperature as well as the return temperature of the DHC. It can be seen that the supply temperature is kept between the limits of 97.5 °C and 102.5 °C after an initial heating process. The return temperature reaches a steady state of about 55 °C. The third plot shows the inlet temperatures of the three HIL units.

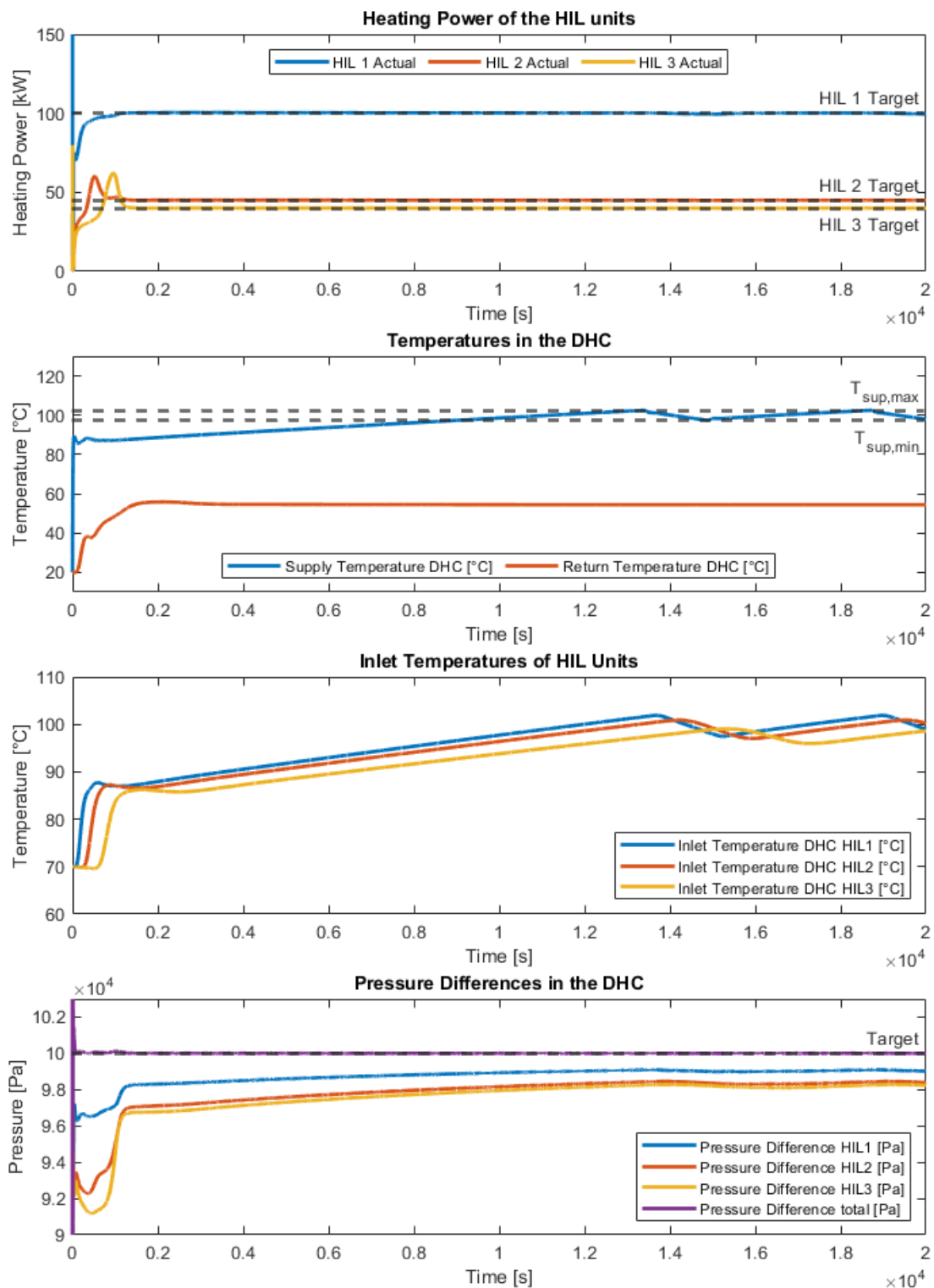


Fig. 3: Selection of some simulation results (own representation)

First of all, the height of the peaks after heating up at about second 15,000 shows the influence of the different heat losses of the flexible heat network. In addition, the phase shift between the HIL units can be seen from the curves. Both effects are the result of the different distances that the fluid has to cover from the central generation unit to the respective HIL units. The fourth plot shows the pressure differences of the HIL units as well as the desired and actual values of the total pressure difference at the primary pump. Here, the desired total pressure difference can be set and maintained after a short time. Furthermore, the different transient behaviour of the HIL units is also evident here. It results from the phase shift already described due to the pipelines and the interaction between the HIL units.

Finally, it should be noted that a simulation model for the transient calculation of the study scenario “conventional heating network” has been developed. This is to be expanded in the future for the simulation of other scenarios (e.g. low-temperature networks with prosumers). In addition, it is intended to work out algorithms for optimising the operating strategies in the form of a unit-commitment optimisation problem.

Conclusion

In this paper, the background for a doctoral thesis on the identification and testing of technical solutions in the context of digitalisation in relation to district heating was presented. In addition, the empirical investigation of predictive optimisation approaches at the District LAB test facility was highlighted as an essential method. For this purpose, a simulation model is to be set up and transformed into a digital twin by coupling it with the test facility. Furthermore, it is planned to apply demand and availability forecasts with the help of machine learning methods in order to calculate the best possible operating strategy on the basis of the forecasts. This overall system will then be tested in the District LAB.

Furthermore, some first results were presented. First, it was described that some of the components intended for use in the simulation model were subjected to validation. This showed good agreement between simulation and manufacturer data in some cases, but also areas with large deviations. Using the example of the pump model, it was shown that the deviations can be reduced by adapting the models for the application case of the District LAB.

Subsequently, the simulation model for the entire system in the scenario “conventional heating network” was discussed. The scenario was explained, the dimensioning of the thermo-hydraulic components was discussed and the control structures used were presented. Eventually, selected simulation results were shown and the further work steps were explained.

Acknowledgement

The author would like to thank the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy for funding the UrbanTurn research project (Founding Code: 03EN3029). In addition, the author would like to thank Fraunhofer IEE and HCU for their ongoing support and the supervising of the presented PHD project.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literature

Atta, K. T., & Birk, W. (2018). Utilizing generic consumer modeling in planning and optimization of district heating and cooling systems. *Proceedings of the 21st Nordic Process Control Workshop*, 125. DiVA.

Frederiksen, S., & Werner, S. (2013). *District heating and cooling*. Studentlitteratur.

Gerhardt, N., Ganal, I., Jentsch, D. M., Rodriguez, D. J., Stroh, K., & Buchmann, E. K. (2019). Entwicklung der Gebäudewärme und Rückkopplung mit dem Energiesystem in -95% THG Klimaszenarien: Teilbericht im Rahmen des Projektes: Transformationspfade im Wärmesektor – Betriebs- und volkswirtschaftliche Betrachtung der Sektorkopplung mit dem Fokus Fernwärme mit hohen Anteilen konventioneller KWK-Erzeugung und Rückkopplung zum Gesamtenergieversorgungssystem: FKZ 03MAP359 [Zwischenbericht]. https://www.iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/2019/2019_Feb_Bericht_Fraunhofer_IEE_-_Transformation_Waerme_2030_2050.pdf

Kallert, A., Lottis, D., Shan, M., & Schmidt, D. (2021). New experimental facility for innovative district heating systems—District LAB. *Energy Reports*, 7, 62–69. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.09.039>

Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH). *Energy*, 68, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>

Moustakidis, S., Meintanis, I., Halikias, G., & Karcianas, N. (2019). An Innovative Control Framework for District Heating Systems: Conceptualisation and Preliminary Results. *Resources*, 8(1), 27. <https://doi.org/10.3390/resources8010027>

Ntakolia, C., Anagnostis, A., Moustakidis, S., & Karcianas, N. (2021). Machine learning applied on the district heating and cooling sector: A review. *Energy Systems*. <https://doi.org/10.1007/s12667-020-00405-9>

Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital Twin: Values, Challenges and Enablers From a Modeling Perspective. *IEEE Access*, 8, 21980–22012. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>

Schmidt, D. (2020). Digitalisation of District Heating and Cooling. *Euroheat & Power*, 11/2020, 28–30.

Tahanan, M., van Ackooij, W., Frangioni, A., & Lacalandra, F. (2015). Large-scale Unit Commitment under uncertainty. *4OR*, 13(2), 115–171. <https://doi.org/10.1007/s10288-014-0279-y>

Wemhöner, C., Hafner, B., & Schwarzer, K. (2000). Simulation of Solar Thermal Systems with Carnot Blockset in the Environment MATLAB® SIMULINK®. 3. ISES European solar congress, Copenhagen, Denmark. <https://scholar.google.com/scholar?q=Simulation%20of%20solar%20thermal%20systems%20with%20CARNOT%20blockset%20in%20the%20environment%20Matlab%20Simulink>

Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *ASME Transactions*, v64, 759–768.

Wärmeverluste von Kunststoffmantelrohrverbindungen

Violeta Madan// Marcus Illguth
violeta.madan@hcu-hamburg.de
marcus.illguth@hcu-hamburg.de

HafenCity University, Hamburg

Kurzfassung

Die Berechnung der Wärmeverluste erfolgt in der Fernwärmep Praxis nach der DIN EN 13941-1 Anhang D und mit den vom Hersteller angegebenen Kennwerten. Mit diesen Methoden bestimmte Wärmeverluste weichen aufgrund der enthaltenen Annahmen häufig von den im Betrieb gemessenen Wärmeverlusten ab, sodass für eine genaue Bestimmung eine kosten- und zeitaufwändige Modellierung des Systems erforderlich ist. In der Berechnung der Wärmeverluste in der DIN EN 13941-1 werden die Rohrverbindungen, die bei diskontinuierlich hergestellten Systemen etwa alle 6-12 Meter montiert werden müssen, nicht berücksichtigt. In einer Studie an der HCU wurde ein Probekörper mit einer Schrumpfmuffenverbindung auf 120 °C temperiert und die Temperatur an der Mantelrohrerfläche mit einer Wärmebildkamera gemessen, um den Einfluss der Rohrverbindung auf die Wärmeverluste des Systems abschätzen zu können. Für das untersuchte System sind die Wärmeverluste der Rohrleitung rund 15 % höher als die Wärmeverluste der Muffenverbindung. Bei Muffenverbindungen mit Querschnittsaufweitung werden die Wärmeverluste durch die Berechnung nach DIN EN 13941-1 überschätzt, wenn die Schaumeigenschaften der Verbindung denen des geraden Rohres entsprechen. Die Differenz der Wärmeverluste hängt in diesem Fall maßgeblich von dem Durchmesserunterschied zwischen dem Rohr und der Verbindung ab. Aufgrund der abweichenden Randbedingungen bei erdverlegten Fernwärmeleitungen und dem gegenseitigen thermischen Einfluss von Vorlauf und Rücklauf, sind die Ergebnisse nur bedingt auf erdverlegte Systeme übertragbar.

Einleitung

Die Wärmeverluste sind ein wichtiges Element für die Auslegung und Effizienz von Fernwärmesystemen. Die Minimierung der Wärmeverluste wird in der Fernwärmebranche angestrebt, um energetische und wirtschaftliche Einsparungen zu erzielen. Die Berechnung von Wärmeverlusten erfolgt in der Praxis nach der EN 13941-1 Anhang D (DIN EN 13941-1) oder mit den vom Hersteller angegebenen Wärmeverlustkennwerten (Isoplus 2011, Logstor 2020). Die Rohrverbindung, die in der Praxis alle 6-12 Meter manuell hergestellt werden muss, wird bei der Wärmeverlustberechnung nach der EN 13941-1 nicht berücksichtigt.

Die Rohrverbindung ist eine kritische Systemkomponente an der gemäß der AGFW Schadensstatistik die meisten Schäden registriert werden. Eine regelmäßige Qualitätsprüfung der Rohrverbindung ist daher wichtig für die Gewährleistung einer sicheren Infrastruktur (Grage et al. 2013). Die Qualitätsprüfung von Mantelrohrverbindungen wird in der EN 489-1 (DIN EN 489-1) beschrieben. Die Schaumprüfung erfolgt nach EN 253 (DIN EN 253).

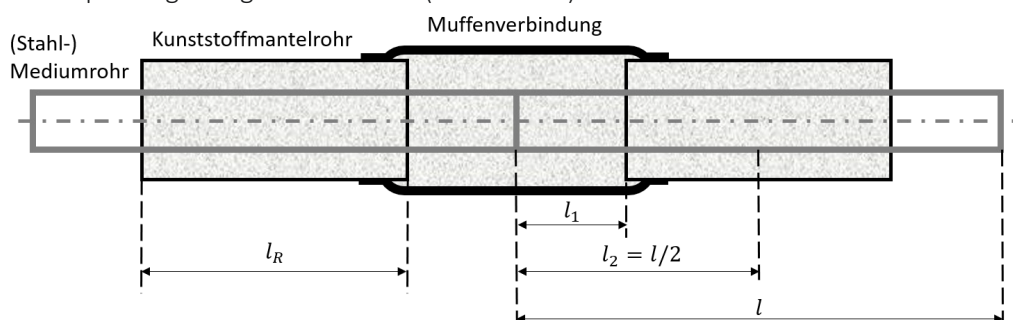


Fig. 1: Längsschnitt durch ein Kunststoffmantelrohr mit Muffenverbindung

Bei den flexiblen Rohrsystemen, die seit ca. 30 Jahren auf dem Markt sind, werden Rohrlängen bis zu 100 Metern kontinuierlich hergestellt, sodass der Anteil der Rohrverbindungen im Gesamtsystem unter ein Prozent fällt. Werksmäßig hergestellte (starre) Kunststoffmantelrohre werden in der Regel in Längen von $l = 6$ Meter oder $l = 12$ Meter produziert (Tödter 2020). Die Länge der Rohrenden ohne Wärmedämmung l_1 wird in der EN 253 mit 150 bis 250 Millimetern angegeben, sodass der Anteil der Verbindung im Gesamtsystem bis zu $l_1/l_2 \approx 8\%$ betragen kann. Die Mediumrohre werden an der Verbindungsstelle verschweißt oder verpresst, sodass die Muffenverbindung nachträglich ausgeschäumt werden muss. In der Regel wird ein Überwachungs- und Fehlerortungssystem eingesetzt, damit Feuchtigkeitseintritt frühzeitig erkannt und Folgeschäden wie Korrosion an Rohrleitungen, Betriebsunterbrechungen und Verlust der Schaumqualität vermieden werden. Bei dem häufig angewendeten Nordischen Überwachungssystem wird Feuchtigkeitseintrag durch die Messung des ohmschen Widerstands zwischen einem Drahtpaar und dem Mediumrohr erkannt.

Als Dämmmaterial wird Polyurethan (PUR)-Hartschaum eingesetzt. Bei der Mantelrohrverbindung wird zwischen Schrumpf- und Schweißmuffen unterschieden. Bei der Schrumpfmuffenverbindung wird der PE(X) Muffenkörper mit einer Gasflamme abgeschrunpft und mit einem Schmelzkleber adhäsiv an die Rohrleitung gebunden. Bei den Muffentypen wird weiterhin zwischen der Abdichtung vor Dämmung (AvD) und der Abdichtung nach Dämmung (AnD) unterschieden (BFW 2018). Eine Übersicht der am häufigsten verwendeten Muffensysteme ist im AGFW-Arbeitsblatt FW 401 Teil 6 gegeben (FW 401 T6). Die manuelle Herstellung der Muffenverbindung muss mit hoher Präzision durchgeführt werden, da Mängel wie Lunkerbildung, ungleichmäßiges Durchwärmen, Nichteinhaltung der Aushärtungszeiten oder Feuchtigkeit zu mechanischen Schwachstellen im Rohrverbund führen können. Diese können sich auch negativ auf die Wärmeleitung auswirken. Während die mechanische Belastbarkeit der Rohrverbindung bereits in vielen Veröffentlichungen thematisiert wurde (Besier et al. 2012, Grage et al. 2013, Weidlich 2015), besteht bei der Untersuchung von Wärmeverlusten von Muffenverbindungen noch Forschungsbedarf. In der nachfolgenden Untersuchung wird die Differenz der Wärmeverluste zwischen der Rohrleitung und der Muffenverbindung berechnet. Die Einflussfaktoren auf die Wärmeverluste der Rohrverbindung und die möglichen Auswirkungen auf die Wärmeverluste im Fernwärmenetz werden diskutiert.

Methodisches Vorgehen

Die Wärmeverluste der Rohrleitung und der Verbindung wurden basierend auf einer Messung der Mantelrohrtemperatur und der Materialeigenschaften berechnet. Für die Analyse der Schaumqualität als Einflussfaktor für die Wärmeleitung wurden jeweils die Schaumdichte und die Zellengröße nach EN 253 bestimmt.

Für die Temperaturmessung wurde ein 2,5 Meter langes Kunststoffmantelrohr mit einer 0,4 Meter langen Aussparung in der Mitte zur Verfügung gestellt. Die Stahlrohre waren bei der Anlieferung bereits verschweißt. Die Verbindung zwischen den Mantelrohren wurde an der HafenCity Universität (HCU) vor Ort hergestellt. Die Muffe ist eine vernetzte Schrumpfmuffe, wobei die Abdichtung nach der Dämmung erfolgt ist (Typ AnD). Die Querschnittsaufweitung bei diesem Muffentyp ist geringer als bei den Muffen, deren Abdichtung vor der Dämmung erfolgt (Typ AvD). Zur Quantifizierung der Muffenform wird der Formfaktor ξ als Parameter verwendet, der dem Quotienten aus dem Durchmesser der Muffe und dem Durchmesser der Rohrleitung entspricht. Der Formfaktor des untersuchten Muffensystems beträgt $\xi = 1,1$. Die Abmessungen des Probekörpers, der Muffentyp und die Materialien werden in der Tab. 1 festgestellt.

Zur Einstellung einer konstanten Mediumrohrtemperatur, wurde der Probekörper über 48 Stunden mit einem Prozessthermostat, das mit Silikonöl als Medium arbeitet, auf 120 °C temperiert. Danach wurde die Oberflächentemperatur am Rohrmantel und an der Muffenoberfläche mit einer FLIR B360 Wärmebildkamera gemessen. In dem Messbereich von -20 °C bis 120 °C liegt die Meßgenauigkeit der Absoluttemperatur bei 2 K (FLIR 2008). Der Emissionsfaktor wurde bei der Messung konstant auf $\epsilon=0,95$ eingestellt und entspricht dem Emissionsfaktor von Kunststoffmantelrohren (Tödter 2020). Der Probekörper wurde in einer Holzkiste frei gelagert, sodass der Probekörper während der Temperierung und Messung von allen Seiten von Luft umgeben war, wobei durch die Kistenwände der konvektive Wärmetransport verringert wurde.

	Länge in mm	Durchmesser in mm	Typ	Material
Probekörper	2 500	DN 80/160		
Rohrleitung	$2 \cdot l_R \approx 1\,600$	160	Kunststoffmantelrohr	Mediumrohr: Stahl P235GH PUR-Dämmung: 42% Polyol/58% Isocyanat Mantelrohr: PEHD
Verbindungs-muffe	740	146	Vernetzte Schrumpfmuffe, Abdichtung nach Dämmung	Mediumrohr: Stahl P235GH PUR-Dämmung: 42% Polyol/58% Isocyanat Muffe: vernetztes PEHD

Tab. 1: Geometrische Abmessungen und Materialien des Probekörpers

Durch das nachträgliche Ausschäumen der Mantelrohrverbindung wurden unterschiedliche Schaumeigenschaften der Rohrleitung und der Muffe erwartet. Um den Einfluss der Schaumeigenschaften auf die sich einstellende Mantelrohrtemperatur zu untersuchen, wurden Schaumproben aus der Rohrleitung und der Verbindung entnommen und die Zellengröße und Schaumdichte nach EN 253 bestimmt. Zur Bestimmung der Schaumdichte wurden die quaderförmigen Schaumproben mit einem digitalen Messschieber (DIN 862) vermessen und die Masse mit einer Analysewaage (ISO 9001) bestimmt. Die Zellengröße wurde durch das Auszählen von Zellen entlang einer Länge von 10 Millimetern, mittig in der Dämmung gelegen, in radialer Richtung bestimmt. Jedes Ergebnis wurde gemäß EN 253 als Durchschnittswert von mindestens drei Messungen berechnet.

Stand des Wissens

In der Praxis wird vom Hersteller der Wärmedurchgangskoeffizient oder der längenbezogene Wärmeverluststrom in Abhängigkeit des Rohrdurchmessers, der Dämmklasse und der Mitteltemperatur angegeben (Isopius 2011, Logstor 2020). Der längenbezogene Wärmeverluststrom (\dot{q}) ist ein Kennwert für den radialen Wärmeverlust zwischen dem im Rohr fließenden Medium und dem äußeren Umgebungsmedium. Der längenbezogene Wärmeverluststrom ist definiert als Quotient aus dem radialen Wärmeverluststrom (\dot{Q}) pro Rohrlänge l und hat die Einheit W/m:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{l} \quad \text{Gleichung 1}$$

Bei der an der HCU durchgeführten Temperaturmessung wurde die Temperatur an der Oberfläche eines Kunststoffmantelrohres (KMR) und einer Muffenverbindung gemessen. Das KMR System besteht aus dem Stahlmediumrohr, der PUR-Schaum-Dämmung und dem PEHD Mantelrohr und kann als dreischichtiger Hohlzylinder, wie in Fig. 2 dargestellt, beschrieben werden. Bei dieser Modellvorstellung wird nur die Wärmeleitung von der Innenwand des Stahlrohres zu der Außenwand des Mantelrohres betrachtet. Konvektiver Wärmeübergang durch das strömende Medium und außen an der Luft wird vernachlässigt.

Der Wärmestrom durch einen Hohlzylinder mit 3 Schichten kann aus dem Fourier'schen Gesetz hergeleitet werden (Wagner, 2011):

$$\dot{q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (T_1 - T_4)}{\frac{\ln(r_2) - \ln(r_1)}{\lambda_{\text{Stahl}}} + \frac{\ln(r_3) - \ln(r_2)}{\lambda_{\text{PUR}}} + \frac{\ln(r_4) - \ln(r_3)}{\lambda_{\text{Mantel}}}} \quad \text{Gleichung 2}$$

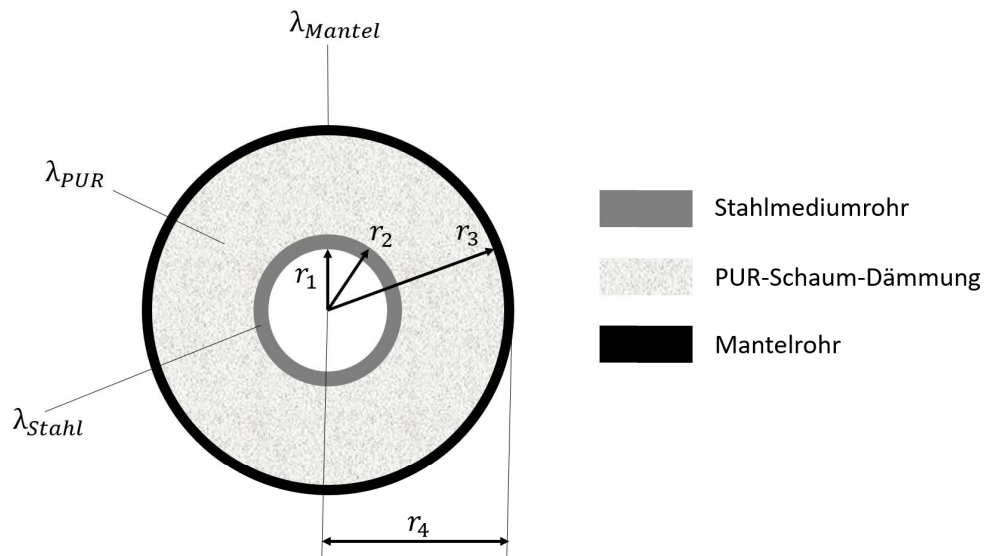


Fig. 2: Querschnitt eines Kunststoffmantelrohres

Mit

$\lambda_{Stahl, PUR, Mantel}$ = Wärmeleitfähigkeit des Stahls, des PUR-Schaumes und des Rohrmantels in $W/(m \cdot K)$
 T_i = Temperatur an der Position i (s. Fig.1) in $^{\circ}C$
 r_i = Radius an der Position i (s. Fig.1) in m .

Die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung hat mit der Temperaturdifferenz den größten Einfluss auf die Wärmeverluste. Die Wärmeleitfähigkeit wird in der Regel vom Hersteller bei einer mittleren Temperatur von $T_m = 50^{\circ}C$ angegeben, die nach Gleichung 3 berechnet werden kann.

$$T_m = \frac{(T_1 + T_4)}{2} \quad \text{Gleichung 3}$$

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit im gealterten und nicht gealterten Zustand wird in der EN 253 beschrieben. Neben der Temperatur wird die Wärmeleitfähigkeit vor allem von den Schaumeigenschaften beeinflusst (Gibson et al. 1997).

Der Fernwärmeversorger oder-planer legt die Wärmenetze in der Praxis mit den Herstellerkennwerten aus, wenn das Rohrsystem bekannt ist. Eine Alternative ist die Berechnung der Wärmeverluste nach der DIN EN 13941-1 Anhang D. In der EN 13941-1 wird der Ansatz von Wallentén übernommen, wonach der Wärmeverlust als Summe aus einem symmetrischen und antisymmetrischen Anteil approximiert wird (Wallentén 1991). Eine Zusammenfassung und kritische Bewertung der Modelle zur Berechnung der stationären Wärmeverluste für erdverlegte Fernwärmesysteme wurde in einer aktuellen Studie durchgeführt (Madan et al. 2021). Der gesamte Wärmeleitwiderstand ergibt sich bei erdverlegten Systemen als Summe des Wärmeleitwiderstandes des Erdbodens, des Wärmeleitwiderstandes der Dämmung und des Wärmeleitwiderstandes aufgrund der Interaktion der verlegten Rohrpaare. Für die Berechnung von Wärmeverlusten von frei verlegten Fernwärmeleitungen gibt es keine Norm. Die Wärmeverluste von Freileitungen können nach der Theorie des Wärmedurchgangs für eine gekrümmte Wand, jeweils für das Vorlauf- und das Rücklaufrohr berechnet werden. Eine Interaktion der Rohrpaare ist aufgrund der Luftschicht zwischen den Rohren nicht zu erwarten (Weidlich 2018). Bedingt durch die höhere Wärmeleitfähigkeit des Erdbodens, wärmt sich der Bereich um ein erdverlegtes Fernwärmerohr herum auf, sodass das Temperaturgefälle zwischen Medium und umgebenden Boden geringer ist als zwischen Medium und Luft. Dieser Prozess führt dazu, dass die Wärmeverluste im Erdreich bei sonst konstanten Parametern in der Theorie geringer sind als an der Luft.

Ergebnisse

Die Temperatur an der Mantelrohroberfläche der Rohrleitung und der Muffe wurde mit der Wärmebildkamera an sechs Messstellen gemessen. Die Wärmekamerabilder sind in den Fig. 3-6 dargestellt. Der Emissionsfaktor wurde bei allen Infrarot(IR)-Bildern auf $\epsilon = 0,95$ eingestellt und die Messdistanz beträgt ca. 1,5 Meter. Die IR-Bilder sind chronologisch von links (Fig. 3) nach rechts (Fig. 6) sortiert. Es ergibt sich eine Temperaturverteilung über die Länge des Probekörpers mit einer maximalen Temperaturdifferenz von rund drei Kelvin zwischen der Rohrleitung (32.1 °C) und der Muffe (29.0 °C). Während die Temperaturdifferenz zwischen der Rohrleitung auf der linken Seite rund 2 K beträgt, ist diese auf der rechten Seite mit rund 0.5 K vernachlässigbar gering. Die Berechnung wurde mit den in Fig. 3 gemessenen Temperaturen durchgeführt. Die erkennbaren Hotspots mit einer Temperatur von ca. 34 °C sind die in die Dämmung eingebetteten Halterungsvorrichtungen für das Überwachungssystem. Die Hotspots wurden bei der Berechnung der Wärmeverluste vernachlässigt. Die Messung der Temperaturen und der Temperaturdifferenzen ist fehlerbehaftet, so können sich durch eine unterschiedliche Oberflächenrauigkeit des Mantelrohres und des Muffenkörpers Messabweichungen ergeben. Weiterhin ist die Absoluttemperatur zwar mit 2 K fehlerbehaftet, jedoch hat dies keine Auswirkungen auf die relativen Temperaturunterschiede. Eine Variation der Temperatur um 2 Kelvin in beide Richtungen hat eine maximale Änderung des Wärmeverlustes von 0,7 W/m ergeben.

Basierend auf den Messungen mit der Wärmebildkamera lässt sich mit den Materialdaten und Abmessungen des Probekörpers der längenbezogene Wärmeverluststrom nach Gleichung 2 berechnen. Die Berechnungsparameter und Ergebnisse der Wärmeverlustberechnung werden in der Tabelle 2 zusammengefasst. Die geometrische Position der Parameter in der Tabelle 2 ist in der Abbildung 1 definiert. Aufgrund der Messunsicherheit bei der Temperaturmessung und der

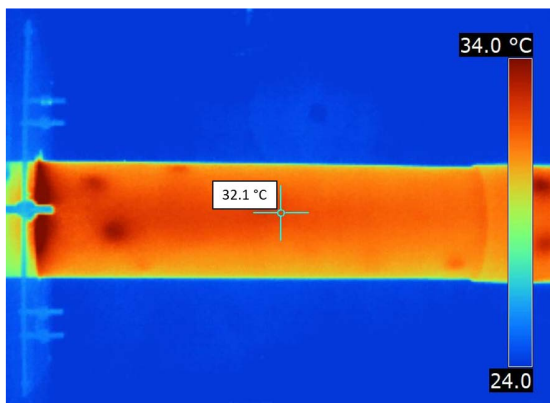


Fig. 3: Messung der Temperatur am Mantelrohr der Rohrleitung mit der Wärmebildkamera.

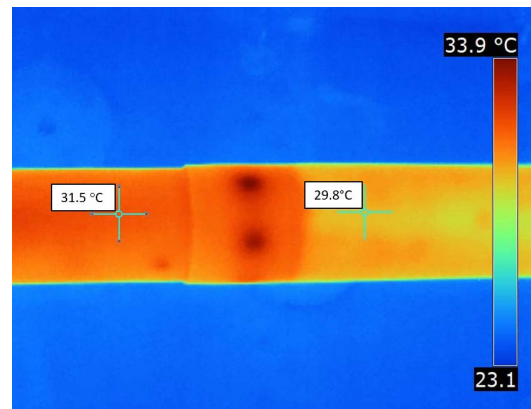


Fig. 4: Messung der Temperaturen am Übergang Rohrleitung-Muffe (links) mit der Wärmebildkamera.

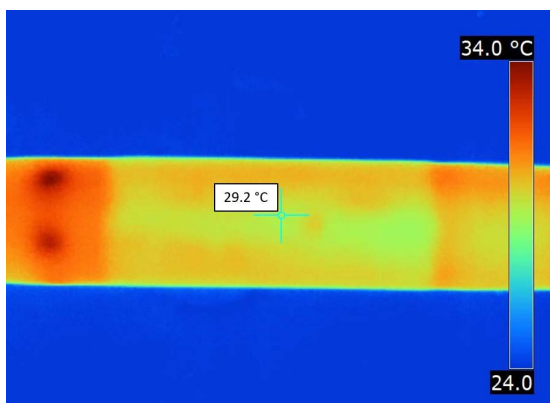


Fig. 5: Messung der Temperaturen in der Mitte der Muffenverbindung mit der Wärmebildkamera.

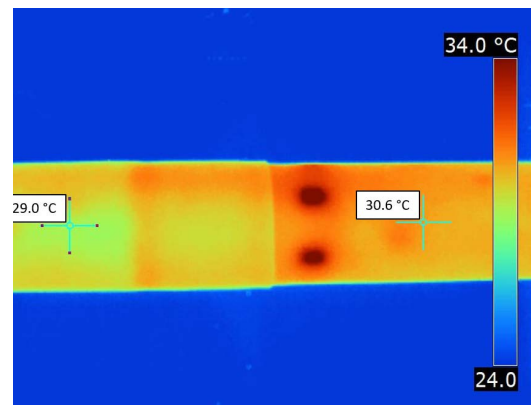


Fig.6: Messung der Temperaturen am Übergang Rohrleitung-Muffe (rechts) mit der Wärmebildkamera.

Wärmeleitfähigkeit des PUR-Schaumes, wurde das Berechnungsergebnis auf ganze Zahlen gerundet. Die Temperatur des Silikonöls wurde der Temperatur an der Innenwand des Mediumrohres (T1) gleichgesetzt und der konvektive Wärmeübergang von Medium zur Rohrwand wurde vernachlässigt. Die von der Wärmebildkamera gemessene Temperatur an der Mantelrohr- bzw. Muffenoberfläche wurde der Temperatur an der Außenwand (T4) gleichgesetzt. Für die Wärmeleitfähigkeit des Stahlmediumrohres und des Mantelrohres wurden die in der EN 253 angegebenen Werte übernommen. Da die Temperatur an der Innenfläche des Mediumrohres mit 120 °C oberhalb der in der EN 253 vorgegebenen Mediumtemperatur von 90 °C lag, wurde für die Wärmeleitfähigkeit der Dämmung der Wert für Pentan-getriebenen PUR-Dämmstoff bei einer Temperatur von 75 °C aus dem VDI Wärmeatlas übernommen (VDI 2017). Die mittlere Temperatur bei der Messung wurde nach Gleichung 3 berechnet und beträgt etwa 75 °C.

Parameter	Formel-zeichen	Quelle	Ergebnis Rohrleitung	Ergebnis Verbindung
Temperatur	T_1	Temperatur des Silikonöls (Temperiermedium)	120 °C	120 °C
Temperatur	T_4	Temperaturmessung mit der Wärmebildkamera	31,5 °C	29,8 °C
Mittlere Temperatur	T_m	Mittlere Temperatur, berechnet nach Gleichung 3	75,75 °C	74,9 °C
Radius	r_1	DIN EN 253:2020-03	41,25 mm	41,25 mm
Radius	r_2	DIN EN 253:2020-03	44,45 mm	44,45 mm
Radius	r_3	Umfangsmessung am Mantelrohr abzüglich der Wandstärke	76,8 mm*	85 mm*
Radius	r_4	Umfangsmessung am Mantelrohr	80 mm	88 mm
Wärmeleitfähigkeit Mediumrohr	λ_{Stahl}	DIN EN 253:2020-03	50 W/(m•K)	50 W/(m•K)
Wärmeleitfähigkeit PUR-Schaum	λ_{PUR}	VDI Wärmeatlas	0,03 W/(m•K)	0,03 W/(m•K)
Wärmeleitfähigkeit Mantelrohr	λ_{Mantel}	DIN EN 253:2020-03	0,4 W/(m•K)	0,4 W/(m•K)
Längenbezogener Wärmestrom an der Luft	\dot{q}	Berechnung nach	30 W/m	26 W/m

*Die Wandstärke des Mantelrohres wurde nicht gemessen. Für die Berechnung wurde der Wert der Mindestwandstärke gemäß der DIN EN 253 übernommen.

Tab. 2: Berechnungsparameter und Ergebnisse der Wärmeverlustberechnung

Um den Einfluss der Schaumeigenschaften auf die Wärmeverluste zu untersuchen, wurde die Schaumdichte und Zellengröße nach EN 253 bestimmt. Die Ergebnisse der aus den Messungen ermittelten Mittelwerte sind in der Tabelle 3 aufgelistet.

	Mittlere Zellengröße	Mittlere Schaumstoffdichte
Rohrleitung	0,27 mm	80,5 kg/m ³
Verbindungsmuffe	0,26 mm	96,3 kg/m ³

Tab.3: Ergebnisse der Prüfung der Zellengröße und der Schaumstoffdichte

Interpretation der Ergebnisse

Für die untersuchte Verbindung betragen die berechneten Wärmeverluste der Rohrleitung rund 30 W/m und sind rund 15 % höher als die der Muffe. Als Einflussfaktoren wurden in der Studie geometrische Faktoren und die Schaumeigenschaften untersucht. Als geometrischer Einflussfaktor kann der Formfaktor der Muffe herangezogen werden. Der Formfaktor des untersuchten Muffensystems beträgt 1,1. Bedingt durch den 16 Millimeter höheren Durchmesser der Muffe, sind geringere Wärmeverluste der Muffe zu erwarten, was in den Ergebnissen bestätigt wurde.

Bei der Untersuchung der Schaumqualität wurde für die nachträglich ausgeschäumte Muffe eine 20 % höhere Schaumstoffdichte gemessen. Die Zellgröße des PUR-Schaumes in der Rohr- und Muffendämmung ist etwa gleich groß. Aus der geringeren PUR-Schaumdichte resultiert ein höherer Zellgasanteil in der Rohrleitung im Vergleich zu der Muffe. Da Gas stets eine geringere Wärmeleitfähigkeit hat als Feststoff wären bei gleichem Durchmesser eine höhere Wärmeleitfähigkeit und höhere Wärmeverluste für die Muffe zu erwarten.

Die sich einstellende Temperaturdifferenz zwischen der Rohrrinnen- und Außenwand ergibt sich aus den Wärmeleitungseigenschaften und geometrischen Abmessungen der Rohrleitung und der Muffe. An der Muffenoberfläche wurde eine geringere Temperatur gemessen als an der Mantelrohroberfläche der Rohrleitung, was einer besseren Dämmwirkung der Muffe entspricht. Für das untersuchte Muffensystem hat der geometrische Formfaktor somit einen größeren Einfluss auf den Wärmestrom als die Unterschiede in der Schaumdichte.

Schlussfolgerungen

In der Studie wurden die längenbezogenen Wärmeverluste von einem Probekörper mit einer Schrumpfmuffenverbindung an der Luft berechnet. Die Wärmeverluste der Rohrleitung betragen 30 W/m und sind rund 15 % höher als die Wärmeverluste der Verbindungsmuffe. Für das untersuchte System wurde der Formfaktor, der Quotient aus dem Durchmesser der Muffe und der Rohrleitung, als Haupteinflussfaktor auf die Wärmeverluste identifiziert. Bei Muffensystemen, deren Abdichtung vor der Dämmung erfolgt ist, ist der Formfaktor höher als bei dem untersuchten System. Bei diesen Systemen sind größere Unterschiede zwischen den Wärmeverlusten zu erwarten, was sich günstig auf die Wärmeverluste des Gesamtnetzes auswirkt. Die Schaumdichte hat bei dem untersuchten System einen geringeren Einfluss auf den Wärmeverlust. Weitere Untersuchungen mit mehreren Probekörpern sollten durchgeführt werden, um die Parameter Formfaktor und Schaumdichte zu quantifizieren und den Einfluss der Wärmeleitfähigkeit weiter zu untersuchen. Eine Messung der Wärmeleitfähigkeit unter Versuchsbedingungen ist zu empfehlen.

Bei einer Übertragung der Berechnungsergebnisse auf ein reales Fernwärmenetz, würden die Wärmeverluste bei einem Anteil der Verbindungen von 8 % im Fernwärmenetz um rund 1 % überschätzt, wenn die Verbindung in der Berechnung nicht berücksichtigt wird. Aufgrund der unterschiedlichen Randbedingungen sind die Ergebnisse nur bedingt auf ein erdverlegtes Fernwärmenetz übertragbar, sodass weitere Untersuchungen zu dem Einfluss der Verbindung auf die Wärmeverluste des Gesamtnetzes notwendig sind.

Bedingt durch die in Zukunft erwartete Absenkung der Systemtemperaturen entscheiden sich Versorgungsunternehmen zunehmend für die Doppelrohrtechnologie, bei der das Vor- und Rücklaufrohr in einer Dämmung verlegt werden. In Anbetracht dieser Entwicklungen wird an der HCU die Untersuchung von Wärmeverlusten von Doppelrohrverbindungen im Rahmen einer Forschungsarbeit angestrebt.

Danksagung

Die dem Artikel zu Grunde liegenden Messungen wurden an der HafenCity Universität selbst-finanziert zur wissenschaftlichen Begleitung des laufenden Projektes „Qualitätsprüfung an Mantelrohrverbindungen für Fernwärmeleitungen nach EN 489-1“ durchgeführt. Wir bedanken uns bei unserem Auftraggeber dem AGFW e.V., vertreten durch Herrn Dr.-Ing. Andretzky für die Möglichkeit der synergetischen Nutzung der erlangten Daten in diesem spannenden und praxis-nahen Projekt.

Literatur

(DIN EN 13941-1) DIN EN 13941-1:2019-12 „Fernwärmerohre - Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr-Verbundsystemen für direkt erdverlegte Heißwasser-Fernwärmenetze - Teil 1: Auslegung“. Deutsche und Englische Fassung EN 13941-1:2019, Beuth-Verlag Berlin (2019).

(Isoplus 2011) isoplus Fernwärmetechnik Vertriebsgesellschaft mbH (2011). „Planungshandbuch: Kapitel 2 – Starre Verbundsysteme“. Abgerufen am 20.11.21, von https://www.isoplus.de/fileadmin/user_upload/downloads/documents/germany/Catalogue_German/Kapitel_2_Starre_Verbundsysteme.pdf

(Logstor 2020) LOGSTOR A/S (2020). „LOGSTOR FlexPipe System“. Abgerufen am 20.11.21, von <https://www.logstor.com/media/6430/logstor-flexpipe-handbuch-202002.pdf>

(Grage et al. 2013) Grage T., Herbst V. (2013) „Praxisgerechte Qualitätsprüfungen von KMR-Muffensystemen“. EuroHeat&Power 42. Jg, H. 9, S. 46-53.

(DIN EN 489-1) DIN EN 489-1:2020-03 „Fernwärmerohre - Einzel- und Doppelrohr-Verbundsysteme für erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 1: Mantelrohrverbindungen und Wärmedämmung für Fernwärmenetze nach EN 13941-1“. Deutsche Fassung EN 489-1:2019, Beuth-Verlag Berlin (2020).

(DIN EN 253) DIN EN 253:2020-03 Fernwärmerohre - Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze - Werkmäßig gefertigte Verbundrohrsysteme, bestehend aus Stahl-Mediumrohr, einer Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen“. Deutsche Fassung EN 253:2019, Beuth-Verlag Berlin (2020).

(Tödter 2020) Tödter J., Helpke C. (2020) „Drohngestützte Thermografie als Basis der Asset- und Instandhaltungsstrategie von Fern- und Nahwärmenetzen“. Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 19768 N. Abgerufen am 19.11.21, von https://www.fernwaerme.de/pdfdata/Schlussbericht_IGF-Vorhaben_19768_N.pdf

(BFW 2018) Bundesverband Fernwärmeleitungen e.V. (2018) „Das praktische Montage-Handbuch für vorgedämmte Fernwärmeleitungen“. 3. Auflage, Dresden, ISBN 978-3-00-059264-5.

(FW 401 T6) AGFW FW 401, Teil 6 „Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze – Bauteile; Rohrverbindungen“. AGFW Verlag (2007).

(Besier et al. 2012) Besier R., Böhm A., Grage T., Tödter J., Meyer H-O., Rührer P., Wagner A. (2012) „Prüfung von Kunststoffmantelrohrverbindungen“. EuroHeat&Power 41. Jg, H. 5, S. 38-43.

(Weidlich 2015) Weidlich I. (2015) “Near future testing requirements for joints in modern district heating networks”, International Scientific Conference “Environmental and Climate Technologies

(FLIR 2008) FLIR Systems FLIR B Serie Benutzerhandbuch (2008). Abgerufen am 19.11.21, von <https://www.manualslib.de/manual/639653/Flir-Systems-Flir-B-Serie.html#product-FLIR%20B360>.

(Wagner 2011) Wagner W. „Wärmeübertragung“. 7. Auflage, Vogel Buchverlag, Würzburg, ISBN 978-3-8343-3209-7.

(Gibson et al. 1997) Gibson L.J., Ashby M.F. (1997) „Cellular Solids“. Cambridge Universitäts-Verlag, Cambridge.

(Wallentén 1991) Wallentén P. (1991) "Steady-state heat loss from insulated pipes". Dissertation Technische Hochschule Lund, Institut für Bauphysik, Lund, Schweden.

(Madan et al. 2021) Madan V., Weidlich I. (2021) "Investigation on relative heat losses and gains of heating and cooling networks". Conference of Environmental and Climate Technologies (CONNECT). 12-14 May 2021, Riga, Latvia.

(Weidlich 2018) Weidlich I. (2018) „Wärme- und Kälteschutz bei Rohrleitungen“. In „Rohrleitungen 2“, 2. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, ISSN 2522-8188.

(VDI 2013) VDI e.V. (2013) „VDI-Wärmeatlas“. 11. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-19980-6.

An Analysis of the most Frequent Operational Temperature of four District Heating Networks of Germany

Pakdad Pourbozorgi Langroudi
pakdad.langroudi@hcu-hamburg.de

HafenCity University, Hamburg

Abstract

Pre-insulated pipes according to EN 253:2019 that are used in District Heating (DH) networks comprise of minimum three layers. These layers are steel medium pipe, rigid polyurethane (PUR) foam as the insulation layer, and a polyethylene (PE) casing as the protection layer. Various studies show that the thermo-oxidation of the PUR foam is one of the most critical mechanism that determines the service-life of the pre-insulated bonded pipe systems. The deterministic approaches for service-life estimation considers the design temperature of the network e.g. 120°C, however the DH operational flow temperature is not constant. In recent decade, due to the decarbonisation trends and new artificial intelligent (AI) based techniques, the DH networks are optimized better than before and therefore, the DH operating flow temperature reduced to some extent. This temperature reduction affects the thermo-oxidation reaction speed, and the thermo-oxidation level of the PUR foam is very crucial to understand the adhesion of the PUR foam at the interface of the steel pipe and accordingly the service-life prediction of the pipe. Moreover, it affects the axial shear strength, which is necessary to impede the steel pipe movement that is caused by thermal expansion and to reduce the mechanical cyclic load. In this paper, the temperature changes of four different DH networks in Germany are analysed and the aim is to reveal the flow temperature of the in-operation DH pipes, Equivalent to Constant Continues Temperature (ECCT). The ECCT would be useful for different purposes such as thermo-oxidation analysis or to be utilize as a parameter in life-time prediction of the DH pipe.

Introduction

District Heating (DH) networks have evolved from their first appearance (Lund et al., 2014) until today, which according to (Buffa et al., 2019) they are in 5th generation now. In every generation, different changes can be identified in different parts of the system as well as in the production, distribution, and consumer sides. One major break-through in DH took place in gen 3 that pre-insulated bonded pipe systems have been introduced. This pipes according to (EN 253:2019) comprise of minimum three layers. These layers are steel medium pipe, rigid polyurethane (PUR) foam as the insulation layer, and a polyethylene (PE) casing as the protection layer. This technique has facilitated the implementation of the pipes in the ground faster than before. Because of the pre-insulation process in the factory, the quality of pipes were higher, plus no additional building for ducts out of concrete and no extra insulation layer such as mineral or glass wool was required. Additionally, it was more flexible in execution, less space needed in public area, cheaper and faster in execution. Therefore, it was possible to bury the pipes directly into the ground without any extra works such as sealing the hatches and ducts to inhibit additional heat-losses and controlling the thermal bridge at mount positions. However, the bounded pipes have a robust design; the utilities always try to run their system in an efficient way with integrating optimization techniques. A first step system optimization tries to adjust the flow temperature relative to the outdoor temperature. This means, for the mean daily ambient temperature below a certain degree Celsius there is a heating demand inside buildings, which is known as Heat Degree Days (HDD) and according to Germany Climate Resilience Policy Indicator (IEA, 2021) this temperature is 16°C. Therefore, the required energy to fulfil the demand needs to be regulated accordingly in the DH supply line. Thus, DH networks operate with a gliding system, in a way that the supply temperature could vary within a range that fits to its own network specifications, i.e. between 80°C to 130°C relative to outside temperature (Paar, 2013) (See Fig. 1).

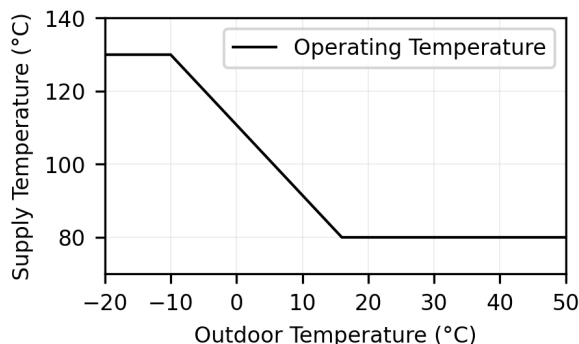


Fig. 1: Schematic operating temperature of a district heating designed for temperature range of 80°C to 130°C with gliding system.

Second step towards optimisation technique is heat demand profile prediction. The operational supply temperature is then modified not only based on outdoor temperature but also according to the probability of the heat demand inside buildings. As an example, at night the heat demand is low because the consumers turn their heating appliances off. Another example could be the working hours. Usually, the consumers are not at home during the working hours of the week and because of this, they consume less than during the hours that they are at home and therefore, the heat demand is influenced by the user behaviour. Alternatively, public and industrial buildings have small heat demand during weekends. However, the grid operators add hydraulic models to their system to supply the heat with minimum fluctuation in the carrier’s temperature. Currently, DH systems are also under influence of Industry 4.0 (Lasi et al., 2014) with integrating assorted Artificial Intelligence (AI) techniques such as Machine Learning (ML) and Deep Learning (DL) for different purposes such as operation and maintenance (Langroudi & Weidlich, 2020; Mbiydzenyuy et al., 2021; Saloux & Candanedo, 2018).

All these complexities apply different loadings to the pipes. The one for temperature cycles is known as Thermal Fatigue. In DH systems, thermal fatigue dominantly controls the degradation of all three main components of the bonded pipe system due to cyclic fluctuations in temperature. Since the flow temperature in DH systems is not constant, it will be useful in different research area of DH systems to have an Equivalent Constant Continuous Temperature (ECCT). As an instance, it would be useful for researchers who are studying the rigid PUR foam degradation and the approximation of the annual thermo-oxidation. This value could also be utilize as a parameter in lifetime prediction of the DH pipes. Therefore, in this paper the operational temperature of four DH networks is analysed and discussed. This paper does not discuss the PUR ageing mechanism and the service-life of DH pipes itself, but about the ECCT of DH networks temperature that could be used in lifetime prediction of the pipes and foam thermo-oxidation process. Additionally, the temperature means and modes of the analysed networks are discussed.

Material and Methods

For this research, four sets of temperature data have been used. The collected data are in time-series format for two to three continuous years that are on hourly basis with two decimal places precision. The data period that is analysed for each network is summarised in Table 1. The measurement locations are at substation of each DH network according to description of each operator. These measurements have been conducted for both supply as well as return pipes.

Network	Data Period (Years)
A	2013-2015
B	2017-2019
C	2018-2019
D	2017-2020

Tab. 1: Period of analyzed substation temperature of each DH networks

Statistical analysis methods such as mean, mode, and normal distribution function have been employed for evaluating the time-series. To avoid biasing, a data-cleaning process have been applied for the data sets to remove the null and any unrealistic values.

Results

Before the analysis of the datasets, it is important to check the consistency of the data. If one wants to investigate the cyclic load based on the temperature alteration, the temperature difference (ΔT) at each oscillation is of importance. According to (EN 13941-1:2019) the number of equivalent full temperature cycles can be calculated from:

$$N_o = \frac{\sum n_i \cdot (\Delta T_i)^m}{(\Delta T_{ref})^m} \quad \text{Equation 1}$$

Where

n_i is the number of cycles with temperature range ΔT_i
 ΔT_{ref} is the reference temperature at which N_o is calculated
 m is the constant in the SN-curve

Since the aim of this paper is to shed light on the operational temperature values, any temperature drop below 65°C and 50°C respectively for supply and return pipes have been set as Limit Values (LV). The temperature below the LV have not been taken into consideration, although they have cyclic load effect on pipes because of the larger temperature difference according to equation 1. The LVs are not fixed and should be determined for each dataset. Hence, in the analysed dataset all the data points below the mentioned LVs including all the null points have been eliminated from the time series to avoid any adverse effect on the ECCT. The reason of the inconsistencies in data are not known but most probably, these could appear because of maintenance activities such as inspections and repairs. Other possibilities could be a failure in logging devices, place of logging, unexpected disturbance, revision of power plant, etc.

The statistical analysis has been accomplished on four datasets. As explained, DH systems run at higher temperature on colder weathers. Accordingly, in warm months, they supply around 65-70°C for domestic hot water, if no specific higher temperature is required. For instance, absorption chillers could utilize hot water energy instead of electricity for cooling but they need higher temperature as 70°C as an input, or in case of connection to industry, a minimum temperature might be required that needs to be satisfied even in warm seasons. In cold months, DH systems supply above 100°C for both domestic hot water and heating. To understand the mean temperature influence of warm and cold weather, three separate analysis are performed for warm, cold and annual season. To be able to compare the networks, in this work April is set as starting month, which is the commencement of the warm season. The warm season lasts till the end of September and the cold season begins in October. The reasoning of this arrangement is to have a full cold season in the annual analysis.

Fig. 2 represents a full year of the operating temperature of four DH networks. Network A has an almost constant run in warm season slightly above 90°C and surprisingly it keeps the same flow with light increase in winter season. No significant change of mean temperature in network A between warm and cold season has been detected. In network B some minor peaks are detectable in April-May and then it plateaus around 80°C. The cold season in network B shows the expected temperature fluctuations and the highest peaks from February to April. The annual mean temperature in network B is roughly the mean of cold and warm season means. Comparing the operational temperature patterns, the network C is exceptionally different from the other networks. Although the fluctuation in network C is high, no extreme peak detected in the cold season. The mean value in the network C is the highest in all networks around 95°C. Network D is very similar to network B with an annual mean around 80°C. In all networks the mean temperature of the return pipes are higher in warm season and lower in cold season.

Operational Temperature

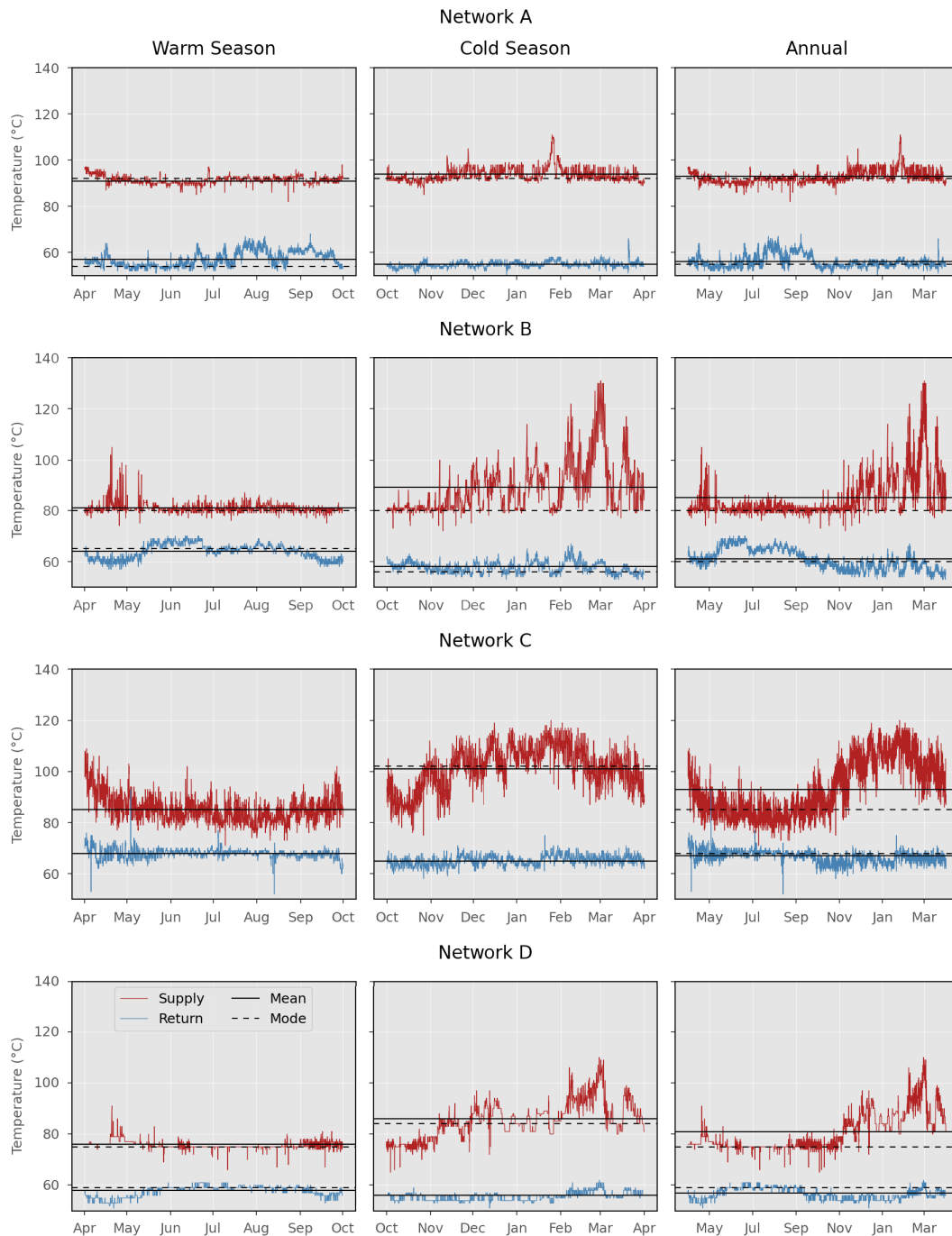


Fig. 2: An annual and seasonal operational temperature pattern of four district heating networks in Germany

Discussion

A statistical analysis of three years for network A, B, and D and two years for network C is summarized in Table 2. The maximum and minimum supply temperature values are found in network B with 131°C and 63°C. The temperature at 150°C and above triggers other form of ageing mechanisms that do not appear in DH systems (Vega et al., 2018), however no such high temperature has been observed in data sets. The minimum return temperature could not be discussed completely, since different continuous temperature drop to 0°C have been detected in datasets and it was set to LVs. However, the maximum return value has found in network C with 99°C.

Since the dataset is hourly basis, no conversion or further calculation is required to find the equivalent continuous temperature and the mean value could be directly counted as ECCT. Interestingly, the supply ECCT value of the networks are in range of 80°C to 95°C.

Network	Supply (°C)				Return (°C)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
Min	82	63	64	65	50	51	50	51
Max	120	131	124	110	71	70	99	68
Mean	93	85	94	81	57	59	67	58
Median	92	81	94	77	56	59	67	58
Mode	92	80	85	75	55	55	68	59
Percentile 25	91	80	85	75	55	56	65	56
Percentile 75	93	86	103	85	58	62	69	59

Tab. 2: Statistical analysis of continuous two-three years of operational temperature for supply and return pipes of four district heating networks in Germany

The box-plot of the supply temperatures in Fig. 3 is explaining the distribution of the temperature data of Fig. 2. The box-plot is giving a clear picture of the temperature ranges in terms of occurrence. The temperature 5°C dispersion of each network varies. This could be because of geographical location and/or the applied optimisation technique. In the annual analysis of the network A, B, and D, the first quartiles (Q1) are close to second quartiles (Q2) with a maximum difference of 2°C. Except network C, the third quartiles (Q3) in both warm and cold seasons are below 100°C and considering the annual distribution it drops to below 95°C. Additionally, the annual maximum value of these networks are below 95°C as well. Network C as discussed before, is the only network in which higher temperatures in the system could be count in the distribution function and not as outlier. However, the form of operation of Network C might not be very common in DH systems, but for a broader conclusion, it will be included in our further considerations.

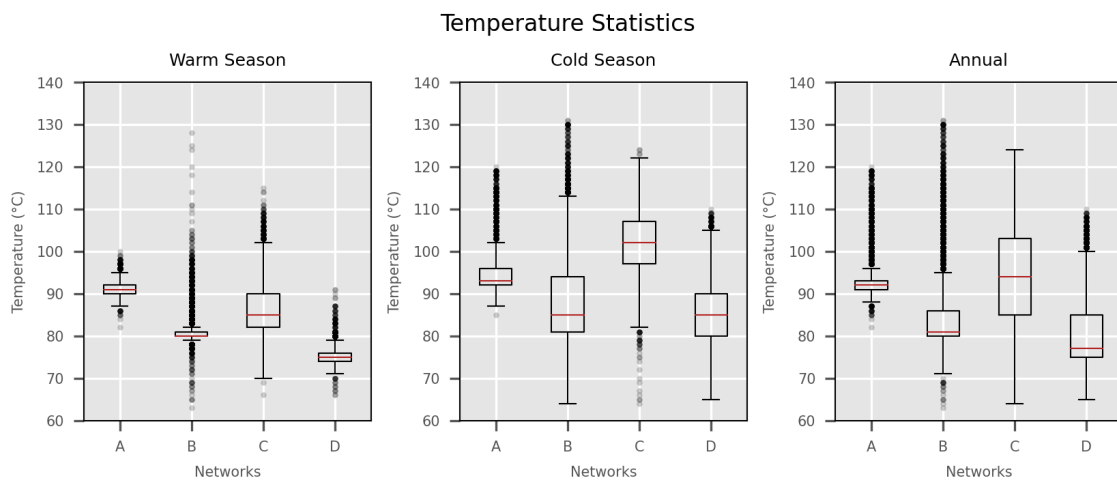


Fig. 3: Box plot of the supply operational temperature of four district heatings in Germany

A mean of ECCTs of available years could be determined as a holistic value of the operational temperature of DH systems. Here, the mean ECCT could be calculated as 88°C for supply and 60°C for return pipes.

The ECCT could be very helpful to understand the ongoing ageing of the in operation pipes. This could be possible with collecting the damage statistics and correlate the mean decommission age with ECCT of the DH network. The ECCT of 88°C is of importance in two aspects. First, the annual average of the thermo-oxidation pipe could be approximated. Second, the yearly monitoring of this value could help to understand the rate of thermo-oxidation of PUR, whether it is negative, positive, or relatively constant and provide practical information of DH pipes that are in operation.

Conclusion

Based on the optimized operation modes of the DH networks in Germany, the operational temperature is relative to outdoor temperature, heat demand profile and the largeness of the network. The statistical analysis of operational temperature changes at substations of four DH networks for two to three continuous years revealed that the current ECCT is about 88°C. This rate may also sink in the following years to a lower value because of decarbonisation trends such as advanced optimisation techniques, digitalization of the DH systems, and construction of the energy efficient buildings. Although, some high peaks up to 131°C have been detected, the frequency that pipes are subjected to such high peaks are low and they are counted as outliers in the annual temperature distribution analysis. The ECCT could be monitored yearly/seasonally for understanding the rate of thermo-oxidation of the PUR. Also, it could be used as a parameter for lifetime estimation of DH pipes in combination of damage statistics and thermal fatigue analysis. This could help to determine the service-life of the pipe and consequently calculating of the Remaining Useful Life (RUL).

Acknowledgement

The authors acknowledge the financial support by the Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action of Germany in the project Instandhaltung-FW (project number 03ET1625B).

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Literature

Buffa, S., Cozzini, M., D'Antoni, M., Baratieri, M., & Fedrizzi, R. (2019). 5th generation district heating and cooling systems: A review of existing cases in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 504–522. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.059>

EN 13941-1:2019. *District heating pipes – Design and installation of thermal insulated bonded single and twin pipe systems for directly buried hot water networks – Part 1: Design; German and English version EN 13941-1:2019*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.

EN 253:2019. *District heating pipes - Bonded single pipe systems for directly buried hot water networks - Factory made pipe assembly of steel service pipe, polyurethane thermal insulation and a casing of polyethylene*. Belgium. European Committee for Standardization (CEN).

IEA. (2021, December 1). *Germany Climate Resilience Policy Indicator – Analysis* - IEA. <https://www.iea.org/articles/germany-climate-resilience-policy-indicator>

Langroudi, P. P., & Weidlich, I. (2020). Applicable Predictive Maintenance Diagnosis Methods in Service-Life Prediction of District Heating Pipes. *Environmental and Climate Technologies*, 24(3), 294–304. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2020-0104>

Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>

Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH). *Energy*, 68, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>

Mbiydzonyuy, G., Nowaczyk, S., Knutsson, H., Vanhoudt, D., Brage, J., & Calikus, E. (2021). Opportunities for Machine Learning in District Heating. *Applied Sciences*, 11(13), 6112. <https://doi.org/10.3390/app11136112>

Paar, A. (Ed.). (2013). *Forschung und Entwicklung / AGFW: Vol. 24. Transformationsstrategien von fossiler zentraler Fernwärmeversorgung zu Netzen mit höheren Anteilen erneuerbarer Energien: Endbericht*. AGFW-Projektges.

Saloux, E., & Candanedo, J. A. (2018). Forecasting District Heating Demand using Machine Learning Algorithms. *Energy Procedia*, 149, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.169>

Vega, A., Yarahmadi, N., & Jakubowicz, I. (2018). Determination of the long-term performance of district heating pipes through accelerated ageing. *Polymer Degradation and Stability*, 153, 15–22. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2018.04.003>

Struktur als Parameter zur ganzheitlichen Beschreibung des Materialverhaltens fließfähiger Baustoffe

Marcel Ramler
ramler@hs-koblenz.de

Hochschule Koblenz, University of Applied Science

Kurzfassung

Zeitweise fließfähige und selbstverdichtende Verfüllbaustoffe, kurz ZFSV, gewinnen zunehmend an baupraktischer Bedeutung. Durch den Einsatz des Materials, insbesondere im innerstädtischen Leitungsbau, ergeben sich sowohl im noch fließfähigen als auch im verfestigten Zustand zahlreiche, teilweise auch konkurrierende Anforderungen. Die exakte und praktikable Parametrisierung zur eindeutigen Beschreibung des Materials gestaltet sich aufgrund seiner komplexen Struktur vergleichsweise schwierig. In diesem Beitrag soll ein generelles Modell zur Abbildung des Materialverhaltens, unabhängig vom fließfähigen oder verfestigten Zustand, vorgeschlagen werden.

Einleitung

Zeitweise fließfähige und selbstverdichtende Verfüllbaustoffe, kurz ZFSV, die oftmals auch als Flüssigböden bezeichnet werden, bilden eine relativ junge Gruppe von Baustoffen, welche vorwiegend zur Verfüllung von Arbeitsräumen, insbesondere von Leitungsgräben im innerstädtischen Bereich verwendet werden (vgl. H ZFSV, 2012).

Bei den ZFSV handelt es sich aus Sicht der Rheologie um hochkonzentrierte feststoffreiche Suspensionen (vgl. Elghobashi, 1994), analog zu Betonen wie unter Fleischmann (2014) oder Wüstholtz (2005) beschrieben. Dabei wird die flüssige Phase i.A. aus Suspensionen von Tonmineralen sowie einem hydraulischen Bindemittel gebildet und hat im Wesentlichen zwei konkurrierende Aufgaben. Zum einen muss sie das Korngefüge stabil in seiner relativen Lage im Kontinuum halten, was durch eine entsprechend hohe Fließgrenze (statisch) oder eine niedrige Viskosität (dynamisch) erreicht wird. Zum anderen muss die flüssige Phase den Fließwiderstand der Suspension so weit reduzieren, dass für die baupraktische Verwendung vorteilhafte Fließeigenschaften, wie die vollständige Umschließung der Rohrleitungen bis in kleinste Zwickelbereiche hinein, erreicht werden. Im verfestigten Zustand soll das Material eine dem Umgebungsboden angemessene Verformungseigenschaft und leichte Wiederaushubfähigkeit besitzen (vgl. Sosinka, 2020).

Der allgemeinen Akzeptanz von ZFSV stehen einige Besonderheiten des Materials entgegen. So liegt Flüssigboden in zwei komplexen Zustandsformen vor. Im flüssigen Zustand, kurz nach Herstellung, kann das Materialverhalten den nicht-newton'schen Fluiden zugeordnet werden. Im verfestigten Zustand lässt sich das Material als gemischtkörniger Boden beschreiben, wobei die vom Wassergehalt abhängigen Eigenschaften der tonigen Bestandteile durch die Hydratation der Bindemittel zeitlich veränderlich sind (vgl. Sosinka, 2020).

Aus der bislang unzureichenden bodenmechanischen Beschreibung des Materialverhaltens im Übergangsbereich zwischen Flüssigkeit und Feststoff ergeben sich, besonders im Hinblick auf die Definition messbarer Parameter, Unsicherheiten bei der Verwendung von ZFSV. Damit verbunden ist eine u.U. nicht ausreichend vorhersagbare Eignung des Materials hinsichtlich statischer oder baubetrieblicher Anforderungen (vgl. IKT, 2020).

Kreislaufwirtschaft / Nachhaltigkeit

Aus ökologischer Sicht ergibt sich die Notwendigkeit, von der konventionellen Grabenverfüllung neben der Nutzung von Rezyklat als Verfüllmaterial auf die Verwendung von ZFSV zu wechseln. So wurde im November 2019 in einer Pressemitteilung der Bauindustrie und des Bundesverbands Mineralische Rohstoffe e.V. folgende Feststellung getroffen, dass die Versorgung von Baustellen mit Kies, Sand, Schotter und Splitt ins Stocken gerät und dringender Handlungsbedarf besteht (Bundesverband Mineralische Rohstoffe e.V., 2019).

Diese Feststellung hat einen unmittelbaren Bezug zur Herstellung und Instandhaltung der innerstädtischen Infrastruktur und es muss zwangsläufig die Frage gestellt werden, wie sinnvoll und nachhaltig die konventionelle Verfüllung von Leitungsgräben mit Sand/Kies natürlichen Ursprungs ist, wenn hierbei wertvoller und finiter Rohstoff, der gleichsam die Grundlage für die Betonherstellung bildet, als Verfüllmaterial vergraben wird. Diesem Problem wird mit dem neuen Kreislaufwirtschaftsgesetz 2020 begegnet. Die Hierarchie, in der Maßnahmen zur Abfallbewirtschaftung angeordnet werden, ist wie folgt dargestellt:

Vermeidung – Wiederverwendung – Recycling – Beseitigung

Der im Leitungsbau anfallende Erdaushub ist nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz als Abfall anzusehen, sobald er aufgrund von mangelnder Verdichtbarkeit oder unzureichenden Bettungseigenschaften nur eingeschränkt oder gar nicht wiedereinbaubar ist. Dies bedingt sich aus §1 BBodSchG, wodurch eine Beeinträchtigung der natürlichen Funktionen vermieden werden sollen, wozu auch die Auflockerung durch den Aushub, welche nachträglich nicht wieder zurückgestellt werden zählt. Ohne weiteres würde dieser so gewonnene Erdaushub der Beseitigung zugeführt.

Mit dem Aufkommen von ZFSV entstand eine effektive Methode, den anfallenden Aushub aufzubereiten und als geeignetes Verfüllmaterial wieder in den Graben einzubauen. Die ökologische Relevanz dieses Verfahrens ergibt sich aus der Tatsache, dass Bodenaushub einen Anteil von annähernd 60 % an den rd. 215 Millionen Tonnen Abfall hat, die insgesamt pro Jahr in der Bauindustrie anfallen (Kreislaufwirtschaft Bau, 2018). Ohne die Wiederaufbereitung als ZFSV und anschließendem Wiedereinbau oder anderweitiger Weiterverwendung als mineralischer Baustoff wird entsprechendes Potential verschenkt. Dies stellt vor allem im Hinblick auf die bevorstehende Verknappung einen schwer hinzunehmenden Missstand dar.

Ausgangssituation und Fragestellung

Den Vorteilen, sei es in der Verfahrenstechnik des Einbaus (z.B. Wegfallen externer Verdichtungsarbeit in der Verfüllzone) oder dem großen ökologischen Nutzen, stehen Unsicherheiten in der bisherigen Beschreibung der Eigenschaften und des Materialverhaltens gegenüber.

Das rheologische Verhalten von Baustoffen, wie Stahl und Beton kann näherungsweise durch sogenannte Strukturmodelle abgebildet werden. Sie beschreiben das rheologische Verhalten des Materials mit Hilfe von drei rheologischen Grundelementen (Abb. 1), die entweder hintereinander und/oder parallel zu Strukturmodellen kombiniert werden können. Als einfache Strukturmodelle können beispielsweise das Prandtl-Strukturmodell für elasto-plastische Festkörper oder das Bingham-Modell für visko-plastische Fluide genannt werden (Metzger, 2016). Sowohl Grundelement als auch zusammengesetzte Strukturen lassen nur eine phänomenologische Beschreibung des makroskopischen Stoffverhaltens zu, welche eng an die zur Ermittlung der Parameter herangezogenen Versuche gekoppelt ist. Eine Beschreibung auf der Grundlage messbarer Parameter der Stoffstruktur ist trotz der Bezeichnung dieser Ansätze als ‚Strukturmodelle‘ nicht möglich.

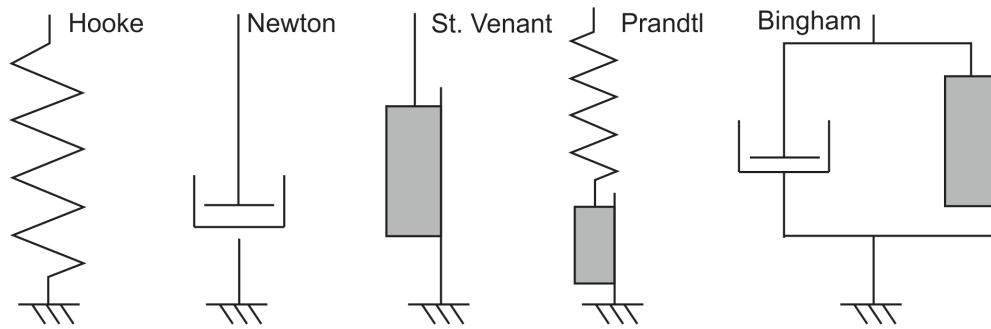


Abb. 1: Rheologische Grundmodelle v.l.n.r.: Hook, Newton, St. Venant, Prandtl-Modell, Bingham-Modell

Gerade Flüssigboden als komplexer Baustoff stellt hierbei eine Herausforderung dar. Ähnlich wie Boden oder Frischbeton bilden ZFSV ein Dreiphasensystem mit der Gesteinskörnung als Haufwerk und einer Ton-Zementsuspension als flüssige Phase, die je nach Rezeptur einen mehr oder weniger großen Anteil des Gesamtvolumens ausfüllt. Hinzu kommt, dass die Fließeigenschaften, bedingt durch den Anteil an hydraulischem Bindemittel, zeitabhängig sind. Daraus resultiert ein komplexes Materialverhalten der ZFSV, deren wissenschaftliche Beschreibung noch weitgehend unvollständig ist. Die rheologischen Modelle für fließfähige Baustoffe beschreiben zumeist nur einzelne Aspekte des Materialverhaltens, also entweder das Fließverhalten oder das Feststoffverhalten. Eine ganzheitliche Betrachtungsweise hat sich bisher nicht etablieren können. Der ansteigende Aufwand zur Identifikation der Parameter und deren erschwerte physikalische Interpretation stellen gleichsam Motivation als auch Erfordernis für eine tiefere Betrachtung dar.

Hierbei könnte eine Weiterentwicklung der Strukturmodelle unter Berücksichtigung der Gefügestruktur und deren Änderung infolge Belastung ein vielversprechender Ansatz sein. So kann die Fließfähigkeit innerhalb der allgemeinen Strömungsmechanik als erhöhter oder verminderter Impulsaustausch im Gefüge oder als Kontinuum als Folge der inneren Struktur im Sinne der geometrischen Anordnung und dem expliziten Interaktionspotential der einzelnen Phasen mehrphasiger Werkstoffe aufgefasst werden. Im verfestigten Zustand kann die Struktur herangezogen werden, um den zur Aufrechterhaltung eines stabilen Gefüges notwendigen Kraftfluss im Kontinuum zu ermitteln.

Vereinfachend soll dieser Ansatz zunächst als ‚Modell der inneren Struktur‘ (MIS) bezeichnet werden und für die Beschreibung der rheologischen Eigenschaften von feststoffreichen Suspensionen modifiziert werden.

Struktur als neuer Parameter

Für die Erläuterung des Modells soll eine Analogie zum Ansatz der Spannungsausbreitung nach Fröhlich (1934) dienen. Gemäß Fröhlich erfolgt die Verteilung der Vertikalspannungen im elastisch-isotropen Halbraum unter einer Einzellast P entsprechend dem Ansatz:

$$\sigma_z = \frac{\nu_k \cdot P \cdot z^{\nu_k \cdot 2 + 2}}{2 \cdot \pi \cdot (x^2 + z^2)^{\frac{\nu_k + 2}{2}}} \quad \text{Gleichung 1}$$

Hierbei beschreibt die Größe ν_k den Konzentrationsfaktor und drückt aus, wie stark die vertikalen σ_z -Spannungen um die Lastachse konzentriert werden (Abb. 2).

Im Zusammenhang mit dem Ansatz von Fröhlich wird in der Bodenmechanik allgemein davon ausgegangen, dass je kohärenter ein Erdstoff ist, desto mehr werden sich die Spannungen ausbreiten ($\nu_k \geq 3$).

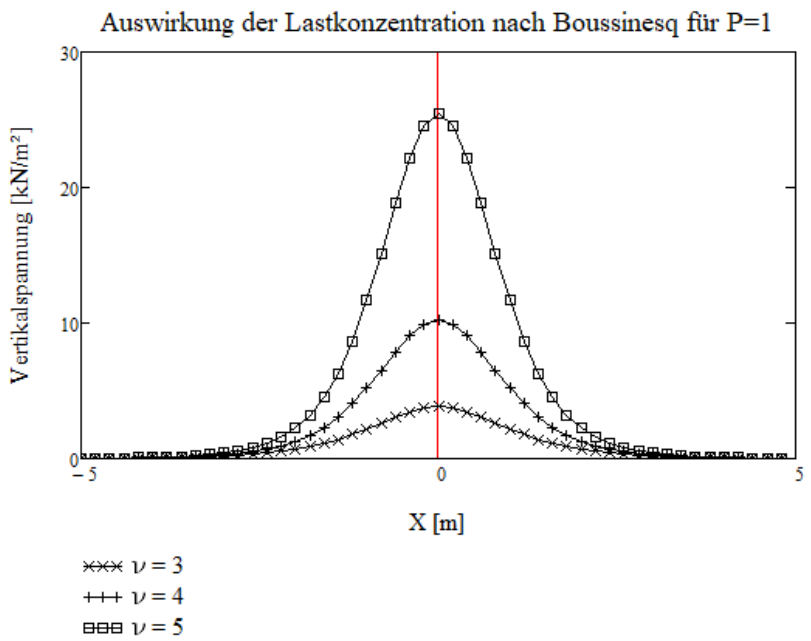


Abb. 2: Spannungskonzentration angelehnt an Fröhlich, variabler Konzentrationsfaktor

Im Zusammenhang mit dem Ansatz von Fröhlich wird in der Bodenmechanik allgemein davon ausgegangen, dass je kohärenter ein Erdstoff ist, desto mehr werden sich die Spannungen ausbreiten ($\nu_k \geq 3$). Je rolliger der Boden ist, umso mehr werden sich die σ_z -Spannungen um die Lastachse konzentrieren. Erklären lässt sich dies durch die bessere Aufnahme der Spannungen, ohne Stützspannungen zur Aufrechterhaltung zu mobilisieren. Somit wird ein geringeres Bodenvolumen am Lastabtrag beteiligt und die Spannungen konzentrieren sich um den Lasteinleitungspunkt. Diese zunächst empirisch basierende Erkenntnis soll im Weiteren mit der Struktur des Bodens begründet werden. Ausgehend von der Annahme, dass stark kohärente Böden zumeist feinkörnige Böden sind, die einen geringen Porenanteil und eine auf das Volumen bezogene hohe Anzahl von Korn-zu-Korn-Kontakten aufweisen, ergibt sich für diese Böden ein annähernd isotropes Materialverhalten.

Struktur ist somit u.a. abhängig vom Porenanteil im Boden. Hierbei gilt: je größer der Porenanteil, umso ausgeprägter ist die Struktur des Materials. Die ideale Struktur ist dadurch gekennzeichnet, dass alle Kornkontakte in Krafrichtung oder orthogonal dazu angeordnet sind. Hier ergibt sich der theoretisch größte Porenanteil im Material (Abb. 3). Die ideale Struktur eines Materials erlaubt eine Spannungsweiterleitung ohne Lastausbreitung, zeigt sich aber entsprechend instabil, so dass in diesem Zustand bereits kleinere Einwirkungen zu einer maßgeblichen Umlagerung der Struktur und damit einhergehender Verformung des Gefüges führen. Die Struktur kann sich durch eine seitliche Lastausbreitung stabilisieren, die durch den angrenzenden Boden oder die innere Zugfestigkeit behindert wird.

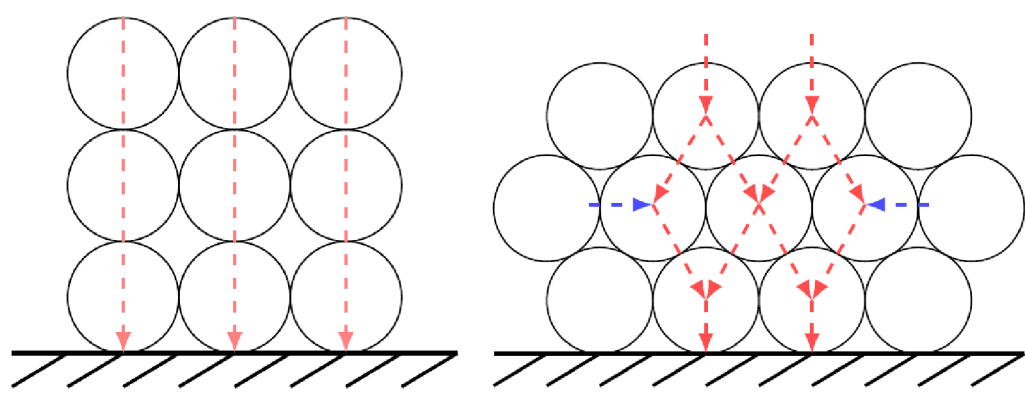


Abb. 3: Links: instabile Idealstruktur $\omega = 0^\circ$, rechts: stabile Struktur $0^\circ < \omega < 45^\circ$

Die Auswirkungen der Struktur und ihre Änderung werden im Laborversuch beobachtet. Dazu wurde ein Versuchsgerät, ähnlich einer Ödometerzelle, entwickelt, das die Messung der radialen Spannungen (Abb. 4) ermöglicht. Wie folgt lässt sich, aus der schematischen Darstellung in Abb. 5, aus der gemessenen Kraft F_{wz} auf die wirkende Radialspannung σ_r schließen:

$$\sigma_r = \frac{F_{wz} \cdot e_2}{h \cdot (r \cdot e_1 + r^2) \cdot 2} \quad \text{Gleichung 2}$$

Die verwendeten Parameter bei der Bestimmung der Radialspannung σ_r bedingen sich aus der gegebenen Geometrie der Ödometerzelle. Bei einer Steigerung der innen wirkenden Radialspannung ist die Ödometerzelle bestrebt der Belastung durch eine Öffnung der Zelle zu entgehen, behindert wird dies über eine am äußeren Rand angebrachte Wägezelle, welche die öffnende Kraft infolge der Radialspannung ermittelt. Über die dargestellte Geometrie lässt sich aus der Messung an der Wägezelle auf die mobilisierten Radialspannungen schließen. Hierbei ist:

F_{wz} =	Gemessene Kraft an der Wägezelle	[N]
e_1 =	Hebelarm Drehgelenk – Innezylinder	[mm]
e_2 =	Hebelarm Wägezelle – Drehgelenk	[mm]
r =	Innenradius der mod. Ödometerzelle	[mm]
h =	Höhe der mod. Ödometerzelle	[mm]
σ_r =	Radialspannung	[N/mm ²]

In Abb. 6 ist die in der modifizierten Ödometerzelle gemessene radiale Stützspannung in Abhängigkeit der Porenzahl eines trockenen granularen Materials (Strahlmittel aus Glasgranulat 0,1-0,2 mm) dargestellt. Zum einen lässt sich eindeutig die Auswirkung des hohen Porenanteils auf die Mobilisierung der radialen Stützspannungen erkennen. Zum anderen zeigt sich auch die Instabilität, die mit einer annähernd idealen Struktur verbunden ist. Ab einem für das Material charakteristischen Spannungsniveau treten spontan Strukturänderungen ein, die zur Mobilisierung entsprechender Stützspannungen führen. Der Versuch wurde als Belastungshysterese durchgeführt. Nach Rücknahme der aufgelegten Belastung stellte sich eine für granuläre Medien bekannte bedingt elastische Rückstellung der Verformung ein.

Die räumliche Anordnung der Kornkontakte im Material, neben Einflüssen der Kornoberfläche, bestimmen den Winkel der inneren Struktur (Abb. 7). Eine nichtgerichtete Spannungsweiterleitung durch eine Vielzahl isotroper Kornkontakte oder auch innerhalb von Flüssigkeiten hat eine hydrostatische Spannungsverteilung mit einem Strukturwinkel von 45 Grad zur Folge. Die Lastausbreitung nach Fröhlich kann somit als Auswirkung einer Strukturausbildung im Material angesehen werden. Das ausgesprochen inelastische Verformungsverhalten von Böden kann durch Strukturänderungen infolge Belastung erklärt werden.

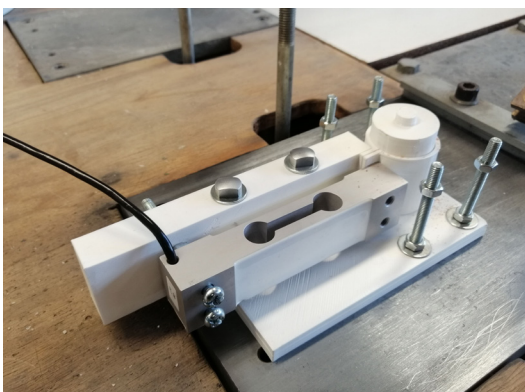


Abb.4: Modifizierte Ödometerzelle

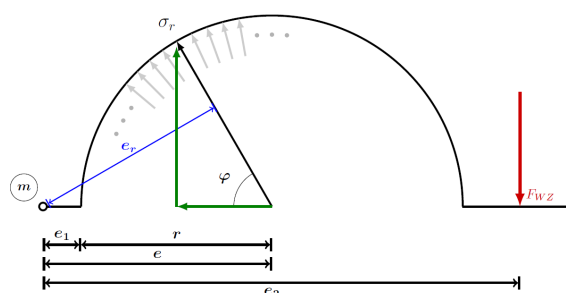


Abb.5: Schematische Darstellung der inneren Spannungen in der mod. Ödometerzelle

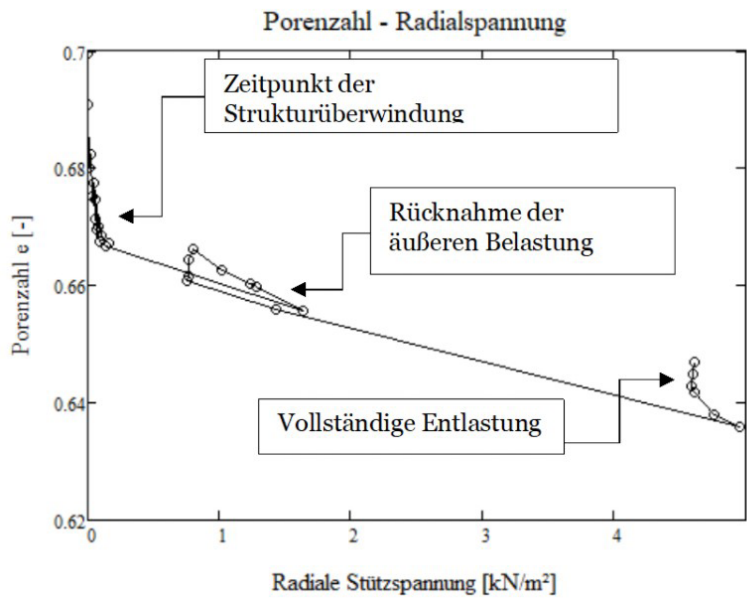


Abb.6: Einfluss der Porenzahl auf die zu mobilisierenden radiale Stützspannung

Des Weiteren wird vorausgesetzt, dass jeder Stoff eine Art der inneren Zugfestigkeit besitzt, welche das Material bis zu einer definierten Kräfteinwirkung stabilisiert und Fließen verhindert. Diese innere Zugfestigkeit und der dazugehörige Strukturwinkel sind die allgemeingültigen Eigenschaften eines jeden Stoffes. Wie sich diese Zugfestigkeit ausprägt, hängt besonders am Beispiel des ZFSV maßgeblich von der Art der Bindemittel, den Oberflächenkräften im Tonmineral oder auch vom Alter ab.

Diese, wenn auch oberflächlichen, Ausführungen, sollen einen kurzen Einblick in das Potential und die Relevanz eines neuen, ganzheitlichen Ansatzes zur Beschreibung des Materialverhaltens liefern. Formuliert soll der Ansatz dann Einzug z.B. in die FVM innerhalb der CFD erhalten.

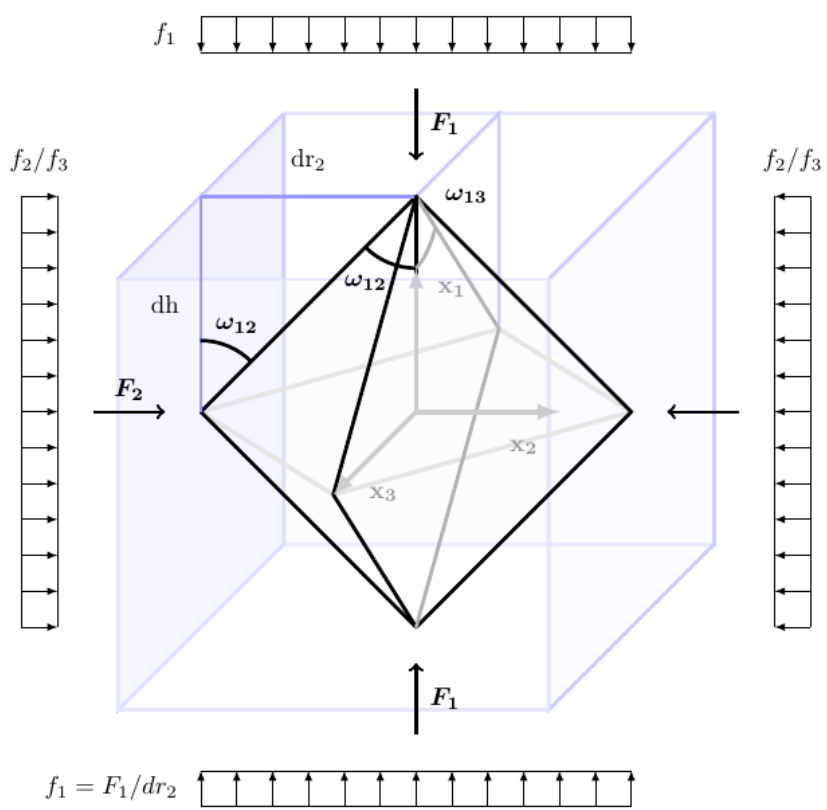


Abb.7: Das "Modell der inneren Struktur" im dreidimensionalen Spannungsraum

Literatur

Kreislaufwirtschaft Bau. (2021). Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018. Berlin: Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V.

Elghobashi, S (1994). On predicting particle-laden turbulent flows. Applied Scientific Research, S. 309-329.

Fleischmann, F. (06.01.2015). Ein Beitrag zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone mit dem Kugel-Messsystem. Bochum: urn:nbn:de:hbz:294-42565.

Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (BBodSchG. Berlin: Bundesamt für Justiz.

Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Berlin: Bundesamt für Justiz.

H ZFSV - Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau. (2012). Köln: FGSV Verlag.

IKT-Warentest: Flüssigböden (ZFSV) im Kanalbau. (2020). Gelsenkirchen: IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur.

Johann Ohde. (25. August 1939). Zur Theorie der Druckverteilung im Baugrund. Der Bauingenieur, S. 451 - 459.

*Sosinka, K. (2021). Entlüftungsverhalten zeitweise fließfähiger und selbstverdichtender Verfüllbaustoffen. Koblenz: Shaker Verlag.
ISBN: 978-3-8440-7818-3*

Wüstholtz, T. (2005). Experimentelle und theoretische Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtendem Beton. Stuttgart: <http://dx.doi.org/10.18419/opus-213>.

Erddruckmessung in einer Sandkiste nach EN 489

Earth pressure measurement in a sandbox according to EN 489

Ingo Weidlich
ingo.weidlich@hcu-hamburg.de

HafenCity University, Hamburg

Kurzfassung

Für die Untersuchung des Interaktionsverhaltens zwischen Rohrleitungen und Boden wurden in der Vergangenheit oft Sandkisten verwendet, in denen Rohre in ein Bettungsmaterial eingebaut wurden und in experimentellen Versuchsreihen das bodenmechanische Kontaktverhalten studiert wurde. Es wurde oft davon ausgegangen, dass es sich bei der Verwendung von Rohren mit handelsüblichen Durchmessern um eine Versuchsrandbedingung handelt, in der Maßstabeffekte weitgehend vernachlässigt werden können. Dabei kann eine Sandkiste der Eigenschaft, dass eine Leitung ein Linienbauwerk ist, kaum Rechnung tragen. Der Grund hierfür liegt vorrangig in Spannungsumlagerungen, die sich in Sandkisten aufgrund der begrenzten Abmessungen ausbilden. An der HafenCity Universität wurden Erddruckmessungen in einer Sandkiste für Normversuche nach EN489 vorgenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Erddrücke von der Position des Messpunktes und den Einbaubedingungen abhängig sind. Die Ursache hierfür wird in der Ausbildung einer Gewölbewirkung vermutet.

Abstract

In the past, sand boxes were often used to investigate the interaction behavior between pipes and soil. Pipes were installed in a bedding material and the soil mechanical contact behavior was studied in experimental test series. It was assumed that the use of pipes with commercial diameters is an experimental boundary condition in which scale effects can be largely neglected. In this context, a sandbox can hardly account for the fact that a pipeline is a line structure. The reason for this lies primarily in stress redistributions, which develop differently in sandboxes than in situ due to the limited dimensions. At HafenCity University, earth pressure measurements were carried out in a sand box for standard tests according to EN489. The results show that the earth pressures are dependent on the position and the installation conditions. The reason for this is assumed to be the formation of an arching effect.

Einleitung

Im Fernwärmeleitungsbau werden gerade Rohre als Stangenware auf die Baustelle geliefert und dort untereinander und mit ebenfalls werksseitig vorgefertigten Formteilen, wie zum Beispiel Bögen und Abzweigen, verbunden. Die Verbindungen sind daher ein wesentliches Element eines jeden Wärmenetzes. Bei allen Komponenten eines Fernwärmerohrleitungssystems müssen zunächst die Mediumrohre kraftschlüssig verbunden werden, danach wird die Ummantelung vermufft und der dabei entstehende Zwischenraum wird vor Ort nachgedämmt, damit eine durchgängige Dämmung des Rohrsystems gewährleistet ist. Es wird zwischen kraftschlüssigen Muffensystemen mit Abdichtung vor und nach der Dämmung, sowie stoffschlüssige Muffensysteme mit Abdichtung vor der Dämmung unterschieden (FW 401 T6).

Introduction

In district heating pipeline construction, straight pipes are delivered to the construction site as bar element, where they are connected to each other and to fittings that are also prefabricated at the factory, such as bends and branches. The connections are therefore an essential element of any heating network. In all components of a district heating piping system, the service pipes must first be connected together, after which the casing is installed and the resulting gap is insulated on site to ensure continuous insulation of the piping system. A distinction is made between joint systems with sealing before and after insulation, and substance-locked joint systems with sealing before insulation (FW 401 T6).

Nach der Inbetriebnahme sind die Verbindungen den Temperaturlasten und den daraus entstehenden Verformungen aus dem Betrieb ausgesetzt. Hierzu gehört die Erwärmung, die aus der Temperaturerhöhung zu erwartende radiale Aufweitung und thermisch induzierte Verschiebungen in Richtung der Rohrachse und in lateraler Richtung zur Rohrachse. Die Verbindung ist im Gesamtsystem eingebunden, sodass die Verschiebungen einer Verbindung von der Position im Netz abhängen. Hierdurch erfährt letztlich jede Verbindung eine individuelle Belastung. Für die Beschreibung des Belastungskollektivs kommt erschwerend hinzu, dass sich moderne Betriebsweisen von Wärmenetzen teilweise stark von den klassischen Betriebsweisen der Vergangenheit unterscheiden. So kann die volatile Einspeisung von erneuerbarer Wärme zu höheren Wechsellasten führen, während allgemein der Trend fallender Betriebstemperaturen zu verzeichnen ist (Weidlich 2015).

Die Verbindungen müssen alle Betriebsszenarien bei anhaltender Dichtheit und allen auftretenden Kräften sicher widerstehen. Da Fernwärmeleitungen als erdverlegte Systeme konzipiert sind, spielen die im Graben auftretenden Bettungsreaktionskräfte im Betrieb dabei eine große Rolle. Aus der Relativverschiebung infolge der thermischen Ausdehnung des Leitungsnetzes und dem umgebenden Bettungsmaterial ergeben sich Reibungskräfte in Rohrachsrichtung und in den Bogen- und Abzweigbereichen Bettungsreaktionskräfte aus der lateralen Bewegung. Die lateralen Bettungsreaktionskräfte werden an vielen Stellen durch den Einsatz von Dehnpolstern minimiert (Wolf et al. 2012). Die auftretenden Reibungskräfte sind daher im Belastungskollektiv der Verbindung vorrangig zu bewerten.

Damit ein zuverlässiger Betrieb gewährleistet werden kann, werden Verbindungstypen vor dem Einbringen in den Markt Belastungstests unterzogen. Der vorrangigen Bedeutung der Reibungskraft im Graben wird durch eine spezielle Erddruckprüfung Rechnung getragen, die nach EN 489 genormt ist (EN 489). Bei dieser Prüfung wird in einer Sandkiste mit definiertem Erdstoff das Verbindungselement in Achsrichtung mit einer zyklischen Zwangsverschiebung beaufschlagt. Der Initialspannungszustand bestimmt dabei die Größenordnung der zu erwartenden Belastung. Die Vorgaben für den Initialspannungszustand beschränken sich auf den Sandeinbau in die Kiste mit einer Mindestbettung von 300 mm bis zur Sohle des Prüflings und einer Mindestüberdeckung von 300 mm über der Sohle des Prüflings,

After commissioning operation start-up, the joints are exposed to temperature loads and the resulting deformations. This includes heating, the radial expansion and thermally induced displacements in the direction of the pipe axis and in the lateral direction to the pipe axis. The joint is integrated in the overall system, so that the displacements of a joint depend on its position in the network. As a result, each connection ultimately experiences an individual load. The description of the load spectrum is complicated by the fact that modern modes of operation of heating networks differ from the classic modes of operation of the past. For example, the volatile feed-in of renewable heat can lead to higher alternating loads, while there is a general trend of reducing operating temperatures (Weidlich, 2015).

The joints must safely withstand all operating scenarios with continued tightness during all forces encountered. Since district heating pipelines are designed as buried systems, the bedding reaction forces occurring in the trench during operation play a major role in this regard. The relative displacement due to the thermal expansion of the pipeline network and the surrounding bedding material results in friction forces in the pipe axis direction and in the bend and branch areas in bedding reaction forces from the lateral movement. The lateral bedding reaction forces are minimized at many locations by the use of expansion pads (Wolf et al. 2012). The frictional forces that occur must therefore be taken as a priority in the load spectrum of the joint.

To ensure reliable operation, joint types are subjected to load tests before they are introduced to the market. The primary importance of the frictional force in the trench is taken into account by a special earth pressure test, which is standardized according to EN 489 (EN 489). In this test, a cyclic forced displacement is applied to the joint test specimens in the axial direction in a sand box with defined bedding material. The initial stress state determines the magnitude of the expected load. The specifications for the initial stress condition are limited to the sand installation in the box with a minimum bedding of 300 mm up to the bottom of the test specimen and a minimum cover of 300 mm above the bottom of the test specimen, related to the straight pipe and not to the joint. In total, a compressive stress at the crown of the pipe of $(18 \pm 1) \text{ kN/m}^2$ shall be achieved by additional rigid ballast plates. The structure with the minimum dimensions of the sandbox is shown schematically in Figure 1.

bezogen auf das gerade Rohr und nicht auf die Verbindungskonstruktion. Insgesamt soll eine Druckspannung am Rohrscheitel von (18 ± 1) kN/m² durch weitere starre Auflastplatten erreicht werden.

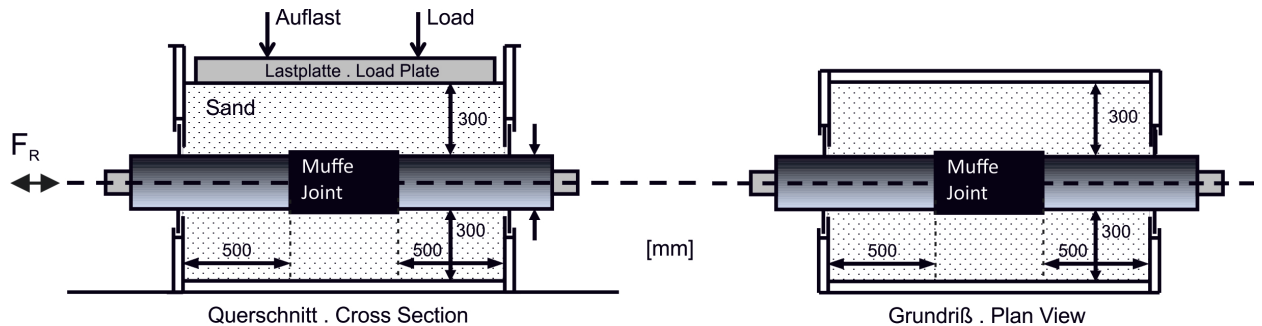


Abbildung 1: Sandkiste nach EN 489, schematisch
Fig.1: Sand box according to EN 489, schematic

Bei Sandkistenversuchen zum Rohr-Boden-Interaktionsverhalten wird meistens davon ausgegangen, dass - Maßstabeffekte weitgehend vernachlässigt werden können, wenn handelsübliche Rohre und Durchmesser verwendet werden. Dabei kann eine Sandkiste der Eigenschaft, dass eine Leitung ein Linienbauwerk ist, kaum Rechnung tragen. Der Grund hierfür liegt vorrangig in Spannungsumlagerungen die sich in Sandkisten aufgrund der begrenzten Abmessungen anders ausbilden als in situ. An der HafenCity Universität wurden Erddruckmessungen in einer Sandkiste für Normversuche nach EN489 vorgenommen, um Kenntnis über den Initialspannungszustand zu erhalten.

Methodisches Vorgehen

In der Studie wurden experimentell Erddruckmessungen in einer Sandkiste für Normversuche nach EN 489 vorgenommen. Die gewählten lichten Abmessungen des Volumens der Sandkiste betragen Länge x Breite x Höhe = 1780 x 800 x 1000 [mm³]. Die Dimensionen liegen in der Größenordnung anderer Apparaturen für diesen Versuch (Smidt 2002). Es wurden drei Erddruckgeber, Typ KDE-PA Tokyo Measuring Instruments 200kPa, in der Sandkiste installiert. Zwei auf dem Boden der Kiste und einer in der Wandung. Die Erddruckgeber wurden zum Ausschalten von Spannungsumlagerungen am Erddruckgeber infolge der Steifigkeitsunterschiede zwischen Erddruckgeber und Sand mit konisch zulaufenden Tellern eingefasst (vgl. WEIDLICH 2008). In Abbildung 2 ist die Lage der Erddruckgeber im Versuchskasten dargestellt.

In sandbox tests on pipe-soil interaction behavior, it is usually assumed that scale effects can be largely neglected if commercially available tubes and diameters are used. However, a sandbox can hardly account for the property that a pipe is a line structure. The reason for this is primarily stress redistributions, which develop differently in sandboxes than in situ due to the limited dimensions. At HafenCity University, earth pressure measurements were carried out in a sandbox for standard tests according to EN489 in order to obtain knowledge about the initial stress state.

Methodical procedure

In the study, earth pressure measurements were made experimentally in a sandbox for standard tests according to EN 489. The selected clear dimensions of the volume of the sandbox were length x width x height = 1780 x 800 x 1000 [mm³]. The dimensions are in the order of magnitude of other apparatus for this test (Smidt 2002). Three earth pressure transducers, type KDE-PA Tokyo Measuring Instruments 200kPa, were installed in the sandbox. Two on the bottom of the box and one in the wall. The earth pressure transducers were enclosed with tapered plates to eliminate stress redistribution at the earth pressure transducer due to differences in stiffness between the earth pressure transducer and the sand (cf. WEIDLICH 2008). Figure 2 shows the position of the earth pressure transducers in the test box.

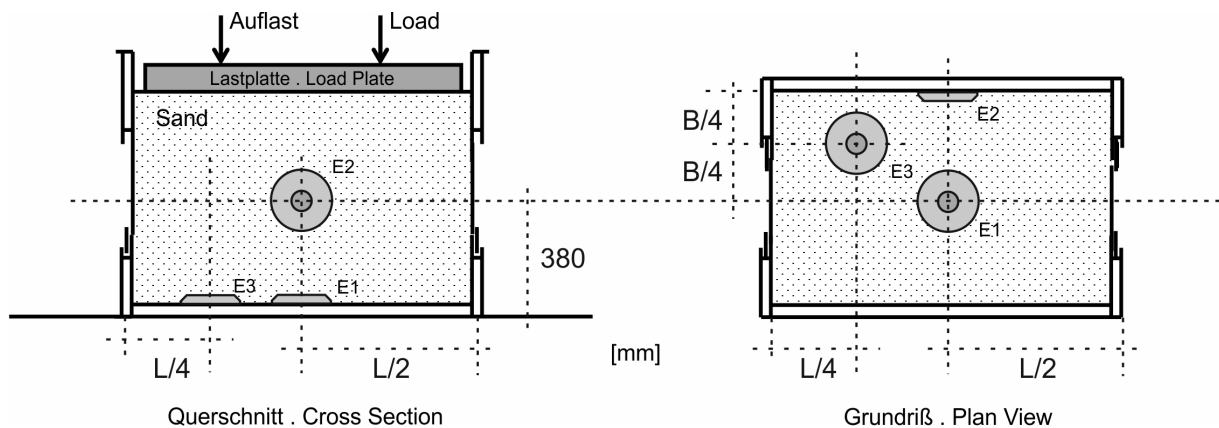


Abbildung 2: Versuchsaufbau, Lage der Erddruckgeber, schematische Darstellung
 Fig.2: Experimental setup, position of the earth pressure sensor, schematic diagram

Für die Versuche wurde ein enggestufter Sand im Körnungsband nach EN 489 gemäß den normativen Anforderungen und den Eigenschaften nach Tabelle 1 eingesetzt.

For the tests, a poor-graded sand in the grain size range according to EN 489 was used in accordance with the normative requirements and the properties given in Table 1.

Eigenschaften / Properties	Zeichen / Symbol	Wert / value
Ungleichförmigkeit Uniformity	C_u	3,4
Krümmung Curvature	C_c	1,2
Lockerste Lagerung Minimum Porosity	n_{max}	0,434
Dichteste Lagerung Maximum Porosity	n_{min}	0,332
Innerer Reibungswinkel Internal friction angle	φ'	39°
Kornrohichte Grain density	ρ_s	2,65 g/m ³
Wassergehalt Water content	w	0,32%

Tabelle 1: Eigenschaften des Bettungsmaterials in Sandkasten nach EN489
 Table 1: Properties of the bedding material in the san box to EN 489

Der Sand wurde mit einem Einrieselverfahren eingebaut, wie es für reproduzierbare Versuchsrandbedingungen empfohlen wird (tom Wörden 2009). Die Lagerungsdichte wurde bei allen Versuchen dokumentiert und entsprach einer dichten Lagerung.

The sand was placed using a trickle-down method, as recommended for reproducible test boundary conditions (tom Wörden 2009). The relative density was documented for all tests and corresponded to dense state.

Die Wandung der Kiste wurde ebenfalls messtechnisch untersucht. Es wurde ein Verbundreibungswinkel δ von 19,4° zwischen Versuchssand und Wandoberfläche und eine Shore-D Härte der Oberfläche von 58 bestimmt.

The wall of the box was also investigated through measurement. A bond friction angle δ of 19.4° between the test sand and the wall surface and a Shore-D hardness of the surface of 58 were determined.

Abschließend wurden die Messungen den in Frage kommenden theoretischen Ansätze für die Berechnung des Erddrucks gegenübergestellt. Durch den Vergleich der Ergebnisse soll eine Vorstellung zu den Spannungumlagerungen in einer Sandkiste nach EN 489 entstehen.

Stand des Wissens

Der Erddruck im Boden ist von den darüber liegenden Lasten und von auftretenden Verschiebungen abhängig. Sofern sich der Boden in Ruhe befindet, wirkt der sogenannte Erdruchdruck. Es wird zwischen horizontalem und vertikalem Erddruck unterschieden. Aufgrund der Scherfestigkeit von Erdstoffen wird nur ein Teil der vertikalen Lasten horizontal wirksam. Die vertikalen Erddruckspannungen nehmen proportional mit der Tiefe in Abhängigkeit von der Wichte des Bodens zu. Zusätzliche Flächenlasten sind zu addieren. Für die Berechnung des horizontalen Erddrucks werden die vertikalen Erddruckspannungen mit dem Erddruckbeiwert k abgemindert. Für den horizontalen Erdruchdruck in Sanden wird in der Regel der Erdruchdruckbeiwert $k_0 = 1 - \sin \varphi'$ verwendet, wobei φ' der innere Reibungswinkel des Bodens ist (DIN 4085). Es gelten unter diesen üblichen Annahmen die Gleichungen 1 und 2.

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \gamma \cdot z + p \\ \sigma_h &= k_0 \cdot \sigma_z\end{aligned}$$

Mit

σ_z = vertikale Spannung im Boden
 σ_h = vertikale Spannung im Boden
 γ = Wichte des Bodens
 z = Tiefe unter Geländeoberfläche
 k_0 = Erdruchdruckbeiwert
 p = Oberflächenlast

In einer Sandkiste interagiert der Sandkörper zudem mit den Wänden der Kiste. Dies geschieht aufgrund der Verzahnung und dem Steifigkeitsunterschied zwischen Wandung und Bodenkörper. Durch Spannungumlagerungen können sich Gewölbe im Boden ausbilden. Finden diese Spannungumlagerungen zwischen den Grabenwänden statt, wird dies auch Siloeffekt genannt und ein Teil des Eigengewichts des Schüttguts wird über Reibung an den Grabenwänden aufgenommen. Für den zweidimensionalen Fall kann dies durch den Beiwert κ gemäß Gleichung 3 und Gleichung 4 beschrieben werden (vgl. JANSSEN 1895, TERZAGHI & JELINEK 1954, HUDER 1972).

Finally, the measurements were compared with the possible theoretical approaches for calculating the earth pressure. The comparison of the results should give an idea of the stress redistributions in a sandbox according to EN 489.

State of knowledge

The earth pressure in the soil depends on the overlying loads and on occurring displacements. If the soil does not move, the so-called earth pressure at rest acts. A distinction is made between horizontal and vertical earth pressure. Due to the shear strength of earth materials, only part of the vertical loads act horizontally. The vertical earth pressure stresses increase proportionally with depth as a function of the weight of the soil. Additional surface loads must be added. For the calculation of the horizontal earth pressure, the vertical earth pressure stresses are reduced by the earth pressure coefficient k . For horizontal earth pressure in sands, the earth pressure coefficient $k_0 = 1 - \sin \varphi'$ is usually used, where φ' is the internal friction angle of the soil (DIN 4085). Equations 1 and 2 apply under these common assumptions.

Gleichung 1// Equation 1

Gleichung 2// Equation 2

With

σ_z = vertical stress in the soil
 σ_h = vertical stress in the soil
 γ = weight of the soil
 z = depth below ground surface
 k_0 = earth pressure coefficient
 p = surface load

In a sandbox, the sand body also interacts with the walls of the box. This occurs due to the interlocking and the difference in stiffness between the walls and the floor body. Stress redistributions can cause arches to form in the floor. If these stress redistributions take place between the trench walls, this is also called the silo effect and part of the dead weight of the bulk material is absorbed by the trench walls via friction. For the two-dimensional case, this can be described by the coefficient κ according to equation 3 and equation 4 (cf. JANSSEN 1895, TERZAGHI & JELINEK 1954, HUDER 1972).

$$\sigma_z = \kappa \cdot (\gamma \cdot z + p)$$

Gleichung 3// Equation 3

$$\kappa = \frac{1 - e^{-2k_g \cdot \tan \delta \cdot z/b}}{2k_g \cdot \tan \delta \cdot z/b}$$

Gleichung 4// Equation 4

Mit
 κ = Silobeiwert
 b = Grabenbreite
 δ = Wandreibungswinkel zwischen Grabenmaterial und Wand
 k_g = Erddruckbeiwert im Graben

With
 κ = silo value
 b = trench width
 δ = angle of wall friction between trench material and wall
 k_g = earth pressure coefficient in the trench

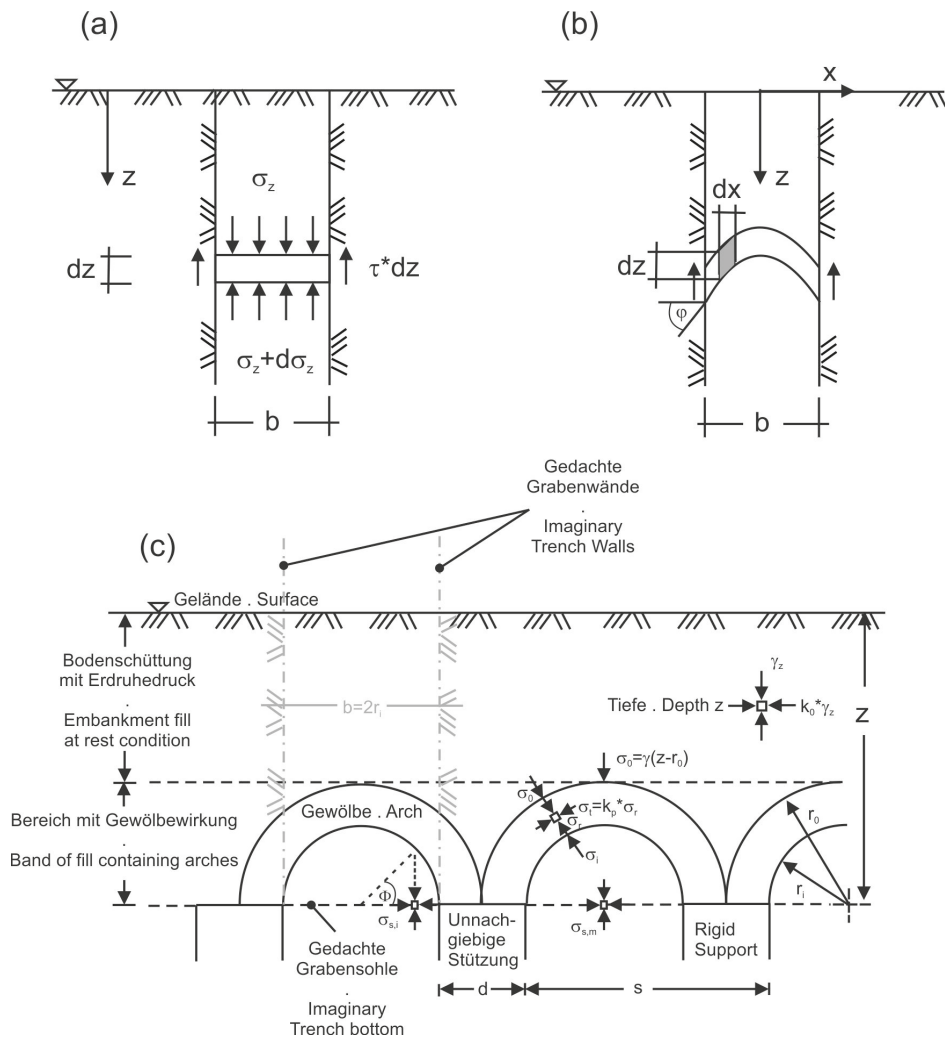


Abbildung 3: Modellvorstellungen für Gewölbewirkung
 Fig.3: Model ideas for arching

Dabei wird für die Berechnung von κ von einer ebenen Elementscheibe ausgegangen, die in Abbildung 3a) dargestellt ist. Ein Gewölbe wird hingegen von HAJNAL et al., Abbildung 3b), und HEWLETT & RANDOLPH, Abbildung 3c), angenommen (Hajnal et al. 1984, Hewlett et al. 1988). Für die Vergleichbarkeit wurden gedachte Grabenwände in Abbildung 3c) ergänzt. Die Vertikalspannung unter der Mitte des Gewölbes geben HEWLETT & RANDOLPH für den ebenen Fall gemäß Gleichung 5 an.

$$\sigma_s = \gamma \cdot (z - s/2) \cdot \left(\frac{s-d}{s}\right)^{(k_p-1)} + \frac{s-d}{2} \cdot \gamma$$

Mit

- σ_s = vertikale Spannung an der Sohle
- z = Lage der Sohle unter Geländeoberfläche
- s = Außendurchmesser des Gewölbes
- d = Breite des Auflagers
- k_p = Passiver Rankine Erddruckbeiwert
= $(1 + \sin \varphi') / (1 - \sin \varphi')$

Bildet sich das Gewölbe entsprechend aus, ist die Vertikalspannung σ_s unter dem Scheitelpunkt des Gewölbes maximal und nimmt in Richtung der Auflager ab. Ähnliche Ergebnisse berichtete EIBL et al. rd. 6 Jahre zuvor anhand von numerischen Untersuchungen von Spannungszuständen in Silos (Eibl. et al. 1982) ohne eine geometrische Idee des Gewölbes vorzugeben. Abbildung 4 zeigt einen Auszug aus den Ergebnissen. Darin wird bestätigt, dass die Vertikalspannungen zur Wand hin abnimmt sofern die Wandreibung größer Null ist. Die Vertikalspannung verläuft demnach nicht über den Siloboden konstant.

For the calculation, a planar element disk is assumed, which is shown in figure 3a). A vault, on the other hand, is assumed by HAJNAL et al., Figure 3b), and HEWLETT & RANDOLPH, Figure 3c) (Hajnal et al. 1984, Hewlett et al. 1988). Imaginary trench walls were added to Figure 3c) for comparability. The vertical stress under the center of the vault is given by HEWLETT & RANDOLPH for the plane case according to Equation 5.

Gleichung 5 // Equation 5

With

- σ_s = vertical stress on the invert
- z = position of the invert below ground surface
- s = outer diameter of the arch
- d = width of the support
- k_p = passive Rankine earth pressure coefficient
= $(1 + \sin \varphi') / (1 - \sin \varphi')$

If the vault forms accordingly, the vertical stress σ_s is maximum below the apex of the vault and decreases in the direction of the supports. Similar results were reported by EIBL et al. about 6 years earlier based on numerical investigations of stress states in silos (Eibl. et al. 1982) without specifying a geometrical idea of the vault. Figure 4 shows an extract of the results. It confirms that the vertical stress decreases towards the wall if the wall friction is greater than zero. Thus, the vertical stress is not constant across the silo floor. A further influence on the earth pressure stresses in a sand box is due to the installation method.

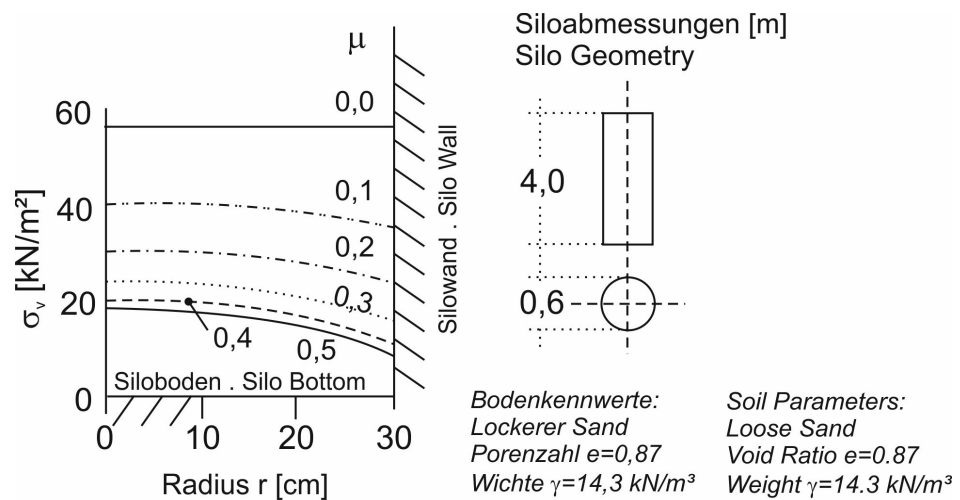


Abbildung 4, Auszug aus den Ergebnissen von EIBL et al.
Fig.4: Excerpt from the results of EIBL et al.

Ein weiterer Einfluss auf die Erddruckspannungen in einer Sandkiste ist durch das Einbauverfahren zu verzeichnen. Die händische oder maschinelle Verdichtung führt zu der Erhöhung der Lagerungsdichte, kann aber auch zu Verspannungen und damit zu erhöhten horizontalen Erddrücken führen. Dieser Verdichtungserddruck kann rechnerisch durch erhöhte Erddruckbeiwerte dargestellt werden. In der Literatur sind erhöhte Erddruckbeiwerte für den horizontalen Verdichtungserddruck in der Bandbreite von 0,7 bis 2,0 angegeben (vgl. FUCHS 1974, GRAMM 1983, NETZER 1998, DIN 4085). Durch das Einrieseln wird ein weitgehend homogener und reproduzierbarer Bodenkörper erzeugt, dessen Lagerungsdichte durch die Fallhöhe gesteuert wird. Das Verfahren verspricht eine Reduktion der durch Verdichtungsverfahren induzierten zufälligen Verspannungen.

Messungen

Es wurden insgesamt fünf Einbausituationen erstellt und die Erddrücke gemessen. In allen Versuchen wurden in vier Stufen Lastplatten aufgesetzt. In einem ersten Versuch wurde die Sandkiste nur mit Sand durch einrieseln befüllt (gemäß Abbildung 2). Es wurde eine Lagerungsdichte von $D=0,5$ erreicht. In den nachfolgenden Versuchen wurde die Sandkiste in Vorbereitung für Verschiebeversuche nach EN489 mit Sand und einem Prüfkörper befüllt (gemäß Abbildung 1). Durch die zusätzlichen Auflasten wurde jeweils die normativ geforderten 18 kN/m^2 am Rohrscheitel erreicht. Beim Einbau mit Rohr wurde die Bettung unter dem Rohr nach dem Einrieseln für die Lagesicherung des Rohres etwas nachverdichtet, wodurch sich die Lagerungsdichte auf $D=0,6$ erhöhte.

In Abbildung 5 sind die Erddruckmessungen der Erddruckgeber E1, E2 und E3 und die sich aus den Messungen ergebenden experimentellen Erddruckbeiwerte k_{exp} auf Höhe der horizontalen Erddruckmessung für alle Auflaststufen dargestellt.

Compaction by hand or machine leads to an increase in the density, but can also lead to stresses and thus to increased horizontal earth pressures. This compaction earth pressure can be represented mathematically by increased earth pressure coefficients. In the literature, increased earth pressure coefficients for the horizontal compaction earth pressure are given in the range from 0.7 to 2.0 (cf. FUCHS 1974, GRAMM 1983, NETZER 1998, DIN 4085). Pouring produces a largely homogeneous and reproducible soil body, the bedding density of which is controlled by the drop height. The method aims for a reduction of random stresses induced by compaction processes.

Measurements

A total of five test situations were created and the earth pressures measured. In all tests, load plates were placed in four stages. In the first test, the sand-box was filled only with sand by pouring (according to Figure 2). A relative density of $D=0.5$ was achieved. In the subsequent tests, the sandbox was filled with sand and a test specimen in preparation for displacement tests according to EN489 (according to Figure 1). Due to the additional superimposed loads, the normatively required 18 kN/m^2 was achieved at the pipe crown in each case. In the case of installation with pipe, the bedding under the pipe was slightly recomacted after pouring in to secure the position of the pipe, which increased the bedding density to $D=0.6$.

Figure 5 shows the earth pressure measurements of the earth pressure transducers E1, E2 and E3 and the experimental earth pressure coefficients k_{exp} resulting from the measurements for all surcharge levels.

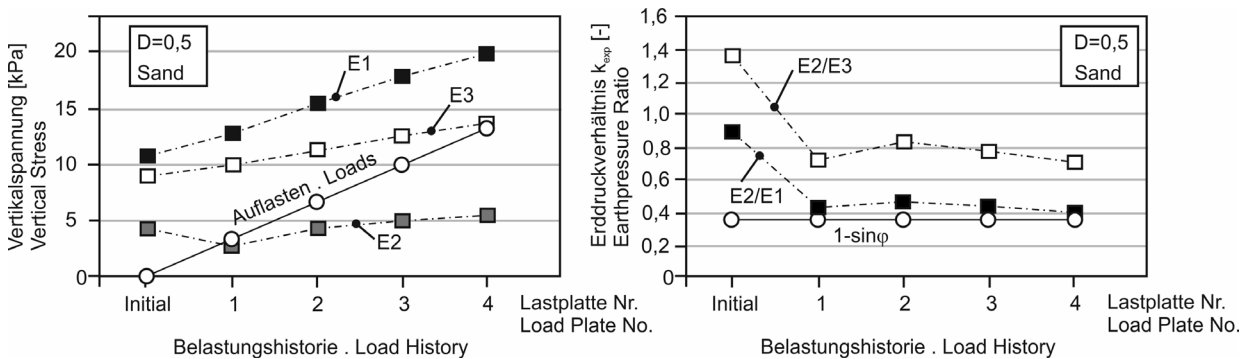


Abbildung 5, Erddruckmessungen in der Sandkiste –nur Sand
 Fig.5: Earth pressure measurements in the sandbox-only sand

Es kann mit Blick auf Abbildung 5 festgestellt werden, dass in der Mitte der Sandkiste der Erddruck E1 größer ist als in der Ecke der Sandkiste (E3). Der Erddruck E3 stieg infolge der weitem Auflasten schwächer an als in der Mitte der Sandkiste. Daher wird vermutet, dass sich auch in Sandkisten die Gewölbewirkung bogenmäßig ausbilden kann. Die Messungen bestätigen die Ergebnisse von EIBL et al. Eine weitere Einflussgröße ist die in der Länge begrenzte Dimension der Sandkiste. Das Erddruckverhältnis ist im Anfangsspannungszustand durch einen erhöhten Erddruck gekennzeichnet. Mit zunehmenden Auflasten stellt sich ein gleichmäßiges Erddruckverhältnis ein. Es scheinen die sich beim Einrieseln entstandenen Verspannungen durch die zusätzlichen Lasten überdrückt zu werden und damit keinen großen Einfluss mehr zu haben. In der Mitte der Sandkiste nähern sich die Werte dem Erdruhedruckbeiwert. In der Ecke der Sandkiste wirken sich die verminderten Spannungen durch ebenfalls erhöhte Beiwerte aus.

It can be seen from Figure 5 that in the center of the sandbox, the earth pressure E1 is greater than in the corner of the sandbox (E3). Earth pressure E3 increased less than in the center of the sandbox as a result of the further loads. It is assumed that arching action can also develop in sandboxes. The measurements confirm the results of EIBL et al. Another influencing factor is the dimension of the sandbox, which is limited in length. The earth pressure ratio is characterized by an increased earth pressure in the initial stress state. With increasing loads, a uniform earth pressure ratio is established. It appears that the stresses that developed during pouring in are counteracted by the additional loads and thus no longer have a major influence. In the center of the sandbox, the values approach the earth pressure coefficient at rest. In the corner of the sandbox, the reduced stresses have the effect of likewise increased coefficients.

Abbildung 6 zeigt ein repräsentatives Ergebnis für die Einbaubedingungen mit Rohr. Hier liegen die gemessenen Erddrücke in der Mitte der Sandkiste in einer ähnlichen Größenordnung wie in der Ecke. Gleichmaßen sind, wie auch bei den Versuchen nur mit Sand, erhöhte Erddruckbeiwerte zu verzeichnen. Auch mit Zunahme der Auflast und nach Aufbringen aller Lastplatten sind erhöhte Erddruckbeiwerte über dem Erdruhedruckbeiwert gemessen worden.

Figure 6 shows a representative result for the test conditions with pipe. Here, the measured earth pressures in the center of the sandbox are of a similar magnitude to those in the corner. Similarly, as in the tests with sand only, increased earth pressure coefficients are recorded. Increased earth pressure coefficients above the earth pressure coefficient were also measured with an increase in the surcharge and after application of all load plates.

Interpretation der Ergebnisse

Wenn auch durch das Einrieseln sehr homogene und reproduzierbare Einbaubedingungen hergestellt werden können, zeigt die Anwendung von Gleichung 1 und Gleichung 2 auf die Situation in der Kiste dass, die mit Gleichung 1 berechneten Spannungen um rund 13% bis 30% über den gemessenen Spannungen liegen. Daher ist folglich von einem Siloeffekt in der Sandkiste auszugehen und Gleichung 3 ist anzuwenden liegen.

Interpretation of the results

Even though very homogeneous and reproducible installation conditions can be produced by pouring, the application of equation 1 and equation 2 to the situation in the box shows that the stresses calculated with equation 1 are about 13% to 30% higher than the measured stresses. Consequently, a silo effect can be assumed in the sandbox and equation 3 must be applied.

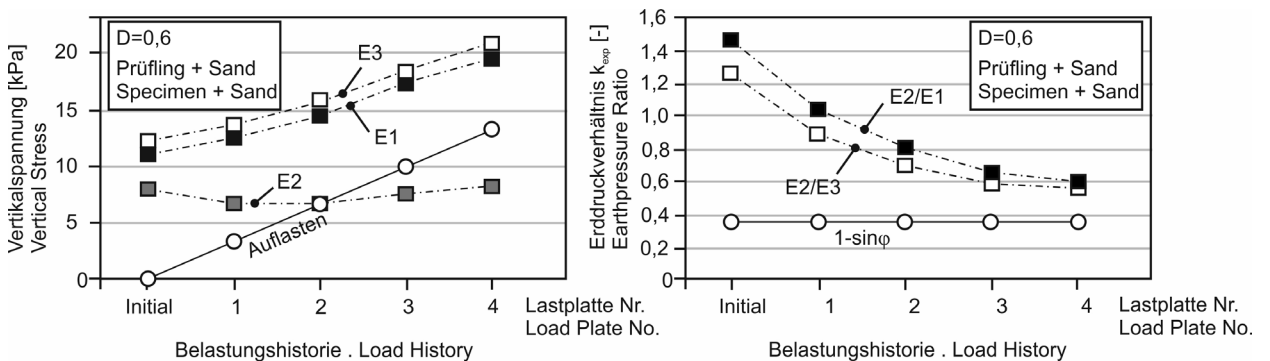


Abbildung 6, Erddruckmessungen in der Sandkiste- Prüfling und Sand
 Fig.6: Earth pressure measurements in the sand box- test specimen and sand

In Abbildung 7 (links) wird der Berechnungsansatz der Gleichung 3 für Silowirkung mit den Messungen verglichen. Für den Erddruck in der Mitte der Sandkiste (E1) ist mit einer Abweichung von 0,6% bis 5% eine gute Übereinstimmung zu erkennen. Für die gemessenen Spannungen in der Ecke der Sandkiste gilt das nur für den Fall mit Prüfling. Bei reiner Sandfüllung sind in der Ecke noch geringere Werte gemessen worden (Abbildung 5, links). Dies kann bei gekrümmten Gewölbeformen der Fall sein, da die Erdlasten

Figure 7 (left) compares the calculation approach of equation 3 for silo effect with the measurements. For the earth pressure in the centre of the sandbox (E1), a good agreement can be seen with a deviation of 0.6% to 5%. For the measured stresses in the corner of the sandbox, this only applies to the case with test specimen. With pure sand filling, even lower values were measured in the corner (Figure 5, left). This can be the case with curved vault shapes, as the earth loads are transferred via the vault into

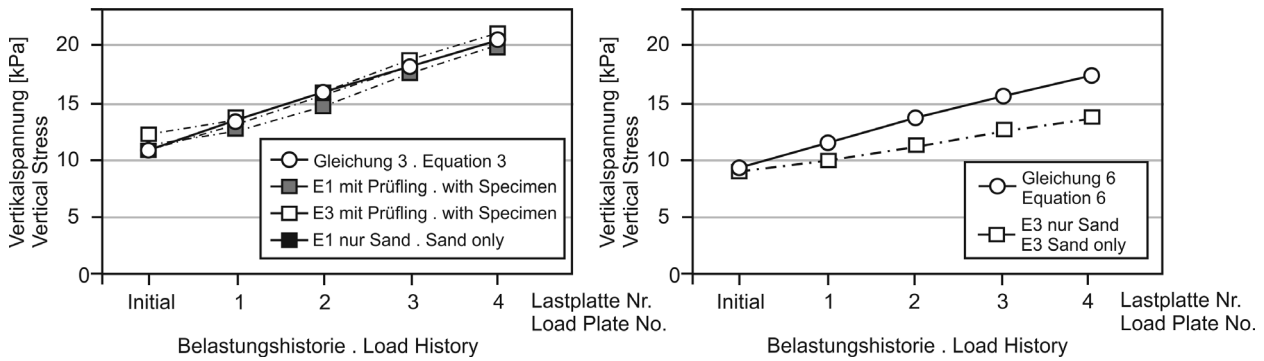


Abbildung 7, Vergleich der Berechnungsansätze mit den Messungen
 Fig.7: Comparison of the calculation approaches with the measurements.

über das Gewölbe in die Kistenwand abgeleitet werden und die Spannungen am Kistenboden von der Position unter dem Gewölbe abhängen.

the box wall and the stresses at the bottom of the box depend on the position under the vault.

Gleichung 5 liefert die Spannung am Kistenboden direkt unter dem Gewölbe. Für die übrigen Positionen unter dem Gewölbe kann dieser Wert in Abhängigkeit des Kreischnittwinkels Φ (s. Abbildung 3) abgemindert werden, wenn die Spannung in der Mitte unter dem Gewölbescheitelpunkt bekannt ist. In Abhängigkeit der Spannung unter dem Scheitelpunkt des Gewölbes $\sigma_{s,m}$ gilt dann für die übrigen Punkte unter dem Gewölbe die reduzierte Spannung $\sigma_{s,i}$ gemäß Gleichung 6.

Equation 5 provides the stress at the bottom of the box directly under the vault. For the other positions under the vault, this value can be reduced as a function of the circle section angle Φ (see Figure 3) if the stress in the center under the apex of the vault $\sigma_{s,m}$ is known. Depending on the stress under the apex of the vault, for the remaining points under the vault the reduced stress $\sigma_{s,i}$ is calculated based on equation 6.

$$\sigma_{s,\phi} = \sigma_{s,m} \cdot \sin \Phi$$

Gleichung 6 // Equation 6

Im vorliegenden Fall liegt der Erddruckgeber um B/4 ausmittig, wodurch der Winkel Φ den Wert 60° annimmt. Unbekannt ist in der Sandkiste die Breite d der unnachgiebigen Stützung bzw. die Dicke des Gewölbes, weshalb hier $\sigma_{s,m} = \sigma_v$ nach Gleichung 3 gesetzt wird, welche für die Mitte der Kiste gute Werte lieferte. Nach Gleichung 6 ergibt sich dann aber nur für den Initialspannungszustand am Erddruckgeber E3 eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit der Messung (s. Abbildung 7, rechts „Initial“). Für alle folgende Zustände mit Auflast ist Gleichung 6 nicht zutreffend, da der gemessene Wert in der Ecke deutlich langsamer ansteigt, als nach Gleichung 6 zu erwarten wäre. Abbildung 7 (rechts) verdeutlicht das.

In the present case, the earth pressure transducer is off-center by B/4, so the angle Φ takes the value 60° . Unknown in the sandbox is the width d of the fixed support or the thickness of the arch, which is why $\sigma_{s,m} = \sigma_v$ is set here according to equation 3, which provided accurate values for the center of the box. According to equation 6, however, satisfactory agreement with the measurement is then obtained only for the initial stress state at the earth pressure transducer E3 (see Figure 7, "Initial" on the right). For all subsequent states with surcharge load, equation 6 is not adequate, since the measured value in the corner increases less than would be expected according to equation 6. Figure 7 (right) illustrates this.

Da Gleichung 5 und damit auch Gleichung 6 für den ebenen Spannungszustand gilt, wird darin die Gewölbewirkung in Längsrichtung der Kiste vernachlässigt. Da die gemessenen Werte unter den berechneten Werten liegen erscheint diese Vereinfachung für Sandkisten, zumindest wenn es um die Spannungen in den Ecken geht, nicht mehr haltbar. Die in Abbildung 7 links zu erkennenden Abweichungen weisen auf dreidimensionale Effekte infolge der Längenbegrenzung der Kiste hin. Da die Sandkiste länger ist als hoch, kann sich aber kein kreisförmiges Gewölbe in Längsrichtung ausbilden. Was hier genau passiert, ist noch genauer zu untersuchen. Mit den dargestellten Berechnungsverfahren lassen sich folglich die gemessenen Werte in der Kistenecke, in der Variante nur mit Sand, nicht ermitteln.

Schlussfolgerungen

Durch die vorliegende Untersuchung des Erddrucks in einer Sandkiste nach EN 489 konnte zunächst gezeigt werden, dass sich bei geostatischen Anfangszuständen Verspannungen in den Kistenecken einstellen können, welche für die Grabensituation in situ als untypisch einzuordnen sind.

Weiterhin wurde beobachtet, dass durch die normativ nach EN 489 vorgegebenen zusätzlichen Auflasten diese initialen Verspannungen überdrückt werden. Die Spannungen auf Rohrniveau und am Boden der Kiste können dann unter Berücksichtigung der Silotheorie zutreffend berechnet werden. Auch das Erddruckverhältnis stellte sich nach dem Aufbringen der zusätzlichen Lastplatten in einem realistischen Verhältnis ein. Die Sinnhaftigkeit des durch die EN 489 vorgegebene Einbauverfahren mit zusätzlichen Auflasten lässt sich daher durch die Untersuchungen bestätigen. Es führt zu einer gleichmäßigen und berechenbaren Spannungsverteilung in der Sandkiste. Dennoch sollte auf eine homogene dichte Lagerung der Bettung beim Einbau geachtet werden. Die Lagerungsdichte sollte dokumentiert werden und von lokalen Verdichtungsmaßnahmen in der Kiste sollte abgesehen werden, damit punktuelle Abweichungen vermieden werden.

In der Kistenecke liefern die hier vorgestellten und untersuchten Berechnungsverfahren bei der Befüllung nur mit Sand keine befriedigende Übereinstimmung mit der durchgeführten Messung. Es wird empfohlen, für das bessere Verständnis der Spannungszustände in Versuchskisten nach EN 489 hier umfangreichere Messungen vorzunehmen und auch numerische Verfahren anzuwenden (s. EIBL et al. 1982). Auf diese Weise kann die Grundlage geschaffen werden, aus den Verschiebekräften einer Erddruckprüfung nach EN 489 verlässlich auf die statisch relevanten

Since equation 5 and thus also equation 6 apply to the plane stress state, the arch action in the longitudinal direction of the box is neglected in this equation. Since the measured values are lower than the calculated values, this simplification appears not to be valid for sandboxes, at least in the corners length limitation of the box. However, since the sandbox is longer than high, a circular vault cannot form in the longitudinal direction. What exactly happens here needs to be investigated in more detail. Consequently, the measured values in the corner of the box, in the variant with sand only, cannot be determined with the calculation methods presented.

Conclusion

The present investigation of the earth pressure in a sandbox in accordance with EN 489 firstly demonstrated that, in the case of initial geostatic conditions, stresses can occur in the corners of the box which are to be interpreted as atypical for the trench situation in situ.

Furthermore, it was observed that these initial soil constraints are suppressed by the additional surcharges specified in the standard EN 489. The stresses at the pipe level and at the bottom of the box can then be calculated correctly, taking into account the silo theory. The earth pressure ratio also turned out to be realistic after the additional load plates had been applied. The usefulness of the installation method with additional superimposed loads specified by EN 489 can therefore be confirmed by the investigations. It leads to a uniform and calculable stress distribution in the sandbox. Nevertheless, care should be taken to ensure homogeneous, dense bedding of the bedding during installation. The bedding density of the material should be documented and local compaction measures in the box should be refrained from in order to avoid punctual deviations.

In the box corner, the calculation methods presented and investigated here do not provide satisfactory agreement with the measurement performed when filling with sand only. It is therefore recommended that, for a better understanding of the stress conditions in test boxes according to EN 489, more extensive measurements should be carried out here and numerical methods should also be applied (see EIBL et al. 1982). In this way, the basis can be created for reliably concluding the statically relevant stress states and

Spannungszustände und Verschiebewiderstände an den Rohrverbindungen rückzuschließen.

Danksagung

Die dem Artikel zu Grunde liegenden Messungen wurden an der HafenCity Universität selbstfinanziert für die wissenschaftliche Begleitung von Aufgaben im Projekt „Qualitätsprüfung an Mantelrohrverbindungen für Fernwärmeleitungen nach EN489“ durchgeführt. Mein Dank gilt Violeta Madan und Marcus Illguth für die engagierte Durchführung und Bereitstellung der Messungen und Daten, sowie Herrn Dr.-Ing. Andretzky vom AGFW e.V., Auftraggeber des genannten Projektes, für die freundliche Unterstützung und Zusage zur Nutzung der Synergieeffekte.

displacement resistances at the pipe joints from the displacement forces of an earth pressure test in accordance with EN 489.

Acknowledgement

The measurements on which this article is based were carried out at HafenCity University on a self-financed basis for the scientific support of tasks in the project “Quality testing of casing pipe joints for district heating pipes according to EN489”. My thanks go to Violeta Madan and Marcus Illguth for their dedicated performance and provision of the measurements and data, as well as to Dr.-Ing. Andretzky of AGFW e.V., the client of the aforementioned project, for his kind support and promise to use the synergy effects.

Literatur / Literature

(FW 401 T6) AGFW FW 401 (2007) "Teil 6, Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze – Bauteile; Rohrverbindungen" – AGFW Verlag, Frankfurt am Main

(Weidlich, 2015) Weidlich I., (2015) "Near future testing requirements for joints in modern district heating networks", International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies - CONECT 2015, Science direct, Energy Procedia, ISSN 18766102, Elsevier Ltd., London

(Wolf et al. 2012) Wolf I., Nielsen H.-J., Weidlich I., (2012) „Dehnpolster – KMR Systembauteil mit großer Wirkung“, Euroheat & Power, 41. Jhg., Heft 3

(EN 489) EN 489-1:2020-03 (2020) "Fernwärmerohre - Einzel- und Doppelrohr-Verbundsysteme für erdverlegte Fernwärmenetze - Teil 1: Mantelrohrverbindungen und Wärmedämmung für Fernwärmenetze nach EN 13941-1"; Deutsche Fassung EN 489-1:2019, Beuth-Verlag, Berlin

(Smidt, 2002) Smidt H.D., (2002) „Intercomparison of sandboxes used for testing joints for district heating pipes“, NORDTEST Report TR 495, 2002-03, Nordtest Finland, ISSN: 0283-7234

(Weidlich, 2008) Weidlich, I. (2008) „Untersuchung zur Reibung an zyklisch axial verschobenen erdverlegten Rohren“. Promotionsschrift 64, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energie-wasserbau, Leibniz Universität Hannover.

(tom Würden, 2010) tom Würden, F. (2010) „Untersuchung zum räumlichen aktiven Erddruck auf starre vertikale Bauteile im nichtbindigen Boden“. Promotionsschrift 68, Institut für Grundbau, Bodenmechanik und Energiewasserbau, Leibniz Universität Hannover.

(DIN 4085) DIN 4085:2017-08, (2017) „Baugrund - Berechnung des Erddrucks“, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag Berlin

(Janssen, 1895) Janssen, H. A. (1895) „Versuche über Getreidedruck in Silozellen“. Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, Seiten 1045–1049

(Terzaghi et al., 1954) Terzaghi, K. und Jelinek R. (1954) Theoretische Bodenmechanik. Springer Verlag Berlin (Huder 1972) Huder J., (1972) "Stability of Bentonite slurry trenches with some experiences in swiss practice", 5th European Conf. SMFE, S.517-522, Madrid

(Hajnal et al., 1984) Hajnal I., Marton J., Regele Z., (1984) "Construction of Diaphragm Walls", John Wiley&Sons, ISBN 0-471-10002-1, 339 S.

(Hewlett et al., 1988) Hewlett, W. und M. Randolph (1988) "Analysis of piled embankments", Ground Engineering, 21:12–17

(Eibl. et al., 1982) Eibl J., Landahl H., Häußler U., Gladen W. (1982) „Zur Frage des Silodrucks“, Beton- und Stahlbetonbau, 4-1982, pp. 104-110

(Netzer, 1998) Netzer, W. (1998) "Pipe deflection in extreme situations - A check for the Austrian calculation standard ÖNORM B5012". 3R International, 37(2-3):124–129, 1998.

(Gramm, 1983) Gramm, G. (1983) „Statik und Festigkeit des Kunststoffmantelrohrs“. 3R international, 22(7/8):355–357, 1983.

(Fuchs, 1974) Fuchs, E. (1974) „Ruhedruck rolliger Erdstoffe“. Schriftenreihe der Bauforschung 53, Institut für Ingenieur- und Tiefbau, Bauakademie der DDR, 1974.

ISBN: 978-3-947972-33-3

DOI: 10.34712/142.21