

Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen

Abschlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben

Herausgeber:

AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.
Stresemannallee 30 | D-60596 Frankfurt am Main
E-Mail: h.huther@agfw.de | Internet: www.agfw.de

Aktenzeichen: 33759/01

Gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Verlag:

AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information
und Standardisierung mbH

Stresemannallee 30 | D-60596 Frankfurt am Main

Telefon: +49 69 6304-416 | Telefax: +49 69 6304-391

E-Mail: bestellung@agfw.de | Internet: www.agfw.de

Verkaufspreis:

EUR 15,00 zzgl. MwSt. für AGFW-Mitglieder

EUR 35,00 zzgl. MwSt. für Nichtmitglieder

Hochschulen und Lehre: Preis auf Anfrage

ISBN 3-89999-086-2

Hinweis:

Beim Inhalt der vorliegenden Publikation handelt es sich um den von den Projektpartnern freigegebenen Berichtstext der Zuwendungsempfänger. AGFW übernimmt keine Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung. Forschungsberichte stellen i.d.R. keine abgestimmte Branchenmeinung dar. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Trotzdem kann von den Autoren, den Herausgebern und dem Verlag keine Haftung für etwaige Fehler übernommen werden. Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, ist nur mit Genehmigung der Autoren gestattet.

August 2020

© AGFW, Frankfurt am Main

Vorwort des AGFW

An der Schnittstelle zwischen Forschung und Fernwärmebranche übernimmt der **AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.** durch die Bereitstellung der Ergebnisse von öffentlich geförderten Forschungsprojekten Verantwortung. Im Rahmen der Veröffentlichungsreihe „Forschung und Entwicklung“ werden branchenrelevante Abschlussberichte bereitgestellt.

In nahezu allen aktuellen Studien mit Langfristszenarien wird Fernwärme als ein zentraler Schlüssel der Wärmewende gesehen. Wichtiger Meilenstein sind dabei auch der Ausbau und die Verdichtung von Wärmenetzen. Die Nutzung des Untergrundes für entsprechende Fernwärmetrassen führt, gerade in dicht besiedelten, städtischen Bereichen, unweigerlich zu Nutzungskonflikten, denn der unterirdische Straßenraum wird immer gefragter. Seit einigen Jahren werden Straßenzüge schmaler, die Konkurrenz erdverlegter Infrastruktur nimmt zu und Bäumen und Vegetation zur Steigerung der Lebensqualität der Anwohner und zur Verbesserung des Stadtklimas gewinnen an Bedeutung.

Ermöglichen es die lokalen Randbedingungen nicht alle Ansprüche gleichermaßen zu erfüllen, müssen alternative (in der Regel kostenintensivere) Trassenführungen umgesetzt werden, Bäume weichen oder der Ausbau/ die Verdichtung ist nicht möglich. Es stellen sich unweigerlich Fragen nach dem Risiko welches durch die Interaktion von Fernwärmeleitungen und Vegetation auftreten kann:

1. Hat der Wärmeeintrag von Fernwärmeleitungen einen Einfluss auf das Wachstumsverhalten oder die Vitalität von Bäumen?
2. Können (Baum-) Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen oder negativ beeinflussen?
3. Welchen Einfluss hat das Verfüllmaterial auf das Wurzelwachstum?
4. Welche Besonderheiten sind bei der Planung von FW und Wurzel-Interaktionsbereichen zu berücksichtigen?

In dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Verbundforschungsvorhaben **„Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“** (kurz: *FW-Vegetation*; Aktenzeichen 33759/01), ist Ihr **AGFW** diesen Fragestellungen systematisch auf den Grund gegangen. Gemeinsam mit dem IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH (Gelsenkirchen) konnten neben theoretischen auch systematische Untersuchungen im Labormaßstab (durch Unterstützung des Institut für „Evolution und Biodiversität der Pflanzen“ der Ruhr-Universität Bochum) durchgeführt werden. Durch die Begleitung des interdisziplinären projektbegleitenden Arbeitskreis und im Besonderen der Unterstützung von Mitgliedsunternehmen des AGFW e.V., ließen sich die Ergebnisse mit Praxisfällen abgleichen und mit Experten diskutieren.

Der AGFW stellt Ihnen zur Brancheninformation diesen Abschlussbericht zur Verfügung und wünscht Ihnen eine interessante und anregende Lektüre.

Werner Lutsch
(Geschäftsführer AGFW e. V.)

Dr. Heiko Huther, Sebastian Grimm
(Forschung und Entwicklung)

Abschlussbericht

„Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“

Aktenzeichen: 33759/01

Laufzeit des Vorhabens: 29.06.2017 – 30.06.2020

Projektpartner:

AGFW | Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und
Standardisierung mbH

IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

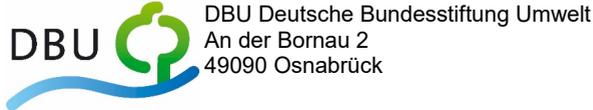
Salomon, M. (IKT), Grimm, S. (AGFW), Stützel, T. (RUB)

Datum: November 2020 (redaktionell überarbeitete Version)

Abschlussbericht:

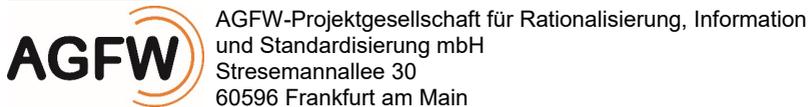
Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen (AZ: 33759/01).

Fördermittelgeber:



Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Antragsteller:



Bereichsleiter F&E: Dr. Heiko Huther

Projektleitung und -bearbeitung: Sebastian Grimm, M.Sc.

Dipl.-Ing. Stefan Hay

Dipl.-Ing. Rolf Besier

Kooperationspartner:



IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH
Exterbruch 1
45886 Gelsenkirchen

Wissenschaftliche Leitung: Prof. Dr.-Ing. habil. Bert Bosseler

Projektleitung und -bearbeitung: Mirko Salomon, M.Sc.

Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Sissis Kamarianakis

Dipl.-Ing. Frank Bersuck

Kilian Möllers, M.Eng.

Tim Hörster, M.Sc.

Kevin Weinz, B.Sc.

Elisa Elfroth

Mit fachlicher Unterstützung von Prof. Dr. Thomas Stützel (Ruhr-Universität Bochum – Lehrstuhl für Evolution und Biodiversität der Pflanzen).

Inhalt

Anlagenverzeichnis	5
Danksagung	6
Kurzfassung	7
1 Wärme und Vegetation	9
1.1 Aktueller Wissensstand	9
1.2 Entwicklung von Hypothesen zum Wurzelwachstum an Fernwärmeleitungen	19
1.3 Forschungsbedarf, Zielstellung, Vorgehensweise	20
2 Bestandsaufnahme vor Ort (In-situ-Aufgrabungen)	23
2.1 Interaktion von Wurzeln und Fernwärmleitung	27
2.2 Interaktion von Wurzeln und Bettung	32
2.3 Keine Interaktionen zwischen Wurzeln und FW-Leitung/Bettung	37
2.4 Wesentliche Erkenntnisse aus den In-situ-Aufgrabungen	40
2.5 Entwicklung von neuen Versuchsfeldern	43
3 Temperaturmessungen und Berechnung von Wärmefeldern	45
3.1 Einflüsse auf das Wärmefeld	45
3.2 Wärmefelder im Erdreich	52
3.3 FEM Berechnung von Wärmefeldern – Teil 1	57
3.4 Erstellung eines Messkonzepts zur Temperaturmessung	62
3.5 Aufbau/ Errichtung der Messstelle	66
3.6 Betrieb und erste Ergebnisse	68
3.7 FEM Berechnung von Wärmefeldern - Teil 2	75
4 Versuchstechnische Untersuchungen	80
4.1 Wurzelwachstumsverhalten – Einfluss Fernwärme auf Wurzel	80
4.2 Outside-In-Versuche – Einfluss Wurzel auf Fernwärmeleitung	95
4.3 Eindrückversuche – Einfluss Wurzel auf FW-Leitung	100
4.4 Versuchsfeld Waldfriedhof Dodesheide – Schutzmaßnahmen	105
5 Diskussion der Forschungsergebnisse und Weiterentwicklung eines biologischen Wachstumsmodells	118

5.1	Diskussion der Forschungsergebnisse	118
5.2	Weiterentwicklung eines Wurzelwachstumsmodells	126
6	Fachübergreifendes Konzept zur Trassenfindung	131
6.1	Aufbau einer Bewertungshierarchie mit Hilfe des Analytischen Hierarchie Prozesses	131
6.2	Praxisbeispiel	135
7	Erste Schlussfolgerungen für die Praxis	160
7.1	Empfehlungen für Planung und Bau	161
7.2	Schulungskonzepte und -materialien	169
7.3	Empfehlungen für Produktprüfungen und Nachweise porenraumarmen Verfüllmaterialien	173
7.4	Regelwerksarbeit	178
8	Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf	179
	Abbildungsverzeichnis	185
	Tabellenverzeichnis	192
	Literaturverzeichnis	194

Anlagenverzeichnis

Anlage 1	Simulation der Wärmeabstrahlung einer Fernwärmetrasse (TU Darmstadt)
Anlage 2	Konzept und Dokumentation zur Messstrecke
Anlage 3	Simulation von Wärmefeldern im Erdreich unter Berücksichtigung von Fernwärmeleitungen (TU Dresden)
Anlage 4	Versuche zum Wurzelwachstumsverhalten
Anlage 5	Outside-In-Versuche
Anlage 6	Eindrückversuche
Anlage 7	DEMUS-Tool zur Szenarienanalyse
Anlage 8	Schulungsmaterial

Danksagung

An erster Stelle möchte sich das Projektkonsortium herzlich für die Förderung und Unterstützung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) bedanken, ohne die eine Durchführung des Forschungsvorhabens zur „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“ nicht möglich gewesen wäre. Weiterhin gilt unser Dank der fachkundigen Begleitung von Prof. Stützel (Institut für „Evolution und Biodiversität der Pflanzen“ der Ruhr-Universität Bochum) und Frau Hodel M.Sc. (ZORN Sachverständigenbüro Gartenbau). Ein besonderer Dank gilt zudem Herrn Maag (Stadt Osnabrück – OsnabrückerServiceBetrieb (OSB)) für die Bereitstellung des Versuchsfeldes Dodesheide in Osnabrück und der Unterstützung bei den Bauarbeiten.

Ein besonderer Dank gebührt auch den Mitgliedern des projektbegleitenden Arbeitskreises „FW-Vegetation“, den AGFW Fachgremien, sowie den Fernwärmeversorgungsunternehmen für die spannende Diskussionen und Praxiserfahrungen, sowie der praktischen Unterstützung bei diversen Versuchen und Baumaßnahmen, die erheblich zur Steigerung der Praxisrelevanz beigetragen haben:

Energienetze Offenbach GmbH (Offenbach)

GEF Ingenieur AG (Leimen)

HAWK - Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst Fakultät Ressourcenmanagement (Göttingen)

I-Netz (Chemnitz)

Mainzer Fernwärme GmbH (Mainz)

münsterNETZ GmbH (Münster)

MVV Netze GmbH (Mannheim)

N-ERGIE Netz GmbH (Nürnberg)

Mainova AG (Frankfurt am Main)

Sachverständigenbüro Michael Honds GmbH & Co. KG (Mönchengladbach)

Stadt Chemnitz - Abteilung Grünplanung (Chemnitz)

Stadt Frankfurt am Main – Grünflächenamt (Frankfurt am Main)

Stadtwerke Karlsruhe GmbH (Karlsruhe)

STURM Isotech GmbH & Co. KG (Wolfsburg)

SWM – Infrastruktur GmbH & Co. KG (München)

Kurzfassung

Wärmenetze sind ein wichtiger Baustein der Energie- bzw. Wärmewende. Städte werden mit neuen Fernwärmetrassen erschlossen, welche i.d.R. als erdverlegte Leitungen ausgeführt werden. Zeitgleich sind der Erhalt und die Neupflanzung von Bäumen wesentlich für das urbane Klima und tragen zur Steigerung der Lebensqualität der Einwohner bei. Stadtbäume benötigen den urbanen Untergrund für das Wurzelwachstum.

Im unterirdischen Straßenraum kann es somit zur Konkurrenz zwischen Wurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen kommen. Die Einflüsse durch Wärmefelder im Erdreich von Fernwärmeleitungen auf Wurzeln sind bisher nicht systematisch untersucht worden. Auch mögliche Auswirkungen von Wurzelwuchs an Fernwärmeleitungen sind nur geringfügig bekannt. Aus diesem Grund sollen in dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben mögliche Interaktionsarten zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitungen untersucht werden.

Auf Grundlage einer Literaturstudie wurde ein ausführliches Versuchsprogramm entwickelt. Es wurden In-situ-Aufgrabungen an Fernwärmeleitungen in der Nähe von Baumstandorten durchgeführt, um erstmalig umfassende Praxis-Beobachtungen von Bäumen und Wurzeln an Fernwärmeleitungen durchführen zu können. Ergänzt wurden diese In-situ-Aufgrabungen durch Temperatur- und Feuchtemessungen an und um erdverlegten Fernwärmeleitungen an Baumstandorten, die durch weitergehende FE-Simulationen von Wärmefeldern ergänzt wurden. In Laborversuchen mit Pflanzen wurde der Einfluss von Wärmefeldern auf das Wurzelwachstum untersucht. In weiteren Untersuchungen wurden Muffenverbindungen und -ummantelungen von Kunststoffmantelrohren dahingehend getestet, ob Wurzeln einwachsen bzw. den Außenmantel beschädigen können. In Feldversuchen wurden zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV) als Schutz vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsgraben untersucht. Ergänzt werden die Feldversuche durch Langzeitbetrachtungen von Wurzelwuchs in Baumsubstraten. Die erzielten Ergebnisse flossen in ein fachübergreifendes Konzept zur Auswahl von Fernwärmetrassen-Alternativen mit ein.

Als ein Ergebnis des hier vorliegenden Forschungsvorhabens kann festgehalten werden, dass der physikalische Wärmeverlust von nach Stand der Technik betriebenen Fernwärmeleitungen keinen erkennbaren Einfluss auf das Wurzelwachstum von Bäumen hat. Schäden durch Wurzeln an nach Stand der Technik betriebenen Fernwärmeleitungen konnten ebenfalls nicht festgestellt werden. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass eine Interaktion zwischen Fernwärmeleitungen und Wurzeln durchaus schadensfrei möglich ist. ZFSV-Rezepturen können so eingestellt werden, dass sie vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsgraben schützen können. Porenreiche Böden (Substrate) am Baumstandort können bei fachgerechtem Einbau das Wurzelwachstum auf diese Bereiche konzentrieren. Durch eine strukturierte Szenarienanalyse

können die Vor- und Nachteile verschiedener Trassenalternativen transparent und nachvollziehbar bewertet werden.

Obwohl in dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben ein umfangreiches Versuchsprogramm durchgeführt und eine Vielzahl neuer Erkenntnisse erzielt wurden, ist dieses Forschungsgebiet dadurch geprägt, dass Wurzeln langsam wachsen und für weitergehende Ergebnisse und Aussagen Langzeitbetrachtungen notwendig sind. In dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben wurde die Basis in Form von Versuchsfeldern, In-situ-Dokumentationen und weiter- bzw. neu-entwickelten Prüfkonzepthen für Langzeituntersuchungen geschaffen, die in einem Folgeforschungsvorhaben durchgeführt werden können. Mit weiteren Langzeit-Ergebnissen können in Zukunft u.a. für Fernwärmeversorgern und Grünflächenämtern weitergehende Informationen und Arbeitsmaterialien zur Verfügung gestellt werden. Übergeordnetes Ziel ist weiterhin ein bestmöglicher Einklang zwischen Wurzeln und Fernwärmetrassen - technisch, biologisch und insbesondere kommunikativ zwischen den Beteiligten - für ein besseres Miteinander und eine hohe Lebensqualität in Städten.

1 Wärme und Vegetation

Durch Baumwurzeln verursachte Schäden an unterirdischen Leitungen und -kanälen, die bisher bekannt und erforscht sind, hängen u.a. von den verwendeten Rohrwerkstoffen, Korrosionsschutzmaßnahmen und Verbindungselementen ab [1]. Dies bedeutet auch, dass bisherige Untersuchungen schwerpunktmäßig durch Wurzeln verursachte Schäden an unterirdischen Leitungen und Kanälen betrachten. Ob jedoch Wärmefelder im Erdreich, insbesondere von Fernwärmeleitungen, Einfluss auf das Wachstumsverhalten von Bäumen und Wurzeln haben, ist bisher weitgehend unbekannt.

Im Vorfeld des hier vorliegenden Forschungsvorhabens wurde im Jahr 2013 eine wissenschaftliche Vorstudie [1] auf Basis einer Literaturlauswertung zum Themengebiet „Interaktion zwischen Baumwurzeln und unterirdischer Infrastruktur“ sowie zum Thema „Einfluss der Bodentemperatur auf das Wurzelwachstum“ erstellt.

Das Ziel dieser Vorstudie [1] war es, ein umfassendes Konzept zur Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen zu erarbeiten und den sich daraus ergebenden Forschungsbedarf abzuleiten. Die Erkenntnisse aus dieser Vorstudie sind die Basis für das hier vorliegende Forschungsvorhaben. Folgend werden die wesentlichen Ergebnisse der Vorstudie [1] in diesen Bericht übertragen und durch eine im vorliegenden Forschungsvorhaben durchgeführte Literaturrecherche ergänzt und aktualisiert.

Hinweis:

Im nachfolgenden Forschungsbericht wird der Kontakt zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitungen bzw. Sandbettungen als „Interaktion“ deklariert. Das bedeutet, dass jede Wurzel innerhalb eines Leitungsgrabens oder an einer Leitung eine Interaktion darstellt. Dies bedeutet jedoch nicht, dass es sich zwangsläufig um eine für Wurzel oder Leitung schädliche Interaktion handelt. Die Auswirkungen einer identifizierten Interaktion sind folgend im Einzelfall beschrieben.

1.1 Aktueller Wissensstand

Als Grundlage der durchgeführten Literaturrecherche wurden die Inhalte von IKT-Forschungsvorhaben sowie Regelwerken und Normen ausgewertet, die als Kern die Themen Wurzeln und unterirdische Infrastruktur beschreiben. Die IKT-Forschungsberichte sind folgend aufgelistet:

- Ökologische Auswirkungen von Wurzeleinwuchs in Abwasserkanälen und -leitungen und ökonomische Maßnahmen zur Schadensvermeidung und Sanierung (März 2001) [2]
- Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle (Juli 2004) [3]

- Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle „Ergänzungsvorhaben“ (Juni 2007) [4]
- Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle „ergänzende Feldversuche“ (Juni 2007) [5]
- Betriebs- und Sanierungsmaßnahmen bei Wurzelschäden in öffentlichen und privaten Abwasserleitungen und –kanälen - Inspektionen (Juli 2007) [6]

Zudem wurden Regelwerke und Normen zum Thema „Bäume, Wurzeln und unterirdische Leitungen und Kanäle“ recherchiert:

- DWA-M162 „Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle“ [7]
- DIN 1998 „Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Flächen; Richtlinien für die Planung“ [8]
- DIN 18920 „Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Schutz von Bäumen, Pflanzenbeständen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen“ [9]
- RAS-LP 4, Schutz von Bäumen, Vegetationsbeständen und Tieren bei Baumaßnahmen“ [10]
- FLL „Empfehlungen für Baumpflanzungen - Teil1: Planung, Pflanzarbeiten, Pflege“ [11]
- FLL „Empfehlungen für Baumpflanzungen - Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate“ [12]

Anschließend wurden weitergehende Literaturstellen, wie Fachartikel, wissenschaftliche Paper und Erfahrungsberichte, recherchiert. Zudem wurden Gespräche mit den Mitgliedern des Expertenkreises Forschung und Entwicklung des AGFW durchgeführt.

1.1.1 Biologische Wachstumsmodelle

Inhaltliche Schwerpunkte der IKT-Forschungsvorhaben sind die Interaktion zwischen Wurzeln und Abwasserleitungen und -kanälen sowie die Entwicklung von biologischen Wachstumsmodellen im Erdreich. Die wesentlichen Forschungsergebnisse, die in den oben angeführten Forschungsendberichten dargestellt sind (u.a. [3] und [4]), werden folgend zusammengefasst:

- Wurzeln gehen aufgrund der Anatomie ihrer Wurzelspitzen den Weg des geringsten Widerstandes.
- Wurzeln wachsen bevorzugt in porenreiche Bereiche. Dies können sowohl porenreiche Böden als auch Bauteile mit entsprechend großen und zugänglichen Hohlräumen sein. Beispielhaft seien die umlaufenden Ringräume bei Steckverbindungen genannt.

- Wurzeln brauchen Sauerstoff um wachsen zu können. Deswegen beeinflussen insbesondere die bodenphysikalischen Eigenschaften das Wurzelwachstum. Hierbei spielen die Korngrößenverteilung, das Porenvolumen und die Verfügbarkeit von Wasser eine wichtige Rolle.
- In beobachteten Fällen im Bereich von Ver- und Entsorgungsleitungen wurden die Leitungsgräben bevorzugt durchwurzelt. Als Gründe können die verwendeten Verfüllmaterialien und mangelnde Verdichtung im Zwickelbereich der Rohre genannt werden.
- Das Wurzelwachstum wird durch porenraumarme Böden gehemmt, bzw. porenraumarme Böden werden nicht durchwurzelt.
- Wurzeln können beim Vorhandensein eines entsprechenden Widerlagers Wurzeldruck aufbauen. Messungen an den Primärwurzeln von Stieleichen (*Quercus robur*) ergaben Wurzeldrücke bis ca. 12 bar.
- Wurzeln reagieren, wie die oberirdischen Teile der Vegetation unterschiedlich auf Kappung bzw. Rückschnitt. Grundsätzlich zeigen viele Baumarten ein ausgeprägtes Regenerationsvermögen, was durch vermehrte Bildung von Wurzeln an der Kappungsstelle erkennbar ist.

Auf Basis dieser Ergebnisse wurden die folgenden biologischen Wachstumsmodelle in [3] entwickelt:

Leck-Modell:

Die gängige Begründung für den Einwuchs von Wurzeln setzt die Attraktivität des Leitungsinhaltes voraus. Austretender Leitungsinhalt in der Nähe undichter Rohrverbindungen stellt demnach für die Wurzeln eine Quelle für Wasser und Nährstoffe dar. Der Einwuchs erfolgt gemäß dieser Vorstellung, da aus dem Kontakt zum Leitungsinhalt bessere Lebensbedingungen für die Pflanze hervorgingen. Dieses Modell hat sich als im Wesentlichen unzutreffend herausgestellt. In Abwasser sterben die Wurzeln rasch ab. In Outside-In Versuchen ist der Einwuchs in das Rohrrinnere auch dann erfolgt, wenn es mit Außenluft normaler Luftfeuchte (nicht gesättigt) gefüllt war, der Einwuchs in Leerrohre ist bekannt [3].

Dichtefallenmodell:

Die gesamte Umgebung von Gebäuden und ihrer Infrastruktur stellt einen anthropogen geschaffenen Bodenraum mit einer im Gegensatz zum gewachsenen Boden, häufig verminderter Verdichtung bzw. größerem Porenraum dar. Die Ausrichtung des Wurzelwachstums wird durch Richtungsänderungen beeinflusst, welche die Wurzelspitzen als Folge von Dichteunterschieden im durchwachsenen Boden erfahren. Die Elastizität der Kalyptra (Wurzelspitze) führt dazu, dass die Wurzeln in die Richtung des leichter zu durchwurzelnenden Substrates wachsen.

Ein Zurückwachsen der Wurzeln in einen Bereich höherer Verdichtung bzw. schlechterer Durchwurzelbarkeit ist in der Regel ausgeschlossen. Die Wurzeln werden in Bodenbereichen mit großer Durchwurzelbarkeit „eingefangen“. Der Ringspalt bzw. Ringraum vor dem Dichtelement kann auch, in Abhängigkeit von der Rohrverbindung, einen Bereich darstellen, der durch Wurzeln leicht erschlossen werden kann. Sie können dort mehrere Jahre wachsen, bevor sie letztendlich in die Leitung einwachsen. Hierfür muss der Anpressdruck des Dichtmittels überwunden werden [3].

Quellungs- und Setzungsmodell:

Änderungen der Bodenfeuchtigkeit über die Zeit beeinflussen die Struktur von Böden und Wurzeln. Bestandteile des Substrates sind in der Lage unter Wasseraufnahme zu quellen und durch Wasserabgabe zu schwinden. Diese zeitlichen Veränderungen des zur Verfügung stehenden Raumes im Boden kann ein Ausbreiten der Wurzeln beeinflussen. Quellungs- und Schwundvorgänge können wahrscheinlich auch in verholzten Wurzeln auftreten [3].

Hierbei ist von Bedeutung, dass Räume von weniger als 1/10 mm ausreichend sind, um durch Dickenwachstum der Wurzel ausgefüllt zu werden. Bei erneuter Quellung des Substrates wird die Wurzel dann passiv gegen ein Widerlager gedrückt. Ob dabei die Wurzel oder das Widerlager deformiert werden, hängt von den mechanischen Eigenschaften ab. Auf diese Weise können möglicherweise Kräfte auf Rohre und Rohrverbindungen wirken, die weit über den Kräften aus kambialem Dickenwachstum liegen. In der Umgebung von Leitungen und deren Verbindungen, die unterhalb des Grundwasserstandes verlegt sind, sollten keine Schwankungen durch Quellungs Vorgänge auftreten [13].

Hierdurch können möglicherweise Kräfte auf Rohre und Rohrverbindungen wirken, die über den gemessenen, aus Dickenwachstum entstandenen Kräften liegen. So ist es denkbar, dass die hohen Kräfte, die für das Überwinden des Anpressdrucks einer Rohrverbindung notwendig sind, durch Quellung verholzter Zellwände erzeugt werden. In der Umgebung von Leitungen und deren Verbindungen, die unterhalb des Grundwasserstandes verlegt sind, treten nur geringe Schwankungen durch Quellungs Vorgänge auf. Trifft dieses Modell zu, so tritt der Einwuchs von Wurzeln in Leitungen, die ständig unterhalb des Grundwasserstandes verlegt sind, selten auf [3].

Für das Eindringen von Leitungen an Wurzeln können auch weitere Bewegungen im Boden verantwortlich sein. So können durch Setzungen oder Hebungen des Bodenkörpers, z.B. infolge Grundwasserabsenkung oder -anstieg, die Leitungen gegen vergleichsweise steife Wurzeln gedrückt werden.

Sauerstoffmodell:

Die Verfügbarkeit von Sauerstoff im Boden hat großen Einfluss auf die Ausbreitung von Wurzeln. Alle pflanzlichen Organe benötigen Sauerstoff zur Aufrechterhaltung ihres Stoffwechsels. Die Versiegelung städtischer Böden hat zur Folge, dass der Eintrag von Sauerstoff in den Boden stark eingeschränkt ist. Abwasserleitungen werden meist als Freispiegelleitungen betrieben und ausreichend über Wartungs- und Inspektionsöffnungen (Schächte) belüftet. Der größte Anteil der Leitung ist mit Luft gefüllt. Bei vergossenen Dichtungen können im Vergussmaterial durch Schwinden Risse entstehen. Der in der Luft enthaltene Sauerstoff kann so in der Umgebung von Rohren und Rohrverbindungen in den Boden gelangen. Aber auch Rohrverbindungen mit Elastomerdichtungen können mit der Zeit gasdicht werden (vgl. [7]). Die Rohrverbindung und der angrenzende Boden werden dadurch möglicherweise für Wurzeln attraktiv. Wurzeln wachsen gemäß diesem Modell nur dort weiter wo die Sauerstoffversorgung ausreicht. Im Ergebnis wachsen sie damit bei Sauerstoffmangel und einer lokalen Sauerstoffquelle auf diese zu, obwohl sie über keine Sauerstoffsensoren verfügen und finden so die Rohrverbindung. Bei nicht gasdichten Rohrwerkstoffen kann auch bei intakten Leitungen Sauerstoff austreten, der einen Einfluss auf die Ausbreitung von Wurzeln haben kann [3].

Kombinationsmodell:

Das Einwachsen in die Leitung erfolgt im Allgemeinen nicht, weil der Leitungsinhalt gute Bedingungen bereitstellt, der Einwuchs ist hingegen die logische Konsequenz des Zusammenspiels verschiedener Gegebenheiten in der Nähe der Leitung. Es ist anzunehmen, dass ein Zusammenspiel verschiedener Faktoren den Einwuchs von Wurzeln in Leitungen ermöglicht. Sowohl die Dichte des Bodens, sein Quellverhalten, wie auch die Verfügbarkeit von Sauerstoff und der Zustand der Leitung haben einen Einfluss auf das Wurzelwachstum. Das Erkennen von Faktoren, die vor Ort einem Schaden Vorschub leisten, kann helfen zukünftige Schäden zu vermeiden [3]. In der Praxis ist in der Regel ein Faktor dominierend bzw. limitierend. Das kann dazu benutzt werden, Schäden zu verhindern und das Wachstum auf andere Bereiche zu konzentrieren.

Zusammenfassend kann aus den IKT-Berichten festgehalten werden: Das zur Leitung gerichtete Wurzelwachstum ist eine Reaktion auf die Umgebung der Leitung. Aus Leckagen austretendes Abwasser bzw. Nährstoffe sind von untergeordneter Bedeutung. Die Umgebungsbedingungen und Oberflächeneigenschaften des Rohres können den Einwuchs in die Leitung erheblich begünstigen. Erst im zweiten Schritt entscheiden die Rohrverbindungseigenschaften über das Einwuchsrisiko. Eine Behinderung des Wurzeleinwuchses ist dort im Wesentlichen über einen großen Gegendruck (Anpressdruck der Dichtungen) und eine wurzelab-

weisende Verbindungsgeometrie (geringe Ringräume und Angriffsflächen) möglich. Die Gasdichtheit der Verbindung kann Wachstumsreize weiter vermindern. Der Einwuchsvorgang lässt sich durch Kombination biologisch-technischer Modelle beschreiben [3].

Der Einfluss der Bodentemperatur oder eine erhöhte Bodentemperatur auf das Wurzelwachstum, wie sie durch den Bau von Fernwärmeleitungen auftreten kann, wird in den biologischen Wachstumsmodellen und den IKT-Forschungsberichten bisher nicht beschrieben.

1.1.2 Normen und Regelwerke

Im Merkblatt DWA-M 162 „Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle“ [7] werden wesentliche Schutzmaßnahmen für den Baum und die Leitung zusammengefasst, sodass eine normative Grundlage für das Nebeneinander von Bäumen und unterirdischer Infrastruktur zur Verfügung steht. Mit Blick auf den Bau von unterirdischen Kanälen und Leitungen im Bereich von Baumstandorten sowie der Pflanzung von Bäumen im Bereich von unterirdischen Leitungen und Kanälen werden Hinweise zum Vorgehen bei drei unterschiedlichen Fällen in [7] beschrieben:

1. Vorhandener Baumbestand – Neubau oder Austausch unterirdischer Leitungen
2. Vorhandene Leitungen – Neupflanzung oder Ersatz von Bäumen
3. Neubau von unterirdischen Leitungen – Neupflanzung von Bäumen

Im Regelwerk wird darüber hinaus auf weitergehendes Regelwerk verwiesen. Zu nennen sind DIN 1998 [8], DIN 18920 [9], RAS-LP 4 [10] und FLL „Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 2 [12]“. Die FLL „Empfehlungen für Baumpflanzungen - Teil 1“ [11] werden hier ergänzend dargestellt.

In DIN 1998 aus dem Jahre 2018 [8] wird in Kapitel 4.1.5 „Leitungen im Bereich von Bäumen“ auf das Merkblatt DWA-M 162 [7] verwiesen, dass bei möglichen Interaktionen zwischen Bäumen und unterirdischer Infrastruktur berücksichtigt werden soll.

DIN 18920 [9] beschreibt den Baumschutz bei Baumaßnahmen an Baumstandorten. Wesentliche Aussagen, die für den Leitungsbau von Relevanz sind, werden in Kapitel 4.4 dargestellt. Als wichtige Kenngröße für den Baumschutz bei Bauarbeiten wird der sogenannte Mindestabstand von mindestens 2,50 m bezogen auf die Stammachse beschrieben, der in die Richtlinie „Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle“ [7] wie folgt übernommen wurde:

„Der Mindestabstand gilt dem Schutz des Baums. Dadurch soll insbesondere der Wurzelbereich, aber auch der oberirdische Teil des Baumes (Stamm und Krone) vor Beschädigungen geschützt werden und zum anderen wird ihm dadurch freier Wurzelraum zur Verfügung gestellt.“ (aus [7])

Da das Wurzelwachstum oftmals über den Mindestabstand hinausgeht, können nach [7] Schutzmaßnahmen vor Wurzeleinwuchs im Leitungsgraben (passive Schutzmaßnahmen) und Maßnahmen am Baumstandort (aktive Schutzmaßnahmen) durchgeführt werden. Zu den passiven Schutzmaßnahmen gehören der Einsatz porenraumarmen Verfüllstoffe im Rohr- oder Leitungsgraben, Einbau von Mantelrohren (Schutzrohren) um die Leitung, Einbau von Platten oder Folien im Leitungsgraben, Auswahl wurzelfester Rohrverbindungen und weitere Schutzmaßnahmen [7]. Zu den aktiven Schutzmaßnahmen werden Pflanzgruben, Wurzelgräben, Belüftung und Trennelemente benannt [7]. Pflanzgruben und Wurzelgräben sollen mit vegetationsstechnisch günstigen Bedingungen, z.B. mit Substraten, hergestellt werden [7], wie sie in den Regelwerken der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL) „Empfehlungen für Baumpflanzungen - Teil1: Planung, Pflanzarbeiten, Pflege“ [11] und „Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate“ [12] u.a. beschrieben werden.

Für den Raumbedarf des Wurzelbereiches sind nach [11] im urbanen Straßenraum großflächige und großvolumige Standorte für die Entwicklung von Bäumen zumeist nicht vorhanden. Durch Anlage von tiefen Pflanzgruben und einer Verwendung von Pflanzsubstraten mit festgelegten Eigenschaften oder Bauweisen, die den Bodenraum unterhalb des Verkehrsraum sowie seitlich daneben erschließen und belüften, kann die Entwicklung von Bäumen auch im urbanen Raum ausreichend stattfinden. Für die Anfangsentwicklung des Baumwachstums in den ersten Standjahren soll mindestens ein Pflanzgrubenvolumen von 12 m³ für den Wurzelraum geschaffen werden [11].

In RAS-LP 4: „Schutz von Bäumen, Vegetationsbeständen und Tieren bei Baumaßnahmen“ [10] werden Schutz- und Schadensbegrenzungsmaßnahmen beschrieben. Zudem werden in zahlreichen Bildern Schäden sowie Ursachen von Schäden an den oberirdischen und unterirdischen Teilen von Bäumen dargestellt. Beispielhaft wurden folgende Beeinträchtigungen bzw. Schädigungen in [7] übernommen:

- Bodenverdichtung durch Befahren, Abstellen von Maschinen und Fahrzeugen, Baustelleneinrichtungen, Lagern von Baustoffen und Abfällen,
- Baugrundverdichtung, z. B. als technische Maßnahmen im Wegebau,
- Bodenbewegung (Bodenauftrag, Bodenabtrag),
- Erstellung von Baugruben und Gräben (ANMERKUNG: insbesondere im Bereich von Wurzeln, die für die Standsicherheit des Baums wichtig sind (statisch wirksamer Wurzelraum),
- mechanische Beschädigung oder Zerstörung im Wurzel- und/oder im oberirdischen Bereich,

- Freistellen von Bäumen (hierdurch Beeinträchtigung der Stand- und Bruchsicherheit bei Windlast sowie Einschränkung der Vitalität durch Sonnenbrand bis hin zum Absterben),
- Austrocknung, Grundwasserabsenkungen, Überstauung, Vernässung.

Der Einfluss der Bodentemperatur oder einer erhöhten Bodentemperatur auf das Wurzelwachstum, wie sie durch Fernwärmeleitungen auftreten kann, wird in den aktuellen Regelwerken bisher nicht beschrieben. In einem „Merkblatt über Baumstandorte und unterirdische Ver- und Entsorgungsleitungen“ der FGSV aus dem Jahre 1989 [14] wird als für Bäume existenzgefährdend das „Aufheizen des Bodens durch Fernheizungen oder hoch belasteten Stromkabeln“ benannt. In den o.g. aktuellen Normen und Regelwerken sind ähnliche Aussagen nicht mehr beschrieben.

1.1.3 Fachliteratur zu Wärme und Vegetation

In der o.g. AGFW-Information zur Bodenbeeinflussung durch Bau und Betrieb erdverlegter Fernwärmeleitungen [15] aus dem Jahr 1988 wurden Messungen bzw. FE-Berechnungen der Bodentemperaturen in Bereichen von Fernwärmeleitungen dargestellt. Folgende Temperaturen im Umfeld von erdverlegten Fernwärmeleitungen können daraus abgelesen werden:

- Messungen der Bodentemperaturen an Fernwärmeleitungen im Jahr 1988 im Sommer bei einer Außentemperatur von 25° Celsius mit identischer Vor- und Rücklauftemperaturen von 115°C ergaben maximale Temperaturen im direkten Leitungsumfeld von ca. 39 °C [15].
- Aus FE-Berechnungen zur Temperaturverteilung im Boden bei Fernwärmeleitungen (Vorlauftemperatur 120° Celsius und Rücklauftemperatur 60° Celsius) in 1,2 Metern Tiefe bei einer Außentemperatur von 0° Celsius können Temperaturen im Bereich zwischen Vor- und Rücklauf von maximal 22 °C ablesen werden [16].

Mit Blick auf den Einfluss von Fernwärmeleitungen auf das Wurzelwachstum von Bäumen gibt es somit – auf Basis der Literaturrecherche – keine umfassenden Untersuchungen. Auch in dem Merkblatt „Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle“ [7] wird im Detail nicht näher auf diese Thematik eingegangen. Es können lediglich Hinweise zum Einfluss aus grundsätzlichen Untersuchungen (vgl. [17]) oder aus Einzelbeobachtungen (vgl. [18], [19]) abgeleitet werden, deren Kernaussagen folgend kurz beschrieben werden.

Untersuchungen von Lyr [17] beschreiben den Einfluss der (Wurzel-)Temperatur auf den Wurzelzuwachs an europäischen Waldbäumen. Dazu wurden Pflanztöpfe mit Stecklingen von acht unterschiedlichen Baumarten bepflanzt und über einen Zeitraum von vier Monaten in Wasserbädern mit Temperaturen von 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30° und 35°Celsius wachsen gelassen.

Als ein wesentliches Ergebnis ist eine Übersicht verschiedener Baumarten mit einem Temperaturoptimum des Wurzelmassenzuwachses (*total dry mass increament*) und den jeweiligen Wachstumstoleranzräumen (minimaler Grenzwert 5°C und maximaler Grenzwert 35°C) erarbeitet worden. Wachstumsoptima von 15°C Celsius wurden bei Rottanne (*Picea abies*), Lärche (*Larix decidua*), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und Birke (*Betula verrucosa*), Wachstumsoptima bei 25°C Celsius bei Stieleiche (*Quercus robur*) und Hainbuche (*Carpinus betulus*) sowie bei Schwarzkiefern (*Pinus nigra*) bis zu 30° Celsius festgestellt. Bei der maximalen Temperatur von 35°C Celsius konnten bei den Baumarten Stieleiche, Hainbuche und Schwarzkiefer noch ein Wurzelmassezuwachs festgestellt werden. Die o.g. Baumarten Rottanne, Lärche und Douglasie überstanden die Versuchslaufzeit bei 35° Celsius nicht und sind abgestorben. Die o.g. Ergebnisse zeigen, dass unterschiedliche Wurzeltemperaturen, je nach Baumart, einen Einfluss auf den Wurzelmassenzuwachs haben können. Die Versuchsdauer von nur vier Monaten ist für die hier anstehenden Probleme zu kurz, da das Hauptwachstum bei immergrünen Bäumen ebenso wie bei verschiedenen Laubgehölzen in verschiedene Jahreszeiten fällt und die Unterschiede daher nicht notwendigerweise aussagekräftig sind.

Erste beispielhaft durchgeführte Aufgrabungen an einer Fernwärmeleitung von Herrn Dr. Heidger [18] zeigten, dass Wurzeln in der direkten Umgebung von Fernwärmeleitungen und auf deren Rohraußenmantel gewachsen waren. Die Beobachtungen in Hannover wurden für die Baumart Eiche gemacht.

Erste Hinweise zum Wurzelwachstum in der Nähe von Fernwärmeleitungen können einem Gutachten des Sachverständigenbüros Dengler im Auftrag der Stadt Münster aus dem Jahr 1986 [19] entnommen werden. Im Rahmen von Untersuchungen des Baumbestandes vor einer Baumaßnahme wurden Bodentemperaturmessungen im Umfeld einer Fernwärmeleitung durchgeführt. Als Ergebnis wird dort beschrieben, dass die Bodentemperaturen sich in einem Abstand von fünf bis sechs Metern Entfernung zur Fernwärmeleitung wieder normalisiert hatten. Eine Aussage über die Rohrleitungsart liegt nicht vor. Als Hinweise beschreibt der Gutachter das Wuchsverhalten der Wurzeln wie folgt:

„Es hat sich bei den vorgenommenen Wurzelfreilegungen gezeigt, dass bei jenen, in Nähe der Fernwärmeleitung befindlichen, von der Wärmeabstrahlung beeinflussten Bäumen, die Tendenz besteht, daß die der Fernwärmeleitung zugewandten Wurzeln aus ihrer natürlichen Verlaufsrichtung „fliehen“, indem sie seitlich abzweigen [19].“

Dem Gutachten ist die Leitungsart und die Mediumtemperatur nicht zu entnehmen.

Aus dem Bereich einjähriger Kulturpflanzen (Getreide, Mais, Tomaten u.a.) gibt es Untersuchungen zum Wachstumsverhalten bei Wärme. Diese ist aber aufgrund des abweichenden

Wurzelverhaltens nicht als Referenz für das Wachstumsverhalten von Großbäumen heranzuziehen. So haben unter anderem Richner im Jahr 1992 [20] und Engels im Jahr 1988 [21] das Wurzelwachstum von Maispflanzen unter Temperatureinfluss beschrieben. Canahm [22] hat den Temperatureinfluss auf Tomatenpflanzen erforscht. Résumé dieser und weiterer Literaturstellen wie von Macduff [23], der den Temperatureinfluss auf Gerste und Ölraps untersuchte, ist, dass die untersuchten Wurzeln nicht auf langfristiges Wachsen und eine große Standfestigkeit ausgelegt sind, sondern primär für die Nährstoffaufnahme und das kurzfristige Wachstum.

Folgende Themengebiete wurden ergänzend zur Vorstudie [1] recherchiert und einzelne Inhalte sind kurz dargestellt.

Wärmeausbreitung von erdverlegten Stromtrassen

Bei erdverlegten Stromtrassen erfolgt, ähnlich wie bei Fernwärmestrassen, eine Wärmeausbreitung im Erdreich [24] (vgl. Wärmeausbreitung von Fernwärmeleitungen im Erdreich, Kapitel 3). Jedoch sind, auf Basis der hier durchgeführten Literaturrecherche und Vorstudie [1], bisher keine Untersuchungen zu Wärme und Wurzeln bei erdverlegten Stromtrassen bekannt.

Deponiebau – Angaben zu Wurzeltiefen

Das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV NRW) hat „Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponieabdichtungssysteme“ [25] veröffentlicht. Aufgrund von Begrünungen stillgelegter Deponien werden an Deponieabdichtungssystemen auch Anforderungen gegen Durchwurzelung gestellt. In den Anforderungen ist eine Orientierungstabelle erstellt worden, welche die Wurzeltiefen von Bäumen auf natürlichen Böden darstellt. Anhand dieser Tabelle liegen Wurzeltiefen je nach Baumart in Bereichen von 0,6 m bis 4,5 m. Datengrundlage ist der Wurzelatlas von Kutschera und Lichtenegger aus dem Jahr 2002 [26]. Die maximalen Wurzeltiefen können bei der Simulation von Wärmefeldern durch erdverlegte Fernwärmeleitungen berücksichtigt werden.

Optimale Temperaturen zum Rasenwachstum

Nach Hausen [27] ist bei bewölkten Wetterverhältnissen die Lufttemperatur mit der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe äquivalent. Die optimale Bodentemperatur für das Rasenwurzelwachstum liegt zwischen 10°C und 18°C. Für das Rasensprosswachstum gilt ein Optimum von 15°C bis 24°C. Diese Bereiche ergeben folglich eine Überlappung von einer Temperaturspanne zwischen 15°C und 18°C, in der ein unterirdisches und oberirdisches Rasenwachstum bestmöglich stattfindet. Unterschreitet die Temperatur ein Minimum von 0,5°C oder übersteigt die Temperatur ein Maximum von 25°C, findet kein Wurzelwachstum mehr statt. Das Sprosswachstum

unterscheidet sich dahingegen, dass ein Wachstum bereits unter 5°C und über 32°C zum Stillstand kommt. Nach Lyr [17] wachsen Wurzeln einzelner Großbaumarten auch bei 35°C und ggf. mehr. Ein Vergleich zwischen Rasen- und Wurzelwachstum ist somit nicht zielführend.

ZFSV als Schutzmaßnahme vor Wurzeleinwuchs im Leitungsgraben

Die Entwicklung und Optimierung von wurzelhemmenden ZFSV-Rezepturen werden erstmalig durch Simon beschrieben [28, 29]. Als wesentliche Parameter für eine wurzelhemmende ZFSV-Rezeptur werden eine geringe Porosität (< 30 Vol.-%) [28] und eine hohe Packungsdichte [29] beschrieben. Dabei ist insbesondere darauf zu achten, dass ein sicherer und dauerhafter Wurzelschutz des Leitungsgrabens gewährleistet ist, wenn das Bettungsmaterial eine deutlich geringere Porosität aufweist als der umgebende Boden.

1.2 Entwicklung von Hypothesen zum Wurzelwachstum an Fernwärmeleitungen

Die Literaturrecherche zeigt, dass bisher keine umfassenden Untersuchungen mit Blick auf den Einfluss von Fernwärmeleitungen auf das Wurzelwachstum von Bäumen vorliegen. Offene Fragestellungen zu Wurzeln und Wärme im Boden wurden in der Vorstudie [1] in folgende Arbeitshypothesen formuliert:

- » Hypothese A: Das Temperaturfeld schützt die FW-Leitungen vor Wurzeln (Stimmt nicht im Fall von Eiche für „neu“ verlegte FW-Leitung).
- » Hypothese B: Das Temperaturfeld fördert das Wurzelwachstum (Stimmt im Fall Eiche für „neu“ verlegte FW-Leitung, wobei das „wieso“ offenbleibt).
- » Hypothese C: Die Wasserversorgung der Wurzeln (z.B. diskontinuierlich, vgl. Wurzelentwicklung in Regenwasserkanälen) auch in warmen Böden muss gewährleistet sein. Hier ist der Versiegelungsgrad für das Zuströmen von Oberflächenwasser maßgeblich. Hinweis: Der Porenraum hat einen Einfluss auf das Wasserhaltevermögen des Bodens.
- » Hypothese D (Heidger-Hypothese):

Auf der Rohroberfläche setzen sich nach Verdunstung Mineralien ab, die der Pflanze als Nährstoff zur Verfügung stehen. Hierdurch wird das Wurzelwachstum gefördert. Hinweis: Die Grenzfläche zwischen Rohroberfläche und Bodenkörper wirkt wie eine durchgängige Bodenpore (Grenzflächenraum). Möglicher negativer Effekt: Es können sich auch Schadstoffe akkumulieren (wie z.B. kristallines Streusalz).

- » Hypothese E: Durch die nachlassende Dämmwirkung des Isolationsmaterials (Alterung) erhöht sich die Bodentemperatur. Ältere Literatur geht von 80-90 % aus, die von Dämmung abgefangen wird (vgl. [30]), gibt aber keine Auskunft über den Alterungsprozess. Durch eine Temperaturerhöhung aufgrund einer verminderten Dämmwirkung beschleunigen sich alle Bodenprozesse und die jahreszeitliche Periodizität geht verloren. Die Wurzeln reagieren besonders empfindlich auf diese Veränderungen.
- » Hypothese F: Wachsen Wurzeln im Bereich von Fernwärmeleitungen verändern die erhöhten Bodentemperaturen die Vegetationsperioden der Stadtbäume und verändern das Wachstumsverhalten der ober- und unterirdischen Teile des Baumes. Die Auswirkungen können unterschiedlich sein. Falls beispielsweise der Laubfall verzögert wird, erhöht die Bruchgefahr bei Schneefall aufgrund der Blattflächen.

Die in der Vorstudie [1] entwickelten Arbeitshypothesen veranschaulichen die Breite der offenen Fragestellungen zum Thema Wärme und Vegetation im Erdreich und stellen keine abschließende Liste dar. Unberücksichtigt bleiben beispielsweise die Interaktionen von Wurzeln mit bestehenden Fernwärme- bzw. Dampfleitungssystemen die unter Haubenkanälen verlegt werden. Die Arbeitshypothesen veranschaulichen, dass ggf. verschiedene Szenarien in der Interaktion zwischen Fernwärmeleitungen und Baumvegetation möglich sind. Daher dienen die Arbeitshypothesen als Grundlage für die Entwicklung der Untersuchungen des hier vorliegenden Forschungsvorhabens.

1.3 Forschungsbedarf, Zielstellung, Vorgehensweise

Die Vorstudien-Ergebnisse der Literaturlauswertungen und der Gespräche des Expertenkreises Forschung und Entwicklung des AGFW haben ergeben, dass Wurzelsysteme mit Fernwärmeleitungssystemen interagieren. Die Auswirkungen für die Vegetation und die Leitungssysteme sind bisher nicht systematisch untersucht worden. Auf der einen Seite besteht Unsicherheit im Umgang mit bestehenden Leitungssystemen. Auf der anderen Seite sind zur Reduktion der Treibhausgasemissionen neue Fernwärmetrassen im Baumbestand zu erschließen, wobei die divergierenden Anforderungen für die Begrünung der Städte und der energieeffizienten Versorgung der Bürger mit Fernwärme in Einklang gebracht werden müssen. Um die unterschiedlichen Ziele im Einzelfall in Einklang zu bringen kann die Richtlinie „Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle“ (vgl. [7]) herangezogen werden. Konkrete Hinweise für die Beantwortung der Fragestellung im Zusammenhang mit Fernwärmeleitungssystemen werden in [7] nicht berücksichtigt.

Untersuchungen oder Studien zum Wurzelwachstumsverhalten von Großbäumen in Kombination mit Wärme bzw. Wärmefeldern im Erdreich durch unterirdische Leitungen sind auch durch eine Literaturrecherche sieben Jahre später nicht bekannt. Jedoch sind weiterhin oftmals Vorbehalte gegenüber Fernwärmetrassen an Baumstandorten vorhanden, wie sie z.B. in [31] beschrieben sind. Dies unterstreicht den notwendigen Forschungsbedarf zu der Thematik unterirdische Fernwärmeleitungen und Baumwurzeln. In den folgenden Untersuchungen soll ermittelt werden, ob die Wärmeabstrahlung von Fernwärmeleitungen im Untergrund das Baum- und Wurzelwachstum beeinflussen kann und ob Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen können.

Dazu werden zunächst In-situ-Aufgrabungen an Fernwärmeleitungen an Baumstandorten durchgeführt (vgl. Kapitel 2). Ziel ist die Ermittlung von möglichen Interaktionsarten zwischen den Leitungen und Wurzeln in der Praxis. Weitergehend werden FE-Simulationen und In-situ-Wärmemessungen an einer neugebauten Fernwärmetrasse durchgeführt (vgl. Kapitel 3). Zur bestmöglichen Fernwärme-Trassenwahl wird eine Szenarienanalyse durchgeführt, um transparent darstellen zu können, wann eine Fernwärmetrasse unter bestimmten Randbedingungen an Baumstandorten zielführend ist (vgl. Kapitel 6).

Durch Laborversuche im botanischen Garten der Ruhr-Universität Bochum mit Pflanzen werden erste Grundlagen geschaffen um zu untersuchen, ob das Wurzelwachstum durch Wärmefelder im Erdreich beeinflusst wird. Ferner werden Untersuchungen durchgeführt, ob durch Wurzelinteraktionen Fernwärmeleitungen beschädigt werden können. Langzeit-Feldversuche zu aktiven und passiven Schutzmaßnahmen nach [7] runden das hier vorliegende Untersuchungsspektrum ab (vgl. Kapitel 4).

Urbane Bäume und unterirdische Leitungen in Einklang zu bringen, ist eine interdisziplinäre Aufgabe, die in vielen Fällen Kompromisse fordert. Um Kompromisse im engen urbanen Raum finden zu können, sind auch (Langzeit-)Erkenntnisse zu Schutzmaßnahmen an Baumstandorten und im Leitungsgraben notwendig. Mögliche neue Erkenntnisse fließen auch in die Weiterentwicklung von biologischen Wachstumsmodellen mit ein, um ein besseres Verständnis über das Wachstumsverhalten von Wurzeln in urbanen Böden zu entwickeln (vgl. Kapitel 5).

Die Forschungsergebnisse fließen in eine Szenarienanalyse zur bestmöglichen Trassenwahl einer Fernwärmeneubaumaßnahme mit ein (vgl. Kapitel 6). Das Forschungsvorhaben wird durch einen interdisziplinären Projektkreis begleitet. Die Forschungsergebnisse werden dort vorgestellt und diskutiert. Auf Basis der Forschungsergebnisse und in Abstimmung mit dem Projektkreis werden erste Schlussfolgerungen für die Praxis in Form von Arbeitsanweisungen und Schulungsmaterialien zur Durchführung von Fernwärme-Bauarbeiten an Baumstandorten, Hinweise für Ausschreibung und Vergabe sowie Empfehlungen für ZFSV-Produktprüfungen erstellt (vgl. Kapitel 7). Somit haben die Forschungsergebnisse einen direkten Mehrwert

für die Praxis. Die Forschungsergebnisse fließen darüber hinaus in die Regelwerksarbeit des AGFW mit ein und werden ggf. künftig auch im Rahmen der Überarbeitung von [7] berücksichtigt.

2 Bestandsaufnahme vor Ort (In-situ-Aufgrabungen)

Ein wesentlicher Untersuchungsschwerpunkt in diesem Forschungsvorhaben waren In-situ-Aufgrabungen an Fernwärmeleitungen in der Nähe von Baumstandorten, um erstmalig umfangreiche und vergleichbare Praxiserfahrungen hinsichtlich der Interaktion zwischen Baumwurzeln und Fernwärmeleitungen zu sammeln. Zur Akquise der Aufgrabungsmaßnahmen wurden zum einen AGFW-Mitgliedsunternehmen direkt kontaktiert, zum anderen wurde die Branche durch mehrere Akquise-Fachartikel in unterschiedlichen Fachzeitschriften und Newslettern über das Vorhaben und Möglichkeiten zur Teilnahme informiert [32, 33, 34, 35, 36].

In sieben deutschen Städten erfolgten Untersuchungen an elf Baumstandorten. Dabei wurden Baumstandorte ausgewählt, an denen Bäume und Fernwärmeleitungen seit mehreren Jahren im Untergrund interagieren konnten. Sechs Aufgrabungen wurden im Rahmen regulärer Baumaßnahmen beteiligter Fernwärmeversorger begleitet. Ferner wurden an fünf, durch den Projektkreis bestimmten Standorten, anlassbezogene Aufgrabungen durchgeführt. Bei den anlassbezogenen Aufgrabungen wurden eigens für das Forschungsvorhaben Baustellen eingerichtet und Tiefbaumaßnahmen durchgeführt. Die Aufgrabungsarbeiten wurden je nach den örtlichen Verhältnissen mit Baggern, Saugbaggern und/oder Handschachtungen durchgeführt, um den Baum und die Wurzeln nicht zu beschädigen.

Während der Aufgrabungen erfolgte u.a. die Entnahme und Analyse von Bodenproben in der Bettung und im anstehenden Boden und, falls möglich und notwendig, die Entnahme und Analyse von Wurzelproben. Die Vitalität des Baumes wurde im Zuge der Aufgrabungsarbeiten vor Ort bewertet, um so mögliche Beeinträchtigungen der Bäume durch Wärmefelder zu ermitteln. Interaktionen zwischen Wurzeln und Fernwärmesystemen wurden untersucht, um eventuelle Schädigungen durch Wurzeln an Fernwärmeleitungen oder Auswirkungen von Wärmefeldern auf das Wurzelwachstum zu identifizieren. Die Bodenproben aus der Bettung wurden hinsichtlich Sieblinie [37], Wassergehalt, Korn- und Trockendichte [38] sowie Porenvolumen und Wasserdurchlässigkeit [39] ausgewertet. Das Porenvolumen wird aus der Korn- und Trockendichte ($1 - \text{Trockendichte} / \text{Korndichte}$) berechnet. Die Bodenproben aus dem anstehenden Boden wurden, je nach Boden- und Probenbeschaffenheit, hinsichtlich Wassergehalt, Korn- und Trockendichte [38] sowie Durchlässigkeit [39] und Glühverlust [40] analysiert.

Obwohl die Ausgangssituation der Aufgrabungen identisch waren (Fernwärmeleitung in der Nähe von einem Baumstandort), sind die Ergebnisse der Aufgrabungen bzw. die beobachteten Interaktionsarten zwischen Fernwärmeleitung und Wurzel unterschiedlich. Folgende Interaktionsarten zwischen Fernwärmeleitung und Wurzeln wurden identifiziert:

- Interaktion zwischen Fernwärmeleitung und Wurzel (bei 3 von 11 Aufgrabungen, vgl. Kapitel 2.1)
- Interaktion zwischen Bettung der Fernwärmeleitung und Wurzel (bei 4 von 11 Aufgrabungen, vgl. Kapitel 2.2)
- Keine Interaktion (bei 4 von 11 Aufgrabungen, vgl. Kapitel 2.3)

Folgend ist in Tabelle 1 eine Übersicht der Aufgrabungen mit den wesentlichen Informationen zu Fernwärmeleitung und Baum sowie deren Abstand und Interaktionsart in chronologischer Reihenfolge der Aufgrabungstermine dargestellt.

Tabelle 1: Zusammenfassung der Aufgrabungsergebnisse

Aufgrabung (Art)	Fernwärmerohrleitung			Betriebs-temp. [°C]		Baum				Abstand zw. Baum/Leitung (horizontal)	Interaktion		
	Art	Alter [ca. a]	Außen- ϕ [mm]	Tiefe [m]	VL	RL	Art	Alter [ca. a]	Höhe [ca. m]			Kronen-DN [ca. m]	Stammumfang in 1 m Höhe [m]
					VL	RL							
1 (BRB)	HK	60	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	Ahorn	n.b. ¹	n.b. ¹	n.b. ¹	0,0	keine
2 (BRB)	KMR	25-30	125	0,9	105	63		Platane	20	15	1,63	1,6	keine
3 (BRB)	AZR	30	300	3,0	100	n.b.		Eiche	n.b. ¹	n.b. ¹	n.b. ¹	1,0	Leitung
4 (BRB)	SMR	45	360	0,8	120	n.b.		n.b. ¹	>45 ¹	n.b. ¹	n.b. ¹	0,0	keine
								n.b.	<45	10	3	1,16	keine
5 (BRB)	AZR	35	300	1,55	n.b.	n.b.		Linde	30-40	15-20	8	1,48	keine ²
6 (BRB)	AZR	35	300	1,55	n.b.	n.b.		Linde	30-40	15-20	8	1,82	Bettung
7 (AA)	KMR	8	220	1,5	n.b.	n.b.		Platane	100	20	15	2,70	Bettung
8 (AA)	KMR	7	630	1,8	80-120	45-80		Kastanie	60	11	10	1,30	Bettung
9 (AA)	KMR	7	630	1,8	80-120	45-80		Kastanie	60	15	10	1,60	Leitung
10 (AA)	KMR	n.b.	n.b.	1,5	80-130	60-80		Platane	95	15	23	2,67	Bettung
11 (AA)	KMR	41	n.b.	1,0	80-130	60-80		Platane	80	15	23	2,20	Leitung

BRB: Begleitung regulärer Baumaßnahme; AA: Anlassbezogene Aufgrabung

KMR: Kunststoffmanteirohr; AZR: Asbestzementrohr; SMR: Stahlmanteirohr; HK: Haubenkanal VL: Vorlauf RL: Rücklauf

n.b.: nicht bekannt

1: Baum wurde vor Eintreffen der Projektbearbeiter entfernt.

2: Die Fernwärmeleitung wurde vor Eintreffen der Projektteams gefällt und entfernt.

3: Die Angabe des Außendurchmessers dient als Anhaltspunkt zur Abschätzung der Rohrdimension. Sofern möglich, wurde dieser in situ gemessen, falls dies nicht möglich war, wurden die Maße aus der entsprechenden Norm entnommen.

Hinweise zu den Indizes ¹ und ².

Vereinzelte war es dem Projektteam erst bei fortgeschrittenem Baufortschritt möglich an den Aufgrabungen teilzunehmen. Drei Bäume (Aufgrabung Nr. 1, 3 und 4) wurden bereits vor den Aufgrabungsarbeiten bzw. vor Eintreffen des Projektteams gefällt und entfernt. Falls möglich wurde die Baumart anhand der Aussagen des örtlichen Fernwärmeversorgungsunternehmens oder Grünflächenamtes dokumentiert. Angaben zu Baumalter und -höhe sowie Kronendurchmesser und Stammumfang konnten in diesen Fällen nicht ermittelt werden. Bei Aufgrabung Nr. 5 wurde bereits vor Eintreffen der Projektbearbeiter die Fernwärmerohrleitung und Bettung entfernt. An der Baugrubenwand konnten keine Wurzeln im Bereich der Bettung festgestellt werden. Die Rohrleitungstiefe wurde wenige Meter entfernt an einem noch nicht entfernten Rohrleitungsstück in derselben Baugrube gemessen.

Betriebsparameter, Rohrleitungsart und -alter sowie -außendurchmesser wurden durch die Fernwärmeversorgungsunternehmen mitgeteilt. Die Rohrleitungstiefe wurde von Geländeoberkante bis zur Oberkante der Rohrleitung gemessen. Die Baumart wurden durch einen Biologen bestimmt. Das Baumalter wurde durch den örtlichen Fernwärmeversorgungsunternehmen oder das Grünflächenamt mitgeteilt. Baumhöhe, Kronendurchmesser und Stammumfang bei ein Meter Höhe wurden vor Ort gemessen. Der Abstand zwischen Baum und Fernwärmeleitung sowie die Interaktionsart wurden während der Aufgrabungen dokumentiert.

Tabelle 1 zeigt die Vielfalt der durchgeführten Aufgrabungen. Es wurden Aufgrabungen an vier unterschiedlichen Rohrleitungsarten durchgeführt. Das Alter der Rohrleitungen variierte von wenigen Jahren bis zu mehreren Jahrzehnten. Die Außendurchmesser unterschieden sich von 125 bis zu 600 Millimetern. Auch die Rohrleitungstiefen konnten von knapp unter einem Meter bis zu drei Metern Tiefe festgestellt werden. Die durchschnittlichen Betriebstemperaturen wurden bei sieben von elf Aufgrabungen durch den jeweiligen Netzbetreiber ermittelt. Die Betriebstemperaturen variieren bei den Vorläufen von 80 bis 130° Celsius und bei den Rückläufen von 45 bis 80° Celsius.

Bei zehn von elf Aufgrabungen wurde ein Baum in der Nähe der Fernwärmeleitung, bei Aufgrabung Nr.4 wurden zwei Bäume im unmittelbaren Umfeld der Fernwärmeleitung festgestellt. Es erfolgten Aufgrabungen an fünf unterschiedlichen Baumarten. Das Baumalter konnte zwischen 20 und 100 Jahren geschätzt werden. Die Baumhöhen variierten von 10 bis 20 Metern, die Kronendurchmesser von 3 bis 23 Metern und die Stammumfänge von 1,16 bis 2,7 Metern.

Fünf Fernwärmeleitungen wurden mehrere Jahrzehnte nach Pflanzung des Baumes installiert. Bei Aufgrabung Nr. 2 wurde der Baum nach Bau der Fernwärmeleitung gepflanzt. Bei Aufgrabung Nr.4 wurde ein Baum vor und ein Baum nach Bau der Fernwärmeleitung gepflanzt. Bei den weiteren Aufgrabungen war eine genaue Aussage, ob Baum oder Fernwärmeleitung zuerst gepflanzt bzw. gebaut wurden, nicht abschließend möglich.

Bei drei Aufgrabungen wurden Interaktionen zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitung festgestellt, bei vier Aufgrabungen Interaktionen zwischen Wurzeln und Bettungsmaterial und bei den restlichen vier Aufgrabungen konnte keine Interaktion festgestellt werden. Nur bei 63 % wurde somit eine Interaktion festgestellt, obwohl bei allen durchgeführten Aufgrabungen durch die äußeren Rahmenbedingungen eine Interaktion zwischen Wurzeln und Fernwärmesystem erwartet wurde. Bei reiner Betrachtung der Fernwärmerohrleitungs- und Bauparameter in Tabelle 1 war nicht erkennbar, warum welche Interaktion eingetreten ist.

Daher wird in den folgenden Unterkapiteln eine Beschreibung und Diskussion der Aufgrabungsergebnisse nach den Interaktionsarten unterteilt, um erste Rückschlüsse diskutieren zu

können, warum bei z.T. vergleichbaren Rohr- und Baumparametern unterschiedliche Interaktionsarten festgestellt werden konnten. Dazu werden insbesondere die ermittelten Bodenkennwerte ausgewertet und dargestellt. Nur bei Aufgrabung Nr.1 konnten aus logistischen Gründen keine Bodenproben entnommen werden. Die Bodenschichten und dazugehörigen Bodenkennwerte je Aufgrabung werden in den folgenden Unterkapiteln detailliert beschrieben.

Daher lagen für diese Aufgrabung keine Ergebnisse vor. Des Weiteren wurden zwei Fernwärme-neubaumaßnahmen an Baumstandorten durch den Projektkreis ausgewählt und durch das Projektteam begleitet. Diese zwei Standorte wurden als neue Langzeit-Versuchsfelder zur Untersuchung der Interaktion zwischen Fernwärmeleitungen und Wurzeln entwickelt und können für weitere Folgeforschungsvorhaben genutzt werden. Da es sich in beiden Fällen um neue Trassen handelt, war vorab keine Interaktionen zwischen Fernwärmeleitung und Wurzeln möglich. Aus diesem Grund werden die Versuchsfelder in Kapitel 2.5 und Kapitel 3 gesondert beschrieben.

2.1 Interaktion von Wurzeln und Fernwärmleitung

Bei den Aufgrabungen Nr. 3, Nr. 9 und Nr. 11 wurden Interaktionen zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitung festgestellt. Jedoch ist die Ursache der Interaktion wie folgt zu unterscheiden:

- Bei den Aufgrabungen Nr. 3 und Nr. 11 waren zuerst die Fernwärmerohrleitung vorhanden und die Baumwurzel wuchs anschließend zur Fernwärmeleitung.
- Bei Aufgrabung Nr. 9 war zunächst die Baumwurzel vorhanden, die für den Neubau einer Fernwärmerohrleitung gekappt wurde.

Aus diesem Grund werden die Beobachtungen der Aufgrabungen folgend separat beschrieben.

Aufgrabung Nr. 3

Bei der Aufgrabung Nr. 3 konnte das Wurzelwachstum einer Eiche an eine Fernwärmerohrleitung (Asbestzementleitung, Vor- und Rücklauf in 300 Zentimeter Tiefe unter GOK) festgestellt werden. Es konnte nicht ermittelt werden, ob zuerst die Fernwärmeleitung gebaut oder der Baum gepflanzt worden war. In Abbildung 1 ist deutlich erkennbar, dass die Wurzeln von Richtung GOK in die Tiefe wachsen, die Rohrleitungsoberfläche berühren, vertikal an der Rohr-oberfläche entlang wachsen und weiter vertikal in tiefere Bodenschichten wachsen.



Abbildung 1: Interaktion zwischen Wurzeln und Fernwärmerohrleitung, Vorlauf (links) und Rücklauf (rechts)

Da der Baum bereits entfernt worden war, konnte keine Analyse der Vitalität des Baumes durchgeführt werden. Der Abstand zwischen Baumstammachse und Fernwärmerohrleitung betrug ca. einen Meter. Als Bodenhorizonte ist in den oberen zehn Zentimetern eine schluffige Vegetationstragschicht und darunter ein sandig-kiesiger Boden festgestellt worden. Bei der Analyse von Bodenproben bei 160 Zentimeter unter GOK (Sieblinie S, g, u') und 300 Zentimeter unter GOK (Sieblinie S, fg', mg') wurden keine wesentlichen Unterschiede hinsichtlich Korndichte ($2,8 \text{ g/cm}^3$), Trockendichte ($1,7\text{-}1,8 \text{ g/cm}^3$), Porenvolumen (34-39 Vol.-%) und Durchlässigkeit (5×10^{-5} bis $2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) festgestellt. Der Wassergehalt betrug 6,9 % bei 160 Zentimeter Tiefe und 3,4 % in 300 Zentimeter Tiefe.

Der Wurzel lag somit über die Tiefe ein nahezu gleichbleibender Boden vor, der vertikal durchwurzelt wurde. Wurzeltiefen bis zu drei Metern sind bei (Stiel-)Eichen nach [26] bekannt. Bis zu drei Metern Tiefe konnten die Wurzeln bei Aufgrabung Nr. 3 erfasst werden. Jedoch scheinen die Wurzeln auch unterhalb der Leitung weiter in die Tiefe zu wachsen. Bis zu welcher tatsächlichen Tiefe die Wurzeln bei Aufgrabung Nr. 3 gewachsen sind, konnte im Rahmen der Aufgrabungsarbeiten nicht ermittelt werden.

Aufgrabung Nr. 11

Aufgrabung Nr. 11 wurde an einer ca. 80 Jahren alten Platane durchgeführt, die an zwei Seiten von einer Kunststoffmantelrohr-Trasse umgeben ist. Die Erdbauarbeiten erfolgten mittels Saugbagger. Da sich die Aufgrabungen im Straßenbereich befanden, war die Vorgabe, die Kopflöcher so klein wie möglich zu halten. Aufgrund der dadurch resultierenden kleinen Baugruben konnten nur gestörte Bodenproben entnommen werden. Es wurden zwei Kopflöcher hergestellt, um an beiden Trassenabschnitten (Kopfloch 1: Abstand Stammachse bis KMR 2,4 Meter; Kopfloch 2: Abstand Baumachse bis KMR 1,8 Meter) das Wurzelwachstum beobachten zu können (vgl. Abbildung 2).

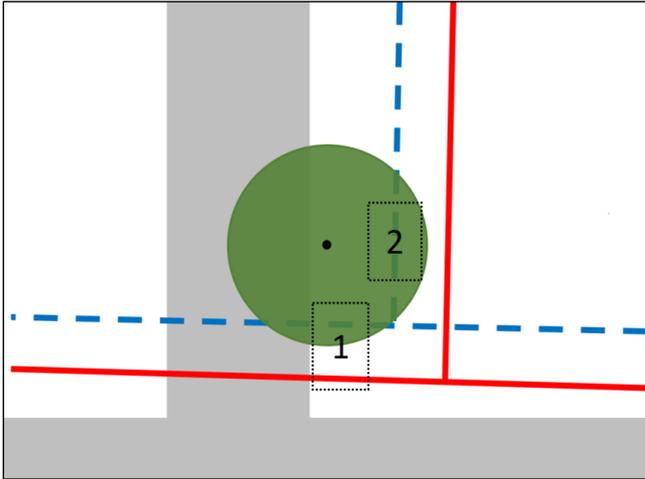


Abbildung 2: Skizze von Trassenverlauf, Baumstandort mit ungefährender Lage der Kopflöcher 1 und 2

Es konnte ein ausgeprägtes Wurzelgeflecht unmittelbar unterhalb der Asphaltdecke bei Kopfloch 1 festgestellt werden. Zwischen GOK und Bettung wurden vereinzelt Fein- und Grobwurzeln festgestellt. Innerhalb der Bettung wurden weitere Feinwurzeln ermittelt (vgl. Abbildung 3, links).

Bei Kopfloch 2 zeigten sich zwischen GOK und Bettung mehrere Feinwurzeln und Grobwurzeln. Zwischen Vor- und Rücklauf und an den Rohroberflächen und den KMR-Muffen konnten Feinwurzeln festgestellt werden (vgl. Abbildung 3, rechts). Ein Einwuchs der Wurzeln in die Fernwärmemuffe oder eine Beschädigung des Rohraußenmantels konnte nicht festgestellt werden.

Da, im Verhältnis zu den Wurzeln oberhalb der Bettung, kleinere Feinwurzeln innerhalb der Bettung festgestellt wurden, ist es wahrscheinlich, dass diese Wurzeln erst im Nachgang des Einbaus der Fernwärmeleitung in die Bettung und an die Fernwärmeleitung gewachsen sind.



Abbildung 3: Feinwurzeln in der Bettung bei Kopfloch 1 (links) und Feinwurzeln an und zwischen Vor- und Rücklauf bei Kopfloch 2 (rechts)

Es wurde in beiden Kopflöchern jeweils eine gestörte Probe entnommen. In beiden Kopflöchern war von GOK bis 0,2 Metern Tiefe eine Asphalttschicht mit Schottertragschicht vorhanden. In 0,6 Metern unter GOK konnte in Kopfloch 1 ein Sand mit Kiesanteilen bestimmt werden. Die Durchlässigkeit lag bei 1×10^{-5} m/s, die Korndichte bei $2,7 \text{ g/cm}^3$, die Trockendichte bei $1,7 \text{ g/cm}^3$ und der Wassergehalt bei 1,8 %. Das Porenvolumen lag bei 34 Vol.-%.

In Kopfloch 2 konnte im Bettungsbereich von 0,6 Metern bis zur Grabensohle ein Sand mit schwachen Kiesanteilen und schwachen Schluffanteilen bestimmt werden. Die Durchlässigkeit wurde zu 1×10^{-6} m/s, die Korndichte zu $2,7 \text{ g/cm}^3$ und die Trockendichte zu $1,7 \text{ g/cm}^3$ bestimmt. Das Porenvolumen lag bei 35 Vol.-%. Der Wassergehalt konnte, wie nach den Aufgrabungsarbeiten zu erwarten (vgl. hoher Grundwasserstand in Abbildung 3, rechts), höher als bei Kopfloch 1 festgestellt werden und wurde zu 7,9 % bestimmt.

Wurzeln konnten bis zur maximalen Aufgrabungstiefe von 1,5 Metern festgestellt werden. Wurzeltiefen von Platanen sind in [26] nicht beschrieben. Ob in tieferen Bereichen weitere Wurzeln vorliegen, wurde nicht ermittelt. Negative Einflüsse auf die Vitalität des Baumes aufgrund des Wärmeeintrags der Fernwärmeleitung konnten nicht festgestellt werden.

Aufgrabung Nr. 9

Bei der anlassbezogenen Aufgrabung Nr. 9 wurde eine im Jahr 2013 neu verlegte Fernwärmetrasse (KMR) an einer bestehenden Kastanie (ca. 60 Jahre) in einem Abstand von 1,5 Metern zur Baumachse untersucht. Bei den Neubaumaßnahmen im Jahr 2013 war die Kappung einer Starkwurzel kurz vor der Rohroberfläche notwendig (vgl. Abbildung 4, links). Bei der Aufgrabung im Rahmen des hier vorliegenden Forschungsvorhabens im Jahr 2020 konnte bis zur o.g. Starkwurzel und Rohroberfläche aufgegraben werden und die Entwicklung des Wurzelwachstums über sieben Jahre unmittelbar an der Fernwärmeleitung untersucht werden. Dabei

zeigte sich zunächst, dass die Starkwurzel wieder vereinzelt bis zur Rohroberfläche neu ausgetrieben ist (vgl. Abbildung 4, rechts).



Abbildung 4: Gekappte Starkwurzel nah an der Rohroberfläche während der Neubaumaßnahmen der Fernwärmetrasse 2013 (links; Bildquelle: ZORN Sachverständigen Büro Gartenbau) und an der Rohroberfläche während der anlassbezogenen Aufgrabung 2020 (rechts, gelber Pfeil zeigt die Rohroberfläche)

Durch Begutachtung der Wurzel durch einen Baumsachverständigen im Leitungsgraben konnte festgestellt werden, dass die Wurzel in den vorderen ca. 40 Zentimetern abgestorben war. Dieses Wurzelstück wurde daraufhin entfernt, um die Ursache des Wurzelsterbens zu analysieren. An dem Wurzelstück wurde Weißfäule, ein holzabbauender Pilz, festgestellt, der durch mechanische Verletzungen der Wurzel entstehen kann. Da das Wurzelstück verhältnismäßig sehr leicht war, war zu vermuten, dass der Pilz bereits über mehrere Jahre das Wurzelholz abbaut und somit vermutlich die Verletzung der Wurzel bei den Baumaßnahmen im Jahr 2013 verursacht wurde. Das Absterben der Wurzel aufgrund der Wärmeabstrahlung durch die Fernwärmeleitung war somit eher auszuschließen. Diese These wird durch den Neuaustrieb der Wurzel vor dessen Absterben gestützt.

Im Zuge des Neubaus der Fernwärmetrasse im Jahr 2013 wurde nach Absprache zwischen Fernwärmeversorger, Grünflächenamt und Baumsachverständigenbüro über der Fernwärmetrasse im Wurzelbereich der Bestandsbäume großvolumig Baumsubstrat von der GOK bis zu einer Tiefe von 1,5 Metern eingebaut. Bei der Aufgrabung 2020 zeigte sich, dass der Großteil der Wurzelmasse (Feinst- bis Grobwurzeln) in diesem Substrat verblieben ist (vgl. Abbildung 5, links). Zusätzlich zur o.g. Starkwurzel, die bereits im Jahr 2013 vorhanden war, wurden nur vereinzelt neu gewachsene Feinwurzeln in der Sandbettung festgestellt (vgl. Abbildung 5, rechts).



Abbildung 5: Großteil der Wurzelmasse in Baumsubstrat bis 1,5 Meter unter GOK (links) und seit 2013 vereinzelt neu gewachsene Feinwurzeln in der Bettung (rechts)

Die Analyse der Bodenproben ergab, dass das Baumsubstrat ein schluffiger, stark kiesiger Sand und die Bettung ein breitgestufter Sand mit Fein-, Mittel- und Grobanteilen war. Es war ein Unterschied des Wassergehaltes zwischen Bodensubstrat in 0,6 Metern von ca. 11,0 M.-% und Sandbettung in 1,6 Metern von ca. 3,5 M.-% feststellbar. Die Wasserdurchlässigkeiten der Bettung wurden zu $1,4$ bis $1,5 \times 10^{-4}$ m/s, die Korndichte zu $2,7$ g/cm³, die Trockendichte zu $1,6$ g/cm³ und das Porenvolumen zu 41 bis 42 Vol.-% bestimmt. Der Glühverlust des Substrates ergab 3,6 M.-%.

(Fein-)Wurzeln konnten bis zur maximalen Aufgrabungstiefe von 1,6 Metern festgestellt werden. Bei Kastanien ist nach [26] mit Wurzeltiefen bis zu drei Metern zu rechnen. Ob in tieferen Bereichen weitere Wurzeln vorliegen wurde nicht ermittelt. Die Vitalität des Baumes wurde seit 2013 in unregelmäßigen Abständen beobachtet und es konnten keine negativen Einflüsse durch die Wärmefelder im Erdreich festgestellt werden.

2.2 Interaktion von Wurzeln und Bettung

Bei den Aufgrabungen Nr. 6, Nr. 7, Nr. 8 und Nr. 10 konnten Interaktionen zwischen (Sand-)Bettung und Wurzeln festgestellt werden. Dabei konnten bei diesen Aufgrabungen zwei unterschiedliche Interaktionsarten zwischen Bettung und Wurzeln festgestellt werden:

- (Fein-)Wurzeln in der Bettung, die vermutlich nach Bau der Fernwärmetrasse in die Bettung gewachsen sind (vgl. Aufgrabungen Nr. 6, Nr. 8 und Nr. 10)
- Wurzeln in der Bettung, die vermutlich bereits beim Bau der Fernwärmetrasse vorhanden waren (vgl. Aufgrabung Nr. 7).

Aufgrabung Nr. 8

Aufgrabung Nr. 8 wurde an einer Kastanie wenige Meter entfernt von Aufgrabung Nr. 9 (vgl. Kapitel 2.1) an derselben Fernwärmetrasse durchgeführt. Im Gegensatz zu Aufgrabung Nr. 9 waren bei Aufgrabung Nr. 8 bei Neubau der Fernwärmetrasse im Jahr 2013 keine größeren

Wurzeln im Leitungsbereich vorhanden, die weiterhin im Leitungsgraben bzw. der Bettung verbleiben mussten. Somit zeigte sich das bereits bei Aufgrabung Nr. 9 beschriebene Wurzelbild, dass im Bereich des Baumsubstrates der Großteil der Wurzelmasse (Feinst- bis Grobwurzeln) festgestellt werden konnte. In der Bettung wurden nur einzelne Feinwurzeln ermittelt.

Auch hier wurden Bodenproben aus dem Substrat und aus der Bettung entnommen. Das Baumsubstrat war ein schluffiger, stark kiesiger Sand und die Bettung ein breitgestufter Sand mit Fein-, Mittel- und Grobanteilen. Es war ein Unterschied des Wassergehaltes zwischen Bodensubstrat in 0,8 Metern von ca. 10,7 bis 12,7 M.-% und Sandbettung in 1,9 Metern von ca. 3,3 bis 3,4 M.-% feststellbar. Die Wasserdurchlässigkeiten der Bettung wurden zu $1,1 \text{ bis } 1,0 \times 10^{-4} \text{ m/s}$, die Korndichte zu $2,7 \text{ g/cm}^3$, die Trockendichte zu $1,6 \text{ g/cm}^3$ und das Porenvolumen zu 40 Vol.-% bestimmt. Der Glühverlust des Substrates ergab 3,0 M.-%.

(Fein-)Wurzeln konnten bis zur maximalen Aufgrabungstiefe von 1,9 Metern festgestellt werden. Bei Kastanien ist nach [26] mit Wurzeltiefen bis zu drei Metern zu rechnen. Ob in tieferen Bereichen weitere Wurzeln vorliegen wurde nicht ermittelt. Die Vitalität des Baumes wurde seit 2013 in unregelmäßigen Abständen beobachtet und es konnten keine negativen Einflüsse durch die Wärmefelder im Erdreich festgestellt werden.

Aufgrabung Nr. 6

Bei Aufgrabung Nr. 6 konnte das Wurzelwachstum einer ca. 30 bis 40 Jahre alten Linde in die Sandbettung einer 3,9 Meter entfernten Fernwärmetrasse festgestellt werden. Die Asbestzementleitung wurde nach Pflanzung der Linde errichtet. Bei den regulären Baumaßnahmen wurde die Asbestzementleitung durch eine Kunststoffmantelrohrleitung ersetzt. In der Nähe der Fernwärmeleitung konnten wenige Feinwurzeln in der Bettung festgestellt werden (vgl. Abbildung 6, links). Bei dieser Aufgrabung war besonders, dass wenige Zentimeter über der Fernwärmeleitung ein Telekommunikationskabel in derselben Bettung verlegt war. An diesem Telekommunikationskabel konnte über die gesamte Strecke der Aufgrabung eine axial zum Kabel wachsende Wurzel festgestellt werden (vgl. Abbildung 6, rechts).



Abbildung 6: Feinwurzeln in Bettung der Fernwärmeleitung (links; roter Pfeil zeigt zur Fernwärmeleitung, eingekreist sind die Feinwurzeln, rechts im Bild das Telekommunikationskabel und Wurzeln, die an dem Telekommunikationskabel axial entlang wuchsen (rechts; ohne Telekommunikationskabel))

Die Sandbettung lag in einer Tiefe von 1,2 bis 1,8 Metern unter GOK. Von GOK bis zur Sandbettung war eine Vegetationstragschicht vorhanden. In der Vegetationstragschicht konnten an der Baugrabenwand vereinzelt Wurzeln (Feinst- bis Schwachwurzeln) festgestellt werden. Ein augenscheinlicher Unterschied des Wurzelwachstums zwischen Vegetationstragschicht und Sandbettung, mit Ausnahme des Wurzelwachstums entlang des Telekommunikationskabels, war nicht ersichtlich.

Die Vegetationstragschicht war ein schluffiger Sand mit schwachen Kiesanteilen und die Bettung ein Feinsand mit mittelsand- und schluffigen Anteilen. Es war ein Unterschied des Wassergehaltes zwischen Vegetationstragschicht in 0,25 Metern von ca. 13,0 M.-% und Sandbettung in 1,5 Metern von ca. 4 bis 4,5 M.-% feststellbar. Die Wasserdurchlässigkeiten der Bettung wurden zu $9,5 \times 10^{-6}$ m/s, die Korndichte zu $2,7 \text{ g/cm}^3$, die Trockendichte zu $1,6 \text{ g/cm}^3$ und das Porenvolumen zu 43 Vol.-% bestimmt. Die Trockendichte der Vegetationstragschicht lag bei $1,7 \text{ g/cm}^3$. Der Glühverlust der Vegetationstragschicht ergab 3,4 M.-%.

(Fein-)Wurzeln konnten bis zur maximalen Aufgrabungstiefe von 1,6 Metern festgestellt werden. Bei Linden ist nach [26] mit Wurzeltiefen bis zu 2,5 Metern zu rechnen. Linden sind Herzwurzler, wodurch Wurzeln auch außerhalb des Kronendurchmessers durchaus zu erwarten sind. Ob in tieferen Bereichen weitere Wurzeln vorliegen wurde nicht ermittelt. Negative Einflüsse auf die Vitalität des Baumes aufgrund des Wärmeeintrags der Fernwärmeleitung konnten nicht festgestellt werden.

Aufgrabung Nr. 7

Aufgrabung Nr. 7 wurde an einem Z-Sprung einer Kunststoffmantelrohr-Trasse in 1,2 Metern Abstand zu einer ca. 100 Jahre alten Platane durchgeführt. Die Kunststoffmantelrohrleitung wurde im Jahr 2012 errichtet, wodurch vermutlich ein Teil der (stärkeren) Wurzeln zu diesem Zeitpunkt bereits in der Nähe der Fernwärmeleitung vorhanden war. Wenige Zentimeter von der Fernwärmeleitung entfernt konnte z.B. in der Grabensohle eine 19 Zentimeter dicke Wurzel ermittelt werden, die aufgrund ihrer Größe bereits vor Neubau der Fernwärmeleitung vorhanden sein musste (vgl. Abbildung 7, links). Zudem wurden von GOK bis zur Grabensohle in 1,5 Metern Tiefe weitere Feinst- bis Starkwurzeln festgestellt, bei denen jedoch nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Wurzeln auch im Nachgang des Fernwärmeneubaus in die Bettung gewachsen sind (vgl. Abbildung 7, rechts).



Abbildung 7: Starkwurzel (19 Zentimeter) neben der Fernwärmeleitung (links; roter Pfeil Wurzel, gelber Pfeil Fernwärmeleitung) und Wurzelwachstum oberhalb der Fernwärmeleitung (rechts)

Aufgrund der Gegebenheiten vor Ort konnte nur eine kleine Baugrube mittels Saugbagger freigelegt werden. Von GOK bis 0,4 Metern Tiefe war eine Schottertragschicht vorhanden, an der jedoch keine Bodenprobe entnommen werden konnte. Von 0,4 Metern bis unter die Fernwärmeleitung (1,5 Meter unter GOK) war vermutlich als Bettung ein Feinsand mit schwachen schluffigen und starken mittelsandigen Anteilen vorhanden. In der Bettung konnte eine gestörte Bodenprobe entnommen werden. Die Durchlässigkeit wurde zu $7,5 \times 10^{-6}$ m/s, die Korndichte zu $2,7 \text{ g/cm}^3$, der Wassergehalt zu 5,9 % und der Glühverlust zu 0,5 M.-% bestimmt.

Wurzeln konnten bis zur maximalen Aufgrabungstiefe von 1,5 Metern festgestellt werden. Wurzeltiefen von Platanen sind in [26] nicht beschrieben. Ob in tieferen Bereichen weitere Wurzeln vorliegen wurde nicht ermittelt. Negative Einflüsse auf die Vitalität des Baumes aufgrund des Wärmeintrags der Fernwärmeleitung konnten nicht festgestellt werden.

Aufgrabung Nr. 10

Aufgrabung Nr. 10 wurde an einer Kunststoffmantelrohrleitung in 2,2 Metern Abstand von einer ca. 95 Jahre alte Platane durchgeführt. Die Erdbauarbeiten erfolgten mittels Saugbagger. Da sich die Aufgrabungen im Straßenbereich befanden, war die Vorgabe, dass Kopfloch so klein wie möglich zu halten. Aufgrund der dadurch resultierenden kleinen Baugrube konnten nur gestörte Bodenproben entnommen werden. Bei der Aufgrabung zeigten sich zwischen GOK und Bettung mehrere Feinwurzeln und eine Starkwurzel mit einem ovalen Umfang von 13 Zentimetern Breite und 26 Zentimetern Höhe (vgl. Abbildung 8, links). In der Bettung der Fernwärmeleitung konnten weitere Feinwurzeln festgestellt werden (vgl. Abbildung 8, rechts). Da, im Verhältnis zu den Wurzeln oberhalb der Bettung, nur kleinere Feinwurzeln in der Bettung festgestellt wurden, ist es wahrscheinlich, dass diese Wurzeln erst im Nachgang des Einbaus der Fernwärmeleitung in die Bettung gewachsen sind.



Abbildung 8: Fein- und Starkwurzel oberhalb der Bettung (links) und Feinwurzeln in der Bettung (rechts, u.a. gelber Pfeil)

Es wurde eine gestörte Bodenprobe im Leitungsgraben entnommen. Von GOK bis 0,6 Metern war ein Sand Kies vorhanden. Die Durchlässigkeit wurde zu 1×10^{-5} m/s, die Korndichte zu $2,6 \text{ g/cm}^3$, die Trockendichte zu $2,0 \text{ g/cm}^3$ und der Wassergehalt zu 1,7 % bestimmt.

Wurzeln konnten bis zur maximalen Aufgrabungstiefe von 1,5 Metern festgestellt werden. Wurzeltiefen von Platanen sind in [26] nicht beschrieben. Ob in tieferen Bereichen weitere Wurzeln vorliegen wurde nicht ermittelt. Negative Einflüsse auf die Vitalität des Baumes aufgrund des Wärmeintrags der Fernwärmeleitung konnten nicht festgestellt werden.

2.3 Keine Interaktionen zwischen Wurzeln und FW-Leitung/Bettung

Bei den Aufgrabungen Nr. 1, Nr. 2, Nr. 4 und Nr. 5 konnte keine Interaktion zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitung bzw. -bettung festgestellt werden, obwohl die oberirdischen Randbedingungen (u.a. Abstand zwischen Fernwärmeleitung und Baum, Rohrleitungs- und Baumalter) eine Interaktion vermuten ließen. Alle Aufgrabungen ohne feststellbare Interaktionen wurden als Begleitungen regulär stattfindender Baumaßnahmen durchgeführt. Die (vermutlichen) Gründe für die nicht festgestellten Interaktionen waren bei jeder der o.g. Aufgrabungen unterschiedlich. Folgend werden die Aufgrabungen kurz individuell beschrieben und die möglichen Ursachen für die fehlende Interaktion diskutiert.

Aufgrabung Nr. 1

Aufgrabung Nr. 1 erfolgte an einem Haubenkanal unmittelbar unter einem Ahorn. Die Aufgrabung erfolgte, da vermutet wurde, dass ein Wurzeleinwuchs zu einem Leck an einer Fernwärmeleitung in einem Haubenkanal geführt hat. Weiter wurde vermutet, dass der Wasserverlust aus dem Leck das Wurzelwerk und die Standsicherheit des Baumes gefährdet. Aus diesem Grund wurde der Baum entfernt und die Fernwärmemetrasse soll zukünftig in die Fahrbahn verlegt werden, um mögliche Schäden durch Fernwärmeleckagen an weiteren Bäumen der Allee zu verhindern [vgl. 31]. Da die Aufgrabungen aus o.g. Gründen sehr kurzfristig durchgeführt werden mussten, konnte das umfassende Prüfprogramm in diesem Fall nicht durchgeführt werden, sondern nur eine teilweise Beobachtung der Aufgrabungsarbeiten. Die Aufgrabungen zeigten jedoch keinerlei Interaktion von Baumwurzeln an oder im Haubenkanal (vgl. Abbildung 9, links). Das Wurzelwachstum beschränkte sich laut Aussage der Personen vor Ort auf Bereiche in der Oberflächennähe (vgl. Abbildung 9, rechts).



Abbildung 9: Blick in Haubenkanal, kein Wurzeleinwuchs sichtbar (links), Wurzel in Oberflächennähe (rechts, Bildquelle Gartenpflege Adamek)

Aufgrabung Nr. 2

Aufgrabung Nr. 2 wurde an einer Platane durchgeführt, die durch einen Z-Sprung der Fernwärmetrasse an zwei Seiten von einer Fernwärmeleitung in einem Abstand von 1,6 Metern umschlossen wurde. Aus diesem Grund wurde hier im Vorfeld eine Interaktion zwischen der Fernwärmeleitung und Baumwurzeln vermutet. Jedoch konnten während der Aufgrabungsarbeiten nur vereinzelte Feinwurzeln an der Grabenwand festgestellt werden (vgl. Abbildung 10, links), jedoch keine Wurzeln in der Bettung oder an der Fernwärmeleitung. Als Ursache für die nicht vorliegende Interaktion konnten die ungünstigen Wachstumsbedingungen in den oberen Bodenschichten vermutet werden. Die Fläche um den Baum war, bis auf eine Baumscheibe von ca. einem Meter Durchmesser, versiegelt und stark verdichtet. Zudem war die Baumscheibe hochgesetzt, wodurch kein (Regen-)Wasser von der befestigten Fläche zur Baumscheibe fließen und dort versickern konnte (vgl. Abbildung 10, rechts).



Abbildung 10: Vereinzelte Feinwurzeln an Grabenwand (links), hochgesetzte Baumscheibe (rechts)

Als Bodenhorizonte konnte eine Schottertragschicht bis 0,3 Meter unter GOK, Grabenverfüllung von 0,3 bis 0,9 Meter unter GOK und darunter eine Sandbettung festgestellt werden. Aus der Grabenverfüllung und der Sandbettung wurden Bodenproben entnommen. Die Grabenverfüllung war ein Sand mit Kiesanteilen und schwachen Schluffanteilen. Die Bettung war ein Sand mit schwachen Kiesanteilen und schwachen Schluffanteilen. Es war ein geringer Unterschied des Wassergehaltes zwischen Grabenverfüllung bei 0,75 Metern von ca. 6,2 M.-% und Sandbettung in 0,94 Metern von ca. 5,8 bis 6 M.-% feststellbar. Die Wasserdurchlässigkeiten der Bettung wurden von 4 bis 1×10^{-7} m/s, die Korndichte zu $2,8 \text{ g/cm}^3$, die Trockendichte zu $1,7$ bis $1,9 \text{ g/cm}^3$ und das Porenvolumen zu 31 bis 39 Vol.-% bestimmt.

Trotz dieser Bedingungen war die Platane, ähnlich wie die umliegende Vegetation, in einem vital guten Zustand, obwohl die Aufgrabungsarbeiten nach einer langen Trocken- und Hitzeperiode stattfanden. Aus diesen Gründen wurde vermutet, dass sich die Wurzeln in einer tiefer liegenden Bodenschicht mit Wasser- und Nährstoffen versorgen konnten.

Aufgrabung Nr. 4

Bei Aufgrabung Nr. 4 waren zwei Bäume in der Nähe einer Fernwärmeleitung aus dem Jahr 1974. Beide Bäume wurden auf einem privaten Grundstück vermutlich nach Bau der Fernwärmeleitung gepflanzt. Baum 1 war bereits beim Eintreffen des Projektteams entfernt. Baum 2 war noch vorhanden (vgl. Abbildung 11, links). Bei den Aufgrabungen konnten Wurzeln beider Bäume oberhalb der Fernwärmetrasse im Oberboden bis zu einer Tiefe von 0,2 Metern festgestellt werden. Die Fernwärmetrasse wurde dabei durch die Wurzeln diagonal gequert („Ausdehnung“: Länge – 5m; Breite 2 m von Baum 2). Ein Einwuchs in die Leitungszone konnte nicht festgestellt werden (vgl. Abbildung 11, rechts).



Abbildung 11: Baum 1 direkt an Fernwärmetrasse (links), Wurzeln in 0,2 Metern Tiefe unter GOK oberhalb der Fernwärmetrasse in ca. zwei Metern Abstand von Baum 1 und fünf Metern Abstand von Baum 2 (rechts)

Es wurden Bodenproben aus dem Oberboden (Sieblinie S, u, t', g') und der Sandbettung (Sieblinie mS, gs*, fs', g') entnommen. Der Wassergehalt ist beim Oberboden mit 13 bis 15 % wesentlich höher als in der Bettung mit 3 %. Die Korndichte des Oberbodens ist zu 2,5 bis 2,7 g/cm³ und der Glühverlust zu 3,4 M.-% festgestellt worden. Ein Einfluss auf die Vitalität des Baums 1 durch die Fernwärmeleitung war nicht erkennbar. Baum 2 war bereits gefällt, wodurch eine Aussage zur Vitalität des Baumes nicht mehr möglich war.

Aufgrabung Nr. 5

Aufgrabung Nr. 5 wurde im Rahmen einer Fernwärmetrassen-Erneuerung durchgeführt, zu der auch die Aufgrabung Nr. 6 gehörte (vgl. Kapitel 2.2). Jedoch war hier bei Eintreffen des Projektteams der Leitungsgraben bereits ausgehoben. Mögliche Wurzeln konnten somit nur an der Grabenwand betrachtet werden. Dabei konnten Wurzeln in der Vegetationstragschicht (vgl. Abbildung 12, links) und im Übergang zwischen Vegetationstragschicht und Sandbettung

festgestellt werden. Auf Höhe der Sandbettung konnten keine Wurzeln an der Grabenwand ermittelt werden (vgl. Abbildung 12, rechts).



Abbildung 12: Wurzelgeflecht in Vegetationstragschicht (links) und keine sichtbaren Wurzeln in Sandbettung (rechts)

Es wurden in der Vegetationstragschicht und in der Sandbettung (unterhalb der ehemaligen Rohrachse) Bodenproben entnommen. Die Vegetationstragschicht war ein Sand mit Schluff- und Kiesanteilen. Die Bettung ein Sand mit Schluffanteilen und schwachen Kiesanteilen. Der Wassergehalt lag in der Vegetationstragschicht in 0,1 bis 0,3 Metern Tiefe bei 13,1 % und in der Sandbettung bei 1,9 Metern Tiefe bei 7,2 bis 9,5 %. In der Vegetationstragschicht wurde der Glühverlust zu 4,8 M.-% bestimmt. Die Trockendichte der Sandbettung betrug $1,7 \text{ g/cm}^3$. Die Vitalität des Baumes war augenscheinlich gut. Die maximale Wurzeltiefe wurde bei ca. einem Meter Tiefe festgestellt, was für Linden nach [26] auch zutreffend ist. Jedoch ist nicht auszuschließen, dass bei den Aushubarbeiten bereits Wurzeln vor Eintreffen des Projektteams entfernt worden waren.

2.4 Wesentliche Erkenntnisse aus den In-situ-Aufgrabungen

Die Beobachtungen während der In-situ-Aufgrabungen gaben erste wichtige Erkenntnisse zur Interaktion zwischen Baumwurzeln und Fernwärmeleitungen. Der potentielle Wärmeeintrag von Fernwärmeleitungen ins Erdreich beeinflusste bei keiner der durchgeführten Aufgrabung die Vitalität des Baumes. Zudem konnten an keiner der betrachteten Fernwärmeleitungen Schäden durch Wurzelwuchs beobachtet werden.

Bei den In-situ-Aufgrabungen konnten Fälle mit und ohne Interaktionen zwischen Fernwärmeleitung und/oder Bettung mit Wurzeln festgestellt werden. Alle betrachteten Fernwärmeleitungen waren in Sandbettungen verlegt. Die Gründe für die analysierten Interaktionen waren bereits bei dieser Stichprobe von elf Aufgrabungen sehr vielfältig und nicht an einem Parameter

festzumachen. Folgend werden insbesondere die ermittelten Bodenparameter der Sandbettungen herangezogen, um für das Wurzelwachstum an Fernwärmeleitungen mögliche maßgebliche Parameter zu diskutieren. Die Begleitung von elf Aufgrabungen an Fernwärmeleitungen an Baumstandorten können somit erste Hinweise für mögliche Interaktions-Parameter geben, die in zukünftigen Forschungsvorhaben im Rahmen von weiteren In-situ-Aufgrabungen sowie Feld- und Laborversuchen weitergehend untersucht und analysiert werden sollten.

Bei einigen Aufgrabungen konnte im Bereich der Fernwärmeleitungen ein geringerer Wassergehalt in der Bettung im Vergleich zu den höheren Bodenhorizonten festgestellt werden. Jedoch ist auf Basis der In-situ-Aufgrabungen nicht zu ermitteln, ob der oftmals geringere Wassergehalt in der Bettung auf Einflüsse der Fernwärmetrasse zurückzuführen ist oder beispielsweise auf unterschiedliche Tiefenlagen, aus denen die Proben entnommen wurden. Hierzu sollten weitere Langzeitmessungen an einem Versuchsfeld durchgeführt werden (vgl. Kapitel 3).

Die Bettungseigenschaften hinsichtlich Wasserdurchlässigkeit, Korn- und Trockendichte sowie Porenvolumen und Interaktionsart werden zur Übersicht in Tabelle 2 dargestellt. Da es nicht bei allen Aufgrabungen möglich war gestörte und ungestörte Bodenproben zu entnehmen, konnten für einzelne Bettungen nicht alle o.g. Kennwerte ermittelt werden.

Tabelle 2: *Ermittelte Bodenparameter in den Sandbettungen der In-situ-Aufgrabungen*

Aufgrabung	Tiefe unter GOK [m]	Durchlässigkeit [m/s]	Korndichte [g/cm ³]	Trockendichte [g/cm ³]	Porenvolumen [Vol.-%]	Interaktionsart
Nr. 2	0,94	1,4 - 3,8 x 10 ⁻⁷	2,8	1,7-1,9	31-39	keine
Nr. 3	1,60	2,1 - 2,2 x 10 ⁻⁵	2,8	1,8	35-36	Leitung
	3,00	4,6 - 4,8 x 10 ⁻⁵	2,8	1,8	34-39	Leitung
Nr. 4	0,50	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	keine
Nr. 5	1,87	n.b.	n.b.	1,7	n.b.	keine
Nr. 6	1,50	9,5 x 10 ⁻⁶	2,7	1,5	n.b.	Bettung
Nr. 7	0,85	7,5 x 10 ⁻⁶	2,7	1,7	36	Bettung
Nr. 8	1,90	1,0 - 1,4 x 10 ⁻⁴	2,7	1,6	40	Bettung
Nr. 9	1,60	1,4 - 1,5 x 10 ⁻⁴	2,7	1,6	41	Leitung
Nr. 10	0,60	1,0 x 10 ⁻⁵	2,6	2,0	22	Bettung
Nr. 11	0,60	1,0 x 10 ⁻⁴ – 1,0 x 10 ⁻⁶	2,6-2,7	1,7	33-35	Leitung

n.b.: nicht bestimmbar

Die Korndichte lag bei allen Sandbettungen und Interaktionsarten bei 2,7 bis 2,8 g/cm³. Ein Einfluss der Korndichte auf das Wurzelwachstumsverhalten war somit unwahrscheinlich. Die Trockendichte variierte zwischen 1,6 bis 1,9 g/cm³, das Porenvolumen zwischen 31 bis 41 Vol.% und die Wasserdurchlässigkeit von 10⁻⁴ bis 10⁻⁷ m/s. Bei Trockendichten von 1,6 bis

1,8 g/cm³ und Porenvolumen von 34 bis 41 Vol.-% waren Wurzelinteraktionen mit Fernwärmeleitung und Bettung festgestellt worden. Bei Aufgrabung Nr. 2 konnte mit einer maximalen Trockendichte von 1,9 g/cm³ und minimalen Porenvolumen von 31 Vol.-% keine Interaktion zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitung bzw. Bettung ermittelt werden. Jedoch waren bei diesen Ergebnissen auch die größten Schwankungen. Ergebnisse weiterer Probekörper hinsichtlich Trockendichte und Porenvolumen von Aufgrabung Nr. 2 waren mit den Ergebnissen der anderen Aufgrabungen durchaus vergleichbar. Die Stichprobenanzahl der hier vorliegenden Untersuchungen ist als eher gering einzustufen. Allgemeingültige Rückschlüsse auf mögliche Einflüsse auf das Wurzelwachstum sind auf Basis dieser Ergebnisse zunächst nicht möglich.

Die ermittelten Durchlässigkeiten nach DIN 18130 [39] waren bei den Aufgrabungen als durchlässig bis stark durchlässig einzustufen (d.h. $\geq 10^{-6}$ m/s). Auch hier bestand eine Ausnahme bei Aufgrabung Nr. 2, wo die Durchlässigkeit als schwach durchlässig nach DIN 18130 [39] einzustufen war. Zwar waren auch hier Schwankungen im Messergebnis vorhanden (1,4 - 3,8 x 10⁻⁷ m/s), jedoch lagen diese Werte weiterhin unterhalb der Durchlässigkeitswerte bei den anderen Aufgrabungen. Somit kann auf Grundlage der durchgeführten Aufgrabungen im Rahmen des hier vorliegenden Forschungsvorhabens festgehalten werden, dass die Durchlässigkeit ein möglicher Indikator für Wurzelwachstum sein kann.

An Trennflächen zwischen Rohraußenmantel und Bettung oder zwischen Bodenschichten wurde z.T. ein verstärkter Wurzelwuchs festgestellt (vgl. Abbildung 13). Größere Wurzeln wurden in der Sandbettung i.d.R. nur festgestellt, wenn sie bereits vor Errichtung der Fernwärmetrasse in oder an der Baugrube vorhanden waren. Die Ausnahme bildete die Wurzeln einer Eiche bei Aufgrabung Nr. 3.



Abbildung 13: Wurzelwuchs in Trennfläche zwischen Telekommunikationskabel und Bettung (links) und zwischen Sandbettung und Tragschicht (rechts) bei Aufgrabung Nr. 6

Hinsichtlich Wurzelform und Wurzeltiefe konnten keine wesentlichen neuen Erkenntnisse im urbanen Raum festgestellt werden. Dies lag u.a. daran, dass die Aufgrabungstiefen maximal bis zur Bettungssohle ausgeführt wurden und die Fernwärmeleitungen i.d.R. nah am Baumstandort lagen, um die Wahrscheinlichkeit möglicher Wurzelinteraktionen mit Fernwärmeleitungen bei den Aufgrabungen zu erhöhen. Die Ermittlung der Interaktion zwischen Fernwärmeleitungen und Baumwurzeln war das Hauptziel des hier vorliegenden Forschungsvorhabens.

2.5 Entwicklung von neuen Versuchsfeldern

Im Rahmen einer In-situ Aufgrabung zur Untersuchung von Interaktionen zwischen Baumwurzeln und Fernwärmeleitungen wurde im November 2019 eine Baumaßnahme eines AGFW Mitgliedsunternehmens in Sachsen zur Neuverlegung einer Fernwärmetrasse begleitet. Die neue Fernwärmetrasse mit Kunststoffmantelrohrleitungen wurde parallel zu einem Fußweg verlegt und befindet sich in Teilen in Baumbewuchs sowie einer Rasenfläche (vgl. Abbildung 14). Zur Unterstützung des hier beschriebenen Forschungsvorhabens ermöglichte es das Fernwärmeversorgungsunternehmen in Abstimmung mit dem Grünflächenamt und den Bauausführenden Firmen vor Baubeginn Bäume zu identifizieren, die trotz Unterschreitung des nach [9] empfohlenen Mindestabstandes zur geplanten Trasse erhalten bleiben sollten. Es wurden nur Bäume entfernt, wenn dies zur Durchführung der Arbeiten (im Trassengraben und zur Erreichbarkeit mit den Baumschienen) notwendig oder deren Standsicherheit im Nachgang nicht mehr gewährleistet war.



Abbildung 14: Darstellung der Situation (links: Trassenverlauf, rechts: Leitungsgraben mit querenden Wurzeln und Gehölzbestand)

Nach dem erfolgreichen Abschluss der Baumaßnahme konnten, mit Unterstützung des lokalen Grünflächenamtes, neue Bäume direkt auf die Fernwärmetrasse gepflanzt werden. Dafür wurden Gehölze aus dem vorhandenen Baumbestand der Umgebung entnommen und zentral auf der neuen Fernwärmetrasse wiederverpflanzt (vgl. Abbildung 15). Verwendete Gehölzarten

waren hierbei Hainbuchen (*Carpinus betulus*), Linden (*Tilia spec.*), Pappeln (*Populus spec.*) sowie Eschen (*Fraxinus excelsior*), die auch im sonstigen Stadtgebiet häufig vorkommen. Die Lage der Bäume und die Baumarten im Versuchsfeld wurden dokumentiert. Während der Tiefbaumaßnahmen wurden Proben des anstehenden Bodens und der Bettung entnommen und dokumentiert.



Abbildung 15: Wiederbepflanzung auf der Leitungstrasse

Nach und während einer mehrjährigen Wachstumsphase sollen weitere Untersuchungen des Wurzelwachstums im Bereich der Fernwärmeleitungen durchgeführt, Bodenproben entnommen und die Vitalität der Bäume untersucht werden. Auch die zeitversetzte Entnahme der unmittelbar über der Trasse eingepflanzten Bäume, ist möglich, um potentielle Einflüsse im Labor zu untersuchen. Ziel der Untersuchungen sind weitergehende Langzeit-In-situ-Erkenntnisse hinsichtlich eines möglichen Um- und Einwuchs von Wurzeln an Kunststoffmantelrohrleitungen. Ggf. können so die Laborergebnisse aus Kapitel 4 verifiziert und validiert werden, da viele Randbedingungen (u. a. Bodenparameter, Baumarten- und alter, vorhandene Wurzeln in der Leitungstrasse) bereits beim Bau der Fernwärmetrasse dokumentiert wurden.

Es konnte keine In-situ-Aufgrabung an einer bestehenden Fernwärmeleitung in der Nähe von Baumstandorten für Langzeit-Temperaturmessungen unter und über der Erde akquiriert werden. Jedoch ergab sich die Möglichkeit an einer Fernwärme-Neubaumaßnahme im Mitteldeutschen Raum eine entsprechende Messstelle zu implementieren. Weitergehende Informationen zur Messstrecke sind in Kapitel 3 beschrieben.

3 Temperaturmessungen und Berechnung von Wärmefeldern

Systeme mit unterschiedlichen Temperaturen an zwei Orten, weisen das Bestreben auf einen Gleichgewichtszustand zu erreichen und es kommt zu einem Energieausgleich. Das bedeutet, so lange die Mediumtemperatur in einem Wärmenetz größer ist als die Umgebungstemperatur, gibt es einen Wärmetransport vom Ort des höheren (Heizwasser) zum Ort des niedrigeren thermischen Potentials (Umgebung) [41].

Die aktuell vorherrschende Rohrleitungstechnologie für Heizwassernetzsysteme im Fernwärmesektor bilden erdverlegte Kunststoffmantelrohre (KMR) (siehe Abbildung 16), die bei Anwendung des AGFW Regelwerks mit einer maximalen Dauerbetriebstemperatur von bis zu 120°C betrieben werden [42]. Auch wenn die durchschnittlichen Jahresbetriebstemperaturen von Bestandssystemen mittlerweile oftmals unter 100°C liegen, werden durch die Temperaturdifferenzen Wärmefelder im Erdreich erzeugt. Deren Ausbreitung im Erdreich und die dadurch mögliche Beeinflussung der Vegetation sind im Rahmen des Forschungsvorhabens von besonderem Interesse.

Im Gegensatz zu erdverlegten Stromkabeln, bei denen eine ausreichende Wärmeabfuhr notwendig ist, liegt es bei Fernwärmeleitungen im grundsätzlichen Eigeninteresse des Fernwärmeversorgungsunternehmens, während des Transportes im Verteilnetz möglichst wenig Wärme an die Umgebung abzugeben und so die physikalischen Wärmeverluste zu reduzieren. Die Ausbildung des Temperaturfeldes im Erdreich ist aufgrund zahlreicher Einflussfaktoren, wie beispielsweise Umgebungstemperatur, solare Einstrahlung und Niederschläge, sowie variabler Betriebsparameter ein mathematisch instationäres und komplexes Problem. Im Folgenden sind einige ausgewählte Einflüsse und Auswirkungen kurz aufgeführt (vgl. Kapitel 3.1), anschließend sind Ergebnisse von Berechnungen mit Finite-Elemente Programmen aufgeführt, die, unter Berücksichtigung variierender Randbedingungen, mögliche Ausbreitungen von Wärmefeldern abbilden. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden die Rahmenbedingungen für „Wärmeversuche“ (vgl. Kapitel 4.1) gewählt und ein Messkonzept (vgl. Kapitel 3.4) entwickelt, mit dem die simulierten Ergebnisse anhand von Messungen an real betriebenen Fernwärmeleitungen abgeglichen werden sollen (vgl. Kapitel 3.6).

3.1 Einflüsse auf das Wärmefeld

Die Einflüsse auf die Wärmeabstrahlung von Fernwärmeleitungen und das dadurch erzeugte Wärmefeld sind vielfältig. Neben nicht direkt zu beeinflussenden Umgebungsbedingungen, wird die Temperaturdifferenz zwischen Medium und Umgebung auch von der Betriebsweise des Netzes (z.B. aktuell zur Erfüllung der Versorgungsaufgabe notwendige Vorlauftemperatur)

beeinflusst werden. Hinzu kommen konstruktive Einflüsse wie zum Beispiel Nennweite und Dämmung der Rohrleitung, Verlegetiefe und Bettungsmaterial, die nach Abschluss der Baumaßnahme üblicherweise nur noch durch Alterungserscheinungen Änderungen erfahren. Im Folgenden sind beispielhafte Einflüsse auf das Wärmefeld aufgeführt.

3.1.1 Konstruktive Einflüsse

Dämmreihe

Das klassische KMR besteht aus drei Hauptkomponenten, dem Stahlmediumrohr, umhüllt von einer Polyurethan-Hartschaumstoffwärmedämmung (PUR-Dämmung), die von einem Polyethylen-Ummantelung (PE-Mantel) umgeben ist (siehe Abbildung 16).

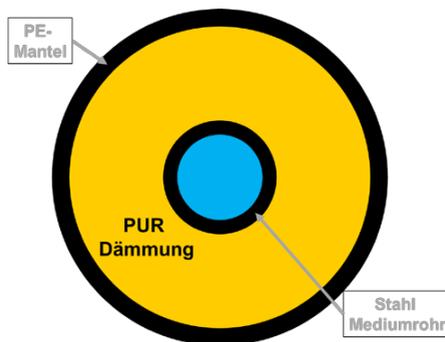


Abbildung 16 Skizze - Aufbau eines KMR

In der aktuellen Fassung der DIN EN 253:2020-03 [43] sind drei Wärmedämmserien aufgeführt, die für ein Mediumrohr gleichen Nenndurchmessers verschiedene Außendurchmesser des PE-Mantels (bei konstanter PE-Dicke) angeben (für DN 20 - DN 900). Da der Zwischenraum des KMR vollständig mit PUR Dämmung ausgefüllt ist, bedingt dies unterschiedliche Dämmstärken. Ausgehend von der niedrigsten Dämmstärke 1 (bspw. für DN 200 → Dämmstärke von ≈ 44 mm über den gesamten Umfang) erhöht sich die Dämmstärke im Durchschnitt um 40% bei Dämmstärke 2 und um 80% bei Dämmstärke 3. Die Abgegebene Wärmeleistung reduziert sich dadurch bei Dämmreihe 2 um durchschnittlich rund 20% und bei Dämmreihe 3 um durchschnittlich rund 30% gegenüber Dämmreihe 1.

Nennweite

Die in DIN EN 253 [43] aufgeführten Nennweiten reichen von DN 15 (Innendurchmesser Mediumrohr ≈ 17 mm) bis DN 1200 (Innendurchmesser Mediumrohr ≈ 1194 mm). Besonders bei kleinen Nennweiten (kleine Mediumrohre) führt eine dicke Isolierung auch zu einer erheblichen Vergrößerung der äußeren Oberfläche, wodurch die Auskühlung der Leitung zunimmt. Bei

größeren Leitungen ist dieser Effekt weitestgehend zu vernachlässigen, da das Verhältnis der Manteloberfläche zur Oberfläche des Mediumrohrs deutlich geringer ist [44].

Bogensegmente

Im Rahmen des AGFW Forschungsvorhabens „Technische Gebrauchsdauer Analyse“ (TGdA) wurden zwei Ausführungsvarianten eines 90° Bogens in einer Forschungsmessstrecke verbaut und mit Temperatursensoren ausgestattet. In Abbildung 17 lässt sich erkennen, dass die Anzahl der Segmentschnitte im PE Mantel einen Einfluss auf die mögliche Dämmstärke hat. Die daraus resultierenden Änderungen, sowie detaillierte Informationen zum Versuchsaufbau sind dem Abschlussbericht des Forschungsvorhabens zu entnehmen (Teil 1, Kapitel 3.2.4) [45].

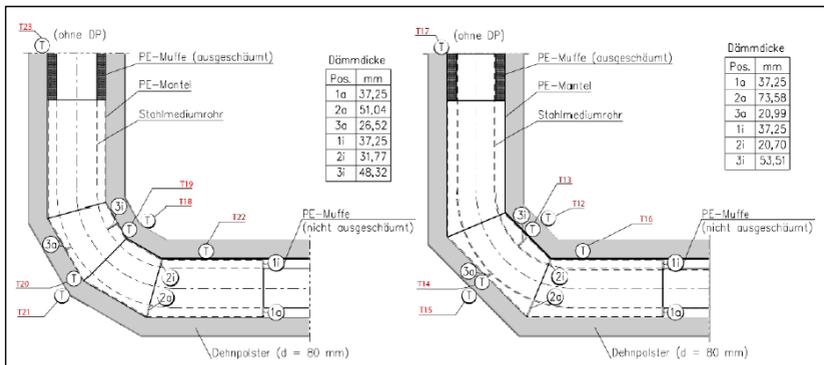


Abbildung 17: Schematische Darstellung der 90°-Bögen, inkl. Anordnung der Temperatursensoren und der resultierenden Dämmdicke an ausgewählten Punkten [45]

Ausführung

Mit dem Ziel möglichst gleichwertige Produkte bei angemessenem Aufwand zu erhalten, sind bei Fertigungsprozessen immer Toleranzbereiche angegeben, deren Einhaltung durch Qualitätssicherungsmaßnahmen zu überwachen ist. Doch auch innerhalb der normativ zulässigen Toleranzen können Abweichungen vom Idealmodell auftreten, die zwar unproblematisch aber eventuell nachweisbar sind. So liegt im Idealfall das Mediumrohr exakt im Zentrum des KMR, praktisch ist die Koaxialität aber nur in gewissen Toleranzen möglich, die für KMR (DN 90- DN 1200) ebenfalls in DIN EN 253 [43] vorgegeben sind. Im extremsten, gerade noch zulässigen Abweichungsfall eines DN 900 KMR liegt die Achse des Stahlrohres 14 mm von der des PE Mantels entfernt. Die Dämmstärke (Abstand von Außenseite Stahlrohr bis Innenseite PE-Mantel) variiert dabei über den Umfang von rund 70 mm bis 100 mm.

3.1.2 Alterung

Für KMR wird nach AGFW [46] eine minimale technische Lebensdauer von 30 Jahren gefordert. In der Praxis hat sich gezeigt, dass Fernwärmetrassen unter Umständen in der Lage sind 50 Jahre oder gar länger betrieben zu werden. Materialien, die über derart lange Zeiträume thermisch und mechanisch belastet werden, unterliegen in der Regel gewissen Alterungsprozessen, die die Materialeigenschaften mit der Zeit verändern können. Bei den, für die Wärmedämmung von KMR maßgeblichen PUR-Hartschaumstoffen, erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit über die Nutzungsdauer, was sich erneut besonders bei kleinen Nennweiten bemerkbar macht [46].

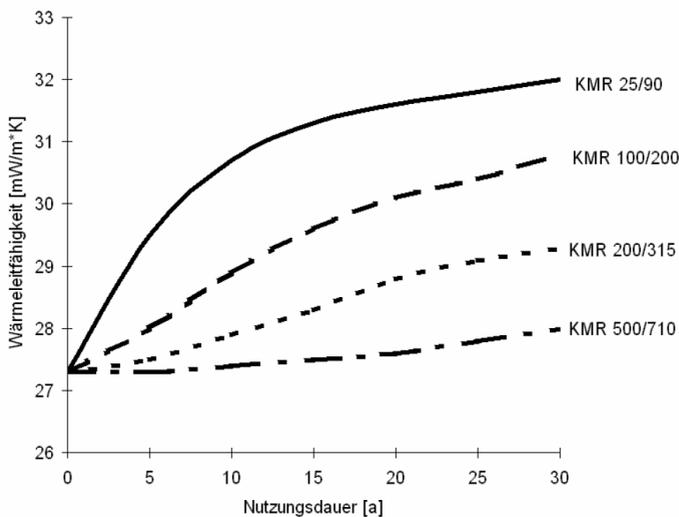


Abbildung 18: Zeitliche Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit von Rohren verschiedener Dimensionen [46]

3.1.3 Einfluss des Bettungsmaterials

Zur ersten Orientierung kann man die Wärmeleitung einer Fernwärmeleitung im Erdreich als einfaches, stationäres Problem beschreiben. Die Berechnung des Wärmestroms (\dot{Q}) durch eine Zylinderschale lässt sich nach [47] wie folgt bestimmen:

$$\dot{Q} = \lambda * 2 * \pi * l * \frac{(t_1 - t_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad [47] \quad \text{Formel 1}$$

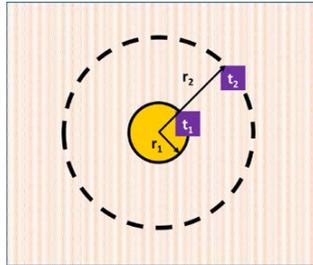


Abbildung 19: Skizze zur Berechnung von \dot{Q} durch Zylinderschalen

Nimmt man die geometrischen Größen als konstant an und fasst diese zu einer Geometriegröße (G) zusammen, sieht man, dass sich der Wärmestrom mit der Wärmeleitfähigkeit (λ) und der Temperaturdifferenz ($t_1 - t_2$) verändert.

$$\dot{Q} = \lambda * G * (t_1 - t_2) \quad \text{Formel 2}$$

Wärmeleitfähigkeiten von Böden variieren stark mit der Bodenart und dem jeweiligen Feuchtegehalt, eine Übersicht findet sich in Tabelle 3.

Tabelle 3 Wärmeleitfähigkeiten von Böden

Bodenart	λ [W/mK]
trockener Sand	0,36-0,37 [41]
Vollgesättigter Ton/Schluff	1,72 [41]
Erdreich, lehmig feucht	2,33 [47]
Erdreich, trocken	0,53 [47]
Quarzsand, trocken	0,3 [47]
Flüssigboden (mit Bentonit)	2,61 [48]
Leitfähigkeit des Bodens	1,2 [49]

Unter den Annahmen, dass die Wärmeleitfähigkeit der Umgebung konstant ist und auch die Temperatur (t_1) konstant den Wert einer festen Vorlauftemperatur (Mediumtemperatur) hält, bleiben noch die beiden Variablen t_2 und \dot{Q} . Zur Berechnung der Temperaturen an verschiedenen Punkten im Erdreich ist es notwendig einen Wärmestrom zu bestimmen. Dieser ist zwar bezogen auf eine mittlere Erdreichtemperatur [49] abzuschätzen. Nach Dahlem [50] ist die Erdreichtemperatur, in der klassischen Verlegetiefe von FW-Leitungen von 0,8 bis 2 m, abhängig von der Umgebungstemperatur und dem Grundwasserstand. Wie in Formel 2 zu sehen, ist der Wärmestrom allerdings von der Temperaturdifferenz ($t_1 - t_2$) abhängig.

Für die Berechnung eines Wärmefelds muss auch berücksichtigt werden, dass über die Ränder des Rechengebietes ein Wärmeaustausch erfolgen kann (abhängig von Sonneneinstrahlung).

lung, Umgebungstemperatur etc.) und die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs stark von der Bodenart und dessen Feuchtegehalt abhängt (trockener Quarzsand $\lambda = 0,3 \text{ W/mK} \rightarrow$ lehmiges Erdreich, feucht = $2,33 \text{ W/mK}$ [47]). Schnell wird klar, dass es sich bei der Berechnung eines Wärmefeldes um eine Fernwärmeleitung um ein komplexes System handelt, das von zahlreichen Randbedingungen abhängt, die man teilweise nicht direkt beeinflussen kann. Für die Berechnung derartiger mehrdimensionaler, instationärer Problemstellung, mit teilweise voneinander abhängigen Größen, kommen heutzutage oft Finite-Elemente-Methoden in Simulationsstools zur Anwendung.

Sand / ZFSV

Im Rahmen des BMWi geförderten Forschungsvorhabens „Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung“ [51] wurde eine In-situ-KMR-Leitung errichtet, die bei sonst gleicher Ausführung einmal in ZFSV und einmal in Sand gebettet wurde (siehe Abbildung 20).

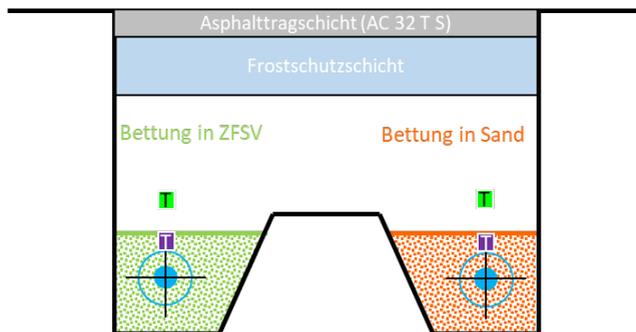


Abbildung 20: Skizze des Querschnittes der Forschungsstrecke (kein typischer FW-Rohrleitungsgraben)

Standort (und damit Umwelteinflüsse), Verlegetiefe, Rohrmaterial und Betriebstemperatur sind nahezu identisch, weshalb sämtliche Unterschiede in der Temperaturentwicklung auf den Einfluss des Bettungsmaterials zurückzuführen sein sollten. Da es sich um eine reine Forschungsstrecke handelt, die keinen Rücklauf hat, keine Versorgungsaufgabe übernimmt und einige konstruktive Besonderheiten aufweist, sind die Daten nicht allgemein auf Fernwärmetrassen übertragbar. Ein qualitativer Vergleich des Einflusses durch die Bettungsmaterialien ist aber dennoch möglich. Die Messstrecke wurde Ende 2015 in Betrieb genommen und 2016 weitestgehend mit konstanter Mediumtemperatur von 90°C betrieben. In dieser Zeit wurde im Sand eine relative Feuchte von rund 34 % (Standardabweichung $\approx 3,1 \%$) und im ZFSV von rund 43 % (Standardabweichung $\approx 1,3 \%$) gemessen. In der violetten Kurve in Abbildung 21 ist die Differenz der direkt an der Rohroberkante gemessenen Temperaturen ($T_{\text{Sand}} - T_{\text{ZFSV}}$) dargestellt, es ist eine Differenz von bis zu 1,5 K zu erkennen. Die Temperaturdifferenz in einem

Abstand von rund 30 cm zur Rohroberkante ist in der grünen Kurve noch ersichtlich aber deutlich geringer als direkt am Rohr. Dies kann zum einen an Umgebungseinflüssen liegen, die zur einer Temperaturangleichung im Erdreich führen, zum anderen liegen die in Abbildung 20 grün markierten Temperaursensoren nicht mehr direkt im unterschiedlichen Bettungsmaterial, sondern knapp darüber in einem mit gleichem Füllmaterial (Sand/ Erdreich) aufgefüllten Bereich.

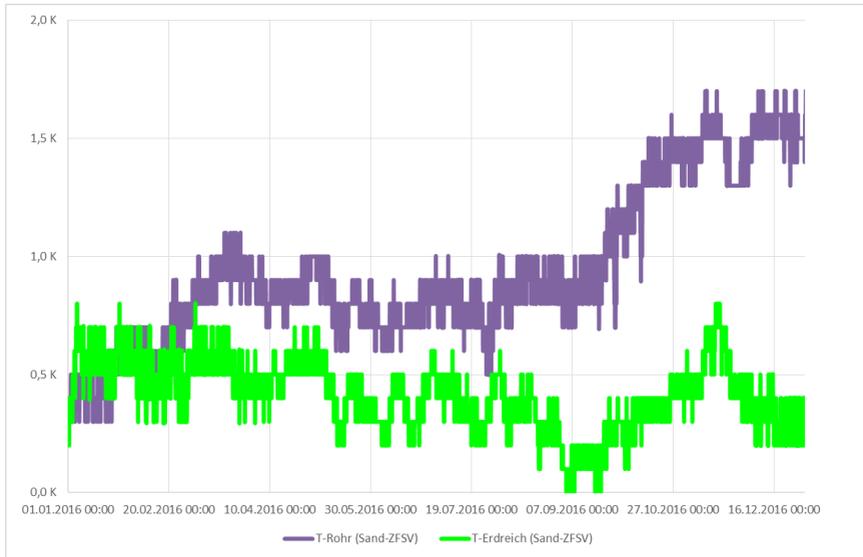


Abbildung 21: Gemessene Temperaturdifferenzen von Sand-ZFSV Bettung

3.1.4 Einfluss von Betriebsparametern

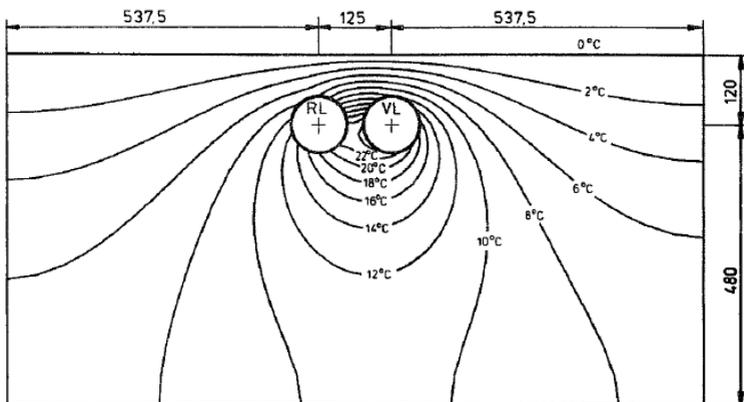
Nach Herstellerangaben ist es möglich, die abgegebene Wärmeleistung eines spezifischen KMR in Abhängigkeit der Trassen-Vorlauf- und Rücklauftemperatur zu berechnen [49]. Grundlage ist eine angenommene mittlere Erdreichtemperatur von 10°C. Ausgangswert ist der Mittelwert der abgegebenen Wärmeleistung einer KMR-Trasse (gemittelt über die Nennweiten DN 20-DN 1000) mit 120°C Vorlauftemperatur (T_{VL}) und 60°C Rücklauftemperatur (T_{RL}). Tabelle 4 zeigt beispielhafte Reduzierungen der abgegebenen spezifischen Wärmeleistung pro Trassenmeter (q) bei Verringerung von T_{VL} und/oder T_{RL} .

Tabelle 4 Berechnung der abgegebenen Wärmeleistung in Abhängigkeit der Betriebstemperaturen

T_{VL} / T_{RL}	$\phi q (D1) =$	
	[W/m]	[%]
120/60	31,4	100%
100/50	25,5	-19%
80/40	19,6	-38%
60/30	13,7	-56%
40/20	7,8	-75%
120/50	29,4	-6%
100/60	27,5	-12%
100/40	23,5	-25%

3.2 Wärmefelder im Erdreich

Die Frage nach der Ausbreitung von Wärmefeldern um erdverlegte Fernwärmeleitungen ist nicht neu und auch die Komplexität aufgrund der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Einflussparameter ist bekannt. In der Literatur lassen sich entsprechend komplexe Beispiele und Berechnungen finden z.B. [15].



Längenangaben in cm
DN 800 / 1000

$T_V = 120^\circ\text{C}$
 $T_R = 60^\circ\text{C}$
 $T_U = 0^\circ\text{C}$

Abbildung 22: FEM Berechnungsergebnisse dargestellt als Isothermen um ein Kunststoffmantelrohr [15]

Auf Grundlage der Literaturrecherche konnten erste Rückschlüsse auf die Ausbreitung von Temperaturfeldern um Kunststoffmantelrohrleitungen gezogen werden, die als Grundlage für die Konzeptionierung der Wärmeversuche (vgl. Kapitel 4.1) und der Entwicklung möglicher Messkonzepte (vgl. Kapitel 3.4) dienen. Auch wenn die Ergebnisse der errechneten Wärmefelder im Grunde sehr ähnlich sind, lassen sich Unterschiede entdecken die teilweise auf die gewählten Randbedingungen zurückzuführen sind. Zur Errichtung eines möglichst realitätsnahen Versuchsaufbaus bei den Wärmeversuchen wurden zur Konzeptionierung in einem ersten Schritt existierende Messstellen des AGFW nach real gemessenen Oberflächentemperaturen an erdverlegten KMR ausgewertet. Anschließend wurde in einer einfachen Simulation der prinzipielle Versuchsaufbau abgebildet, da dessen Geometrie stark von der realen Situation abweicht.

3.2.1 Auswertung Messwerte

Für die Versuchskisten der Wärmeversuche muss der Wärmequelle eine Soll-Temperatur vorgegeben werden. Mit dem Ziel, das Temperaturniveau möglichst realen Gegebenheiten anzupassen, wurde hierfür auf Messdaten des AGFW zurückgegriffen. Aufgrund der Abweichenden Fragestellungen in diesen Forschungsvorhaben, deren Ziel nicht die Bestimmung der Temperaturfelder war, sind nicht alle relevanten Parameter erfasst, sodass mit diesen Daten nur eine Abschätzung der ungefähren Temperaturgröße möglich ist.

Messdaten AGFW #1

Der erste Datensatz stammt von dem AGFW Forschungsvorhaben „Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR Verlegung“ [51] in dem eine Forschungsleitung ohne direkte Versorgungsaufgabe errichtet wurde. Im betrachteten Zeitraum Nov.- Juni wurde diese weitestgehend konstant mit 90°C im Vorlauf betrieben.

- » Nennweite: DN 40
- » Anzahl der Messpunkte: 298.355
- » Minimalwert= 61,2 °C
- » Maximalwert= 95,5°C
- » Mittelwert = 89,96 °C
- » Standardabweichung = 0,414

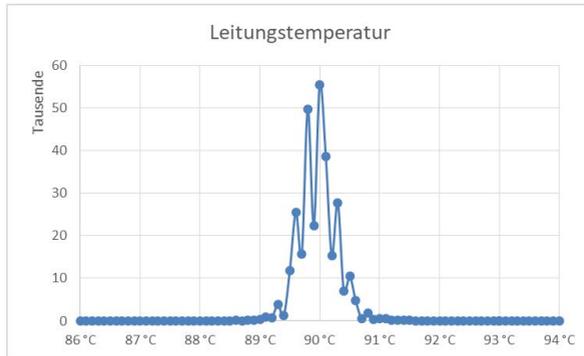


Abbildung 23: Anzahl der Gemessenen Temperaturen im Heizwasser (in Tausend)

An der PE-Ummantelung der KMR-Leitung wurde einmal an der Unterkante (RUK) und einmal an der Oberkante (ROK) gemessen. Trotz der weitestgehend konstanten Temperatur des Heizwassers schwanken die Temperaturen am Mantel stark und sind an der ROK und RUK unterschiedlich ausgeprägt (siehe Tabelle 5 und Abbildung 24). Mögliche Ursache sind die schwankenden In-situ-Umgebungsbedingungen, die auch der Grund dafür sein können, dass sich oberhalb und unterhalb des Rohres unterschiedliche Temperaturverläufe ergeben.

Temperaturen an Ober- und Unterkante des KMR

Tabelle 5: Übersicht zu den Temperaturmessungen an RUK und ROK

	RUK	ROK
Anzahl der Messpunkte	296.801	296.801
Minimaltemperatur	12,6 °C	13,0 °C
Maximaltemperatur	22,1 °C	23,5 °C
Mittelwert	15,85 °C	16,43 °C
Standardabweichung	2,463	2,930

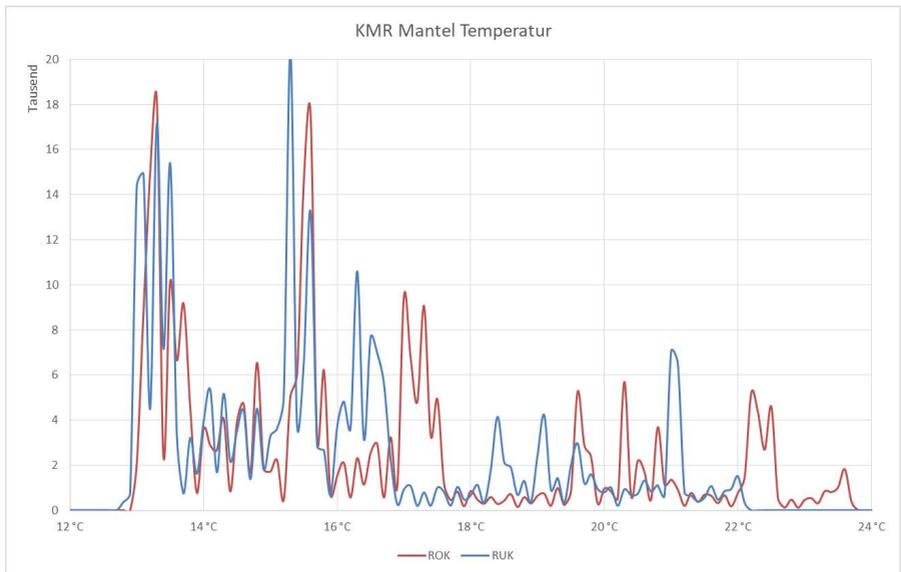


Abbildung 24: Anzahl der gemessenen Temperaturwerte pro Temperatur (in Tausend)

Messdaten AGFW #2

Im Rahmen des AGFW Forschungsvorhabens „Technische Gebrauchsdaueranalyse von Wärmenetzen unter Berücksichtigung volatiler erneuerbarer Energien“ [45] wurde eine Teststrecke mit KMR DN 150 errichtet. Während einer Betriebsphase von Juli bis April pendelte die definiert eingebrachte Mediumtemperatur zwischen 60 und 140°C (siehe Abbildung 25). Die Temperatursensoren zur Messung an der KMR Oberflächentemperatur sind im Bogenbereich angebracht. Sowohl auf der Innen- als auch der Außenseite des KMR Bogens sind maximal Temperaturen von 36°C aufgetreten. Die Mittelwerte liegen um die 25°C bei einer mittleren Betriebstemperatur von 100°C (siehe Tabelle 6). Die gemessenen Temperaturen im Bogenbereich wurden während einer Betriebsphase aufgezeichnet, in der kein Dehnpolster, welches zusätzliche die Ausbildung des Wärmefeldes beeinflussen würde, zum Einsatz gekommen ist.

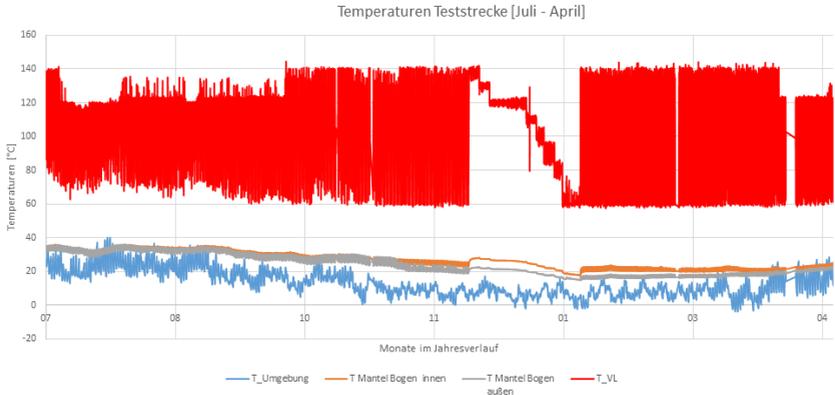


Abbildung 25: Temperaturdaten an der Forschungsmessstrecke (von Juli bis April)

Tabelle 6: Übersicht zu den Messwerten der Forschungsmessstrecke

	Umgebungs- temperatur	Oberflächen- temperatur KMR Bogen (innen)	Oberflächen- temperatur KMR Bogen (außen)	Medium- temperatur (T_VL)
Min.	-3,9 °C	17,5 °C	14,8 °C	57,3 °C
Max.	40 °C	36,0 °C	36,1 °C	144,4 °C
Ø	13,1 °C	26,6 °C	24,1 °C	100,8 °C

In beiden Fällen bildet der Versuchsaufbau zwar eine funktionstüchtige und weitestgehend nach dem Stand der Technik errichtete Fernwärmeleitung ab, die jeweiligen Forschungsfragen führten allerdings zu Anpassungen, die keine realen Temperaturfelder abbilden (z.B. Rücklauf und VL mit gleicher Temperatur, variierende Bettungsmaterialien etc.). Für den Versuchsaufbau der Wärmeversuche wurde eine Temperaturquelle mit ca. 36°C gewählt, da so ein entsprechend markanter Temperaturgradient innerhalb der Versuchskiste erzeugt werden kann.

3.2.2 Temperaturgradient im Wärmeversuch

Nach dem ersten Planungsentwurf für die Wärmeversuche wurden mit Hilfe eines einfachen Simulationstools (Energy2D) erste Simulationen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass unter den gewählten Randbedingungen mit einem ausgedehnten Wärmefeld zu rechnen ist (siehe Abbildung 26).

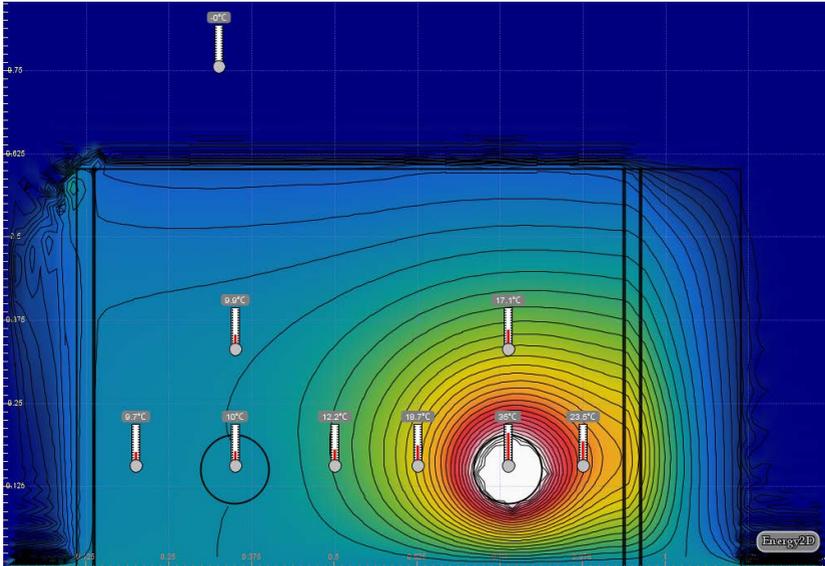


Abbildung 26: Einfache Simulation der Wärmeversuche

Auch wenn sich die hier beschriebenen, vereinfachten Simulationsergebnisse auf den ersten Blick mit den Angaben aus der Literatur decken, wurde deutlich, dass zur Simulation von Wärmefeldern im Erdreich, unter realen und damit deutlich komplexeren Randbedingungen, ein umfangreicheres und leistungsfähigeres Modell benötigt wird.

3.3 FEM Berechnung von Wärmefeldern – Teil 1

Für detailliertere Berechnung von Wärmefeldern im Erdreich mittels FEM Simulation, konnte das Institut für Technische Thermodynamik (TTD) der Technischen Universität Darmstadt (TUD) gewonnen werden. Dieses setzte für die „Untersuchung des Einflusses von Fernwärmeleitungen auf die Temperaturverteilung im Erdreich“ das Programm COMSOL Multiphysics ein.

3.3.1 Rechengebiet und Randbedingungen

Im ersten Schritt musste ein Rechengebiet mit entsprechenden Geometrien definiert werden. Da im Fernwärmeleitungsbau zahlreiche Kombinationen von Rohrdurchmesser, Verlegetiefe, Rohrabstand, Dämmstärke der Rohrleitung, Deckschichtmaterialien etc. existieren, gibt es allerdings keine klassische Referenzgeometrie, die eine Art „Standardfall“ abbildet. Deshalb wurden die geometrischen Vorgaben und sonstigen Randbedingungen des finalen Rechenmodells, unter einzelnen Vereinfachungen, an eine real existierende Fernwärmetrasse angelehnt. An dieser Versorgungsleitung im Süddeutschen Raum konnte der AGFW im Rahmen

des BMWi geförderten Forschungsvorhabens „Technische Gebrauchsdauersanalyse“ [45] eine messtechnische Überwachung installieren. Dadurch ist sichergestellt, dass ein praxisnahes Rechenmodell verwendet wird. Das finale Modell ist in Abbildung 27 zu sehen.

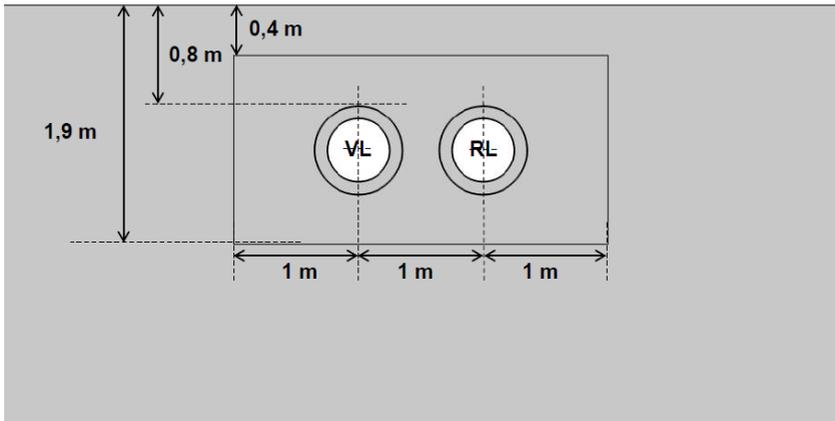


Abbildung 27: Geometriemodell zur FEM Berechnung mit DN 500 Leitungen

3.3.2 Szenarien

In gemeinsamen Arbeitstreffen entwickelten AGFW und TTD, unter Berücksichtigung von Fachliteratur und Herstellerdatenblättern, die Randbedingungen und Ausprägungen des Modells. Weiterhin wurden Szenarien festgelegt, in denen sich einzelne Randbedingungen verändern, um die Einflüsse auf das Wärmefeld zu vergleichen (vgl. Tabelle 7).

Tabelle 7: Veränderte Kennwerte in den untersuchten Szenarien

Szenario	Kennwert	Ausprägung
1	Feuchte des Erdreiches Umgebungstemperatur	Trocken / feucht; 0°C / 20°C
2	Umgebungstemperatur	0°C / 20°C (sprunghaft)
3	Vorlauftemperatur	110°C / 130°C (sprunghafter Anstieg)
4	Sonneneinstrahlung	Tagesverlauf

In der Regel sind für die Erstellung von Simulationsmodellen unterschiedliche Annahmen und Vereinfachungen notwendig, die den Rechenaufwand in einem handhabbaren Rahmen halten. Für die hier angesetzten Fragestellungen wurde beispielsweise mit konstanten Randbedingungen für den Rand des Rechengebietes (Erdreich 10°C, Umgebung 0°C / 20°C) gerechnet.

net. Außerdem wurde das Erdreich in zwei Abschnitte (Leitungszone und Umgebendes Erdreich) mit unterschiedlichen aber innerhalb des Materials konstanten Stoffwerten angenommen. Es wird im Rechenmodell keine konvektive Wärmeübertragung berücksichtigt, sondern nur mit Wärmeleitung gerechnet (Ausnahme Sonneneinstrahlung).

Szenario 1 - Feuchtes und trockenes Erdreich

In der grafischen Auswertung der untersuchten Szenarien (siehe Abbildung 28) ist beispielhaft zu sehen, wie sich die Wärmefelder (dargestellt sind die Isothermen) um die Rohrleitungen herum ausbilden.

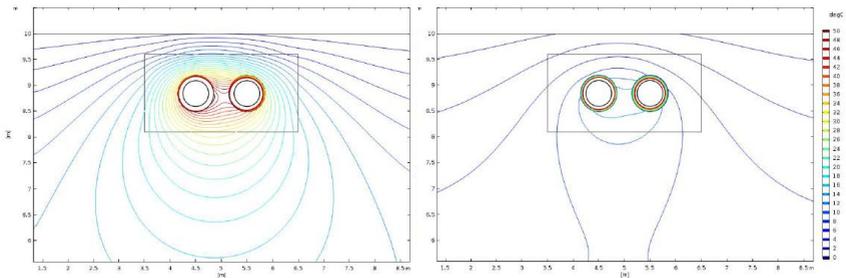


Abbildung 28: Isothermen bei sehr trockenem (links) und sehr feuchtem (rechts) Erdreich und 0°C Umgebungstemperatur

Szenario 2 – Einfluss der Umgebungstemperatur

In Abbildung 29 ist der Temperaturverlauf entlang der Geländeoberkante (GOK) zu sehen, im linken Bild ist das Rechengebiet wie beschrieben mit Fernwärmeleitung und im rechten Bild ungestörtes Erdreich mit gleichen Umgebungsbedingungen dargestellt. Ausgehend von der blauen Kurve (Zeitpunkt $t=0$), die ihr Maximum bei 2,7°C aufweist (Differenz zur ungestörten Erdreich 2,2 K), wird die Umgebungstemperatur sprunghaft auf 20°C erhöht. Nach simulierten 12h (grüne Kurve) bzw. 24h (rote Kurve) lässt sich sehen, dass die Differenz zwischen dem Erdreich unmittelbar über der Fernwärmeleitung und dem am Rand des Rechengebietes kaum verändert. Durch den Anstieg der Umgebungstemperatur steigt dabei auch im ungestörten Erdreich die Temperatur an der GOK um ≈ 8 K (nach 12h) bzw. 10 K (nach 24h) an.

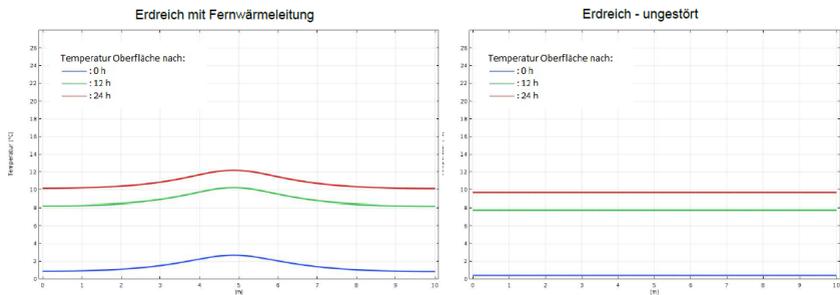


Abbildung 29: Temperaturverlauf am Übergang Erdreich/ Luft nach sprunghaftem Anstieg der Umgebungstemperatur von 0°C auf 20°C

Szenario 3 – Einfluss der Vorlauftemperatur

Im dritten Szenario wurde die Vorlauftemperatur (T_{VL}) sprunghaft von 110°C auf 130°C erhöht, was den Temperaturverlauf an der GOK allerdings kaum beeinflusst (vgl. linke Seite Abbildung 30). Auch nach einem simulierten Zeitraum von 24h ist die Differenz zur Ausgangskurve mit $\Delta T = 0,04$ K vernachlässigbar im Vergleich zum Einfluss durch eine geänderte Umgebungstemperatur. Auf der rechten Seite von Abbildung 30 ist in diesem Fall der Temperaturverlauf senkrecht zur GOK (entlang der geometrischen Symmetrielinie zwischen Vor- und Rücklauf) dargestellt. Auch hier ist die Differenz nach 24h gegenüber der Ausgangssituation mit $\Delta T = 0,3$ K eher gering.

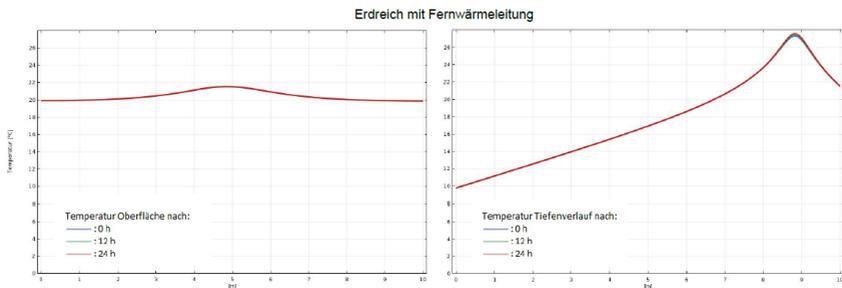


Abbildung 30: Temperaturverlauf an der GOK (links) und dazu senkrecht (rechts) mit einem Sprung der Vorlauftemperatur von 110°C auf 130°C (weitere Details siehe Anlage 1)

Szenario 4 – Sonneneinstrahlung

Im vierten Szenario wurde bei Umgebungstemperatur 20°C und feuchtem Erdreich eine Sonneneinstrahlung eines warmen Juni Tages bei klarem Himmel in Frankfurt¹ simuliert (siehe Abbildung 31).

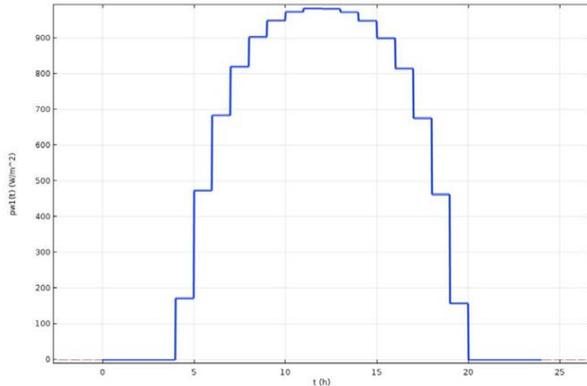


Abbildung 31: Realer Tagesverlauf der Sonneneinstrahlung (Leistung der Sonneneinstrahlung pro m^2 über einen Tag) am Breitengrad/Längengrad: 50.083, 8.715 (PVGIS)

In Abbildung 32 ist erneut der Temperaturverlauf an der GOK dargestellt, der sich qualitativ in der bereits bekannten Form darstellt. Auf der rechten Seite ist zum Vergleich das ungestörte Erdreich dargestellt, es wird deutlich, dass der Wärmeeintrag durch Sonneneinstrahlung großen Einfluss auf die Temperatur hat.

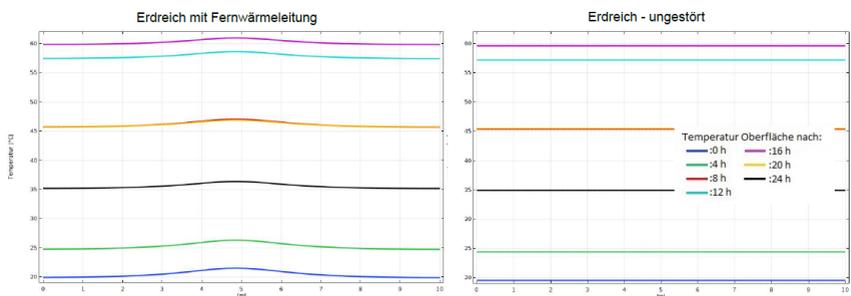


Abbildung 32: Zeitlicher Unterschied im Temperaturverlauf an der GOK bei $T_{Umgebung} = 20^{\circ}C$ und starker Sonneneinstrahlung

¹ European Commission Joint Research Centre, Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)

Die maximal auftretende Temperatur liegt in dieser vereinfachten Simulation bei 61°C. Auch wenn in der Realität sehr feuchtes Erdreich und heiße Sommertage selten so extrem aufeinandertreffen, durch Schatten der Strahlungseintrag geringer ausfällt oder nicht berücksichtigte Wärmeübertragungsformen relevante Mengen an Wärme vom Erdreich an die Umgebung abgeben, wird deutlich, dass die Umgebungsbedingungen das Wärmefeld erheblich beeinflussen.

3.3.3 Validierung des Simulationsmodells

Zur Validierung der Simulationsergebnisse sollten im weiteren Projektverlauf, parallel zu durchgeführten Aufgrabungen an Wurzel/ Fernwärme Interaktionspunkten, Messstellen errichtet werden. Nach individueller Anpassung des Modells an die realen Gegebenheiten (inklusive der Vegetationsnähe) lassen sich so die, von den Annahmen beeinflussten, Ergebnisse des Modells mit realen Messwerten abgleichen.

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens begleiteten Aufgrabungen (vgl. Kapitel 2), ermöglichten allerdings nicht die Errichtung eines entsprechenden Messfeldes, da entweder die Leitung oder der Baum nach Beendigung der Arbeiten nicht an der vorherigen Stelle verblieben sind oder kein ausreichender Raum für entsprechende Messeinrichtungen zur Verfügung stand. Eine Validierung des Modells der TU Darmstadt war deshalb vorerst nicht möglich.

Im Rahmen des projektbegleitenden Arbeitskreises konnte allerdings ein Versorger gewonnen werden, der bei der Errichtung einer neuen Leitungstrasse im innerstädtischen Grünstreifen einer Messeinrichtung zustimmte. Aufgrund der lokalen Gegebenheiten musste, bei dieser Baumaßnahme, der nach DIN 18920 [9] empfohlene Mindestabstand von 2,5 m lokal unterschritten werden, allerdings ohne die Bäume während des Baus oder im nachfolgenden Betrieb negativ zu beeinflussen. In Abstimmung mit dem zuständigen Grünflächenamt wurden deshalb Baumsachverständige hinzugezogen, welche die Baumaßnahmen begleiten und mögliche Eingriffe in den Wurzelbereich bewerten und etwaige Wurzel- / Baumschutzmaßnahmen (z.B. Schutz der Wurzel vor dem Austrocknen oder Schutz des Baumes vor Verlust der Standfähigkeit) durchführen konnten.

In Zusammenarbeit mit dem lokalen Versorger, den Baumsachverständigen, Fernwärmeexperten des AGFW e.V. und einem externen Messtechniker konnte auf dieser Grundlage ein Messkonzept erstellt und umgesetzt werden.

3.4 Erstellung eines Messkonzepts zur Temperaturmessung

Auf Grundlage bisheriger Erfahrungen mit Fernwärmemessstellen, wurde ein erstes Messkonzept entwickelt. Wie bereits beschrieben sind für die Ausbreitung von Wärmefeldern im Erdreich nicht nur die Temperatur ausschlaggebend, sondern auch die Wärmeleitfähigkeit des Bodens und die Umgebungsbedingungen. Aus diesem Grund sind für das Messkonzept auch

Messungen des Feuchtegehalts im Erdreich vorgesehen. Das erste Messkonzept wurde anschließend mit den Projektpartnern und einem externen Ingenieurbüro für Mess-/Steuer-/Regelungstechnik und Energiemanagement diskutiert. Die daraus resultierende Überarbeitung bildete dann die Grundlage für die Rücksprache mit dem Versorger und weiteren AGFW Fernwärme-Experten. Es stellte sich heraus, dass seitens des Versorgers für Planung und Bau der neuen Trasse mit einem „Sachverständigenbüro Gartenbau“ zusammengearbeitet wird. Dieses prüft, beispielsweise durch Suchschürfungen im Wurzelbereich der Bäume, potentielle problematische Interaktionen zwischen Leitung und Vegetation im Bereich der geplanten Trassenführung. Dabei geht es nicht nur um den späteren Betrieb, sondern auch um baubegleitende Schutzmaßnahmen für Bäume, wenn beispielsweise größere Wurzelfreilegungen eine Unterversorgung oder statische Beeinträchtigung des Baumes vermuten lassen. In Zusammenarbeit mit dem Versorger und der Expertise des Ingenieurbüros, welches Erfahrung im Monitoring von Bäumen hat, entstand anschließend das finale Messkonzept.

3.4.1 Das Messkonzept

In der Konzeption wurden drei Teilabschnitte ausgewählt, die jeweils einen unabhängigen Messbereich mit unterschiedlichem Fokus darstellen (1. BAUM, 2. UNGESTÖRT, 3. GRABEN). Der erste Teilabschnitt (BAUM) dient primär zur Erfassung der Situation im Wurzelbereich des Baumes. Hierzu sind die Temperatur in der Krone des Baumes (TK) sowie die Feuchte (F) und Temperaturen (T) im Wurzelbereich (B 1, grün - nahe der Baumachse, B 2, violett – nahe einer Hauptwurzel, B 3, rot - Wurzelbereich in Leitungsnähe) zu erfassen (siehe Abbildung 33).

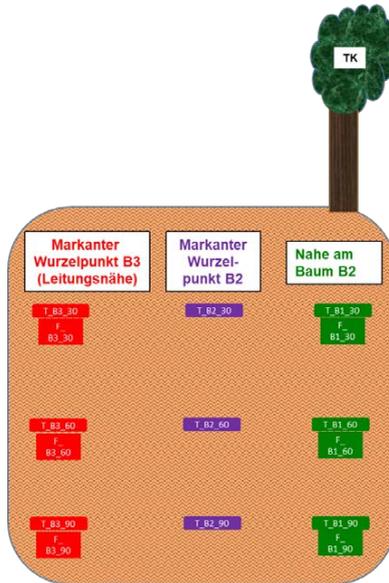


Abbildung 33: BAUM Set mit zehn Temperatur- (T, TK) und sechs Feuchte- (F) Sensoren

Für einen Vergleich, wie sich das Wärmefeld im Wurzelbereich gegenüber einem nicht durchwurzelten Bereich verhält, wird ein zweiter Abschnitt (UNGESTÖRT₂) erstellt. Dieser wird dem ersten Abschnitt BAUM (Bereiche B1 und B3) nachempfunden und ist lediglich in Rohrachse so weit verschoben, dass er möglichst außerhalb des Wurzelbereichs liegt (größtmöglicher Abstand zu den beiden angrenzenden Bäumen der Allee). Der dritte Abschnitt (GRABEN) dient zur Erfassung des Wärmefeldes in unmittelbarer Nähe der Fernwärmetrasse und des Leitungsgrabens. Ziel ist vor allem die Ausbreitung des Wärmefeldes um die Rohrleitung zu erfassen, um so den Wärmeeintrag ins Erdreich durch das Rohr aufzuzeichnen (siehe Abbildung 34).

² Ungestört bedeutet in diesem Zusammenhang auf einen Bereich, der möglichst nicht von Wurzeln gestört ist. Da es hierbei auch zu Überschneidungen mit dem Rohrgraben kommen kann, ist nicht von einem komplett ungestörten (natürlich gewachsenen) Boden auszugehen.

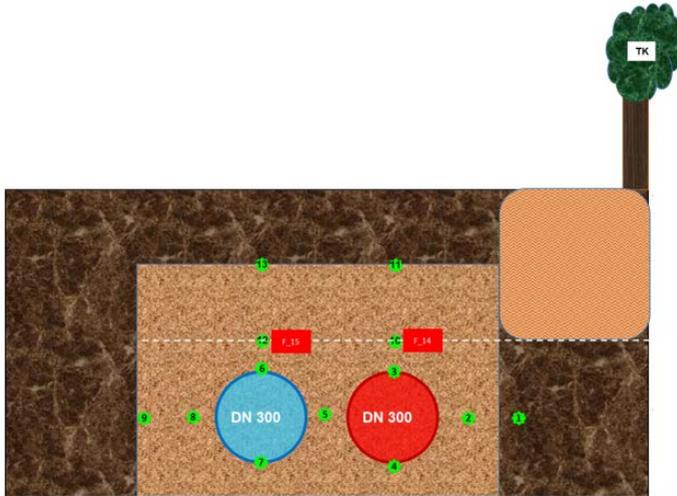


Abbildung 34: GRABEN Set mit 13 Temperatur- und zwei Feuchtesensoren

3.4.2 Messtechnik

Die ins Erdreich bzw. in den Leitungsgraben eingebrachten Messsensoren werden als verlorene Messtechnik geplant, da das Freilegen von Fernwärmeleitungen grundsätzlich mit sehr hohem organisatorischem und finanziellem Aufwand verbunden ist. Auf Grundlage guter Erfahrungen, im Rahmen anderer Forschungsvorhaben mit AGFW Beteiligung, wurde für die Messstelle *HOBO*-Messtechnik der Firma *Onset Computer Corporation* ausgewählt. Insgesamt wurden für die Umsetzung des Messkonzeptes 28 Temperatursensoren (Messbereich -40 – 100 °C; Genauigkeit $\leq \pm 0,2$ K bei 0 – 50 °C) und zwölf Feuchtesensoren (Messbereich 0-0,55 m³/m³) sowie ein externer Temperatur- und Feuchtesensor für die Baumkrone benötigt. Aufgrund der lokalen Gegebenheiten musste auf batteriebetriebene Logger zurückgegriffen werden, die sich zum Schutz vor Umgebungseinflüssen in einem separaten Schachtbauwerk befinden. Die Batterien müssen regelmäßig getauscht und dabei die Daten manuell ausgelesen werden. Als Kompromiss zwischen Datenquantität und davon abhängiger Laufzeit bis zum nächsten Batteriewechsel speichern die Datenlogger die Werte in 15-minütigen Intervallen. Dadurch entstehen rund 4.000 Messdaten am Tag.

3.4.3 Planungsprozess

Die Installation der Messstelle ist baubegleitend geplant, da so die Positionierung der Sensoren im Erdreich deutlich einfacher erfolgen kann als bei einer nachträglichen Verlegung. Zusätzlich wird so vermieden, dass das Erdreich (z.B. durch Auflockerung des verdichteten Leitungsbereichs oder das Einbringen anderen Verfüllmaterials bei Verschließen der Löcher etc.)

zusätzliche Störungen erfährt, welche die späteren Messungen zusätzlich beeinflussen können. Aus diesem Grund musste das Messkonzept erstellt werden, bevor der Leitungsgraben vollständig ausgehoben und der Untergrund im Detail bekannt war. Daraus ergab sich allerdings die Notwendigkeit, den Planungsprozess stetig an die tatsächlichen Gegebenheiten anzupassen. Nicht nur der Bauablauf, der von den Fortschritten der einzelnen Bauabschnitte der gesamten Baumaßnahme abhängt, erforderte die Flexibilität aller Beteiligten, sondern auch die tatsächlichen Bodenverhältnisse beeinflussten den tatsächlich umsetzbaren Aufbau der Sensorfelder. So konnte beispielsweise der ursprünglich vorgesehene Messabschnitt nicht umgesetzt werden, da in diesem Leitungsabschnitt kurzfristig Anpassungen vorgenommen wurden, die eine unmittelbare Verfüllung der Leitungszone notwendig machten. Außerdem stellte sich heraus, dass unter dem Grünstreifen teilweise in einer Tiefe von weniger als einem Meter eine extrem harte Bodenschicht beginnt und die Bäume ein sehr flächiges Wurzelwachstum ausgebildet hatten. Da die Bäume durch die Errichtung der Fernwärmetrasse nicht geschädigt werden sollten, stand die Entfernung von Wurzeln nicht zur Debatte und ein Bereich für die Messung im ungestörten Bereich stand letztendlich nicht zu Verfügung.

3.5 Aufbau/ Errichtung der Messstelle

Die Fernwärmetrasse, an der die Messeinrichtungen installiert wurden, befindet sich in einem Grünstreifen im innerstädtischen Bereich (vgl. Abbildung 35).



Abbildung 35: Skizze des geplanten Trassenverlaufs (nach Planungsunterlagen des Versorgers)

Der Rohrleitungsgraben um den Messschacht herum ist umfassend mit Wurzeln durchzogen, weshalb einige Absperrarmaturen versetzt wurden und es keinen Messquerschnitt an einem geraden Rohr ohne Wurzelbereich gibt. In Abbildung 36 ist der Rohrleitungsgraben zu sehen, die mehrfach umwickelten Wurzeln wurden während der Bauphase bewässert und waren vor direkter Sonneneinstrahlung geschützt. Am unteren rechten Bildrand sind die Schutzrohre

(weiß) der Sensorkabel (schwarz) zu sehen. Anhand der offenen Rohrverbindungen ist zu sehen, wo im Nachgang die KMR-Muffen montiert wurden. Im Bereich der Armaturen wurden im Nachgang Dehnpolster aus Schaumstoff ergänzt, die neben ihrem eigentlichen Zweck, Leitungsbewegungen zu kompensieren, eine zusätzliche Dämmung darstellen.

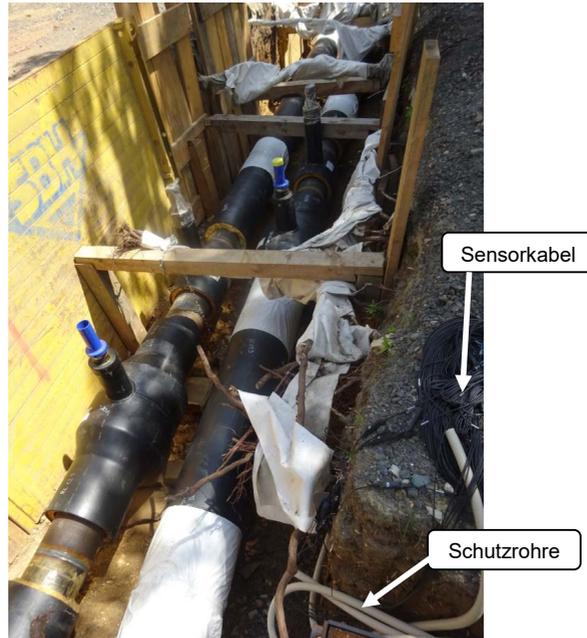


Abbildung 36 Blick in den Rohrgraben nach Installation der KMR Trasse samt Armaturen (vor Muffenmontage; unten rechts Sensorkabel)

Nach Anpassung des Messkonzepts auf die lokalen Gegebenheiten konnten die drei in Abbildung 37 dargestellten Sets „Ungestört“ (blau), „Graben“ (rot) und Baum (hellgrün) errichtet werden. Neben den Rohrleitungen sind auch relevante Wurzeln, Armaturen, der Messschacht und der nächste Baum skizziert. Wichtige Ereignisse für die Inbetriebnahme der Messtechnik sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Tabelle 8 Ereignisse IBN Messtechnik

Datum	Ereignis
04.06.2019	Inbetriebnahme Messtechnik „Baum, Graben, Ungestört“
03.07.2019	Positionierung der Sensoren „Graben, Ungestört“
27.08.2019	Inbetriebnahme & Positionierung Sensor „Baumkrone“
KW 39 - 2019	Inbetriebnahme der Trasse (Nach Messwerten)
14.11.2019	Positionierung der Sensoren „Baum“

Weitere Informationen zu den einzelnen Bauphasen sind Anlage 2 zu entnehmen.

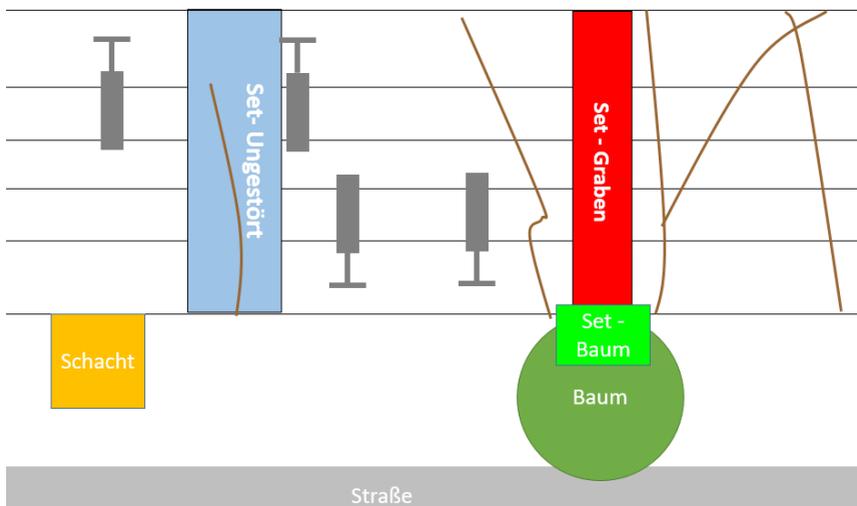


Abbildung 37: Übersichtsskizze der Mess-Sets im Rohrleitungsgraben aus der „Vogelperspektive“ inklusive markanter Wurzelverläufe (braun) und Armaturen (grau stilisiert)

3.6 Betrieb und erste Ergebnisse

3.6.1 Lagerungsdichte

Nach Abschluss der Baumaßnahme untersuchte ein Baugrundgutachter die Lagerungsdichte in der Leitungszone, mittels leichter Rammsondierungen. Die hierfür identifizierten sechs Punkte wurden so gewählt, dass weder die Leitungen, noch Wurzeln oder Messtechnik beschädigt werden konnten und die Untersuchungen dennoch möglichst nah zu den Sensorfeldern stattfanden. Die Schlagzahlen n_{10} der leichten Rammsondierung variieren innerhalb der Leitungszone zwischen 2 und 23. Der z.T. starke Anstieg der Schlagzahlen ab ca. 1,80 m Tiefe

markiert den Übergang von der Leitungszone zum natürlich anstehenden Untergrund. Über der Leitungszone schwanken die Schlagzahlen zwischen 1 und 15. Im Schnitt liegen die Schlagzahlen über die gesamte Tiefe aller Rammsondierungen bei rd. 4 bis 7. Das Ende der Erkundungstiefe wurde durch die Baugrubensohle definiert. Diese lag bei ca. 1,80 m bis 2,00 m unter GOK. Die verzeichneten Schlagzahlen weisen auf eine sehr lockere bis lockere Lagerung des Bodenmaterials hin. Obwohl weitestgehend auf schweres Gerät verzichtet werden musste, um Messtechnik und Wurzelwerk zu schützen, überrascht die teilweise niedrige Lagerungsdichte. Besonders in der Leitungszone hat die Lagerungsdichte Einfluss auf die Statik der warmgehenden Leitungen, was aber bei der Planung entsprechend berücksichtigt werden kann. Bis zum Projektende waren an der Oberfläche keinerlei Setzungserscheinungen zu beobachten, die sonst auch zu Verschiebungen der Positionen einzelnen Messsensoren führen könnte. Eine zweite Untersuchung zu einem späteren Zeitpunkt kann Aufschluss darüber geben, wie sich die Lagerungsdichte mit der Zeit verändert hat. Aufgrund der Tatsache, dass die Leitung noch kein ganzes Jahr betrieben wurde hat man von dieser Untersuchung während der Projektlaufzeit abgesehen.

In 1,2 Metern Tiefe wurden gestörte und ungestörte Bodenproben in der Sandbettung und eine gestörte Bodenprobe im anstehenden Boden entnommen. Der anstehende Boden war ein toniger und kiesiger Sand/Schluff. Die Bettung ein Sand mit Schluffanteilen und schwachen Kiesanteilen. Der Wassergehalt lag im anstehenden Boden bei 7 % und in der Sandbettung bei 6,2 %. Die Korndichte der Sandbettung wurde zu ca. 2,6 g/cm³ und die des anstehenden Bodens zu 2,7 bis 2,8 g/cm³ bestimmt. Die Trockendichte der Sandbettung betrug 1,5 bis 1,6 g/cm³, das Porenvolumen 37 bis 44 % und die Durchlässigkeit 2,2 bis 2,7 x 10⁻⁵ m/s. Im anstehenden Boden wurde der Glühverlust zu 3,4 M.-% bestimmt.

3.6.2 Messdaten

Anhand der in Abbildung 38 dargestellten Messdaten des Sets „Ungestört“ lassen sich die einzelnen Betriebsphasen der Sensoren, von ihrer (1) Inbetriebnahme über die (2) Positionierung im Erdreich bis hin zur (3) Aufnahme des Versorgungsbetriebs der FW-Leitung abgrenzen. Diese sind weitestgehend für alle Sets gültig.

Set „Ungestört“

Die qualitative Anordnung der Temperatursensoren im Querschnitt ist in Abbildung 39 dargestellt. Temperatursensor T4 befindet sich zwischen dem PE Außenmantel des KMR und dem darüber angebrachten Dehnpolster (Materialstärke 40 mm). Es ist deutlich zu sehen, dass unter dem Dehnpolster im Betrieb der Leitung deutlich höhere Temperaturen auftreten (max. ≈43 °C) als direkt darüber (T6). Nach [52] sind unter dem Dehnpolster Temperaturen bis maximal 50°C zulässig. Auffällig ist, dass die Temperaturen an der Außenseite des Dehnpolsters

(T5 am Vorlauf und T6 am Rücklauf) geringer sind als die gemessenen Temperaturen von T2, in der Nähe der Wurzel.

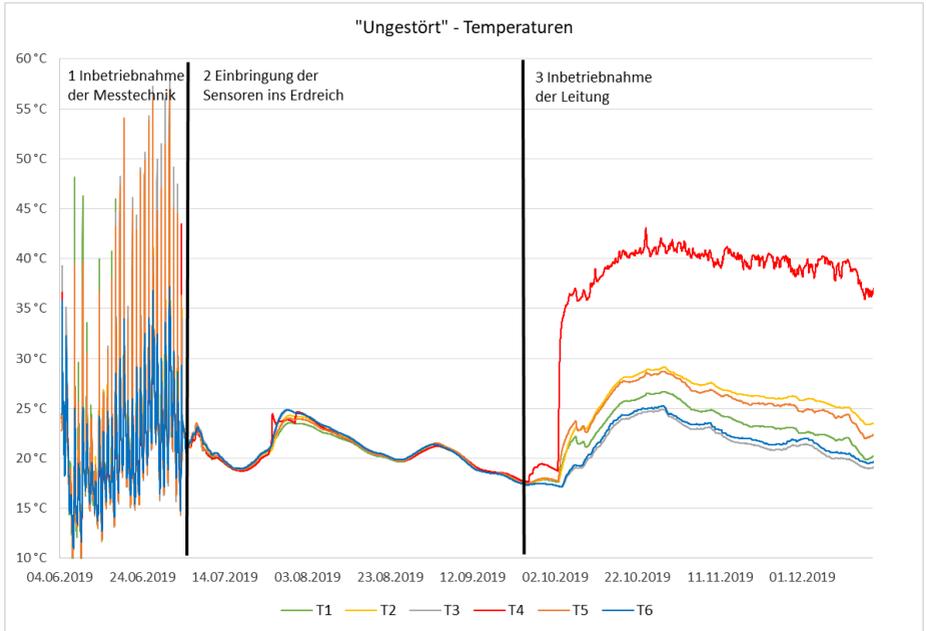


Abbildung 38: Set "Ungestört" – Temperaturen

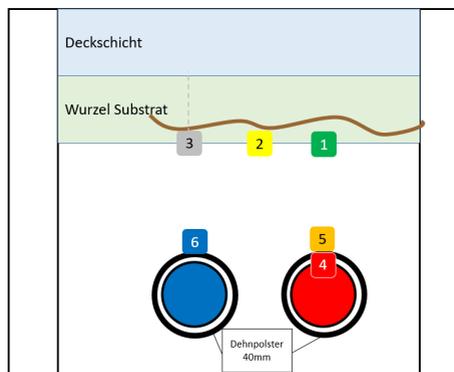


Abbildung 39: Querschnitt Set "Ungestört"

Dieser Effekt kann durch verschiedene Ursachen hervorgerufen werden. Möglich wären einerseits Messungenauigkeiten, welche die Abweichung zwischen den Sensoren hervorrufen. Diese sind allerdings vor der Leitungsinbetriebnahme nicht in dieser Größenordnung aufgetreten. Weitere Ursachen könnten diverse Inhomogenität im Erdreich sein, die einen sehr zielgerichteten erhöhten Wärmestrom der Leitung in Richtung des Sensors-T2 erzeugen. Ebenfalls möglich sind auch Einflüsse durch die Umgebungsbedingungen im oberen Bereich des Rohrleitungsgrabens. Neben möglicher Inhomogenität in der Überdeckung oder einem Einfluss durch die Wurzel, könnten auch Sonneneinstrahlung oder ähnliches zu einem lokalen Temperaturanstieg führen. In Abbildung 40 sind ergänzend zu den gemessenen Temperaturen im Set „Ungestört“ die gemessene Umgebungstemperatur und Temperaturdaten des Deutschen-Wetter-Dienstes (DWD) dargestellt. Tendenziell lassen sich im qualitativen Verlauf Ähnlichkeiten zwischen der Umgebungstemperatur und den Messwerten (Ausnahme T4 unter dem Dehnpolster) erkennen. Zum besseren Verständnis der Effekte sind vergleichende Auswertungen mit den anderen Sets vorgesehen, außerdem können einzelne Effekte anhand von FEM-Simulationsrechnungen überprüft werden.

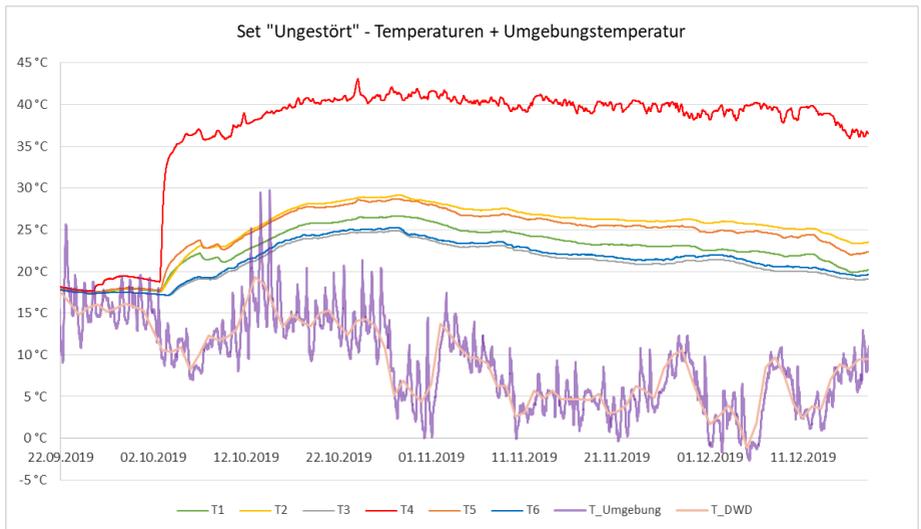


Abbildung 40: Set "Ungestört" Temperaturen inkl. Umgebungstemperatur

Baumkrone

Während der Projektlaufzeit zeichnete ein in einer Baumkrone angebrachter Bluetooth-Datenlogger die Umgebungstemperatur und die relative Feuchtigkeit am Standort der Messstelle auf. Für den Zeitraum von August 2019 bis Mitte Juni 2020 sind diese Daten in Abbildung 41 dargestellt. Der Abgleich zwischen Daten des DWD und den gemessenen Daten konnte vorerst

nur für die Temperaturen durchgeführt werden, da für die relative Feuchte keine direkt vergleichbaren Daten verfügbar sind. Wie im Vergleich zwischen den gemessenen und den vom DWD ermittelten Daten in Abbildung 40 zu sehen, erscheinen die eigenen, höher aufgelösten, gemessenen Temperaturdaten plausibel und können für weitere Auswertungen herangezogen werden.

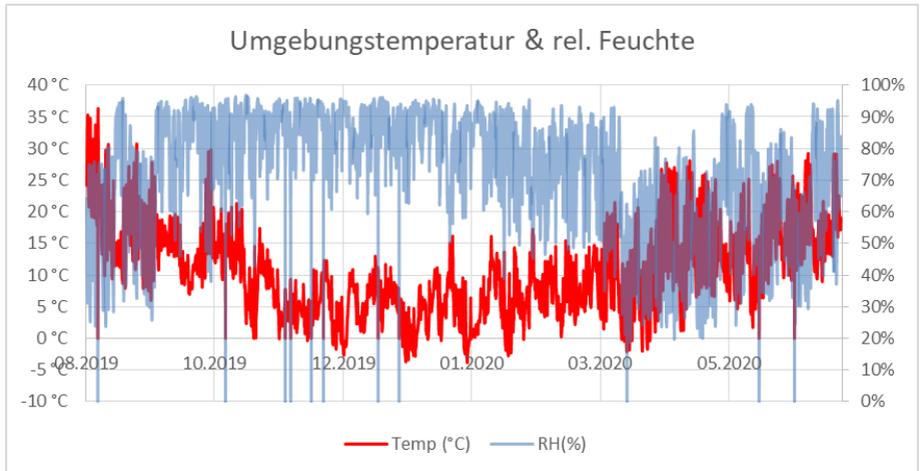


Abbildung 41: Umgebungsbedingungen am Standort der Messstelle

Set Graben

Die Messwerte des Sets „Graben“ liefen zu Beginn auf und entsprechen ungefähr dem bekannten Muster der noch nicht verlegten Sensoren im Set „Ungestört“. Während der Statusüberprüfung nach der Positionierung konnten auch keine Unstimmigkeiten festgestellt werden. Erst bei der ersten geplanten Auswertung der Messdaten wurde ersichtlich, dass es an dieser Messstelle massive Probleme bei der Datenerfassung gab. Gemeinsam mit dem Hersteller und dem Messtechniker wurde der Datenlogger eingeschickt und auf Funktionsfehler überprüft. Es konnten allerdings keine Auffälligkeiten nachgewiesen werden, weshalb die Fehlerursache bei den erdverlegten Sensoren liegen muss. Nachdem der Datenlogger wieder zur Verfügung stand wurde dieser, zusammen mit zwei zusätzlichen installiert. Anschließend wurden die Messsensoren auf mehrere Datenlogger aufgeteilt. Nach zwei bis drei Wochen ist der Fehler erneut aufgetreten und durch die Anpassung der Belegung konnten die defekten Sensoren eingegrenzt werden. Bis zum Projektende konnten zwei defekte Sensoren identifiziert werden, ein weiteres Erfassen der Messwerte wird angestrebt. In Abbildung 42 sind die Sensoren inklusive der großen Datenlücke dargestellt.

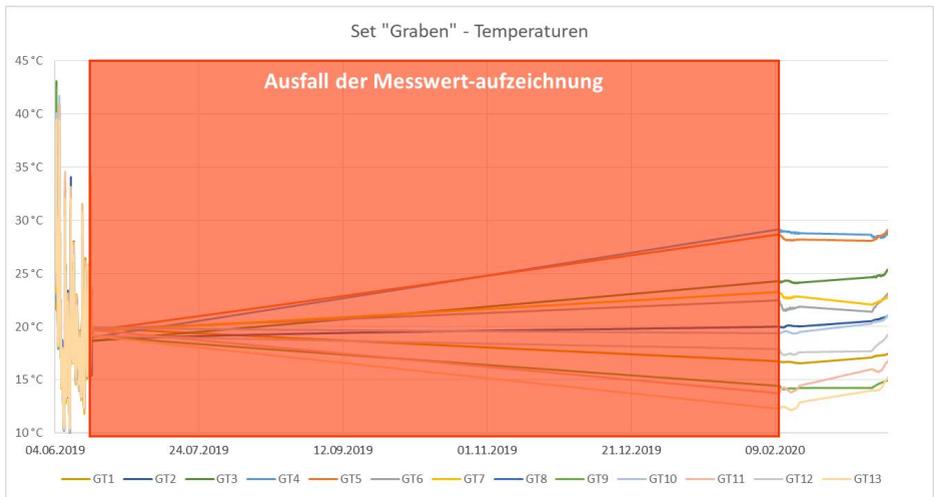


Abbildung 42: Set "Graben" – Temperaturen (Ausfallzeitraum linear interpoliert zwischen letztem verfügbarem und nächstem gemessenen Wert)

Set Baum

Die Sensoren des Sets „Baum“ konnten erst nach weitestgehendem Abschluss der Oberflächenarbeiten im Grünstreifen positioniert werden. Die von November 2019 an auflaufenden Daten wurden erstmalig im Januar 2020 ausgelesen, dabei konnten diverse Ausfälle der Messwerterfassung festgestellt werden. Bis zum Projektende dauert die Fehlersuche, in Abstimmung mit dem Hersteller und Messtechniker, noch an. Als Ursache für die Messwertausfälle ist eine nicht nachvollziehbare Entladegeschwindigkeit der Batterien in den Datenloggern (\approx ein Monat anstatt sechs Monate) identifiziert worden. In Abbildung 43 sind die verfügbaren Temperaturdaten für das erste Halbjahr 2020 dargestellt und die linear interpolierten Zeiträume des Datenausfalls markiert. In Abbildung 44 ist die Anordnung der Messpunkte am Set „Baum“ skizziert.

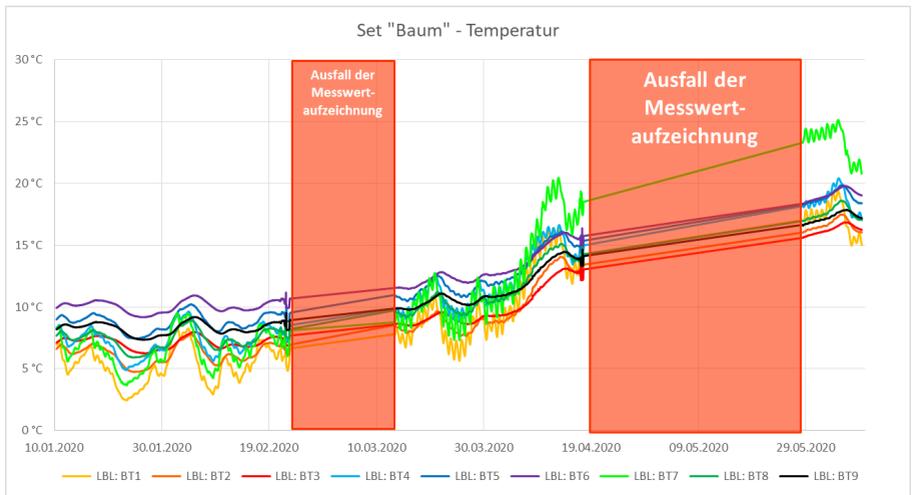


Abbildung 43: Set "Baum" Temperaturen Datenlücken (Ausfallzeitraum linear interpoliert zwischen letztem verfügbaren und nächstem gemessenen Wert)

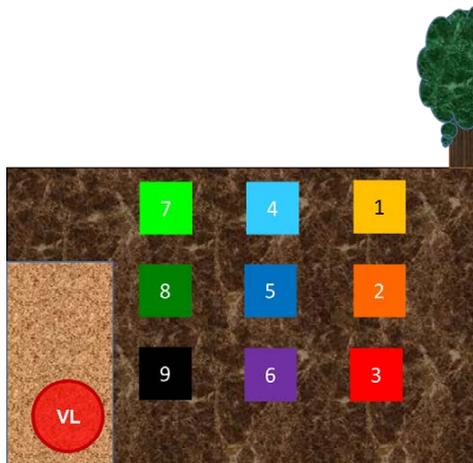


Abbildung 44: Anordnung Messpunkte Set "Baum"

3.6.3 Ergebnisse und weitere Schritte

Aufgrund der, im Kontext des Forschungsvorhabens, langen Zeit von Planung der Messstrecke zur Inbetriebnahme und der aufgetretenen Fehler bei der Messwertaufzeichnung sind nur für das Set „Ungestört“ ausreichende Datenmengen für eine erste Analyse verfügbar. Aufgrund

der lokalen Anpassungen (Armaturen und Dehnpolster im Messquerschnitt) stellt dieses Messset ein sehr individuelles Szenario dar, welches ohne den Bezug zu weiteren Datenpunkten (Manteltemperatur am Rohr ohne Dehnpolster) nicht eindeutig auszuwerten ist. Die verfügbaren Messwerte deuten allerdings darauf hin, dass die Umgebungsbedingungen einen relevanten Einfluss auf die Temperaturen im Erdreich haben können und eventuell auch Sonneneinstrahlung und Verschattung bei der Simulation zu berücksichtigen sind.

Ausgehend von diesen Informationen wurde Kontakt zur TU Dresden und dem dort ansässigen „Institut für Bauklimatik“ aufgenommen. Aus der Bautechnik kommend, wird sich hier seit Jahren intensiv mit der Simulation von Wärmeausbreitung in „Baumaterialien/ Werkstoffen“ beschäftigt. In letzter Zeit häufen sich hier auch Anfragen zur Simulation von Erdsondenfeldern und Effekte durch Sonneneinstrahlung, weshalb auch hier eine umfassende Expertise vorhanden ist. Für derartige Simulationen sind variable Bodenkennwerte, Verschattungen und Klimadaten zu berücksichtigen, die bisher nicht in die Simulation (vgl. Kapitel 3.3) der Fernwärmetrasse eingeflossen sind. Ausgehend von der Erfahrung am Institut für Bauklimatik sind die verfügbaren Daten der Messstelle allerdings nicht ausreichend, um ein valides Modell zu erzeugen. Selbst bei fehlerfreier Messwernerfassung werden üblicherweise Daten über mehr als ein Jahr benötigt, um grobe zeitabhängige Effekte bei der Ausbreitung von Temperaturen im Erdreich zu berücksichtigen. Um dennoch ein ordentliches Modell aufzubauen, welches den Abgleich mit Messwerten zulässt und die Untersuchung weiterer Randbedingungen ermöglicht, wurde erneut auf die Messstrecke aus dem AGFW Forschungsvorhaben TGdA zurückgegriffen. Viele der Informationen waren dabei schon für die erste FEM Berechnung aufbereitet worden und standen direkt zur Verfügung. Da die Aufzeichnung der Messwerte an dieser Fernwärmetrasse auch weiterhin andauerte, standen hier zwischenzeitlich Messwerte von rund 1,5 Jahren zur Verfügung. Da bei der Errichtung dieser Messstelle an der FW-Trasse im Realbetrieb des TGdA Projektes auch die Erfahrungen aus dem Projekt „FW-Vegetation“ eingeflossen sind, stehen auch umfassende Temperaturdaten zur Verfügung. Aufgrund der abweichenden Fragestellungen sind dort allerdings keine Feuchte-Sensoren vorhanden.

3.7 FEM Berechnung von Wärmefeldern - Teil 2

Unter dem Arbeitstitel „Simulation von unterirdischen Fernwärmeleitungen mit DELPHIN6“ erstellten die Experten der TU Dresden ein Simulationsmodell der Fernwärmetrasse. Auf Grundlage der bisherigen Erkenntnisse und in Abstimmung mit dem zuständigen Fernwärmeversorgungsunternehmen konnten wichtige Details ergänzt werden, welche die realen Gegebenheiten möglichst detailliert abbilden. Weitere Informationen zur Modellierung, Annahmen und gewählten Parameter, sowie weiterführende Ergebnisse sind in Anlage 3 zu finden.

Nachdem durch verschiedenen Iterationsschleifen die Simulationsergebnisse immer besser zu den gemessenen Temperaturen im Erdreich passten, wurden vier Varianten gerechnet,

deren Unterscheidungsmerkmale in Tabelle 9 dargestellt sind. Als Input für die Wetterdaten wurden gemessene Daten des DWD an einer nahen Messstation vorgegeben. Da die exakte Vorlauftemperatur des Heizwassers im Inneren der Leitung nicht gemessen werden kann, dienen die gemessenen Temperaturen an der Manteloberfläche als Eingangsgröße.

Tabelle 9: Varianten des FEM Rechenmodells

	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Feuchtegehalt Erdreich	30 %	30 %	10%	30 %
Abminderung Verschattung	0 %	0 %	0 %	70 %
Wärmeleitfähigkeit Erdreich	$\lambda = 2,33$ W/mK	In Abhängigkeit der Anfangsfeuchte		

Als wichtiges Teilergebnis zeigte sich, neben den bereits aus Abschnitt 3.3 bekannten Einflüssen, in diesen Simulationen ein besonders großer Einfluss bei der Variation der kurzweiligen Strahlung. Außerdem scheinen die erkennbaren Differenzen von den in situ gemessenen und den simulierten Temperaturen auf Einflüsse durch Wärmeentzug durch das Grundwasser zurückzuführen zu sein. Dies könnte gegebenenfalls auch die gemessenen Temperaturdifferenzen zwischen Rohrober- und Rohrunterkante erklären, was für zukünftige Berechnungen zu berücksichtigen ist. Wie Anlage 3 zu entnehmen ist, sind mit den verfügbaren Daten plausible Simulationen der Wärmeströme im Erdreich möglich und können so den Einfluss von Änderungen einzelner Parameter (beispielsweise durch Effekte des Klimawandels, oder neuer Betungs- oder Rohrleitungsmaterialien) auf die Wärmefelder im anstehenden Erdreich untersuchen. In Abbildung 45 bis Abbildung 48 sind beispielhaft die Temperaturfelder für den Sommerfall (Sommerwetter und niedrige Leitungstemperaturen) und für den Winterfall (Niedrige Umgebungstemperatur und hohe Leitungstemperatur) der Varianten 2 und 4 dargestellt. Es ist zu erkennen, wie sich die Temperaturfelder im Erdreich bis in eine Tiefe von rund 10-12 m ausbreiten. An den seitlichen Rändern des Simulationsgebietes klingen die Temperaturen mit zunehmender Tiefe früher ab, als unmittelbar unter der Fernwärmetrasse. Auch an der Erdoberfläche ist direkt über der Fernwärmetrasse eine leichte Temperaturüberhöhung zu erkennen. Insgesamt ist in den oberflächennahen Bodenschichten eine starke Abhängigkeit der Temperaturverteilung von den Umgebungsbedingungen zu sehen. Die unmittelbar an den Rohrleitungen auftretenden Temperaturspitzen (ca. 25-30°C) sind bereits nach wenigen Zentimetern wieder auf einem vergleichweisen niedrigen Niveau. Besonders deutlich ist dies in den beiden abgebildeten Winterfällen zu erkennen. Dort erstrecken sich unter der Fernwärmetrasse die Felder gleicher Temperatur ebenfalls weiter ins Erdreich hinein, allerdings treten

außerhalb des Rohrgrabens keine grundsätzlich höheren Temperaturen auf als in den Randgebieten. Für weiterführende Simulationen ist deshalb der mögliche Einfluss von Wurzeln auf die Ausbreitung der Temperaturfelder zu untersuchen, da gegenüber dem Erdreich abweichende Wärmeleitfähigkeiten auch den Wärmetransport beeinflussen. Darüber hinaus gewinnt die Frage an Bedeutung, ab welchen Grenztemperaturen das Wurzelwachstum doch beeinflusst oder gar verhindert wird. Sind diese Temperaturen bekannt, lassen sich verschiedene Voraussetzungen ableiten, die zum Auftreten dieser zu meidenden Temperaturbereich führen können (beispielsweise reduzierte Dämmeigenschaften, neue Bettungsmaterialien mit anderer Wärmeleitfähigkeit oder höheren Betriebstemperaturen). Die hierfür notwendigen Grenztemperaturen sind durch weitere Laborversuche zum Wurzelwachstum in Wärmefeldern mit unterschiedlichen Baumarten zu bestimmen.

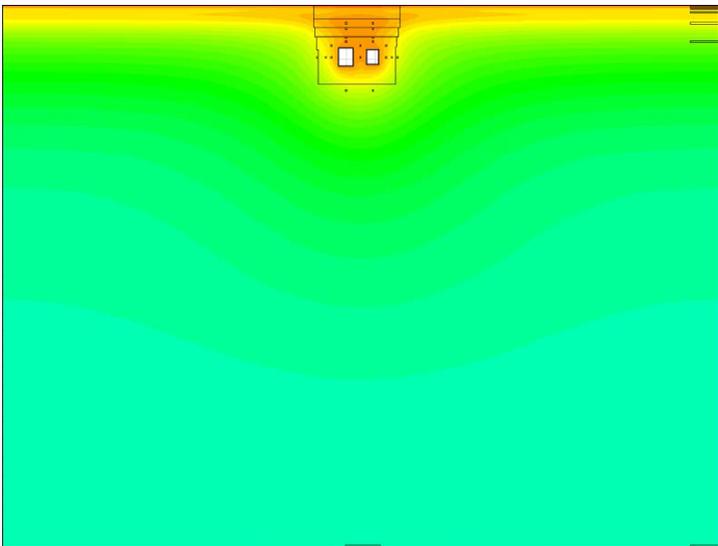


Abbildung 45: Temperaturfeld V2 (feuchtes Erdreich) im Sommer



Abbildung 46: Temperaturfeld V2 (feuchtes Erdreich) im Winter

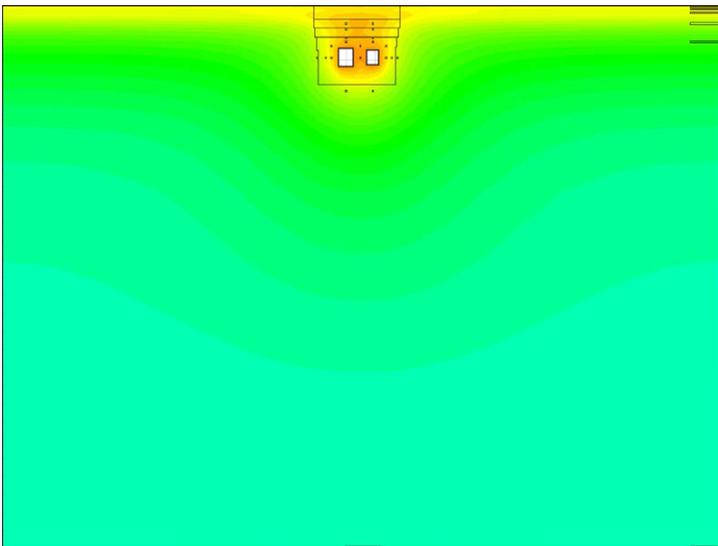


Abbildung 47: Temperaturfeld V4 (Schatten) im Sommer

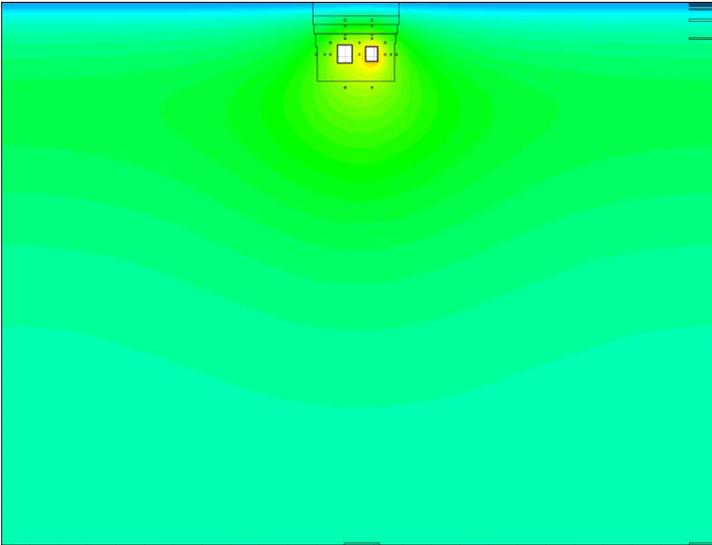


Abbildung 48: Temperaturfeld V4 (Schatten) im Winter

4 Versuchstechnische Untersuchungen

In Kapitel 1 wurden auf Basis einer Literaturrecherche und erster Praxiserfahrungen zur Interaktion von Wurzeln und Fernwärmeleitungen Hypothesen möglicher Wurzel-Fernwärmerohr-Interaktionen aufgestellt.

Durch erste praxisnahe Untersuchungen mit Pflanzen sollten einzelne Hypothesen untersucht werden. Ein Schwerpunkt der Untersuchungen lag darin zu prüfen, inwieweit die Wärmeabstrahlung von Fernwärmeleitungen das Wurzelwachstum beeinflussen kann. Hier lag der Untersuchungsschwerpunkt auf den Einflüssen auf die Wurzeln (vgl. Kapitel 4.1).

Weitere Untersuchungen legten den Blick auf den Einfluss von Wurzeln und Wurzelwachstum auf Fernwärmeleitungen (vgl. Kapitel 4.2 und 4.3). Es wurde untersucht, ob Wurzeln an KMR die Muffen oder den PE-Außenmantel beschädigen können.

Abschließend wurden in einem Versuchsfeld in Osnabrück eingebaute Schutzmaßnahmen nach deutschem Regelwerk [7] hinsichtlich Ihrer Langzeiteigenschaften untersucht (vgl. Kapitel 4.4).

4.1 Wurzelwachstumsverhalten – Einfluss Fernwärme auf Wurzel

Um das Wachstumsverhalten von Wurzeln im Umfeld von Fernwärmeleitungen untersuchen zu können, wurden durch den Lehrstuhl für Evolution und Biodiversität der Pflanzen im botanischen Garten der Ruhr-Universität Bochum in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Untersuchungen zur Wärmeausbreitung von erdverlegten Fernwärmeleitungen und deren Auswirkungen auf das Wurzelwachstum durchgeführt. In diesem Zusammenhang wurden entsprechende Wärmefelder in mit Weidenstecklingen bepflanzten Versuchskisten durch Heizpatronen simuliert. Ziel war die Untersuchung des Einflusses von Wärmefeldern auf die Richtung und Ausbreitung des Wurzelwachstums. Mit diesen Versuchen sollten die Arbeitshypothesen untersucht werden, ob die Temperaturfelder von Fernwärmeleitungen im Baugrund das Wurzelwachstum fördern, hemmen oder darauf keinen Einfluss haben.

4.1.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die fünf Versuchskisten (A-E), bestanden aus Siebdruckplatten (2 cm Wandstärke), mit den Maßen 1.000 mm Länge, 800 mm Breite und 600 mm Höhe, waren mit Substrat befüllt und mit jeweils sechs Stecklingen (aufgeteilt in drei Reihen) bepflanzt worden. Als Substrat wurde Gartenerde verwendet, da die Wurzeln hier überdurchschnittlich gut in alle Richtungen wachsen konnten und der Einfluss des Substrats auf das Wurzelwachstum gering wie möglich gehalten wurde. Aufgrund des schnellen Wurzelaustriebs von Weiden wurden Weidenstecklinge eingesetzt, um innerhalb der 30-monatigen Laufzeit des Forschungsvorhabens ein möglichst ausgeprägtes Wurzelwachstum zu erhalten.

Es wurde ein möglichst hoher Temperaturgradient in den Versuchskisten erzeugt (blauer Punkt = Kaltwasserleitung, roter Punkt = Heizpatrone, vgl. Abbildung 49), um eventuelle Auswirkungen auf des Wurzelwachstum möglichst deutlich darstellen zu können. Das Versuchsdesign folgte somit dem Ansatz möglichst deutliche Effekte durch extreme Randbedingungen zu erzeugen. Ist kein Einfluss durch die extremen Parameter nachzuweisen, wird auch in-situ kein Einfluss erwartet.

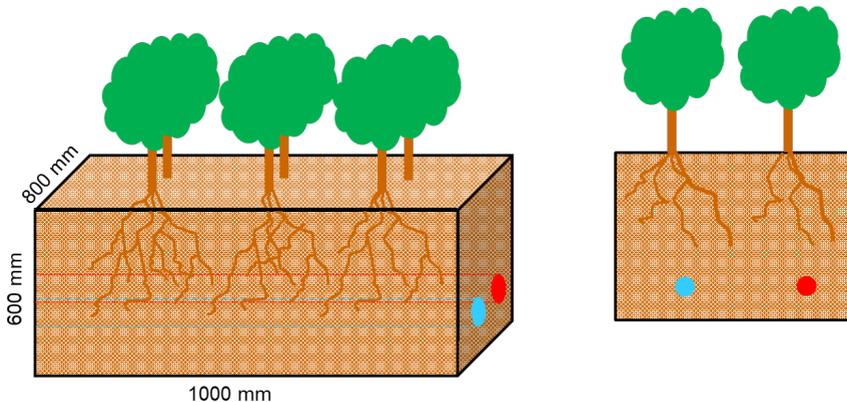


Abbildung 49 Versuchsaufbau zur Auswirkung von Wärmefeldern auf das Wurzelwachstum

Die Temperatur der Kaltwasserleitung betrug ca. 15° Celsius (entsprechend der durchschnittlichen Temperatur von Trinkwasser). Die Temperatur der Heizpatrone war auf ca. 35° Celsius eingestellt (entsprechend der Temperatureaufzeichnung an einer Forschungsmessstelle des AGFW, am Außenmantel eines im realen Betrieb befindlichen Kunststoffmantelrohres). Die Heizpatronen wurden elektrisch betrieben. Die Temperaturen der Heizpatronen wurden über eine Regelungsbox gesteuert. Dazu wurden Temperatursensoren an der Oberfläche der Heizpatronen befestigt. Die Temperatur der Heizpatronen war auf den Sollwert 35° Celsius getriggert. Eine Hysterese ergab sich über die Nachlaufzeiten der Wärmeverteilung an den Heizpatronen, wodurch die Mittelwerte der Heizpatronen über die Versuchslaufzeit bei Versuchskiste A zu 36,6°C, Versuchskiste B zu 36,3°C, Versuchskiste C zu 36,0°C, Versuchskiste D zu 36,1°C und Versuchskiste E zu 35,4°C berechnet wurden. Die Messwerte der Heizpatronen-Regelungsbox wurden aufgrund der hohen Datenmengen (Messung alle 15 Sekunden) und verfügbaren Speicherkapazität vereinzelt nicht vollständig erfasst. Da jedoch mit den Temperatursensoren in den Versuchskisten (vgl. Kapitel 4.1.2) ein konstanter Wärmezufluss und auch Heizpatronenausfälle definitiv nachgewiesen werden konnten, wurde während der Versuchslaufzeit darauf verzichtet, das ansonsten funktionierende Regelungs- und Messsystem

zu ändern, um den weiteren Versuchsablauf nicht zu stören. Die Berechnung der Heizpatronen-Temperaturmittelwerte im Normalbetrieb erfolgte auf Basis der erfassten Temperaturen der Regelungsbox von April 2018 bis Juli 2019. Messwerte nach Juli 2019 wurden nicht berücksichtigt, um Heizpatronenausfälle nicht in die Langzeitmittelwerte miteinfließen zu lassen (vgl. Kapitel 4.1.2). Aus diesem Grund wurden bei der Mittelwertberechnung für Versuchskiste D die Messwerte während des Heizpatronenausfalls im März 2019 ebenfalls nicht berücksichtigt.

Die Überdeckung der Heizpatrone und Kaltwasserleitung betrug 500 mm und der horizontale Abstand zwischen den Leitungen 360 mm. Die Versuchsaufbauten wurden im Außenbereich des botanischen Gartens der Ruhr-Universität Bochum platziert, wodurch eine professionelle Versorgung der Pflanzen gewährleistet war. Es wurden schattige Standorte gewählt, die den Einfluss der solaren Einstrahlung minimieren sollen.

Zur Messung der Temperaturen im Substrat sind je Versuchskiste sechs Temperatursensoren installiert (vgl. Abbildung 50) worden. Je Versuchskiste waren drei Temperatursensoren vertikal oberhalb der Heizpatrone mit den Abständen 60 mm (AT4, BT9, CT15, DT22, ET29), 120 mm (AT5, BT10, CT16, DT23, ET30) und 240 mm (AT6, BT11, CT17, DT24, ET31) angeordnet. Zwischen Heizpatrone und Kaltwasserleitung sind horizontal zwei weitere Temperatursensoren mit den Abständen 120 mm (AT3, BT7, CT14, DT21, ET28) und 240 mm (AT2, BT8, CT13, DT20, ET27) installiert worden. In Versuchskiste A und E wurde auf der Kaltwasserleitung zur Messung des Mediums der jeweils sechste Temperatursensor angeordnet (AT1, ET26). In den Versuchskisten B, C und D war der sechste Temperatursensor mit Abständen horizontal und vertikal zur Heizpatrone von 120 mm (BT12, CT18, DT25) eingesetzt. Die horizontale und vertikale Grundausrichtung der Temperatursensoren zur Heizpatrone wurde gewählt, um Temperaturen im Substrat zu messen und den Temperaturgradienten zwischen Kaltwasserleitung und Heizpatrone abschätzen zu können.

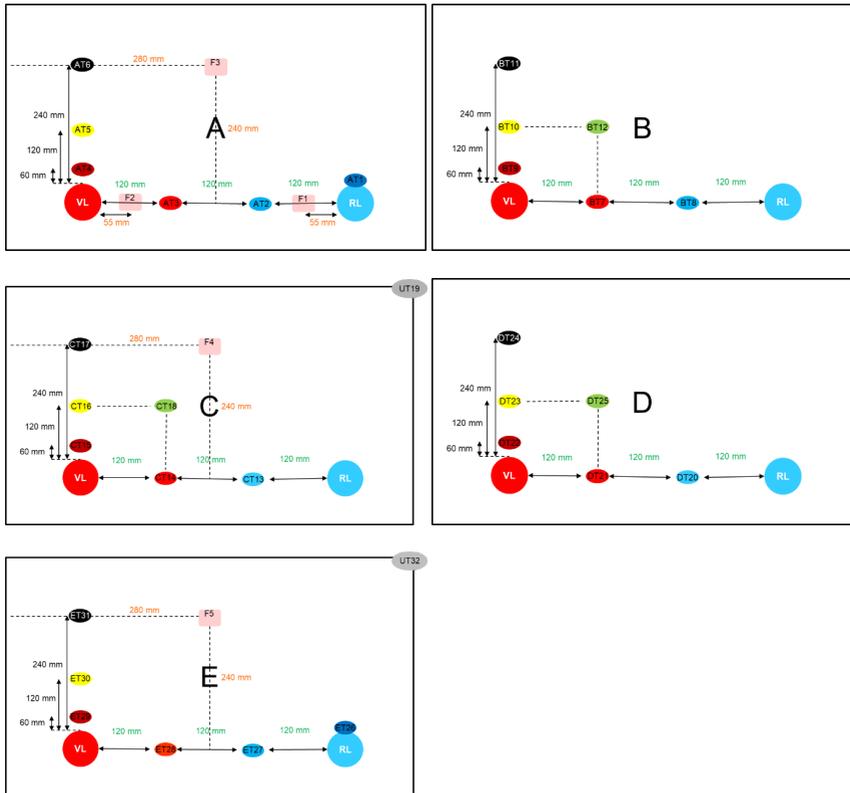


Abbildung 50: Anordnung der Messsensoren in den Versuchskisten A (links oben), B (rechts oben), C (links mittig), D (rechts mittig) und E (links unten)

Um den Einfluss der Umgebungstemperatur ermitteln zu können, wurden an den Versuchskisten C und E jeweils ein Außentemperatursensor (UT19, UT32) installiert. Zusätzlich wurde zur Temperatursteuerung der Heizpatronen an jeder Heizpatrone ein weiterer Temperatursensor installiert.

Zur Ermittlung des Wassergehaltes im Substrat wurden insgesamt fünf Feuchtesensoren in den Versuchskisten A (F1, F2, F3), C (F4) und E (F5) installiert. Der Sensor F1 war 120 mm horizontal rechts neben der Heizpatrone und der Sensor F2 120 mm horizontal links neben der Kaltwasserleitung angeordnet. Die Sensoren F3, F4 und F5 sind mittig zwischen den Leitungen in einer Höhe von 240 mm installiert worden. Die Messungen gaben u.a. Hinweise auf die Bewässerung der Weidenstecklinge.

Die Versuche wurden im April 2018 gestartet. Die Weidenstecklinge entwickelten sich schnell und somit konnte bspw. im August 2018 im Großteil der Versuchskisten ein ausgeprägtes Wachstum der Weidenstecklinge festgestellt werden (vgl. Abbildung 51, links). Jedoch war festzuhalten, dass insbesondere im zur Hauswand gewandten Bereich das Wuchsverhalten geringer ausfiel als in den von der Hauswand abgewandten Bereichen der Versuchskiste (vgl. Abbildung 51, rechts).



Abbildung 51: Wuchsverhalten der Weidenstecklinge (links) und Wachstumsverhalten zur Hauswand (rechts) im Juli 2018

Daher erfolgte eine Versetzung der Versuchskisten zu Beginn der Wachstumsperiode 2019 mit einem größeren Abstand zur Hauswand. Zum Ende der Wachstumsperiode 2019 wurde ein für die Versuchsauswertung ausreichend ausgeprägtes Pflanzenwachstum in allen Versuchskisten identifiziert (vgl. Abbildung 52, links). Dabei wurden zwar Unterschiede in den Versuchskisten bzgl. der Wachstumsgröße der Weidenstecklinge festgestellt (vgl. Abbildung 52, mittig und rechts), jedoch in einem Maße, dass für die Versuchsergebnisse ein ausreichendes Wurzelwachstum in allen Versuchskisten zu erwarten war.



Abbildung 52: Versuchskisten v.l.n.r. A bis E (links), seitlicher Blick auf Versuchskiste E (mittig) und seitlicher Blick auf Versuchskiste A (rechts) zum Ende der Versuchslaufzeit im Juli 2019

4.1.2 Temperatur- und Feuchtemessungen

Zum Auslesen der Messdaten wurde die Freeware HOBOWare als Software genutzt. Die Messdaten wurden in Microsoft Excel konvertiert und ausgewertet. Die Messintervalle betragen 15 Minuten. Die Temperaturverläufe der Versuchskisten zeigten, dass der Temperaturgradient zwischen den Temperatursensoren über die Versuchslaufzeit stabil gehalten werden konnte. Die in den Versuchskisten gemessenen Temperaturverläufe sind beispielhaft an Versuchskiste B (Versuchslaufzeit von April 2018 bis Juli 2019) in Abbildung 53 dargestellt. Die Temperaturverläufe der weiteren Versuchskisten sind Anlage 4 zu entnehmen.

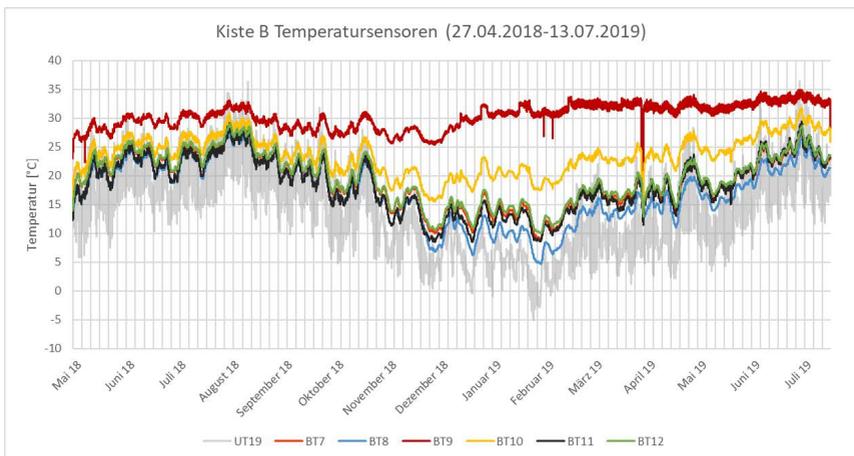
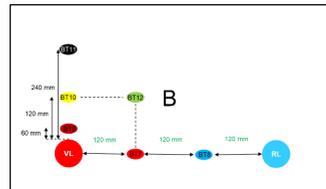


Abbildung 53: Temperaturverlauf vom 27.04.2018 bis zum 13.07.2019, hier beispielhaft an Versuchskiste B (Anordnung der Temperatursensoren rechts oben oder vgl. Abbildung 50 (rechts oben))

Die Außentemperatur (graue Linie) hatte einen Einfluss auf die Temperatur in den Versuchskisten. Je näher die Temperatursensoren an der Heizpatrone gelagert wurden, desto geringer wurde der Außentemperatureinfluss und desto größer war der Einfluss der Heizpatrone auf den Messwert. Die Messwerte zeigten, dass in horizontaler und vertikaler Richtung ein relativ gleichmäßiger Temperaturgradient erzeugt wurde. Der über die Versuchslaufzeit größer wer-

dende Temperatureinfluss auf die vertikal über der Heizpatrone angeordneten Temperatursensoren ist vermutlich mit der Setzung der Messsensoren über die Zeit zu erklären. Um dies bildlich zu verdeutlichen, sind in Abbildung 54 nur die Messdaten der Versuchssensoren im horizontalen und vertikalen Abstand von jeweils 120 und 240 mm (BT7, BT8, BT10 und BT11) dargestellt.

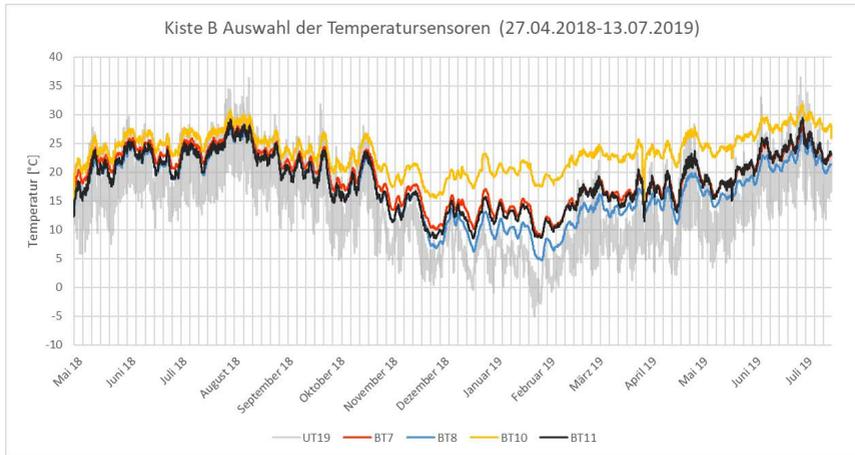


Abbildung 54: Temperaturverläufe der horizontalen und vertikalen Temperatursensoren im jeweiligen Abstand von 120 und 240 mm von der Heizpatrone, hier beispielhaft an Versuchskiste B (Anordnung der Temperatursensoren vgl. Abbildung 50 (rechts oben))

Zu Beginn der Messungen waren die Messwerte relativ identisch, mit fortschreitender Versuchslaufzeit wurde der Temperatureinfluss insbesondere auf den Temperatursensor BT10 (gelb), der zu Beginn 120 mm vertikal über der Heizpatrone angeordnet war, durch die Heizpatrone immer größer. Der Einfluss der Umgebungstemperatur nahm zeitgleich ab. Bei Öffnung der Versuchskisten wurde beim Temperatursensor BT10 ein Abstand von 45 mm gemessen, was eine Setzung von 75 mm bedeutet. Die gemessenen Setzungen der Temperatursensoren sind beispielhaft an Versuchskiste B in Abbildung 55 dargestellt.

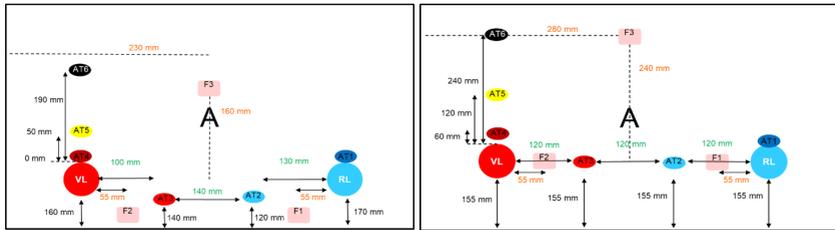


Abbildung 55: Abmessungen der Temperatursensoren zum Ende der Versuche im September 2019 (links) und zu Beginn der Versuche April 2018 (rechts)

In Versuchskiste A und E wurden zusätzlich die Temperaturen direkt an der Kaltwasserleitung (auch Rücklaufleitung) gemessen und verglichen. Wie in Abbildung 56 dargestellt, war die Außentemperatur ein maßgeblicher Faktor für die Temperatur an der Kaltwasserleitung. In den Wintermonaten wurde das Trinkwasser abgestellt, sodass dort ein Temperaturabfall erkennbar war. Dies zeigte, dass das Trinkwasser insbesondere in den Monaten, in der die Trinkwassertemperatur wärmer war als die Umgebungstemperatur, einen Einfluss auf die Versuchskiste hatte. Denn sobald das Trinkwasser nach dem Winter wieder angestellt wurde, stiegen die Temperaturmesswerte. Zudem war abwechselnd die Zu- und Ablauftemperatur höher. Nach stichprobenartiger Kontrolle der Messwerte wurde beobachtet, dass vermutlich die Sonneneinstrahlung auf die jeweilige Versuchskiste maßgeblich war, je nachdem, ob Versuchskiste A oder Versuchskiste E durch Sonneneinstrahlung beeinflusst wurde. Es war erkennbar, dass nur vereinzelt die gemessenen Temperaturen der Kaltwasserleitung über 20° Celsius erreichten. Somit konnte ein ausreichender Temperaturgradient in den Versuchskisten erzeugt werden. Die Auswertungen zeigten, dass eine Kombination aus Trinkwassertemperatur, Umgebungstemperatur und Sonnenstrahlung die maßgeblichen Einflüsse auf die Temperatur der Kaltwasserleitung waren.

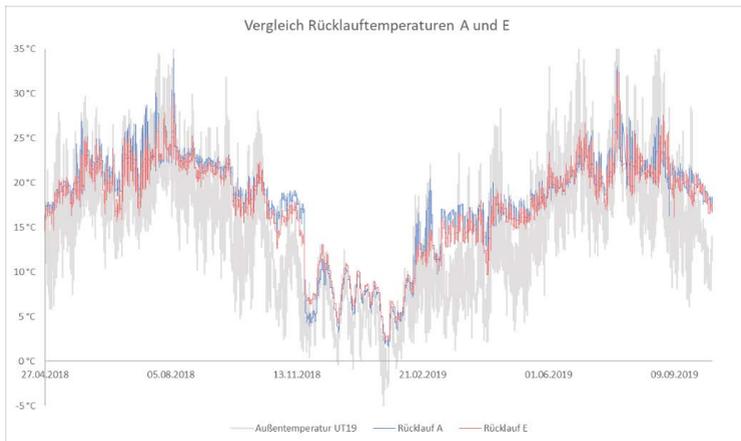


Abbildung 56: *Temperaturmessungen an Zulauf (Versuchskisten A (blauer Graph)) und Ab-
lauf der Kaltwasserleitung bzw. „Rücklaufleitung“ (Versuchskiste E (roter
Graph))*

Der Temperatursensor CT14 war bereits seit der ersten Wachstumsperiode defekt. Bei den Temperatursensoren AT3 und BT9 wurden über die gesamte Versuchslaufzeit einzelne Messausfälle festzustellen. Die weiteren Sensoren waren bis Juli 2019 funktionsfähig. Ab Juli 2019 gab es weitere vereinzelte Messausfälle der Temperatursensoren DT20 und ET30.

In Versuchskiste D war aufgrund eines elektrischen Kurzschlusses die Heizpatrone am 06. Februar 2019 ausgefallen. Als der Defekt erkannt wurde, wurde er unmittelbar am 26.03.2020 behoben, wodurch die Versuche wie geplant in der zweiten Wachstumsperiode weiter durchgeführt wurden.

Ab Juli 2019 kam es zu weiteren Defekten und Ausfällen an den Heizpatronen, wodurch zeitweise alle Heizpatronen abgestellt waren, da der FI-Schalter im Stromsicherungskasten ausgelöst wurde. Eine schnelle Fehleranalyse und -behebung wurde dadurch erschwert, dass an einer Versuchskiste ein Wespennest vorgefunden wurde und dadurch Fehleranalysen und Reparaturarbeiten vor Ort nur sehr eingeschränkt möglich waren. Als Fehler wurde die Heizpatrone der Versuchskiste B identifiziert. Die Heizpatrone in Versuchskiste B konnte nicht repariert werden. Aus diesem Grund wurde der Versuch in Versuchskiste B im Juli 2019 beendet und im September 2019 ausgewertet. Zudem wurde ein defektes Relais in der Regelungsbox festgestellt und ausgetauscht. Der Austausch des Relais erfolgte im IKT, wodurch alle Heizpatronen für wenige Tage erneut abgeschaltet waren. Zusätzlich fiel Anfang August 2019 in Versuchskiste D der Temperatursensor zur Regelung der Heizpatrone aus. Der Temperatur-

sensor wurde kurzfristig ausgetauscht. Jedoch kam es anschließend zu weiteren Regelungsausfällen der Heizpatronen, wodurch sich die Heizpatronen kurzfristig auf ca. 90°Celsius aufheizten und der FI-Schalter erneut ausgelöst wurde. Durch weitere Reparaturarbeiten konnten diese Fehler nicht behoben werden. Da sich die Defekte nach bald 18 Monaten Versuchslaufzeit unter Außenwetterbedingungen häuften und die Wachstumsperiode fast abgeschlossen war, wurden die Versuche Anfang September 2019 beendet und im November 2019 ausgewertet.

Im Nachgang konnte als Haupt-Defekt ein Feuchtigkeitseintritt in die Heizpatronen der Versuchskisten B und D identifiziert werden, wodurch es zu Kurzschlüssen im System kam. Für die Planung von möglichen zukünftigen Versuchen werden Heizpatronen mit weniger Leistung, Schutzrohre um die Heizpatronen (Schutz gegen Feuchtigkeit und besserer Austausch von defekten Heizpatronen und Temperatursensoren), ein Fail-Safe-Modus in der Regelungsbox sowie eine Datenfernüberwachung empfohlen.

Insgesamt wurden fünf Feuchtmesssensoren in die Versuchskisten eingebaut. Drei in Versuchskiste A (AF1, AF2 und AF3) und jeweils ein Sensor in Versuchskiste C (CF4) und E (EF5). Der Feuchtsensor AF1 in Versuchskiste A war im März 2019 nach 11 Monaten und der Feuchtesensor EF5 in Versuchskiste E im Februar 2019 nach 10 Monaten Versuchslaufzeit ausgefallen. Eine allgemeingültige Aussage über den Einfluss der Heizpatronenwärme auf die Bodenfeuchtigkeit und somit den Wärmegradienten konnte somit nicht getroffen werden.

Durch die Auswertung der Feuchtemessungen in Versuchskiste A (vgl. Abbildung 57) konnte festgestellt werden, dass in der ersten Wachstumsperiode eine geringe Bewässerung stattgefunden hatte. In der zweiten Wachstumsperiode wurde die Versuchskiste ausgiebiger bewässert. Auffällig war der Unterschied zwischen den Feuchtemessungen oberflächennah (AF3) und horizontal neben der Heizpatrone (AF2) in der ersten Wachstumsperiode mit wenig Bewässerung. Ggf. war dort eine Austrocknung des Bodens durch die höhere Wärme verantwortlich. In der zweiten Wachstumsperiode war, ggf. aufgrund der ausreichenden Bewässerung und somit der Gewährleistung von ausreichender Feuchte in der gesamten Versuchskiste, kein signifikanter Unterschied mehr zwischen den Feuchtemessungen AF2 und AF3 feststellbar. Auch nach Abschaltung der Heizpatronen im August 2019 konnte keine Veränderung der Feuchtigkeit in der Versuchskiste nachgewiesen werden. Der erkennbare Peak im Juni 2019 war vermutlich auf eine sehr starke Bewässerung zurückzuführen. Ein allgemeiner Einfluss von Feuchtigkeitsunterschieden auf den Temperaturgradienten konnte nicht ausgeschlossen werden und sollte in zukünftigen Forschungsvorhaben untersucht werden.

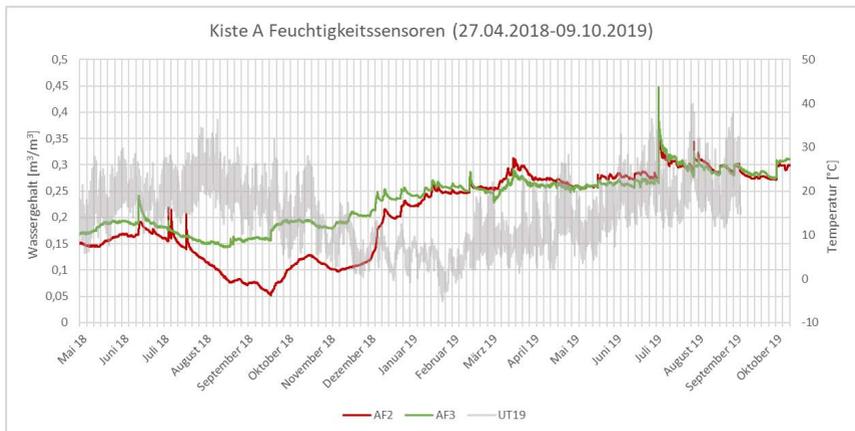


Abbildung 57: Feuchtemessungen beispielhaft an Versuchskiste A dargestellt (Anordnung der Temperatursensoren vgl. Abbildung 50 (links oben))

4.1.3 Versuchsergebnisse

Nach einer Standzeit von April 2018 bis November 2019 (Versuchskiste B lediglich bis August 2019) sowie einem erzeugten Temperaturgradienten in den Versuchskisten von April 2018 bis August 2019 (Versuchskiste B lediglich bis Juli 2019) wurde bei allen Versuchskisten ein ausgeprägtes Wurzelwachstum bis unter die Leitungszone festgestellt. Zur Versuchsauswertung wurde eine Siebdruckplatte vor Kopf geöffnet und nach und nach jede Pflanzreihe händisch mit Schaufeln und Harken freigelegt. Dies erfolgte mit großer Vorsicht, um die Wurzelwachstumsrichtungen nicht zu verändern und mögliche Setzungen der Temperatur- und Feuchtesensoren messen zu können.

Nach Auswertung aller Pflanzreihen wurde kein Einfluss durch den Wärmegradienten auf die Wurzelwachstumsrichtung festgestellt. Bei neun von 15 Pflanzreihen wurde ein rein vertikales Wachstum über die Leitungszone hinaus bis zur Versuchskistensohle identifiziert (vgl. Abbildung 58, links). An der Versuchskistensohle stellte sich anschließend ein horizontales Wurzelwachstum ein (vgl. Abbildung 58, rechts). An vier Pflanzreihen wurde zusätzlich zum vertikalen Wurzelwachstum eine Wachstumstendenz von der warmen zur kalten Leitung festgestellt. Eine Wachstumstendenz von der kalten zur warmen Leitung konnte, neben dem vertikalen Wachstum, an einer Pflanzreihe festgestellt werden. In einer Reihe wurde ein überkreuzendes Wurzelwachstum von warmer zur kalten und von kalter zur warmen Leitung festgestellt (vgl. Anlage 4).



Abbildung 58: Vertikales Wachstum bis zur Versuchskistensohle auf Seite der Heizpatrone (rote Einkreisung) und auf Seite der Kaltwasserleitung (blaue Einkreisung) (links) und horizontales Wurzelwachstum an der Versuchskistensohle (rechts) beispielhaft dargestellt an Versuchskiste C - Reihe 2

In Versuchskiste D wurde ebenfalls in allen drei Reihen ein vertikales Wurzelwachstum festgestellt. Jedoch wurde in Reihe 2 zusätzlich ein horizontales Wurzelwachstum von der warmen zur kalten Seite identifiziert. An der kalten Seite wuchsen diese Wurzeln zusammen mit den Wurzeln des Stecklings der kalten Seite vertikal bis zur Versuchskistensohle nach unten (vgl. Abbildung 59, links). In Reihe 3 der Versuchskiste D erfolgte das eben beschriebene Wurzelwachstum genau spiegelverkehrt, d.h., dass die Wurzeln horizontal von der kalten zur warmen Versuchskistenseite wuchsen und dort dann ebenfalls zusammen vertikal bis zur Versuchskistensohle weiterwuchsen (vgl. Abbildung 59, rechts).



Abbildung 59: Versuchskiste D: Horizontales Wurzelwachstum von warmer zur kalten Seite in Reihe 2 (links) und kalter zur warmen Seite in Reihe 3 (rechts)

Diese Beobachtungen würden bei einzelner Betrachtung vermuten lassen, dass ggf. ein Einfluss auf die Wurzelwuchsrichtung vorlag. Jedoch sind diese Ergebnisse in der gleichen Versuchskiste nur wenige Zentimeter voneinander entfernt festgestellt worden. Daher konnte der Einfluss des Wärmegradienten auf die Wuchsrichtung in diesen Fällen weitestgehend ausgeschlossen werden. Diese Aussage bekräftigte die Auswertung von Versuchskiste C, Reihe 1. Hier zeigte sich ein horizontales Wurzelwachstum von der kalten zur warmen **und** von der warmen zur kalten Seite in einer Reihe (vgl. Abbildung 60).



Abbildung 60: Wurzelwachstum von der warmen zur kalten Seite (rote Pfeile) und von der kalten zur warmen Seite (blauer Pfeil) in Versuchskiste C, Reihe 1

Nur in Versuchskiste E wurde in den Reihen 1 und 2 der Großteil des Wurzelgeflechts auf der kalten Seite identifiziert (vgl. Abbildung 61). Die Wurzeln der warmen Seite wuchsen zur kalten Seite, ein vertikales Wurzelwachstum auf der warmen Seite war nur gering ausgeprägt.



Abbildung 61: Wurzelwachstum von der warmen zur kalten Seite (roter Pfeil), Versuchskiste E Reihe 1 (links) und Reihe 2 (rechts)

Zudem wuchsen Wurzeln der Reihe 1 auf der kalten Seite relativ nah an der Oberfläche bis zur Reihe 3 (vgl. Abbildung 62). Auch in Versuchskiste E war vermutlich nicht der erzeugte Wärmegradient für das Wurzelwachstumsverhalten verantwortlich. Eine näherliegende Antwort war, dass Versuchskiste E vor und nach dem Versetzen der Versuchskisten mit der warmen Seite immer außen angeordnet war. Dadurch ließ sich vermuten, dass in diesem Bereich durch Sonneneinstrahlung weniger Feuchtigkeit vorhanden war als im kalten Bereich der Versuchskiste E. Dies könnte zu dem vermehrten Wurzelwachstum in der kalten Seite geführt haben.



Abbildung 62: Wurzelwachstum oberflächennah auf der kalten Seite von Reihe 1 bis zur Reihe 3 in Versuchskiste E (blauer Pfeil)

Als Ergebnis blieb festzuhalten, dass trotz des steilen Temperaturgradienten mit durchschnittlich ca. 36 °Celsius an der Heizpatrone und bis zu 20 Kelvin über der Kaltwasserleitung, ein Einfluss durch den Wärmeeintrag auf das Wurzelwachstum nicht festzustellen war. Tabelle 10

zeigt eine Übersicht über das Wachstumsverhalten der Weidenstecklinge in den Versuchskisten und die dazugehörigen Pflanzreihen.

Tabelle 10: Übersicht Wärmeversuche

Kiste	Reihe	Wurzelwachstum
A	1	Vertikal
A	2	Vertikal
A	3	Vertikal und Tendenz zur kalten Seite
B	1	Vertikal
B	2	Vertikal
B	3	Vertikal
C	1	Überkreuzend
C	2	Vertikal
C	3	Vertikal
D	1	Vertikal
D	2	Vertikal und Tendenz zur kalten Seite
D	3	Vertikal und Tendenz zur warmen Seite
E	1	Vertikal und Tendenz zur kalten Seite
E	2	Vertikal und Tendenz zur kalten Seite
E	3	Vertikal

4.2 Outside-In-Versuche – Einfluss Wurzel auf Fernwärmeleitung

In den Outside-In-Versuchen wurde der Einfluss von Wurzeln auf KMR-Muffenverbindungen bei Kunststoffmantelrohren untersucht. Die Probekörper wurden durch den Lehrstuhl für Evolution und Biodiversität der Pflanzen der Ruhr-Universität Bochum erstellt und am botanischen Garten über die gesamte Versuchslaufzeit gepflegt. Ziel der Untersuchungen war es zu klären, ob ein Einwuchs von Wurzeln in KMR-Muffenverbindungen erfolgen kann.

4.2.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Insgesamt wurden zwölf Probekörper mit KMR-Muffenverbindungen hergestellt und mit einem trapezförmigen Substratbehälter umhüllt. Nach Fertigstellung wurden diese vertikal aufgestellt und der Substratbehälter mit Oberboden aufgefüllt sowie mit Weidenstecklingen bepflanzt. Aufgrund der trapezförmigen Form und des geringen Volumens des Substratbehälters sowie der vertikalen Ausrichtung der Probekörper wurde ein Wurzelwachstum gezielt auf die KMR-Muffenverbindungen provoziert. Der Versuchsaufbau ist der folgenden Abbildung 63 zu entnehmen.



Abbildung 63: Versuchsaufbau zur Wurzelfestigkeit von KMR-Muffenverbindungen

Als Probekörper wurden unvernetzte Muffenrohre aus PE mit Schrumpfmanschetten aus PE-X und vernetzte Muffenrohre aus PE-X ohne Schrumpfmanschetten eingesetzt. Insgesamt wurden vier unvernetzte und acht vernetzte KMR-Muffenverbindungen untersucht. Das Versuchskonzept sah vor, dass je zwei vernetzte und zwei unvernetzte KMR-Muffenverbindungen fachgerecht hergestellt wurden. Die weiteren KMR-Muffenverbindungen wurden gezielt mit folgenden Ausführungsfehlern und Schwachstellen appliziert:

- » Unzureichend erwärmte Schrumpfmanschetten;
- » Verzicht auf das Aufräuen der Ummantelungen der KMR;
- » Verzicht auf Schmelzklebstoffbänder;
- » Nicht entfernte Schutzfolie auf der Schrumpfmanschette;
- » Eintragung von Fremdstoffen in die Kleb- und Dichtebene.

Eine detaillierte Auflistung und Darstellung der Probekörper sind in Kapitel 4.2.2 in Tabelle 11 und in Anlage 5 dargestellt.

Die Versuche wurden im April 2018 gestartet und im November 2019 beendet. Die Versuchslaufzeit betrug demnach 18 Monate und zwei Wachstumsperioden. Für erste Zwischenergebnisse und zur Abschätzung des Auswurzelungsverhaltens wurden davon abweichend eine Probe im November 2018 (nach sieben Monaten) und zwei Proben im April 2019 (nach zwölf Monaten) geöffnet. Das Öffnen der Probekörper erfolgte mit zwei vertikalen Schnitten mit Hilfe eines Winkelschleifers an sich gegenüberliegenden Seiten. Dadurch konnte der Oberboden als ganzer Körper von der Ummantelung des KMR und der KMR-Muffenverbindung getrennt werden (siehe Abbildung 64).



Abbildung 64: Vorgehensweise zur Öffnung der Probekörper (Links: Vertikales Aufschneiden des Blumenpotfess, Mitte: Vertikales Aufschneiden des durchwurzelten Substrats, Rechts: Entfernen der Schrumpfmanschette von der Rohroberfläche bei einer unvernetzten Muffe)

4.2.2 Versuchsergebnisse

In allen Substraten konnte ein ausgeprägtes Wurzelwachstum innerhalb des Substratbehälters festgestellt werden. Bei der Auswertung der Probekörper zeigten sich unterschiedliche Wurzelinteraktionen, die wie folgt eingeordnet werden können:

- **Wurzelanwuchs** in die Trennfläche/Spalt zwischen dem Muffenrohr und der Ummantelung des KMR, aber nicht in den Schmelzklebstoff bzw. in die Adhäsionsebene des Schmelzklebstoffes (an 9 von 12 Probekörpern (beispielhaft Abbildung 65, links)).

- **Wurzeleinwuchs** in die mit bewussten Applikationsfehlern ausgeführte adhäsive Ebene zwischen dem Muffenrohr und der Ummantelung des KMR (an 2 von 12 Probekörpern (beispielhaft Abbildung 65, rechts)).
- **Kein Wurzelwuchs bzw. -einwuchs** zwischen dem Muffenrohr und der Ummantelung durch eine Wurzel (an 3 von 12 Probekörpern).



Abbildung 65: Wurzeleinwuchs in den nicht-stoffschlüssig verbundenen Spalt zwischen Muffe ohne Dichtband und Kunststoffmantelrohroberfläche (links), Wurzeleinwuchs in eine Muffenverbindung, bei der durch bewusst eingebrachte Fremdstoffe keine adhäsive Verbindung zwischen Muffenrohr und Ummantelung des KMR erfolgen konnte (rechts)

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass bei fachgerecht ausgeführten KMR-Muffenverbindungen kein Wurzeleinwuchs zu erwarten ist. Gleichzeitig ist festzustellen, dass bei einer fehlerhaften Montage bzw. Ausführungsfehlern ein Wurzeleinwuchs möglich ist. Wird die Ebene zwischen dem Ende eines vernetzten Muffenrohres aus PE-X (ohne zusätzliches Schrumpfband), nicht vollständig mit Schmelzklebstoff ausgefüllt, d. h. es erfolgt kein Austritt von Schmelzklebstoff aus dem Spalt (siehe Abbildung 66), ist in diesem Bereich ein Wurzeleinwuchs möglich. Es ist darauf hinzuweisen, dass je nach System der Muffenverbindung nach Angabe des Inverkehrbringers ein Austritt von Schmelzklebstoff nicht gefordert ist.

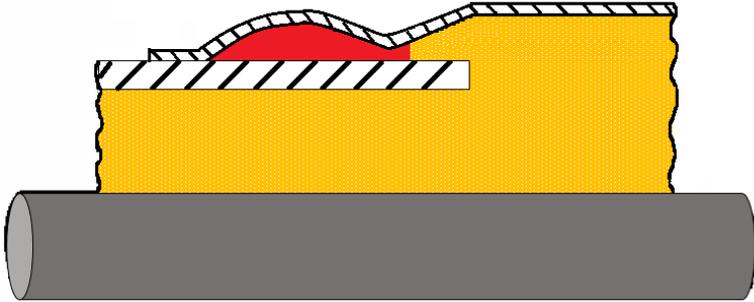


Abbildung 66: Schematische Darstellung einer fachgerecht applizierten Schrumpfmuffe aus PE-X mit Schmelzklebstoff (rot); nach AGFW FW 401-6 [53]

Bei Muffenverbindungen, an deren Ende Schmelzklebstoff austrat und sich zu einem fest anhaftenden Wulst formte, konnte kein Wurzelanwuchs zwischen der Ummantelung des KMR und dem Muffenrohr festgestellt werden. Direkt an der rauhen Oberfläche des Schmelzklebstoffes wuchsen Wurzeln an, was aber keinen Angriffspunkt für ein potentielles Eindringen in die Adhäsionsschicht zwischen dem Muffenrohr und der Ummantelung des KMR darstellt (siehe Abbildung 67).

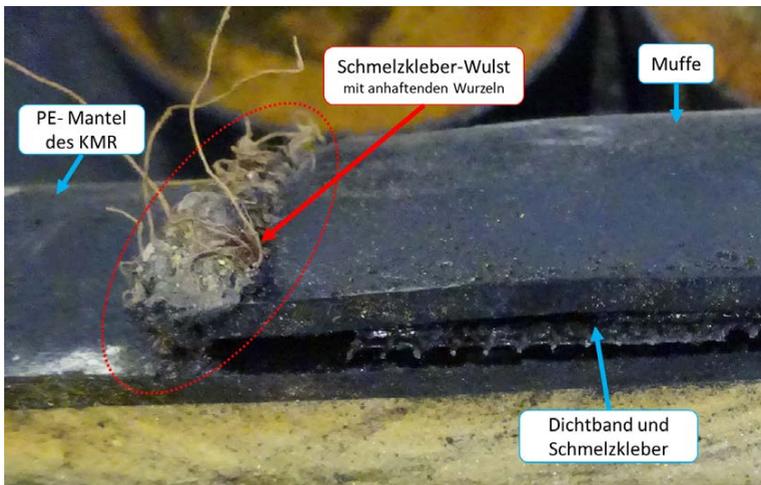


Abbildung 67: KMR-Muffenverbindung mit Schmelzklebstoffwulst am Ende

Die folgende Tabelle zeigt eine Übersicht der Outside-In-Probekörper mit Angabe des Fehlerbildes, des Muffensystems, der Wurzelinteraktion und des Wurzeleinwuchs.

Tabelle 11: Ergebnisübersicht der Outside-In-Versuche

Probekörper	Fehlerbild	Muffensystem	Wurzelanwuchs	Wurzeleinwuchs
I a	Fehlerfrei appliziert	vernetzt	Nein	Nein
I b	Kein Dichtband	vernetzt	Nein	Nein
II a	Schrumpfmanschette nicht ausreichend erwärmt	unvernetzt	Ja*	Nein
II b	Schrumpfmanschette nicht ausreichend erwärmt	unvernetzt	Ja*	Nein
III a	Unsauber verarbeitet, Fremdstoffe eingebracht	vernetzt	Ja	Ja
III b	Unsauber verarbeitet, Fremdstoffe eingebracht	vernetzt	Ja	Nein
IV a	Schutzfolie am Dichtband nicht entfernt	vernetzt	Ja	Nein
IV b	Fehlerfrei appliziert	vernetzt	Ja	Nein
VI a	Oberfläche der Ummantelung nicht aufgeraut und kein Dichtband vorhanden	vernetzt	Ja	Nein
VI b	Kein Dichtband, Fremdstoffe eingebracht	vernetzt	Ja	Ja
VII a	Fehlerfrei appliziert	unvernetzt	Nein	Nein
VII b	Fehlerfrei appliziert	unvernetzt	Ja*	Nein

(* Wurzelanwuchs an Montagehilfe und nicht im Übergangsbereich der Muffe)

Zusammenfassend trat an neun von zwölf Probekörpern Wurzelanwuchs, zwischen dem Muffenrohr und der Ummantelung des KMR und somit eine Interaktion zwischen Muffe und Wurzel, auf. Dabei wiesen sieben dieser neun Probekörper ein absichtlich eingebrachtes Fehlerbild auf. Der fehlerfreie Probekörper IV b hatte einen minimalen Wurzelanwuchs im nicht durch Schmelzklebstoff ausgefüllten Spalt zwischen dem Muffenrohr und der Ummantelung des KMR. Dieser Spalt lag bei allen vernetzten Probekörpern mit Wurzelanwuchs vor. Bei den drei unvernetzten Muffenrohren mit Wurzelanwuchs konnte keine Wurzel unter die Schrumpfmanschette gelangen, lediglich unter dem Montagepatch (eine reine Montagehilfe) konnte Wurzelanwuchs festgestellt werden (siehe Abbildung 68).



Abbildung 68: *Wurzeln am nicht mit Schmelzklebstoff ausgefüllten Spalt am Ende des Muffenrohres von Probekörper IV b (links); Wurzeln unter dem Montagepatch von Probekörper II b (rechts)*

Nur bei zwei von drei Probekörpern mit massiven provozierten Fehlstellen konnten tatsächliche Wurzeleinwüchse in die KMR-Muffenverbindung identifiziert werden. Bei Wurzeleinwuchs in Verbindungen mit Fehlerbildern, die den adhäsiven Verbund nicht beeinflussten oder die fachgerecht ausgeführt wurden, trat kein Wurzeleinwuchs auf.

4.3 Eindrückversuche – Einfluss Wurzel auf FW-Leitung

Ein weiterer Versuch zur Wurzelfestigkeit von Fernwärmeleitungen untersuchte die Auswirkungen des Dickenwachstums von Wurzeln auf die PE-Ummantelung von Kunststoffmantelrohren. Es wurde analysiert, ob das Dickenwachstum einer Wurzel zwischen einem Widerlager im Boden (in der Praxis z.B. Fels oder Stein) dazu führen kann, dass die PE-Ummantelung eingedrückt bzw. beschädigt wird.

4.3.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Drei Versuchsbehälter mit Höhe, Breite und Länge von jeweils 60 Zentimetern wurden für die Versuchsreihe erstellt. Für die Kunststoffmantelrohrleitungen wurden an zwei gegenüberliegende Seiten in einer Tiefe von 20,5 Zentimetern (von Oberkante Versuchskiste zu Oberkante Rohrleitung) horizontal nebeneinander liegende Aussparungen gesägt. Die KMR wurden anschließend durch die Aussparungen in die Versuchskisten geschoben. Es wurden 1,2 Meter lange Probestücke genommen, wodurch die Probestücke auf jeder Seite ca. 30 Zentimeter aus der Versuchskisten hinausragen. Somit wurden die Aussparungen in den Versuchskisten als Widerlager genutzt, sodass die Rohrleitungen durch das geplante Wurzelwachsen nicht maßgeblich auseinander gedrückt werden konnten. Anschließend wurden die Versuchskisten mit Komposterde befüllt und mit jeweils drei Weidenstecklingen, zentral angeordnet

über den Spalt der Rohrleitungen, bepflanzt (vgl. Abbildung 69, links). Die Weidenstecklinge wurden bis zur Tiefe der Oberkante Rohrleitung eingesetzt. Durch die zentrale Anordnung über dem Spalt zwischen den Rohrleitungen sollte das vertikale Wurzelwachstum direkt in den Spalt zwischen den Kunststoffmantelrohrleitungen geführt werden.



Abbildung 69: Versuchsaufbau zu Auswirkungen des Dickenwachstums von Wurzeln auf Kunststoffmantelrohre: Versuchskiste A im Mai 2020 mit ausgeprägtem Wachstum an der Oberfläche (links), Versuchsaufbauschema (rechts)

Die Versuchskisten waren unten offen, sodass die Wurzeln in das anstehende Erdreich wachsen konnten. So sollte ein ausreichendes Dickenwachstum der Wurzeln gewährleistet werden. In Abbildung 69, rechts ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt.

Die Versuche wurden im April 2019 begonnen. Acht von neun Stecklingen wuchsen über 13 Monate. Ein Weidensteckling war vorzeitig eingegangen. Zur Analyse des Wurzelwachstums wurden im Mai 2020 ein Teil der Versuchskisten geöffnet. Für die Analyse des Wurzelwachstums und der Interaktion zwischen Wurzeln und Rohrleitungen wurde zunächst eine Seitenverkleidung der Versuchskisten entfernt. Anschließend wurde händisch und durch Ausspülen mit Wasser die Muttererde entfernt, um die Wurzeln und Rohrleitungen freizulegen. Die Freilegung und Auswertung erfolgte je Weidensteckling. Zur detaillierten Messung und bildlichen Dokumentation der Wurzeln und der Analyse der Rohroberfläche wurden die Stecklinge aus den Versuchskisten entfernt.

4.3.2 Versuchsergebnisse

Zunächst wurde der Abstand zwischen den KMR außerhalb der Versuchskisten vermessen. An den Weidenstecklingen wurden an der Oberkante zum Mutterboden die Durchmesser gemessen. Bei den zwei dicksten Weidenstecklingen (Versuchskiste A, Steckling 1 und Versuchskiste C, Steckling 2) konnte ein ovales Dickenwachstum an der Oberfläche festgestellt

werden. In diesen Fällen wurden die Wurzelstärke in radialer und axialer Richtung der Rohrleitungen gemessen. Die Durchmesser der Weidenstecklinge wurden mit den Abständen der Kunststoffmantelrohrleitungen verglichen. Die Messergebnisse sind in Abbildung 70 dargestellt.

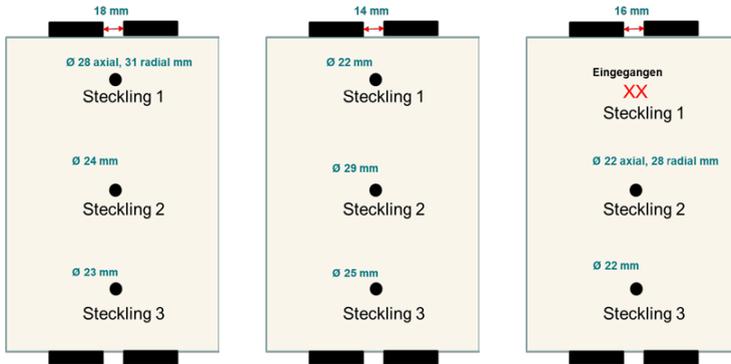


Abbildung 70: Draufsicht auf die Versuchskiste A (links), B (mittig), C (rechts) mit den gemessenen Durchmessern der Weidenstecklinge an der GOK und dem Abstand zwischen den Rohrleitungen

Zur Öffnung wurden aus Versuchskiste A Steckling 1 und aus Versuchskiste C Steckling 2 und 3 ausgewählt. Bei Steckling 1 aus Versuchskiste A und Steckling 2 aus Versuchskiste C wurde ein großes Dickenwachstum an der Oberfläche festgestellt, sodass dort auch ein ausgeprägtes Wurzelwachstum zu vermuten war. Steckling 3 aus Versuchskiste C wurde geöffnet, da durch die Auswertung von Steckling 2 bereits ein Großteil der Versuchskiste geöffnet und ein Wiederauffüllen nicht zielführend war. Die Öffnungen zeigten, dass alle drei Stecklinge in den Spalt zwischen den Rohrleitungen gewachsen waren (vgl. Abbildung 71).



Abbildung 71: Wurzelwachstum zwischen den Rohrleitungen, Versuchskiste A, Steckling 1 (Querschnitt, links), Versuchskiste C, Steckling 2 (Draufsicht, rechts)

Es zeigte sich, dass sich der Querschnitt der Wurzel an den Spalt angepasst hat. Beispielhaft ist das Wurzelwachstumsverhalten von Steckling 2 aus Versuchskiste C folgend in Abbildung 72 dargestellt.



Abbildung 72: Versuchskiste C, Steckling 2 Vorderansicht auf radiales Wurzelwachstum von 18,5 mm (links), Seitenansicht auf axiales Wurzelwachstum von 64,0 mm (rechts) jeweils mit gelbem Pfeil markiert

Die Versuchsergebnisse zeigten bei allen drei ausgewerteten Stecklingen, dass die Wurzeln durch den Spalt zwischen den Rohrleitungen gewachsen waren. Je dicker die Stecklinge be-

reits an der Oberfläche waren, desto ausgeprägter war auch das Wurzelwachstum im Substrat. Jedoch veränderte sich im Spalt zwischen den Rohren die Form der Wurzel, indem sie sich der Spaltbreite anpasste. Die Messergebnisse sind vergleichend zwischen den Messungen direkt über den Rohrleitungen (im Mutterboden) und zwischen den Rohrleitungen folgend in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Vergleichende Messwerte der Eindrückversuche an der Oberfläche zum Mutterboden und zwischen den Rohrleitungen (in Millimeter)

Messstelle	Versuchskiste A, Steckling 1	Versuchskiste C, Steckling 2	Versuchskiste C, Steckling 3
über GOK	31 axial, 28 radial	28 axial, 41 radial	24 axial, 25 radial
zwischen KMR	45 axial, 18 radial	64 axial, 18,5 radial	21 axial, 15,5 radial
Spaltbreite (außerhalb Versuchskiste)	18 radial	16 radial	16 radial

Für das Wurzelwachstum in axialer Richtung der Rohrleitungen wurden Werte von bis zu 63 Millimeter gemessen. Das Wurzelwachstum in radialer Richtung entsprach in zwei Fällen der Spaltbreite zwischen den Kunststoffmantelrohrleitungen. Bei Steckling 2 in Versuchskiste C wurde eine geringfügig größere Dicke als die Spaltbreite gemessen. Als wesentliches Ergebnis blieb festzuhalten, dass bei keinem der drei ausgewerteten Stecklinge eine Beschädigung der Rohrmanteloberfläche festgestellt werden konnte (vgl. Abbildung 73).



Abbildung 73: Rohrmanteloberflächen aus Versuchskiste A (links) und Versuchskiste C (rechts)

Die Auswertung von Steckling 3 aus Versuchskiste C zeigte im Vergleich zu den anderen zwei Stecklingen ein geringfügiges (Dicken-)Wurzelwachstum in radialer und insbesondere axialer Richtung. Aus diesem Grund wurden die restlichen Stecklinge (Versuchskiste A, Steckling 2

und 3 sowie Versuchskiste B alle Stecklinge) daher in den Versuchskisten belassen, um ein Wurzelstärkewachstum (ggf. für Folgeuntersuchungen) zu ermöglichen und weitergehende Ergebnisse zu erhalten. Eine detaillierte Darstellung der Versuchsergebnisse ist Anlage 6 zu entnehmen.

4.4 Versuchsfeld Waldfriedhof Dodesheide – Schutzmaßnahmen

In Osnabrück werden durch den Osnabrücker ServiceBetrieb (OSB) seit über 20 Jahren Baumstandorte in einem Versuchsfeld für wissenschaftliche Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Die Errichtung des Versuchsfeldes Dodesheide wurde u.a. durch die DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt finanziert.

Das Versuchsfeld im Waldfriedhof Dodesheide in Osnabrück wurde im Rahmen des IKT-Forschungsvorhabens „Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre – Teil 1: Verpflanzung von Großbäumen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück“ [54] vor über zehn Jahren entwickelt und erstellt. Im Versuchsfeld sind 24 Großbäume verpflanzt (vgl. Abbildung 74, links). 21 dieser Bäume wuchsen bereits seit dem Jahr 1997 auf dem Betriebshof des Osnabrücker ServiceBetriebs. Es wurden jeweils sieben Exemplare der Baumarten Esche (*Fraxinus excelsior* L.), der Hybridplatane (*Platanus x acerifolia*) und der Kaiserlinde (*Tilia x intermedia* cv. *Pallida*) eingesetzt. Im Jahre 2009 erfolgte die Umpflanzung zum Waldfriedhof Dodesheide in Osnabrück. Dort wurden zusätzlich drei weitere Bäume (zwei Exemplare Eiche (*Quercus* L.) und ein Exemplar Ginkgo (*Ginkgo biloba* L.)) eingepflanzt. Bei der Verpflanzung der Bäume erfolgte eine Durchmischung der ehemals im Verbund stehenden Bäume. Dabei wurden die Bäume in einer 130 m langen Trasse eingepflanzt (vgl. Abbildung 15) [54].

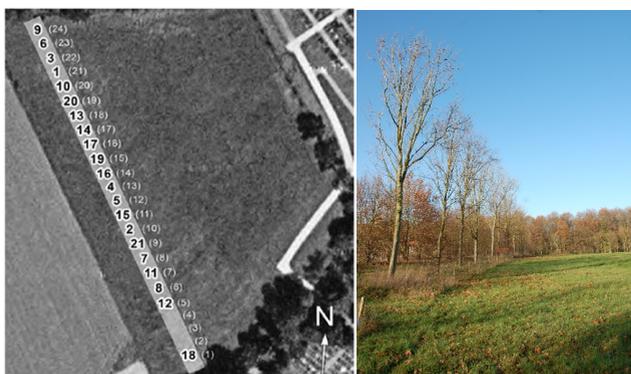


Abbildung 74: Draufsicht auf das Versuchsfeld "Dodesheide" nach der Umpflanzung im Jahre 2009 mit aktueller Nummerierung in Klammern (links) [54], seitlicher Blick auf einen Abschnitt des Versuchsfeldes „Dodesheide“ im Jahr 2019 (rechts)

Die Errichtung von sogenannten Rehabilitationszonen mit Substraten im Versuchsfeld erfolgte im Rahmen des IKT-Forschungsvorhabens „Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre –Teil 2: Anlage von Rehabilitationszonen an den verpflanzten Großbäumen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück“ [55].

Ziel der hier dargestellten Untersuchungen am Versuchsfeld Dodesheide sind Langzeit-Praxiskenntnisse zum Wurzelwachstumsverhalten von Großbäumen in Substraten bzw. an porenraumarmen Verfüllbaustoffen, die als Schutzmaßnahmen nach DWA-M 162, DVGW GW 125 und FGSV Nr. 939 [7] beschrieben werden. Substrate (porenreiche Böden) werden als aktive Schutzmaßnahmen bezeichnet, die unmittelbar am Baumstandort stattfinden und den Wurzeln ausreichend Entwicklungsraum geben sollen. Porenraumarme Böden gehören zu den passiven Schutzmaßnahmen vor Wurzeleinwuchs im Leitungsgraben [7]. Folgend werden die Untersuchungen und deren Ergebnisse beschrieben.

4.4.1 Aktive Schutzmaßnahme – Substrate am Baumstandort

Aktive Schutzmaßnahmen sind nach Regelwerk [7] Maßnahmen zur Förderung des Wurzelwachstums am Baumstandort u.a. durch den Einsatz porenreicher Substrate in Pflanzgruben oder Wurzelgräben. Folgend wird der Aufbau der bereits im IKT-Forschungsvorhabens „Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre –Teil 2: Anlage von Rehabilitationszonen an den verpflanzten Großbäumen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück“ [55] angelegten Rehabilitationszonen sowie die Ergebnisse aus ersten Aufgrabungen dieser Bereiche beschrieben. Die Auswertung des Wurzelwachstums nach sieben Jahren erfolgte im vorliegenden Forschungsvorhaben.

Versuchsaufbau

An jedem der 24 Bäume im Versuchsfeld Dodesheide wurde eine kreisförmige Rehabilitationszone mit einem Radius von ca. 60 Zentimetern und einer Tiefe von 80 Zentimetern angelegt. Als Substrat in der Rehabilitationszone wurden leicht durchwurzelbare Materialien eingesetzt, deren Porenräume eine ausdauernd hohe (Pflanzen-)Verfügbarkeit von Luft und Wasser sicherstellen sollen. Bei den verwendeten Substraten handelt es sich um Mischungen strukturstabiler Materialien auf der Grundlage der Produkte VulkaTree 0/16 und VulkaTree 0/32 der Firma VulkaTec Riebensahm GmbH. Die Hauptbestandteile beider Substrate bilden Naturbims, Leicht-Lava und Löß zu unterschiedlichen Teilen (Vol.-%) und Qualitäten (Körnungen) [55].

Es wurden gestörte und ungestörte Bodenproben des Substrates und des angrenzenden Bodens entnommen. An der Platane mit der Baum-Nr. 11 konnte im Substrat in ca. 0,5 Metern Tiefe ein Sand mit Kiesanteilen und schwach schluffigen Anteilen festgestellt werden. Es war ein Unterschied des Wassergehaltes von 4,7 M.-% bei der gestörten Probe zu 5,4 M.-% bei

der ungestörten Probe festzustellen. Die Trockendichte wurde mit $1,7 \text{ g/cm}^3$ und der Glühverlust mit 2,6 M.-% bestimmt. Das Porenvolumen lag bei einer angenommenen Korndichte von $2,67 \text{ g/cm}^3$ bei 33 Vol.-%.

Am gleichen Standort wurde der anstehende Boden als schluffiger Sand mit schwachen Kieseanteilen und schwachen Tonanteilen ermittelt. Der Wassergehalt unterschied sich von 14 M.-% der gestörten Probe zu 16,8 M.-% bei der ungestörten Probe. Die Korndichte lag bei $2,7 \text{ g/cm}^3$ und der Glühverlust bei 2,4 M.-%. Die Wasserdurchlässigkeit wurde mit $1 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ bestimmt. Das Porenvolumen lag 40,8 Vol.-%.

Um auch das Wachstum der tiefen gelegenen Wurzeln in Richtung der Rehabilitationszonen zu beeinflussen, wurden vor dem Einfüllen der Substrate pro Baum zwölf Belüftungselemente in der Grabenmitte und auf der Sohle der Gräben stehend eingelassen. Hierbei handelt es sich um HS-Baumwurzelbelüfter der Firma Funke Kunststoffe GmbH. Die geschlitzwandigen Kunststoffrohre mit DN/OD 110 mm wurden speziell für diesen Anwendungsfall mit einer Länge von jeweils 1000 mm hergestellt [55].

Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Zur Kontrolle des Wurzelwachstums wurden im Mai 2012, April 2013 und November 2018 Aufgrabungen an jeweils einem Exemplar der Gattung Linde (Baum Nr. 10), Platane (Baum Nr. 11) und Esche (Baum Nr. 20) durchgeführt.

Eine ausführliche Beschreibung des Auswurzelungsverhaltens in der Rehabilitationszone in den Jahren 2009 bis 2013 ist im Forschungsbericht des Forschungsvorhabens „Anlage von Rehabilitationszonen an den verpflanzten Großbäumen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück“ [55] zu finden.

Im November 2018 wurden an den o.g. drei Versuchsbäumen und eingebauten Substraten im Rahmen des hier vorliegenden Projektes weitere Aufgrabungen durchgeführt, um das Wurzelwachstum nach einer Standzeit von weiteren sieben Jahren analysieren zu können. Dazu wurden rechteckige Baugruben ausgehoben, die die kreisförmige Rehabilitationszone tangieren. Die Kantenlänge der Gräben betrug ca. vier bis fünf Meter, abhängig vom Radius der kreisförmigen Rehabilitationszone (vgl. Abbildung 75). Die Grabentiefe betrug 80 Zentimeter sowie die Grabenbreite 60 Zentimeter. Die vertikalen Belüftungselemente wurden mit einer TV-Schiebekamera befahren, um erste Rückschlüsse zu möglichen Wurzeleinwuchs in die Schlitzrohre nach ca. zehn Jahren Betriebszeit ziehen zu können.



Abbildung 75: Schematische Darstellung der Aufgrabungen 2018

Das Auswurzelungsverhalten der drei untersuchten Bäume im Versuchsfeld „Dodesheide“ nach sieben Jahren Wachstum ist folgend dargestellt.

Esche (Baum Nr. 20)

Bei den Aufgrabungen an der Esche (Baum Nr. 20) wurde ein ausgeprägtes Auswurzelungsverhalten in der Rehabilitationszone im oberflächennahen Bereich kleiner 30 Zentimeter unter Geländeoberkante festgestellt. In diesem Bereich sind große Massen an Feinwurzeln (vgl. Abbildung 76, links) sowie einige Starkwurzeln (Durchmesser bis maximal 15 mm) vorzufinden (vgl. Abbildung 76, rechts), welche z.T. die Rehabilitationszone horizontal (> 60 cm) durchwachsen und im gewachsenen Boden weiterwachsen. In tieferen Bereichen reduziert sich die Wurzelmasse, sodass vereinzelt Feinwurzeln und Starkwurzeln vorzufinden waren. Im gewachsenen Boden (außerhalb der Rehabilitationszone) wurden vereinzelt Feinwurzeln bis zur Grabensohle festgestellt.

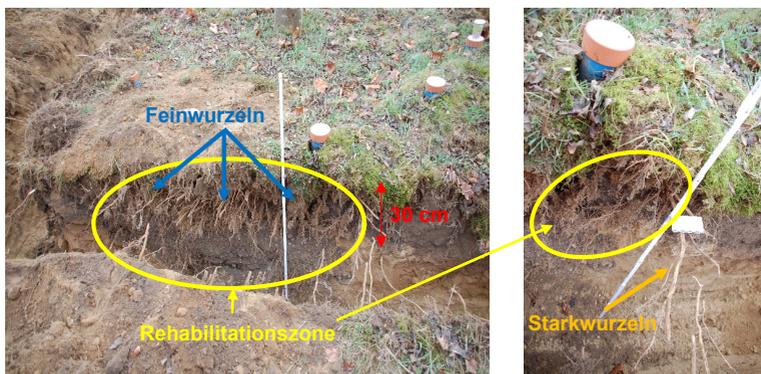


Abbildung 76: Wurzeln der Esche (Baum Nr.20) im November 2018: Feinwurzeln im oberflächennahen Bereich, insbesondere stark ausgeprägt in Rehabilitationszone (links), Starkwurzel im oberflächennahen Bereich im Außenbereich der Rehabilitationszone (rechts)

Platane (Baum Nr. 11)

Bei der Platane (Baum Nr. 11) wurde der Großteil der Wurzelmasse in der Rehabilitationszone identifiziert. Feinwurzeln sind überwiegend in der oberen Bodenschicht (bis ca. 30 cm unter Geländeoberkante) vorhanden. Starkwurzeln (bis ca. 20 mm Durchmesser) sind bis zu einer Tiefe von 60 Zentimeter unter Geländeoberkante vorzufinden (vgl. Abbildung 77, links). Die Starkwurzeln wachsen horizontal in den gewachsenen Boden und durchwurzelten z.T. die 60 Zentimeter breite Baugrube (vgl. Abbildung 77, rechts).



Abbildung 77: Wurzeln der Platane (Baum Nr.11) im November 2018. Fein- und Starkwurzeln in der Rehabilitationszone (links), Durchwurzelung von Starkwurzeln aus Rehabilitationszone in den anstehenden Boden (rechts)

Linde (Baum Nr. 10)

Der wesentliche Teil der Wurzelmasse der untersuchten Linde (Baum Nr. 10) wurde in der Rehabilitationszone festgestellt. Feinwurzeln sind überwiegend in der oberen Bodenschicht (bis ca. 30 cm unter Geländeoberkante) vorhanden. Starkwurzeln (bis maximal 18 mm Durchmesser) sind bis zu einer Tiefe von 80 Zentimeter unter Geländeoberkante vorzufinden (vgl. Abbildung 78, links). Die Starkwurzeln wachsen horizontal in den gewachsenen Boden und durchwurzelten z.T. die 60 Zentimeter breite Baugrube (vgl. Abbildung 78, rechts).

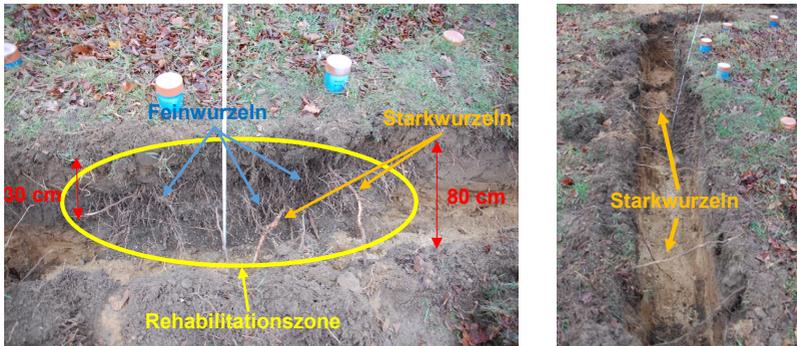


Abbildung 78: Wurzeln der Linde (Baum Nr.10) im November 2018: Fein- und Starkwurzeln in der Rehabilitationszone (links), Durchwurzelung von Starkwurzeln aus Rehabilitationszone in den anstehenden Boden (rechts)

Fazit

Bei allen drei Bäumen konnte ein weitestgehend im Substrat ausgeprägtes Auswurzelungsverhalten festgestellt werden. Vereinzelt Wurzeln, insbesondere Starkwurzeln, wachsen von der Rehabilitationszone in den anstehenden Boden weiter. Die Kombination aus porenreichen Böden und vertikalen Belüftungselementen fördern das Wurzelwachstum direkt am Baumstandort und ein Großteil der Wurzeln verbleibt im Substrat.

An den untersuchten Belüftungsröhren konnte kein ausgeprägter Wurzeleinwuchs bzw. größere Querschnittsverringerungen durch Wurzeln nach knapp zehn Jahren Betriebszeit mittels TV-Kamerabefahrung festgestellt werden. Teilweise wurden kleinere Auffälligkeiten im Rohrquerschnitt festgestellt. Jedoch konnte mit Hilfe der verfügbaren Videomaterialien nicht abschließend identifiziert werden, ob die Auffälligkeiten im Querschnitt eingewachsene Feinwurzeln, Spinnweben oder auch hereingefallene Grashalme von der GOK waren. Weitergehende Detail-Untersuchungen an den Schlitzröhren z.B. mit verbesserter Kameratechnik oder Kanalspiegeln, durch Aufgrabungen oder Probenentnahmen der Auffälligkeiten sind daher zur Erzielung umfänglicher und aussagekräftiger Ergebnisse notwendig.

4.4.2 Passive Schutzmaßnahme - ZFSV

Passive Schutzmaßnahmen sind nach DWA-M 162, DVGW GW 125 und FGSV Nr. 939 [7] Maßnahmen zur Vermeidung von Wurzelum- und -einwuchs an unterirdischen Leitungen und Kanälen u.a. durch den Einsatz porenraumarmer Verfüllstoffe im Leitungsraben. Im Anschluss an die Aufgrabungsarbeiten und Auswertungen des Wurzelwachstums in den Rehabilitationszonen wurden die Baugruben an den drei Baumstandorten Linde (Baum Nr. 10), Platane (Baum Nr. 11) und Esche (Baum Nr. 20) mit ZFSV verfüllt.

Versuchsaufbau

Die Baugruben (60 Zentimeter breit und 80 Zentimeter tief) wurden mit einer möglichst wurzelabweisenden ZFSV-Rezeptur verfüllt (vgl. Abbildung 79, links). Die Anforderungen an die Rezeptur ergaben sich u.a. aus den Ergebnissen des DBU-Forschungsvorhabens „Wurzelhemmende Verfüllbaustoffe“ [28]. In diesem Forschungsvorhaben wurde als ein wesentlicher Parameter zur Wurzelhemmung von ZFSV die Porosität bestimmt [28]. Daher sollte der eingesetzte ZFSV eine möglichst geringe Porosität besitzen, bestenfalls unter 30 Vol.-%. Weitere Anforderungen ergaben sich aus Sicht des Leitungsbaus, speziell des Fernwärmeleitungsbaus [51], die nach Angabe des Herstellers mit der gewählten Rezeptur eingehalten werden können. Eine vollständige Überprüfung dieser Parameter konnte im Rahmen des hier vorliegenden Forschungsvorhabens allerdings nicht durchgeführt werden.

Insbesondere sollte der Wiederaushub mit leichtem Gerät gewährleistet sein, um weitere Untersuchungen am ZFSV durchführen zu können. Der ZFSV wurde mittels Fahrmischern zum Versuchsfeld geliefert und dort direkt in die Baugruben flüssig eingefüllt (vgl. Abbildung 79, rechts). Das Basismaterial für den ZFSV wurde im Werk angemischt. Der anstehende Boden im Versuchsfeld wurde nicht zur Herstellung genutzt. Die Versuchsbäume wurden allseitig mit dem ZFSV bis zur Bodenoberkante umgeben. Damit sollte der Wurzelraum für die Bäume begrenzt, ein Umwachsen des Hindernisses unterbunden und so die Notwendigkeit eines Einwuchses in den ZFSV begünstigt werden.



Abbildung 79: ZFSV kurz nach Einbau um die Versuchsbäume (links), Einfüllen des ZFSV in die Baugrube mit Fahrmischern (rechts)

Versuchsdurchführung und -ergebnisse

Nach einem Jahr Versuchslaufzeit wurden im Dezember 2019 erste Aufgrabungen an den ZFSV-Körpern durchgeführt. Es wurde je Baum eine der vier ZFSV-Seiten untersucht. Dazu wurde mit einem Bagger ein ca. 60 Zentimeter breiter Graben aus Sicht des Baumes hinter dem ZFSV-Körper ausgehoben. Durch die Baggerarbeiten sind vereinzelt Schlitzrohre be-

schädigt worden, diese wurden daraufhin aus dem Versuchsaufbau entfernt. Der ZFSV-Probekörper wurde an den jeweiligen Enden mittels elektrischen Meißels vom restlichen ZFSV gelöst. Der freistehende ZFSV-Probekörper wurde anschließend mit der Baggerschaufel in den ausgehobenen Graben gekippt, um die Trennfläche zwischen ZFSV und Substrat bzw. anstehendem Boden augenscheinlich untersuchen zu können.

Die Auswertung erfolgte vor Ort durch Inaugenscheinnahme der ZFSV-Körper sowie der Grabenwände. Zudem wurden unterschiedliche Laborprüfungen an entnommenen ZFSV-Proben durchgeführt.

Bei den augenscheinlichen Untersuchungen vor Ort konnte unabhängig von der Baumart in keinem Fall eine Einwurzelung festgestellt werden. Der ZFSV bildete eine glatte Oberfläche, auf der die Wurzeln einen dichten Filz ausbildeten (vgl. Abbildung 80, links). Beim Umwerfen der ZFSV-Blöcke blieben die Wurzeln überwiegend an der Grabenwand zurück. Nur vereinzelt hafteten der Wurzelfilz oder einzelnen Wurzeln am ZFSV (vgl. Abbildung 80, rechts).



Abbildung 80: Wurzelfilz an Grabenwand (links), umgeworfener ZFSV-Probekörper mit wenigen Erd- und Wurzelhaftungen (rechts)

Am ZFSV haftender Wurzelfilz oder einzelne Wurzeln ließen sich mit einem Haushaltsbesen abkehren. Wurzeln, die aus der Grabenwand herausstanden und bei Einbau von ZFSV umschlossen wurden, starben im ZFSV ab (vgl. schwarze Wurzelspitze in Abbildung 81, links), konnten aber 5-10 cm im Substrat bzw. gewachsenen Boden Wurzeln regenerieren (vgl. Abbildung 81, rechts).



Abbildung 81: Abgestorbene Wurzelspitze (links), regenerierte Wurzeln ca. 5-10 Zentimeter entfernt von ZFSV (rechts)

Während der ersten Aufgrabungen im Jahr 2019 wurden gestörte ZFSV-Proben von Bruchmaterial in Eimern und ungestörte ZFSV-Proben mittels Prüfzylindern entnommen. Anhand der entnommenen ZFSV-Proben konnten an allen drei Baumstandorten die Sieblinien nach DIN EN ISO 17892-4 [37], Korn-, Trockendichten und Wassergehalt nach DIN 18125 [38] sowie Glühverluste nach DIN 18128 [40] bestimmt werden. Aus Trocken- und Korndichte wurde das Porenvolumen berechnet. Ergänzend wurden an einer ZFSV-Probe auch die Porosität und Porenradienverteilung mittels Quecksilberporosimetrie bestimmt, um einen Vergleichswert zum berechneten Porenvolumen aus Trocken- und Korndichte zu erhalten. Des Weiteren erfolgte an einer Bodenprobe des Baumstandorts Linde die Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130 [39]. Zur Ermittlung der Umweltverträglichkeit von ZFSV wurden zusätzlich je Baum Prüfungen an Feststoff und Eluat (flüssige Lösung) nach LAGA TR Boden 2004 [56] durchgeführt. Die Prüfungen der ZFSV-Proben erfolgte in einem Unterauftrag durch ein externes Bodenzlabor. Das Versuchsprogramm und die -ergebnisse sind folgend dargestellt:

Tabelle 13: Versuchsprogramm und -ergebnisse des im Versuchsfeld eingebauten ZFSV

Prüfung	Linde	Platane	Esche
Sichtbarer Wurzeleinwuchs	nein	nein	nein
Sieblinie	S, u', g'	S, u', g'	S, u', g'
Wassergehalt [M.-%]	20,9 - 21	18,2 – 19,8	18,9 – 19,8
Korndichte [g/cm ³]	2,683	2,767	2,614
Trockendichte [g/cm ³]	1,549	1,541 – 1,601	1,454 – 1,543
Porenvolumen berechnet [Vol.-%]	42,3	40,2 – 42,4	41,0 – 44,4
Porenvolumen Quecks. [Vol.-%]	/	32,73	/
Glühversuch [V _{gl} in M.-%]	0,6	0,8	0,9
Wasserdurchlässigkeit [k _r in m/s]	10 ⁻⁷	/	/
pH-Wert	11,6	11,5	11,6
Elektr. Leitfähigkeit	714	661	686

/ = Prüfung nicht durchgeführt

Die Laborergebnisse zeigten, dass das Porenvolumen über den geforderten 30 Vol.-% lag. Trotzdem konnte kein Wurzeleinwuchs festgestellt werden. Der Unterschied zwischen dem berechneten Porenvolumen und dem Porenvolumen mittels Quecksilberporosimetrie lag vermutlich darin, dass bei der Quecksilberporosimetrie nur Poren im Messbereich zwischen 0,002 und 100 Mikrometern betrachtet wurden. Vermutlich reichen auch 100 Mikrometer Porendurchmesser nicht, um einen Wurzeleinwuchs zu ermöglichen, da die Wurzelspitzen in der Regel dicker sind. Hierzu werden aktuell Messungen durchgeführt um die dünnsten Wurzelspitzen zu ermitteln. Alle Poren, die noch dünner sind, können dann als nicht durchwurzelbar klassifiziert werden. Bei dem berechneten Porenvolumen wurden keine Messgrenzen berücksichtigt. Da mit den Porenvolumen-Normversuchen keine direkten Aussagen zur maximalen Porengröße und der Durchgängigkeit von Poren möglich sind, wurden als weitergehende Untersuchungen, zusätzlich zu den Norm-Laboruntersuchungen, ZFSV-Probestücke mittels Lichtmikroskop analysiert. Diese Untersuchungen dienten als erster Test, ob weitergehende Erkenntnisse durch Mikroskopuntersuchungen hinsichtlich der maximalen Porengröße und -durchgängigkeit von ZFSV möglich sind. An der Ruhr-Universität Bochum wurde ein Fluoreszenz-Stereo-Zoom-Mikroskop der Marke ZEISS (Axio Zoom.V16) benutzt. Damit sind Bildaufnahmen bis zu einer 50-fachen Vergrößerung möglich.

Eine aus dem Versuchsfeld ungestört entnommene ZFSV-Probe wurde zunächst im Prüfcylinder bis zur Gewichtskonstanz bei 100°Celsius getrocknet. Anschließend wurden größtmögliche ZFSV-Probestücke mit einer Feinoszillationssäge herausgeschnitten. Geeignete Probestücke wurden dokumentiert (vgl. Abbildung 82, links). Anschließend wurden die Bruchflächen der Probenstücke mittels Mikroskops in einer 5-fachen Vergrößerung dahin gehend betrachtet, in welchen Bereichen auf der Bruchfläche Auffälligkeiten erkennbar sind, die ggf. als Poren identifiziert werden können (vgl. Abbildung 82, rechts).



Abbildung 82: Dokumentation der ZFSV-Probestücke (links) und Aufnahme mit 5-facher Vergrößerung der ZFSV-Bruchflächen mittels Mikroskops, in der Mitte eine Auffälligkeit in Form eines schwarzen „Flecks“ erkennbar (rechts)

Anschließend wurden die Bereiche der Probenoberflächen ausgewählt, an denen Auffälligkeiten erkennbar waren. Diese wurden bei 25-facher Vergrößerung näher betrachtet. Beispielsweise war in Abbildung 82, rechts ein schwarzer Fleck zu erkennen, welcher zur Betrachtung unter 25-facher Vergrößerung ausgewählt wurde. Der „Fleck“ wurde als Pore mit einem Durchmesser von ca. einem halben Millimeter identifiziert (vgl. Abbildung 83, rechts). In einzelnen Fällen konnten Poren bis zu einer Größe von einem Millimeter festgestellt werden (vgl. Abbildung 83, links). Tiefergehende Poren lagen nicht vor. Eine Aussage zum Porenvolumen oder zur Porosität einer ZFSV-Probe war mittels Mikroskops nicht möglich, jedoch zeigen die Ergebnisse wertvolle Hinweise zu maximalen Größen von Poren in ZFSV.

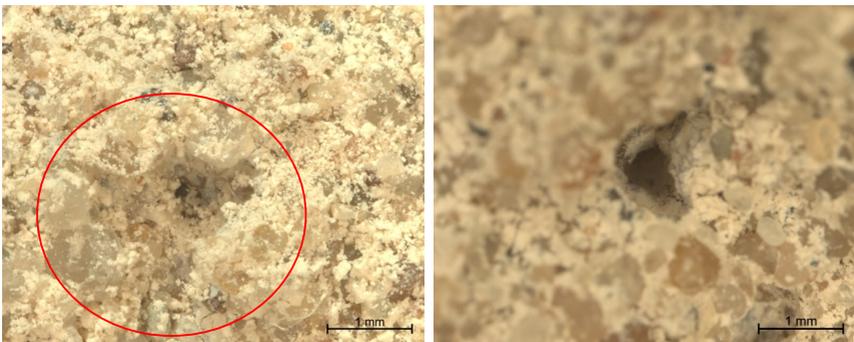


Abbildung 83: Aufnahmen mit 25-facher Vergrößerung: Pore bis zu einer Größe von einem Millimeter (links) und Pore mit einer Größe von einem halben Millimeter (rechts, vgl. Abbildung 82, rechts, „schwarzer Fleck“ bei 5-facher Vergrößerung)

Aufgrund der erhöhten pH-Werte und elektrischen Leitfähigkeit im Eluat des ZFSV wurden im Nachgang dieser Untersuchungen weitere Bodenproben aus den am ZFSV angrenzenden Substraten und anstehenden Boden entnommen. Ziel war die Ermittlung des pH-Wertes bzw. des Ausspülungsverhaltens von ZFSV in die angrenzenden Böden, um dadurch weitere Rückschlüsse auf die Umweltverträglichkeit von ZFSV, insbesondere an Baumstandorten, ziehen zu können. Dabei wurden Bodenproben in ca. einem halben Meter Tiefe jeweils direkt angrenzend am ZFSV sowie mit Abständen von einem halben und einem Meter zum ZFSV im anstehenden Boden und in einem Abstand von einem halben Meter im Substrat entnommen. Zum Vergleich erfolgte die Entnahme von weiteren Bodenproben von anstehendem Boden und Substrat an einem Baumstandort ohne ZFSV im Versuchsfeld. Der ZFSV war an der Oberfläche nicht fest, vermutlich aufgrund der geringen Temperatur von ca. 0° Celsius bei Einbau. Wurzeln der Linde durchwuchsen an einer Stelle die gesamte Grabenbreite durch den nicht festen ZFSV (vgl. Abbildung 84). Daher wurde auch eine weitere ZFSV-Probe des nicht festen ZFSV entnommen und daran ebenfalls der pH-Wert bestimmt. Der pH-Wert im nicht abge bundenen ZFSV betrug im Feststoff 8,1 und im Eluat 8,6. Somit sind diese pH-Werte um ca. 3,0 niedriger als im ausgehärteten ZFSV (vgl. Tabelle 13).



Abbildung 84: Durchwurzelung des nicht festen ZFSV an der GOK am Baumstandort Linde

Die Ergebnisse der pH-Wert-Messungen sind in Tabelle 14 dargestellt. Die pH-Werte lagen entweder unter dem Richtwert von 8,5 [12] oder geringfügig darüber. Weitere Zusammenhänge waren nicht erkennbar, da die pH-Werte sehr uneinheitlich waren. Für weitere Aussagen sind größere Stichproben notwendig.

Tabelle 14: Ergebnisse der pH-Wert-Messungen im Versuchsfeld Dodesheide

Abstand pH-Wert	Substrat		anstehender Boden	
	Feststoff (CaCl ₂)	Eluat	Feststoff (CaCl ₂)	Eluat
direkt am ZFSV	9,0	7,8	7,2	8,2
0,5 Meter Abstand vom ZFSV	7,0	7,4	8,8	9,0
1,0 Meter Abstand vom ZFSV	/	/	6,3	7,4
Baumstandort ohne ZFSV	7,2	7,5	6,2	7,5

/: Messungen wurden nicht durchgeführt

5 Diskussion der Forschungsergebnisse und Weiterentwicklung eines biologischen Wachstumsmodells

Die Forschungsergebnisse des hier vorliegenden Forschungsvorhabens sind vielfältig und wurden durch In-situ-Aufgrabungen (vgl. Kapitel 2), FE-Simulationen und In-situ-Messungen (vgl. Kapitel 3) sowie Laborversuchen und Feldversuchen (vgl. Kapitel 4) ermittelt. Folgende Forschungsschwerpunkte wurden untersucht und werden in den folgenden Unterkapiteln diskutiert:

- Einfluss von Wärmefeldern im Erdreich auf das Wurzelwachstum
- Wurzeinwuchs in KMR-Muffenverbindungen
- Wurzelwuchs an Kunststoffmantelrohrummantelungen
- ZFSV als Schutz vor Wurzeinwuchs in den Leitungsgraben
- (Baum-)Substrate zur Förderung des Wurzelwuchses

U.a. aufbauend auf den hier vorliegenden Forschungsergebnissen wird ein biologisches Wachstumsmodell in Kapitel 5.2 weiterentwickelt.

5.1 Diskussion der Forschungsergebnisse

Folgend werden die Forschungsergebnisse zu den einzelnen Untersuchungsschwerpunkten diskutiert.

5.1.1 Einfluss von Wärmefeldern im Erdreich auf das Wurzelwachstum

In-situ-Temperaturmessungen und FE-Simulationen von Wärmefeldern an Fernwärmeleitungen (vgl. Kapitel 3) zeigen, dass maximale Temperaturen von ca. 35° Celsius an der Rohroberfläche einer nach Stand der Technik betriebenen Kunststoffmantelrohrleitung zu erwarten sind. Bei Laboruntersuchungen zum Wurzelwachstumsverhalten (vgl. Kapitel 4.1) mit Temperaturen von 35° Celsius im Erdreich war allerdings kein Einfluss des Wärmefeldes auf das Wurzelwachstum erkennbar. Diese Erkenntnis bestätigen Beobachtungen bei In-situ-Aufgrabungen an Fernwärmeleitungen an Baumstandorten (vgl. Kapitel 2). Die Diskussion der in der Literaturstudie aufgestellten Hypothesen (vgl. Kapitel 1.2) zum Einfluss von Wärmefeldern im Erdreich auf das Wurzelwachstum ist folgend dargestellt.

» *Hypothese A: Das Temperaturfeld schützt die FW-Leitungen vor Wurzeln (Stimmt nicht im Fall von Eiche für „neu“ verlegte FW-Leitung).*

Ein Einfluss von Wärmefeldern auf das Wurzelwachstum konnte nicht festgestellt werden. Es wurden von unterschiedlichen Baumarten Wurzeln an Fernwärmeleitungen oder in der Sandbettung festgestellt. Daher ist eher nicht davon auszugehen, dass das Temperaturfeld die Fernwärmeleitung vor Wurzeleinwuchs schützt. Die Beobachtungen der In-situ-Aufgrabungen und im Versuchsfeld Osnabrück deuten eher darauf hin, dass unterschiedliche bzw. mehrere Bodenparameter (z.B. Durchlässigkeit, Trockendichte, Porenvolumen, Wassergehalt) maßgeblich dafür sind, ob Wurzeln zu einer Fernwärmeleitung bzw. in eine Sandbettung wachsen können. Dabei ist zusätzlich zur Bettung immer der anstehende Boden mit zu betrachten (vgl. Dichtefallenmodell, Kapitel 1.1.1).

» *Hypothese B: Das Temperaturfeld fördert das Wurzelwachstum (Stimmt im Fall Eiche für „neu“ verlegte FW-Leitung, wobei das „wieso“ offenbleibt).*

Da auf Basis der Forschungsergebnisse kein Einfluss von Wärmefeldern auf das Wurzelwachstum festgestellt werden konnte, ist auch hier nicht davon auszugehen, dass das Temperaturfeld das Wurzelwachstum fördert. Interessant ist, dass die in der Hypothese formulierte Einzelbeobachtung des Anwuchses von Wurzeln einer Eiche auch im Rahmen des Forschungsvorhabens durch eine ähnliche Beobachtung bestätigt werden konnte. (vgl. Kapitel 2.1, Aufgrabung Nr. 3). Jedoch konnte nicht ermittelt werden, ob das Temperaturfeld das Wachstum gefördert hat oder die Wurzel aus einem anderen Grund bzw. anderen Gründen zu der Leitung gewachsen ist. Darüber hinaus wurden aber auch Interaktionen zwischen Wurzeln anderer Bäume und Fernwärmeleitungen festgestellt (Kastanie und Platane). Wahrscheinlich sind hier eher die Bodenparameter als die Baumart entscheidend, denn die vorliegenden Bodenparameter waren in allen Fällen vergleichbar.

» *Hypothese C: Die Wasserversorgung der Wurzeln (z.B. diskontinuierlich, vgl. Wurzelentwicklung in Regenwasserkanälen) auch in warmen Böden muss gewährleistet sein. Hier ist der Versiegelungsgrad für das Zufließen von Oberflächenwasser maßgeblich. Hinweis: Der Porenraum hat einen Einfluss auf das Wasserhaltevermögen des Bodens.*

Bei den In-situ-Aufgrabungen konnte im Bereich der Bettungen tatsächlich ein geringerer Wassergehalt als in anderen Bodenschichten über der Sandbettung festgestellt werden. In den Wurzelwachstumsversuchen (vgl. Kapitel 4.1.2) konnte in Versuchskiste A in der ersten Wachstumsperiode bei geringer Bewässerung ein höherer Wassergehalt im oberen Bereich der Versuchskiste als in der Nähe der Heizpatrone festgestellt werden. Jedoch ist bei den In-

situ-Aufgrabungen kein direkter Zusammenhang zwischen der Interaktionsart (Wurzel an Leitung, Wurzel in Bettung oder kein Wurzeleinwuchs) und dem Wassergehalt feststellbar.

Ob die Unterschiede des Wassergehalts somit aufgrund der zunehmenden Tiefe oder aufgrund einer möglichen Wärmeabstrahlung der Fernwärmeleitung zu erklären sind, konnte auf Grundlage des Versuchsprogramms nicht ermittelt werden. Weitere Hintergründe dazu können ggf. in einem Folgevorhaben durch ergänzende Bodenproben (z.B. Ermittlung der Wassersättigung) und FE-Simulationen (z.B. mit Berücksichtigung von Wassertransport im Erdreich) ermittelt werden. Direkte Zusammenhänge zwischen Porenvolumen und Wassergehalt konnten bei den In-situ-Aufgrabungen nicht festgestellt werden.

» *Hypothese D (Heidger-Hypothese):*

Auf der Rohroberfläche setzen sich nach Verdunstung Mineralien ab, die der Pflanze als Nährstoff zur Verfügung stehen. Hierdurch wird das Wurzelwachstum gefördert. Hinweis: Die Grenzfläche zwischen Rohroberfläche und Bodenkörper wirkt wie eine durchgängige Bodenpore (Grenzflächenraum). Möglicher negativer Effekt: Es können sich auch Schadstoffe akkumulieren (wie z.B. kristallines Streusalz).

Im Rahmen des hier vorliegenden Forschungsvorhabens konnten keine Mineralien als Folge von Verdunstungen an den betrachteten Rohroberflächen festgestellt werden. Jedoch konnte u.a. bei einer Aufgrabung beobachtet werden, dass Wurzeln an Trennflächen zwischen unterirdischen Leitungen und Boden oder zwischen zwei Bodenschichten wachsen können (vgl. Kapitel 2.4). Jedoch wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens kein „Entlangwachsen“ von Wurzeln an Fernwärmeleitungen festgestellt.

» *Hypothese E: Durch die nachlassende Dämmwirkung des Isolationsmaterials (Alterung) erhöht sich die Bodentemperatur. Ältere Literatur geht von 80-90 % aus, die von Dämmung abgefangen wird (vgl. [57]), gibt aber keine Auskunft über den Alterungsprozess. Durch eine Temperaturerhöhung aufgrund einer verminderten Dämmwirkung beschleunigen sich alle Bodenprozesse und die jahreszeitliche Periodizität geht verloren. Die Wurzeln reagieren besonders empfindlich auf diese Veränderungen.*

Bei den Aufgrabungen wurden Fernwärmeleitungen unterschiedlicher Rohrarten und Rohralter betrachtet. Eine nachlassende Dämmwirkung wurde nicht untersucht. Jedoch sind auf Basis der durchgeführten In-situ-Aufgrabungen keine Unterschiede zwischen Rohralter und Interaktionsart festzustellen. Eine veränderte Periodizität von Bäumen an Baumstandorten konnte nicht ermittelt werden, da die Aufgrabungen i.d.R. Tagesbaustellen waren. Die Bäume

konnten somit nicht über ein ganzes Jahr beobachtet werden. Gespräche vor Ort mit den örtlichen Fernwärmeversorgern und z.T. Grünflächenämtern gaben keine Hinweise dazu, dass die jahreszeitliche Periodizität der untersuchten Bäume durch die Fernwärmeleitungen im Boden verändert wurde.

» *Hypothese F: Wachsen Wurzeln im Bereich von Fernwärmeleitungen verändern die erhöhten Bodentemperaturen die Vegetationsperioden der Stadtbäume und verändern das Wachstumsverhalten der ober- und unterirdischen Teile des Baumes. Die Auswirkungen können unterschiedlich sein. Falls beispielsweise der Laubfall verzögert wird, erhöht sich die Bruchgefahr bei Schneefall aufgrund der Blattflächen.*

Die Vitalität aller untersuchten Bäume war augenscheinlich gut. Eine regelmäßige Beobachtung der Bäume über ein ganzes Jahr wurde nicht durchgeführt. In Gesprächen mit den örtlichen Fernwärmeversorgern und z.T. Grünflächenämtern wurden keine Hinweise entnommen, dass z.B. verzögerter Laubfall an den betrachteten Bäumen bekannt ist. Auf Basis der In-situ-Aufgrabungen sind keine Auswirkungen auf die Vegetationsperioden feststellbar. Auch bei den Laborversuchen zum Einfluss der Wärme auf das Wurzelwachstum konnten an den Weidenstecklingen keine Veränderungen bzgl. der Vegetationsperiode beobachtet werden (vgl. Kapitel 4.1). Erfahrungen sprechen eher dafür, dass der Laubfall über die Tageslänge und Lufttemperatur, als durch Bodentemperatur getriggert wird. Dies bestätigen erste Beobachtungen hinsichtlich eines möglichen Einflusses der Straßenbeleuchtung auf den Laubfall.

5.1.2 Wurzeleinwuchs in KMR-Muffenverbindungen

Bei Outside-In-Versuchen (vgl. Kapitel 4.2) wurde beobachtet, dass Wurzeleinwuchs in vernetzte und unvernetzte KMR-Muffen nur möglich war, wenn sie nicht fachgerecht ausgeführt wurden und kein stoffschlüssiger Verbund zwischen Muffe und Rohroberfläche vorliegt. Es können zwar Wurzeln in den kleinen Spalt zwischen Muffenrohr und Umantelung des KMR wachsen, der auch bei fachgerecht ausgeführten Muffen (vernetzt ohne Schrumpfmanschette) vorhanden sein kann. Ein weiterer Einwuchs in den stoffschlüssigen Verbund bei fachgerecht ausgeführten Muffen wurde jedoch nicht festgestellt. Sofern bei der fachgerecht ausgeführten KMR-Muffe der gesamte Kontaktbereich zwischen Muffenrohr und KMR-Ummantelung mit Schmelzklebstoff ausgefüllt war (sichtbar durch Austritt des Schmelzklebstoffs am Muffenende), konnte auch der Wurzelanwuchs verhindert werden. Bei den In-situ-Aufgrabungen konnte kein Wurzelan- bzw. Wurzeleinwuchs in Muffen beobachtet werden.

5.1.3 Wurzelwuchs an Kunststoffmantelrohrleitungen

Die Eindrückversuche (vgl. Kapitel 4.3) zeigten, dass nach einer Wachstumsperiode die Rohrummantelung der Kunststoffmantelrohrleitungen durch das Wurzeldickenwachstum nicht beschädigt wurde. Es ist zu beobachten, dass sich die Wurzelform bei den Eindrückversuchen

an die örtlichen Gegebenheiten anpasst. Eine dadurch hervorgerufene negative Beeinflussung der Wurzeln bzw. Stecklinge konnten nicht beobachtet werden. Bei den In-situ-Aufgrabungen konnten ebenfalls keine Beschädigungen an den Rohroberflächen durch Wurzelwuchs oder negative Einflüsse auf die Vegetation festgestellt werden.

5.1.4 ZFSV als Schutz vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsraben

Die Untersuchungen im Versuchsfeld Dodesheide (vgl. Kapitel 4.4.2) zeigten, dass mit der eingesetzten ZFSV-Rezeptur über den Zeitraum von einem Jahr an den Baumarten Platane, Esche und Linde ein Wurzeleinwuchs in den ZFSV nicht festgestellt werden konnte.

Nach Literatur [28, 29] sind die wesentlichen Parameter für das Verhindern von Wurzeleinwuchs die Porosität und die Packungsdichte. Beim Vergleich der berechneten Porenvolumen des ZFSV im Versuchsfeld Dodesheide und der Sandbettungen der In-situ-Aufgrabungen ist festzustellen, dass der ZFSV ein höheres Porenvolumen besitzt als die Sandbettungen, mit Ausnahme der In-situ-Aufgrabungen Nr. 8 und Nr. 9. Die dortige Sandbettung wies ein mit dem ZFSV vergleichbares hohes Porenvolumen (≥ 40 Vol.-%) auf. Allerdings zeigten sich dort, im Gegensatz zum ZFSV, geringfügige Wurzelinteraktionen mit der Bettung. Bei Betrachtung der Porenvolumen aller In-situ-Sandbettungen kann festgehalten werden, dass Wurzeleinwuchs im Bereich von 22 bis 42 Vol.-% festgestellt werden konnten.

Die Korndichten des ZFSV waren vergleichbar mit den Korndichten der Sandbettungen der In-situ-Aufgrabungen und wurden zu ca. $2,7 \text{ g/cm}^3$ ermittelt. Die Trockendichten des ZFSV waren z.T. mit $1,5$ bis $1,6 \text{ g/cm}^3$ geringer als bei den Sandbettungen der In-situ-Aufgrabungen.

Die Aufgrabungsergebnisse zeigten, dass ebenfalls die (Wasser-)Durchlässigkeit von Böden im Zusammenhang mit möglichem Wurzeleinwuchs stehen kann (vgl. Kapitel 2.4). Die Durchlässigkeit des ZFSV wurde als schwach durchlässig ermittelt. Bei einer vergleichbaren schwachen Durchlässigkeit einer stark verdichteten Sandbettung bei Aufgrabung Nr. 2 wurde ebenfalls kein Wurzeleinwuchs festgestellt. Somit konnte in situ als ein geeigneter bodenmechanischer Parameter hinsichtlich der Wurzelfestigkeit die Durchlässigkeit ermittelt werden. In weiteren vergleichenden Untersuchungen sollten die Zusammenhänge zwischen der Durchlässigkeit von ZFSV und Sandbettungen genauer untersucht werden, um ermitteln zu können, bis zu welcher Durchlässigkeit Wurzeln einwachsen können und in welchen Boden Wurzeln wachsen, wenn sie an einer Trennfläche zwischen ZFSV und Sandbettung mit gleicher Durchlässigkeit anstehen.

Weitere Untersuchungen sind hinsichtlich der Zusammenhänge von Wurzelfestigkeit und Wasserdurchlässigkeit zwischen bindigen und nicht-bindigen Böden bzw. der Höhe des Anteils von Schluff und Ton in Böden notwendig. Im Boden im Versuchsfeld Dodesheide mit toni-

gen und schluffigen Anteilen ist die Wasserdurchlässigkeit mit 10^{-10} m/s sehr gering, das Porenvolumen mit 40,8 Vol.-% vergleichsweise hoch. In diesem Boden wurde vereinzelt Wurzelwuchs festgestellt. Dies könnte u.a. daran liegen, dass die Wurzeln durchgängige Poren aufgrund von biogenen Vorgängen (z.B. Wurmlöchern oder Mausegängen) erschlossen haben. Diese Vermutung wird dadurch unterstützt, dass unterhalb des ZFSV keine Wurzeln im anstehenden Boden festgestellt werden konnten, wobei in diesen Tiefen mit keinen biogenen Poren mehr zu rechnen ist. Diese Hypothese kann zurzeit angenommen werden, da in den ZFSV im Versuchsfeld und in In-situ-Sandbettungen mit Durchlässigkeiten von 10^{-7} m/s kein Wurzeleinwuchs festgestellt werden konnte.

Eine Aussage zum Porenvolumen von ZFSV war mittels Mikroskops nicht möglich, jedoch gaben die Aufnahmen einen wertvollen Hinweis zur maximalen Porengröße im ZFSV. Hierbei ist als Hypothese zum möglichen Wurzeleinwuchs festzuhalten, dass wenn keine durchgängigen oder tiefergehenden Poren in ausreichender Größe bzw. mit ausreichendem Durchmesser vorhanden sind, ein Wurzeleinwuchs in den ZFSV nicht stattfinden kann.

Enthält ZFSV Zement als Bindemittel, kann dies bei der Herstellung von ZFSV die Ursache für pH-Werte im alkalischen Bereich sein [29]. Der pH-Wert ist somit ein weiterer Parameter, der ggf. das Wurzelwachstum beeinflussen kann. Z.B. wird nach FLL [12] für Baumsubstrate ein maximaler pH-Wert von 8,5 für ein ausreichendes Baum- und Wurzelwachstum gefordert. Dabei wird zwischen kalkliebende (7,0 bis 8,5) und kalkmeidende (5,0 bis 7,0) Pflanzen unterschieden [12]. Bei Bäumen ist allerdings meist eine weite pH-Amplitude feststellbar und es ändern sich nur die in Symbiose vorkommenden Mycorrhiza-Pilzarten pH-abhängig.

Im Versuchsfeld Dodesheide konnte festgestellt werden, dass Wurzeln einer Linde im nicht ausgehärteten ZFSV mit einem pH-Wert (CaCl_2) von 8,1 und pH-Wert im Eluat von 8,6 gewachsen sind. In den ausgehärteten ZFSV mit pH-Werten im Eluat von über 11 waren hingegen keine Wurzeln (Linde, Platane und Esche) eingewachsen. Bis zu welcher maximalen Grenze Wurzeln wachsen können, ist in weiteren Laborversuchen zu untersuchen. Diese Beobachtung legt nahe, dass der ZFSV wegen seiner mechanischen Eigenschaften wurzelfest ist und nicht etwa wegen chemischer Eigenschaften wurzelfeindlich ist.

Nach LAGA [56] sind die pH-Werte des ZFSV im Versuchsfeld Dodesheide der Einbauklasse Z1.2 zuzuordnen. Dies bedeutet, dass ggf. beim Aushub eine weitere Verwertung bzw. Wiederverwertung des ZFSV durch den erhöhten pH-Wert negativ beeinflusst werden kann, zumindest innerhalb eines Jahres nach Einbau. Beim im Versuchsfeld eingesetzten ZFSV wurden der pH-Wert und die elektrische Leitfähigkeit oberhalb des Grenzwertes der Einbauklasse Z0 gemessen. Alle weiteren ermittelten Parameter aus Feststoff- und Eluatanalyse wurden als unkritisch deklariert und der Einbauklasse Z0 zugeordnet. Erste wissenschaftliche Untersu-

chungen von Simon [29] zeigten zudem, dass der pH-Wert eines ZFSV innerhalb von 56 Tagen von 12,5 auf 10,4 ausgespült werden kann. Dies führt zu der zusätzlichen Frage hinsichtlich der Umweltverträglichkeit von ZFSV, ob Ausspülungen des ZFSV das umliegende Erdreich negativ beeinflussen können.

Erste Ergebnisse zu Ausspülungen des pH-Wertes von ZFSV in das umliegende Erdreich im Versuchsfeld Dodesheide zeigten, dass in unmittelbarer Nähe im anstehenden Boden und Substrat ein, im Vergleich zu Bereichen im Versuchsfeld ohne ZFSV, erhöhter pH-Werte festgestellt werden konnte. Nach LAGA sind die pH-Werte im Eluat gemessen maßgeblich [56]. Alle im Versuchsfeld Dodesheide gemessenen Eluat-pH-Werte im anstehenden Boden und Substrat lagen unterhalb des maximalen Grenzwertes der Einbauklasse Z0 (<9,5 [56]).

Für den Einsatz von Baumsubstraten sind die Feststoff-pH-Werte (CaCl_2) maßgeblich [12]. Der im Versuchsfeld im direkten Kontaktbereich zum ZFSV ermittelte pH-Wert im Substrat lag mit 9,0 über dem Grenzwert von 8,5 nach FLL [12]. Bei 0,5 Meter Abstand im Substrat war der pH-Wert bereits wieder vergleichbar mit den Messwerten an einem Baumstandort ohne ZFSV. Bei den pH-Werten direkt am ZFSV war außergewöhnlich, dass der pH-Wert im Feststoff gemessen höher ist als der im Eluat gemessene pH-Wert. Daher sind weitere Messungen des pH-Wertes im Versuchsfeld notwendig, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

Eine Anomalie war bei den pH-Wert-Messungen im anstehenden Boden festzustellen. Der pH-Wert im anstehenden Boden direkt am ZFSV liegt mit 7,2 um 1,0 höher als der Vergleichswert ohne ZFSV und dennoch weit unterhalb des Grenzwertes von 8,5. Jedoch wurde der pH-Wert in 0,5 Meter Abstand zum ZFSV im anstehenden Boden mit 8,8 gemessen. Dies war wesentlich höher als zum Vergleichswert und über dem Grenzwert nach FLL [12]. Der pH-Wert in einem Meter Abstand fällt deutlich ab und ist im Bereich des Vergleichswerts ohne ZFSV. Warum der Messwerte in 0,5 Meter Abstand zum ZFSV wesentlich höher war als der Messwert direkt am ZFSV kann auf Basis der Messungen nicht abschließend identifiziert werden. Auch hier sind weitere Untersuchungen im Versuchsfeld für eine breitere statistische Aussagekraft notwendig. Jedoch ist festzuhalten, dass keine negativen Auswirkungen auf die Vitalität des Baumes nach einem Jahr Versuchslaufzeit augenscheinlich zu erkennen waren. In weiteren Langzeitmessungen sollte die Entwicklung des pH-Wertes in unterschiedlichen Tiefen im ZFSV, Substrat und anstehenden Boden ggf. auch unter dem ZFSV sowie die Vitalität der Bäume beobachtet werden, um die langfristige Umwelt- und Baumverträglichkeit von ZFSV weitergehend untersuchen zu können. Mit Blick auf eine ökologische Bilanzierung von ZFSV sollte die Wechselwirkung des pH-Wertes mit dem anstehenden Erdreich und die weitere Verwertung von ZFSV nach LAGA [56] Berücksichtigung finden und ggf. in Langzeit-Versuchen untersucht werden.

Nach der FGSV H ZFSV [58] werden ZFSV in Abhängigkeit von der einaxialen Druckfestigkeit nach 28 Tagen in leichte (bis 0,3 N/mm²), mittlere (von 0,3 bis 0,8 N/mm²) und schwere Wiederaushubfähigkeit (mehr als 0,8 N/mm²) eingeteilt. Die DWA A 139 [59] behandelt in der aktuellen Auflage ebenfalls die Verwendung von ZFSV und fordert zur Einhaltung eines bodenähnlichen Verhaltens u.a. die Einhaltung einer einaxialen Druckfestigkeit von maximal 0,3 N/mm², welches nach der Einteilung der FGSV H ZFSV noch einer leichten Wiederaushubfähigkeit entspricht. Erste Ergebnisse aus einem IKT-Warentest „ZFSV“ [60] an ZFSV-Proben verschiedener Festigkeiten bestätigen, dass händisches Lösen mit Hilfe eines Spatens von ZFSV oberhalb dieses Werts problematisch werden kann. Somit kann es bei Aufgrabungsarbeiten an ZFSV von höherer Festigkeit schnell zu erhöhtem Aufwand von mehr als leichtem Gerät (z.B. Spitzhacke und Minibagger) kommen. Dies hätte insbesondere an Baumstandorten negative Auswirkungen, wenn dort mit schwerem Gerät Aufgrabungsarbeiten durchgeführt werden müssen, da mit schwerem Gerät (z.B. Presslufthammer oder Bagger) die Wahrscheinlichkeit von Schäden (u.a. mechanische Verletzung von Baumstamm und Wurzeln durch Baugeräte, nachträgliche Verdichtung des Bodens) an Baum und Wurzeln steigt.

5.1.5 (Baum-)Substrate zur Förderung des Wurzelwachses

Die Beobachtungen am Versuchsfeld Dodesheide (vgl. Kapitel 4.4.1) und bei Aufgrabung Nr. 8 und 9 (vgl. Kapitel 2) zeigten, dass Baumsubstrate (im Versuchsfeld Dodesheide in Kombination mit vertikalen Belüftungsrohren) das Wurzelwachstum in diesen Bereichen fördern.

Im Versuchsfeld Dodesheide konnte ausgeprägtes Wurzelwachstum in den Substraten mit vertikalen Belüftungsrohren nach knapp zehn Jahren Versuchslaufzeit festgestellt werden. Der Großteil der Wurzelmasse befand sich in den Substraten. Aus den Substraten wuchsen stärkere Wurzeln in das umliegende Erdreich. Jedoch ist aufgrund des Prüfprogramms im hier vorliegenden Forschungsvorhaben nicht ersichtlich, ob die Wurzeln aufgrund des Substrates, der Belüftungsrohre oder der Kombination aus Beidem gewachsen sind.

Bei den Aufgrabungen Nr. 8 und Nr. 9 war das Substrat anscheinend so wurzelwachstumsfördernd, dass kaum Wurzeln aus dem Substrat in die tiefer liegende Bettung gewachsen sind. Dies bestätigt die Annahmen des Dichtefallenmodells (vgl. Kapitel 1.1.1), dass Wurzeln an einer Trennfläche zwischen porenreichen und porenarmen Böden bevorzugt in den porenreichen Bereich wachsen.

5.2 Weiterentwicklung eines Wurzelwachstumsmodells

Es gibt Evidenzen für jedes der verschiedenen Wurzelwachstumsmodelle. In der biologischen Literatur wird insbesondere die Bedeutung der Schwerkraftwahrnehmung in der Calyptra (Wurzelhaube) der Wurzelspitze durch Statolithenstärke (Stärkekörner) thematisiert [61, 62]. Einzelne Modelle oder Hypothesen können als weitgehend widerlegt betrachtet werden, z.B. die Vorstellung, Wurzeln würden durch Wasser und Nährstoffe zum Einwuchs in Leitungen veranlasst. Andere stehen unverändert als Gegensätze da und sind teilweise auf stichhaltige und reproduzierbare Experimente begründet.

Im Kontext der in diesem Forschungsvorhabens behandelten Fragestellung scheint es vor allem darum zu gehen, welche Faktoren in konkreten Situationen die dominierenden sind. Das Dichtefallenmodell ist nicht das einzig richtige, sondern es wurde in Situationen untersucht, in denen die Substratdichte der dominierende Faktor war. Für die Erklärung der in früheren Projekten untersuchten Schäden war dies absolut ausreichend.

Künftig wird es jedoch darum gehen müssen, nicht nur Schäden an technischer Infrastruktur zu vermeiden, sondern eine möglichst gute Koexistenz von Gehölzen und technischer Infrastruktur auf begrenztem Raum zu ermöglichen. Diese Aufgabe geht weit über eine reine Schadensvermeidung hinaus und verlangt einen integrativen Ansatz, in dem die richtigen Teilaspekte verschiedener Modelle zu einem Gesamtbild zusammengefügt werden. Das verlangt mit Sicherheit Modellprojekte mit Begleituntersuchungen und längerfristigem Monitoring. Solche Modellprojekte können zwangsläufig nicht unter den Rahmenbedingungen der aktuellen Regelwerke stattfinden, da diese entweder aus der Sicht des Landschaftsbaus oder aus der Sicht des Leitungsbaus auf reine Schadensvermeidung ausgelegt sind. Im Ergebnis sind die Zielvorstellungen dieser Regelwerke oft inkompatibel, da sie auf Haftungsausschluss angelegt sind und nicht auf eine gemeinsame Optimierung.

Es ist sinnvoll, bei der Betrachtung des Wurzelwachstums zwei Prozesse getrennt zu untersuchen. Das ist zum einen das Spitzenwachstum. Das Spitzenwachstum ist entscheidend dafür, wo die Wurzel hinwächst und damit wie und ob sie Bereiche erreicht in denen sie überhaupt Schäden verursachen kann. Zum anderen muss das sekundäre Dickenwachstum betrachtet werden. Durch wachsenden Raumbedarf seitlich der Wurzel kann es hier zu Konflikten mit technischer Infrastruktur kommen.

Spitzenwachstum der Wurzeln

Hier scheint es zwei verschiedene Modelle zu geben. Zum einen ist seit langem bekannt, dass in der Wurzelhaube der Wurzelspitze Stärkekörner in den Zellen eingelagert sind und durch eine Reihe von Experimenten konnte gezeigt werden, dass die Wirkung der Schwerkraft auf

diese Stärkekörner perzipiert werden kann und die Wachstumsrichtung der Wurzel (in Richtung der Schwerkraft) beeinflusst. Die Signalkette ist auf molekularer Ebene noch nicht vollständig aufgeklärt, der Effekt als solcher ist aber zuverlässig belegt [61, 62]. So orientieren auf rotierenden Tellern fixierte Keimpflanzen ihre Wurzeln in Richtung der Resultierenden aus Zentrifugal- und Schwerkraft.

Bei früheren Untersuchungen von IKT und dem Lehrstuhl für Evolution und Biodiversität der Pflanzen wurde das sogenannte „Dichtefallen-Modell“ beschrieben. Dieses Modell beschreibt die Wachstumsvorgänge, die zum Auffinden und letztlich auch zum Einwachsen in Rohrleitungen führen sehr zuverlässig (vgl. Kapitel 1.1.1). Auf diesem Modell basierende Verfahren zur Vermeidung von Wurzeleinwuchs haben sich als zuverlässig erwiesen. Das Modell geht davon aus dass in einem heterogenen Substrat die gelatinöse Wurzelspitze aus mechanischen / hydraulischen Gründen in Richtung der geringeren Substratdichte abgelenkt wird und dass in der Folge deswegen auch ein Zurückwachsen in das dichtere Substrat nicht mehr möglich ist.

Zunächst scheinen Schwerkraftperzeption und Dichtefalle zwei einander ausschließende Erklärungsansätze zu sein. Bei den Schwerkraftversuchen wurde aber auch mit der einseitigen Entfernung der Calyptra experimentiert. Dies hatte ein verstärktes Wachstum auf der Seite ohne Calyptra und damit eine Krümmung zu der Seite mit Calyptra hin zur Folge. Auf der Seite ohne Calyptra ist eine Perzeption der Schwerkraft schlechterdings unmöglich. Eine logische Erklärung könnte sein, dass letztlich nicht die Schwerkraft selbst für die Wachstumsänderung verantwortlich ist, sondern die Verformung der Calyptra. Wenn die Schwerkraft die einzige Kraft ist, die auf die Calyptra wirkt (Experimente in Lösungen oder auf Drehtellern für die Einwirkung der Zentrifugalkraft) kommen die in den einschlägigen Lehrbüchern beschriebenen Ergebnisse zustande [61, 62]. Die Calyptra kann aber auch durch andere mechanische Einflüsse verformt werden die damit das Richtungswachstum beeinflussen. Solche mechanischen Einflüsse sind z.B. Dichteunterschiede im Substrat.

Beide Ansätze, Schwerkraftperzeption und Dichtefalle wirken damit in gleicher Weise über die Verformung der Wurzelhaube auf das Richtungswachstum der Wurzelspitze. Bei Überwiegen eines Effektes kann dieser alleine über die Wachstumsrichtung entscheiden. Botanische Lehrbücher [61, 62] und die Autoren des Dichtefallen-Modells haben hier lediglich die für ihre Aufgabe oder experimentellen Möglichkeiten wesentlichen unterschiedlichen Extremfälle analysiert.

Dickenwachstum der Wurzel

Beim Dickenwachstum der Wurzel handelt es sich um ein kambiales sekundäres Dickenwachstum, an dem dieselben Gewebe und Wachstumsvorgänge beteiligt sind, wie auch in den

oberirdischen Pflanzenteilen. Es ist deswegen sinnvoll, Effekte des Dickenwachstums, insbesondere Interaktionen mit Hindernissen bei Wurzeln und Stämmen oder Ästen zu vergleichen.



Abbildung 85: Das Schild an der Eiche wird nicht vom Baum weggedrückt, sondern umwachsen

Bei Schildern, Zäunen und anderen Hindernissen, die sich Stämmen oder Ästen in den Weg stellen, kann man nie beobachten, dass sie verdrängt / weggeschoben werden. Auch die Etiketten an den Bäumen im botanischen Garten werden im Lauf der Zeit eingewachsen (Beispiel vgl. Abbildung 85). Schneidet man solche Stücke durch, so zeigt die Oberfläche der Pflanze eine sehr genaue Abformung des Hindernisses. Das Kontaktgewebe ist kleinzellig und wirkt zerdrückt, als ob hier erhebliche Kräfte gewirkt hätten. Nach der alten Regel „Actio gleich Reactio“ wären gleiche Kräfte auf das Hindernis zu erwarten. Allerdings kann man die damit verbundenen Verformungen selbst bei leicht deformierbaren Hindernissen wie Maschendrahtzäunen nie beobachten.

Bei den im hier beschriebenen Forschungsvorhaben durchgeführten Versuchen wurde eine Weide zwischen zwei Fernwärmeleitungen wachsen gelassen. Bei einem Abstand von 1,8 cm zwischen den Rohren betrug der Durchmesser der Weide über der Engstelle 4,5 cm und im Bereich der Engstelle war die Weide deutlich abgeflacht, ohne dass der geringste Effekt auf das Rohr selbst erkennbar war.

Das bedeutet aber nicht, dass Deformationen von Rohren durch Wurzeln nicht möglich wären. Sie sind z.T. bei Kunststoffleitungen bekannt. Die Genese dieser Schäden ist jedoch sehr wahrscheinlich ganz anders als das bisher angenommen wurde und gleicht eher der Genese von Belagschäden im Wegebau.

Auch im Wegebau wurde angenommen, dass z.B. Pflaster- oder Plattenbeläge durch Wurzeln angehoben werden. Es hat sich aber gezeigt, dass durch thermische Bewegung (Aufwölbung durch oberseitige Erwärmung) oder Quellungseffekte im Substrat unter dem Belag oder sogar zwischen den Steinen minimale Freiräume entstehen. Die Bewegungen sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung sind im Extremfall leicht beobachtbar (vgl. Abbildung 86). Sie finden aber in kleinerem Umfang weniger deutlich ausgeprägt sehr häufig statt. Es ist entscheidend, dass so entstandene Räume bereits ergebnisrelevant sind, wenn sie etwa den Platz des halben Durchmessers einer Zelle (also etwa $20\mu\text{m}$) haben. Solche Räume entstehen insbesondere dort, wo eine kraftschlüssige Verzahnung wie im Substrat fehlt, also an im Substrat eingebetteten Strukturen mit glatter Oberfläche wie Rohrleitungen. In diese minimalen Spalten hinein findet dann ein Dickenwachstum der Wurzel statt und wenn durch Abkühlen oder Austrocknen die Beläge in die Ausgangslage zurück könnten, geht das nicht mehr uneingeschränkt und hat sogar eine oberflächliche Verletzung des Pflanzengewebes zur Folge. Erste Ergebnisse liegen hierzu bereits vor [63]. Durch ständige Wiederholung dieses Prozesses entsteht an diesen Stellen nach und nach ein Wundkallus, der in seiner Auswirkung die Schäden durch das reine Dickenwachstum der Wurzel bei weitem übertreffen kann. Auch wenn der Druck auf den Belag oder das Rohr nicht durch das Wachstum der Wurzel, sondern erst nach dem Wachstum durch eine Bewegung des Substrates entsteht, ist die Folge im Ergebnis vergleichbar. Da allerdings für die Schäden dann nicht primär das Wurzelwachstum, sondern die Bodenmechanik maßgeblich ist, sind die Risiken und Gefahrenzonen und die möglichen Gegenmaßnahmen andere als gemeinhin angenommen wurde.

Bisher liegt eine Reihe von Schadensanalysen vor, die nur teilweise veröffentlicht sind [63] und die solche Annahmen stützen. Es fehlt aber ein experimenteller Nachweis mit geeigneten Kontrollversuchen. Nur so kann gezeigt werden, ob sich die scheinbar plausiblen Thesen nachweisen lassen. Durch entsprechende Experimente soll nachgewiesen werden, ob Schäden durch das Dickenwachstum von Wurzeln tatsächlich auf Substrate mit wassergehaltssabhängigen Bodenbewegungen beschränkt sind oder dort häufiger auftreten, wie schnell sie auftreten und wie groß die auf die technische Infrastruktur abgeleiteten Kräfte sind.



Abbildung 86: Neben vertikalen Bodenbewegungen sind auch reversible, bis in den Wurzelhorizont reichende Schwund- und Quellungsbewegungen bekannt. Ihre Auswirkung auf Schadenereignisse durch Wurzeln ist jedoch bisher nicht untersucht.

6 Fachübergreifendes Konzept zur Trassenfindung

Zur strukturierten und transparenten Entscheidungsfindung, bei der Auswahl einer optimalen Trassenführung zum Neubau bzw. zur Erneuerung von Fernwärmeleitungen, kann eine Szenarienanalyse durchgeführt werden. Im Folgenden werden der Aufbau, das Vorgehen und die Umsetzung einer Szenarienanalyse im Fernwärmekontext erläutert. Beginnend mit den theoretischen Hintergründen wird anschließend eine beispielhafte, im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeitete, Szenarienanalyse vorgestellt, die anhand eines Praxisprojekt getestet/validiert wurde. Dabei werden die Ergebnisse aus dem DBU-Forschungsvorhaben „Analyse zur ökologischen und ökonomischen Bewertung offener und geschlossener Bauverfahren zur Herstellung unterirdischer Infrastrukturmaßnahmen“ [64] berücksichtigt.

6.1 Aufbau einer Bewertungshierarchie mit Hilfe des Analytischen Hierarchie Prozesses

Das multikriterielle Verfahren "Analytischer Hierarchie Prozess (kurz: AHP)" ist eine Sonderform der klassischen Nutzwertanalyse, das von dem Mathematiker Thomas Lorie Saaty in den 70er Jahren in den USA entwickelt wurde. Die Besonderheit ist die mehrstufige Anordnung von Kriterien und deren Gewichtung, die über mehrere Ebenen abläuft. Über die wachsende Feingliederung der Kriterien entsteht eine Baumstruktur [65]. Der Grundgedanke liegt darin, die Ziele und möglichen Lösungsalternativen in einer hierarchischen Struktur zu erfassen und zu gliedern. Der AHP basiert auf dem paarweisen Vergleich von Kriterien und Alternativen, welcher mit einer 9-Punkte-Bewertungsskala (AHP-Skala) durchgeführt wird. Im Zuge dieser Bewertung werden im Anschluss über verschiedene Matrizenberechnungen Eigenvektoren berechnet, welche zu einem Gesamtergebnis aggregiert werden [66].

Als analytisch wird der AHP deswegen bezeichnet, weil er die Problemkonstellation in all ihren Abhängigkeiten analysiert. Die entscheidungsrelevanten Informationen werden in eine hierarchische Struktur gebracht. Bei dem AHP handelt es sich ferner um einen Prozess, weil ein prozessualer Ablauf vorgegeben wird, wie Entscheidungen strukturiert und analysiert werden können. Die Entscheidungsfindung und das Ergebnis können mit Hilfe des AHP nachvollziehbar gestaltet werden. Eine weitere Stärke des AHP liegt in dem Aufdecken von Inkonsistenzen, wenn bspw. ein Entscheider unlogische Bewertungen abgegeben hat [67].

Vergleich der Kriterien

Anhand einer 9-Punkte-Werteskala werden im folgenden Schritt die Entscheidungskriterien gewichtet. Die Kriterien werden untereinander paarweise im Hinblick auf alle relevanten Elemente der nächst höheren Stufe verglichen [68]. Die von Saaty verwendete Skala beinhaltet ebenso die Verwendung von reziproken Skalenwerten, die von ihm zwingend vorschrieben werden. D.h., wenn ein Element eine etwas größere Bedeutung hat als ein anderes Element

(z.B. Wert 3), bedeutet dies im Umkehrschluss, dass dem anderen Element der Wert 1/3 zugeordnet wird. Bei einem umgekehrten Verhältnis werden demzufolge die Kehrwerte der in Tabelle 2 aufgezeigten Skalenergebnisse verwendet.

Tabelle 15: 9-Punkte-Bewertungsskala, nach [69]

	Definition	Interpretation
1	Gleiche Bedeutung	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächsthöhere Element
3	Etwas größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
5	Erheblich größere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich größere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
7	Sehr viel größere Bedeutung	Die sehr viel größere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt.
9	Stark dominierend	Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte	

Tabelle 16: Reziproke 9-Punkte-Bewertungsskala

	Definition	Interpretation
1	Gleiche Bedeutung	Beide verglichenen Elemente haben die gleiche Bedeutung für das nächsthöhere Element
1/3	Etwas geringere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine etwas geringere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
1/5	Erheblich geringere Bedeutung	Erfahrung und Einschätzung sprechen für eine erheblich geringere Bedeutung eines Elements im Vergleich zu einem anderen.
1/7	Sehr viel geringere Bedeutung	Die sehr viel geringere Bedeutung eines Elements hat sich in der Vergangenheit klar gezeigt.
1/9	Stark unterlegen	Es handelt sich um den größtmöglichen Bedeutungsunterschied zwischen zwei Elementen.
1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Zwischenwerte	

Berechnung der Kriteriengewichte

Mit Hilfe des Eigenwertverfahrens lässt sich nunmehr eine Rangfolge der Kriterien (bzw. später der Alternativen) berechnen. Dabei werden die Vergleichswerte der vorangegangenen Matrizen in normierte Werte umgewandelt. Diese Werte werden anschließend in einen normierten Eigenvektor überführt, der die relative Wichtigkeit der verschiedenen Attribute abbildet und

somit eine Gewichtung der Kriterien darstellt. Je höher der Wert ist, desto höher ist die Präferenz für das jeweilige Kriterium. Dies gilt für alle Bewertungen, welche auf Basis der 9-Punkte-Bewertungsskala durchgeführt werden.

Alle Vergleichswerte werden dabei spaltenweise addiert und normiert. Die aufbereiteten Vergleichswerte werden zeilenweise addiert und erneut normiert. Die ausgewiesenen Spaltenwerte geben dann den Eigenvektor an. Die Vorgehensweise ist in der folgenden Tabelle 17 angegeben [70].

Tabelle 17: Schema zur Berechnung der AHP-Gewichtung [70]

Attribute	A_1	A_2	A_n	Normierte Evaluationsmatrix			Zeilen-summe $\sum r_i$	Normierter Eigenvektor w_i
				A_1	A_2	A_n		
A_1	$A_{11} = 1$	A_{12}	A_{1n}	$\frac{A_{11}}{C_1}$	$\frac{A_{12}}{C_2}$	$\frac{A_{1n}}{C_n}$	r_1	$w_1 = \frac{r_1}{n}$
A_2	$A_{21} = \frac{1}{A_{12}}$	$A_{22} = 1$	A_{2n}	$\frac{A_{21}}{C_1}$	$\frac{A_{22}}{C_2}$	$\frac{A_{2n}}{C_n}$	r_2	$w_2 = \frac{r_2}{n}$
A_n	$A_{n1} = \frac{1}{A_{1n}}$	$A_{n2} = \frac{1}{A_{2n}}$	$A_{nn} = 1$	$\frac{A_{n1}}{C_1}$	$\frac{A_{n2}}{C_2}$	$\frac{A_{nn}}{C_n}$	r_n	$w_n = \frac{r_n}{n}$
Spalten-summe $\sum C_i$:	$C_1 = \sum_{i=1}^n A_{i1}$	$C_2 = \sum_{i=1}^n A_{i2}$	$C_n = \sum_{i=1}^n A_{in}$	1	1	1	n	1

Bewertung der Alternativen

Die Gewichtung der Kriterien erfolgt grundsätzlich auf allen Hierarchiestufen. Aus diesem Grund steigt die Anzahl der durchzuführenden Vergleiche stark an, wenn der Entscheider zu Beginn mehrere Ebenen und eine große Anzahl an Kriterien festgelegt hat. Anschließend wird durch die multiplikative Attributsgewichtung eine Verbindung der Gewichtungen über die Hierarchiestufen hinweg erzeugt. Aus diesen Berechnungen werden die globalen Gewichte bestimmt. Dazu wird jede untergeordnete Kriterienebene mit dem Gewicht der übergeordneten Kriterienebene multipliziert.

Anschließend werden die lokalen Alternativengewichte je Merkmal mit den globalen Gewichten der darüber liegenden Kriterien multipliziert, so dass man globale Alternativengewichte erhält. Mit einer anschließenden Summenbildung der globalen Alternativengewichte je Alternative ergibt sich ein Präferenzindex, der die Wichtigkeit jeder Alternative darstellt. Man erhält dann die Gewichtungen der Alternativen im Hinblick auf das Ziel in der obersten Ebene.

Ergebnisphase

Im Zuge der Ergebnisphase werden im Wesentlichen die Ergebnisse der Gesamtbewertung präsentiert. Dies hat den Vorteil, dass Ergebnisse mit Projektbeteiligten diskutiert werden können. Darüber hinaus können in Form von Sensitivitäts- und Performanceanalysen weitere Analysen hinsichtlich einzelner Kriterien und Alternativen erfolgen. Sinnvoll ist dies vor allem bei Entscheidungen, wenn zwei Alternativen fast identische Gewichtungen vorweisen.

Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse geht man der Frage nach, wie stark sich die Rangfolge der Alternativen durch Veränderung einzelner Kriterien verändern kann. Ziel einer Sensitivitätsanalyse ist es demnach, Auswirkungen einer Gewichtsänderung auf die Alternativenbewertung zu zeigen. Dieses Instrument stellt ein effektives Hilfsmittel dar, um die Stabilität eines Ergebnisses zu analysieren, vor allem dann, wenn zwei Alternativen sehr knapp beieinander liegen. Innerhalb der Analyse werden die Auswirkungen von Veränderungen von Gewichtungen einzelner Kriterien bei identischer Modellstruktur untersucht. Der Entscheider untersucht einzelne Kriterien, indem die Gewichtung sukzessive verändert wird. Es lassen sich dann Graphen in Abhängigkeit der Veränderung des Gesamtgewichtes darstellen. So wird schnell deutlich, ab welcher Gewichtung es unter Umständen zu einem Rangwechsel der Alternativen kommt. Sind für einen Rangwechsel der Alternativen sehr geringe Verschiebungen der Gewichte notwendig, so ist das Ergebnis instabil. In einem solchen Fall ist die Entscheidung erneut zu bewerten. Im Rahmen einer solchen Sensitivitätsanalyse lassen sich weitere Untersuchungen anstellen. Insbesondere kann die gezielte Untersuchung einzelner Kriterien hinsichtlich der Auswirkung auf Alternativen vorgenommen werden. Dabei werden bspw. Kriterien einer Ebene herausgelöst und der direkte Einfluss eines jeden Kriteriums auf die Alternativen dargestellt.

In einer Sensitivitätsanalyse will der Anwender bspw. ermitteln, wie sich die Alternativen verhalten, wenn ein Kriterium stärker oder auch schwächer bewertet wird. Dadurch kann der Anwender direkt erkennen, wie sich das Gesamtergebnis verändert. So kann man grafisch aufzeigen, wie groß der Einfluss eines jeden Kriteriums auf Alternativen sein kann. Abbildung 87 stellt ein Ergebnis einer solchen Sensitivitätsanalyse dar. Beispielhaft werden hier drei Funktionsverläufe von Alternativen gezeigt. Der Graph zeigt wie sich die Alternativen verhalten würden, wenn das hier zu untersuchende Kriterium stärker (Abszisse nach rechts) oder schwächer (Abszisse nach links) bewertet werden würde.

Da die qualitativen Bewertungen zumeist rein subjektiv erfolgen, kann es durchaus vorkommen, dass diese inkonsistent sind. Bis zu einem geringen Grad sind Inkonsistenzen erlaubt und gefährden die gesamte Entscheidung nicht. Bei hoher Inkonsistenz muss der Entscheidungsprozess und somit die Bewertung erneut durchgeführt werden. Zur Überprüfung der Konsistenz wird der von Saaty eingeführte Konsistenzindex CI und die Konsistenzratio CR

(consistency ratio) berechnet, wobei letzterer der maßgebende Wert für die Überprüfung der Bewertung ist.

Für die Höhe von CR gilt 0,1 als Richtwert. Wird dieser Wert überschritten, gilt der Entscheidungsprozess als inkonsistent und wird Auswirkungen auf die Interpretierbarkeit und Logik der Ergebnisse haben. Der Entscheider sollte demnach den Bewertungsprozess überdenken und erneut durchführen. Im Rahmen der vorliegenden Projektbewertung wird der Konsistenzindex zumindest für alle Kriterienbewertungen mit aufgeführt. Bei einer Bewertung von lediglich zwei Kriterien/Alternativen beträgt der Konsistenzindex stets 0,0, so dass dieser Wert im Rahmen der Alternativenbewertung nicht mehr explizit aufgeführt wird.

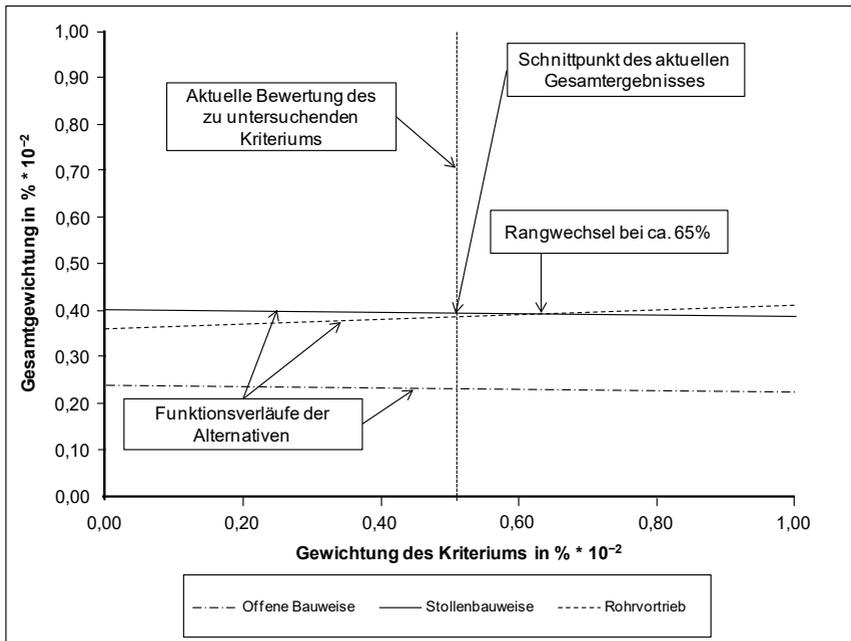


Abbildung 87: Beispielhafte Sensitivitätsanalyse

6.2 Praxisbeispiel

Die Übertragung der Bewertungssystematik zur Szenarienanalyse erfolgt auf ein exemplarisches Beispiel einer bereits ausgeführten Fernwärmeleitung. Es handelt sich hierbei um die Verlegung zweier Fernwärmeleitungen in einer Stadt in Deutschland. Kern dieser Szenarienanalyse ist, zwei Trassenalternativen zu untersuchen. Es soll anhand einer ganzheitlichen Betrachtung über den Lebenszyklus mit beispielhafter Detailplanung gezeigt werden, wie zwei

Fernwärme-Trassenalternativen miteinander verglichen werden können. Im Folgenden werden Bewertungen der erarbeiteten Kriterien durchgeführt, um die Vorgehensweise der entwickelten Methodik zu verdeutlichen. Die Kriterien wurden in zwei Workshops mit dem interdisziplinären Projektkreis entwickelt.

6.2.1 Projektbeschreibung

Beide Trassenalternativen beginnen im Heizkraftwerk einer Müllverbrennungsanlage. Von dort startet die Trasse in östlicher Richtung. Im Bereich eines kleineren Naturschutzgebietes verläuft Trassenalternative 1 in südlicher Richtung entlang einer Hauptverkehrsstraße. Hier wurde die Verlegung der Leitungen in dem vorhandenen Grünstreifen neben der Straße geplant. Trassenalternative 2 hingegen verläuft zunächst in süd-östlicher Richtung durch ein Naturschutzgebiet. Beide Trassen schließen an ein Teilstück einer Hauptverkehrsstraße in nord-östlicher Richtung. Trasse 1 verläuft schließlich in Höhe der Grundstücksgrenze der städtischen Mülldeponie entlang dieser Grenze zu gewerblich genutzten Grundstücken in Richtung Osten. Hierbei ist zu erwähnen, dass die Trasse stets auf städtischem Grund in unmittelbarer Nähe der Grenze zu den gewerblich genutzten Grundstücken liegt. Trasse 2 hingegen verlässt die Hauptstraße in Höhe eines kleineren Naturschutzbereiches sowie privaten Besitzes in süd-östlicher Richtung. Hier sollen die Leitungen unterhalb einer befahrenen Straße mit teilweisem Baumbestand verlegt werden. Am Ende des Gewerbegebietes werden beide Trassenalternativen wieder zusammengeführt. Die Zusammenführung endet mit der Erreichung des Dükers. Zu erwähnen ist darüber hinaus, dass an diesem Ende beide Trassen wieder in öffentlichen Grund liegen, allerdings wieder naturschutzrechtliche Aspekte zu berücksichtigen waren.

6.2.2 Planungsprozess

Für die Untersuchung der Trassenfindung sind die Wirkungsbereiche Landschaftsökologie, Städtebau und Raumordnung, Verkehr, Technik und Wirtschaftlichkeit bearbeitet worden. Hierbei wurden zwei Varianten beurteilt, wobei die Variante 1 mit einer hauptsächlich Verlegung in unbefestigte Bereiche ausgewählt wurde. Es wurde ebenfalls ein Vorentwurf mit vielen dazu benötigten Informationen, wie beispielsweise zeichnerische Darstellung des Gesamtentwurfs, dargestellt. Eine Kostenberechnung wurde nur für die Variante 1 durchgeführt, welche die Autoren dieses Berichtes nicht einsehen konnten. Im weiteren Planungsverfahren konnte die Abwägung aller von den Trassen betroffenen öffentlichen und privaten Belange gegeneinander und der Ausgleich widerstrebender Interessen beobachtet werden. Im Rahmen des Vorentwurfs sind weitere Gutachter (Ökologen) konsultiert worden.

6.2.3 Analyse der ursprünglichen Trassen-Bewertung

Aus den vorhandenen Unterlagen sowie Expertengesprächen stehen lediglich ein Genehmigungsplan sowie ein Variantenplan zur Verfügung. Informationen, die das Nachvollziehen der Entscheidungen hätten unterstützen sollen, liegen im Rahmen dieser Untersuchung nicht vor.

Die Varianten sind entsprechend ihrer Wirkung auf Verkehr, Städtegestaltung, Wirtschaftlichkeit und Umwelt verglichen worden. Informationen über die Gesamtabwägung der Kriterien konnten nicht ermittelt werden. Allerdings erläuterten die Projektverantwortlichen, dass die Kosten für Variante 2 deutlich über den Kosten der Variante 1 beziffert wurden. Eine konkrete Bewertungsmethode wurde nicht genutzt, lediglich eine Gegenüberstellung der Kosten sowie der zu erwartenden Schwierigkeiten (Privatbesitz, Naturschutzgebiet, Baumstandorte etc.) wurde durchgeführt. Es lässt sich beobachten, dass alle Alternativen eine grundsätzliche Eignung aufweisen und in Bezug auf diese Eignung eine Gesamtabwägung der Vor- und Nachteile durchgeführt worden ist. Als Ergebnis ergibt sich die Variante mit dem meisten Nutzen. Diese Vorgehensweise entspricht im klassischen Sinne der Methode der Nutzungswertanalyse.

Die ursprüngliche Bewertung wurde durch die hauseigene Planungsabteilung durchgeführt, wobei keine weiteren Informationen über den beteiligten Entscheidungsträger vorhanden sind.

Aus den Informationen über die Variantenkriterien sind nur quantitative und teils qualitative Indikatoren zu erkennen. Es ist nicht deutlich nachvollziehbar, ob der Trassenvergleich nach gleichartigen Bewertungsmaßstäben durchgeführt worden ist, z.B. ob für alle Kriterien der Varianten (Städtebau, Verkehrsverhältnisse, straßenbauliche Infrastruktur, Wirtschaftlichkeit und Umwelt) identische Indikatoren verwendet worden sind.

Wie aus den Expertengesprächen ersichtlich, unterscheiden sich die Varianten vor allem in den anfallenden Kosten. Wäre die Summe der direkten Kosten (z.B. aus Investition, Betrieb und Unterhalt) den gewichteten Nutzenpunkten gegenübergestellt worden, hätte sich leichter nachvollziehen lassen, wieso die Planer sich für die Empfehlung der Variante 1 entschieden haben. Da dies jedoch nicht getan wurde, lässt sich die Wahl der Variante 1 vor allem im Hinblick auf wirtschaftliche Gründe und nicht anhand des resultierenden Nutzens erklären.

Wie gut die Indikatoren die Validität des gelegten Zielsystems repräsentieren, lässt sich nicht eindeutig feststellen. Darüber hinaus lässt sich nicht genau erkennen, wie mehrere Entscheidungen im Rahmen des Entscheidungsprozesses berücksichtigt worden sind. Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Transparenz und somit die Nachvollziehbarkeit der Entscheidung nicht gänzlich gegeben sind, wobei klar hervorzuheben ist, dass die Autoren keine Beurteilung des vorgenommenen Bewertungsprozesses abgeben können. Es kann durchaus gerechtfertigt sein, die Varianten primär nach den erwarteten Kosten zu bewerten. Weiterhin ist es möglich, dass andere Bewertungskriterien angesetzt wurden, die aber für Dritte/ Außenstehende im Nachgang nicht mehr plausibel/ transparent nachzuvollziehen sind.

Bauverfahren

Bei dem Entwurf, der auf den Grundlagen beider Varianten basiert, ist eine offene Bauweise geplant. Ohnehin wurde im Projektkreis FW-Vegetation darüber gesprochen, welche Bauverfahren zur Ausführung kommen. Die Projektkreismitglieder wiesen darauf hin, dass bei einem Fernwärmeneubau in der Regel die Verlegung der Leitungen in offener Bauweise mit Sandbettung und Kunststoffmantelrohrleitungen vorgenommen wird. Die Auswahl des Bauverfahrens mit Bettung und Rohrwerkstoff ist der Trassenfindung untergeordnet [71]. Aus den o.g. Gründen wird eine Szenarienanalyse zur bestmöglichen Trassenfindung durchgeführt, um im Rahmen des hier vorliegenden Forschungsvorhabens einen großen Praxisnutzen für die Fernwärmebranche zu erlangen und zukünftig den Prozess zur Auswahl der geeignetsten Trassenalternative mit diesem Verfahren bestmöglich zu unterstützen.

6.2.4 Aufstellen einer Bewertungshierarchie für die Szenarienanalyse mit Kriterienentwicklung

Im Folgenden werden verschiedene Kriterien nach Kategorien vorgestellt, die bei der Entscheidung für eine Trassenalternative für den Bau von Fernwärmeleitungen zu beachten sind. Die Kriterien wurden u.a. in einem Workshop des Projektkreises „FW-Vegetation“ entwickelt [71]. Die Laborergebnisse und In-situ-Aufgrabungen aus dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben zeigen, dass keine schädlichen Interaktionen zwischen Fernwärmeleitungen und Wurzeln zu erwarten sind. Neue Erkenntnisse hinsichtlich von Schutzmaßnahmen aus dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben fließen mit in die Betrachtung ein. Die nachfolgenden Kriterien stellen nur einen Anhaltspunkt dar und sind für die Detailplanung eines konkreten Projekts stets individuell zu prüfen und anzupassen. Die Kriterien können sowohl qualitativ als auch quantitativ sein, je nach vorhandenen Informationen.

Im Rahmen dieser Analyse werden die Kriterien, die bei der Wahl der Trasse zu berücksichtigen sind, dargestellt. Das Ziel beläuft sich darauf, zunächst so gut wie möglich Kriterien nach projektbezogenen Kategorien zu erstellen und zu beschreiben und danach, je nach untersuchter Trasse, die Kriterien zu prüfen und anzupassen. Primärkriterien werden in technisch, sozio-ökologisch und ökonomisch aufgeteilt. In einer zweiten Ebene werden weitere Detail-Kriterien erstellt. In den folgenden Tabellen, Tabelle 18 bis Tabelle 21, sind die Kriterien dargestellt.

Tabelle 18: Technische Kriterien

Kriterien Bauzeit	
Bauzeit	<ul style="list-style-type: none"> • Bauzeit der verschiedenen Bauverfahren • Verlängerung der Gesamtbauzeit durch evtl. Sondermaßnahmen
Kriterien Baudurchführung	
Flächenmanagement	<ul style="list-style-type: none"> • Flächenbedarf • Baustelleneinrichtungsflächen (Aufenthaltsräume, Lagerungsräume, Separieranlagen, Absetzteiche usw.) • Ausbauflächen im öffentlichen Verkehrsraum • Flächen für Ent- und Versorgungsleitungen • Dauer der Beschränkung
Transportwege	<ul style="list-style-type: none"> • Transport des Ausbruchsmaterials (hydraulischer oder mechanischer Transport) • Strecke zwischen den Baustelleneinrichtungsflächen (Länge, Höhenunterschied) • Verbesserung der Erreichbarkeit • Fahrbahneigenschaften (Transportgeschwindigkeiten, Aufwand der Reifen und Unterhaltung, Unterhalt des Gleiskörpers) • Fahrleistung der Transportwagen • Bau und Unterhaltung der Transportwege
Rechtliche Realisierbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Mögliche öffentlich-rechtliche Probleme, die eine Realisierung der Trasse unmöglich machen könnten (z.B. Tangieren privaten Eigentums) • Abschätzung der rechtlichen Hindernisse bis zum Baubeginn
Rohrwerkstoff	<ul style="list-style-type: none"> • Art des Materials • Besondere Verbindungen
Kriterien Baugrundrisiko	
Baugrundrisiko	<ul style="list-style-type: none"> • Abweichungen zwischen der Prognose und dem tatsächlichen Befund während des Baus • Beschränkte Kenntnis der geologischen Gegebenheiten und der mechanischen Eigenschaften des Felsens (Störzonen, Wasserzutritte etc.) • Treffsicherheit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse aus geophysikalischen Messungen, Probeentnahmen aus Sondierbohrungen

Tabelle 19: Sozio-ökologische Kriterien – Teil 1

Kriterien Auswirkungen von Emissionen	
Lärm	<ul style="list-style-type: none"> • Lärm durch den Bau der Trasse • Lärm durch Maschinen oder Fahrzeuge
Luftverunreinigungen	<ul style="list-style-type: none"> • Verunreinigung durch die Baumaßnahme (Staubentwicklung, Abgase) • Verunreinigung durch Verkehr: Transport von/zur Baustelle • Verunreinigung durch Verkehr: Umleitung des Straßenverkehrs
Kriterien Boden	
Geländeverformung	<ul style="list-style-type: none"> • Ausmaß der Geländeformung im Bereich der Trasse
Veränderung der Bodenmatrix	<ul style="list-style-type: none"> • Veränderung der Bodenstruktur • Versiegelung biologisch aktiver Bodenoberfläche bzw. infiltrationsfähiger Standorte durch Fahrbahnen, Betriebsgebäude etc.

Tabelle 20: Sozio-ökologische Kriterien – Teil 2

Kriterien Wasser	
GW-Stau	<ul style="list-style-type: none"> • Ausmaß des Grundwasserstaus
GW-Belastung	<ul style="list-style-type: none"> • Belastung des Grundwassers durch Baustoffe
Verschmutzung von Oberflächenwasser	<ul style="list-style-type: none"> • Verschmutzung von Oberflächenwasser durch Baustoffe
Kriterien Ressourcenverbrauch	
Energieverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> • Höhe des Energieverbrauchs
Wasserverbrauch	<ul style="list-style-type: none"> • Wasserverbrauch durch Maschinen • Wasserverbrauch für sonstige bautechnische Verfahren • Wasserverbrauch für Bewässerung der Straßenbäume während der Bau-phase
Verfüllmaterialien	<ul style="list-style-type: none"> • z.B. für die Herstellung von Betonzuschlagsstoffen oder zum Auffüllen von Baugruben • Bei Einsatz von ZFSV: Betrachtung einer ökologischen Bilanzierung hinsichtlich der Wiederaushubfähigkeit sowie Wiederverwertung und Umweltverträglichkeit hinsichtlich des pH-Wertes
Kriterien Natur	
Flora	<ul style="list-style-type: none"> • Beanspruchung gestalterischer Grünflächen • Fällung oder Entfernung von Bäumen, Bewuchs • Beeinträchtigung der raumprägenden Gehölze (bauzeitbedingt) • Beschädigung von Gehölzbeständen im Stamm-, Kronen- und Wurzelbereich • Verlust sonstiger stadtbildprägender Gehölze • Wirkung auf die Vegetationsbestände durch Veränderung des Grundwasserhaushaltes
Fauna	<ul style="list-style-type: none"> • Zerstörung von Lebensräumen • Auswirkungen auf den Lebensraum von besonders schützenswerten Arten
Erhaltung der ökologischen Funktion	<ul style="list-style-type: none"> • Zerstörung der Lebensraumfunktionen durch Schadstoffbelastungen • Zerschneidung von Lebensraumfunktionen durch Bodenaushub, Böschungen oder Betriebsanlagen • Zerschneidung von Lebensräumen (bauzeitbedingte Trennwirkung)
Erholungsgebiete	<ul style="list-style-type: none"> • Bauzeitbedingter Verlust von Erholungsgebieten (Freiräume, Grünflächen, Radwege, Fuß-/ Radwegequerungen, Kleingartenanlagen)
Soziale Kriterien	
Landschaftliche Faktoren	<ul style="list-style-type: none"> • Beeinträchtigung des Landschafts-/Ortsbildes (Beeinträchtigung der Gestaltqualität durch den Verlust von Gehölzstrukturen, Grünflächen etc.) • Kultur- und sonstige Sachgüter (Ausmaß der Auswirkungen auf Kultur und sonstige Sachgüter)
Menschliche Faktoren	<ul style="list-style-type: none"> • Baustellenlärm durch die erforderlichen Baugeräte und die damit ausgeführten Arbeiten • Lärmbelästigung infolge von Umleitungen bzw. Straßensperrung • Schadstoffemissionen • Einschränkung der Anlieger

Tabelle 21: *Ökonomische Kriterien*

Kriterien Lebenszykluskosten	
Initialkosten und Baukosten	<ul style="list-style-type: none"> • Plankosten • Baukosten mit Berücksichtigung von Baumschutzmaßnahmen und aktiven und passiven Schutzmaßnahmen • Kosten durch Beschädigung des Straßenbaus • Kosten durch Behinderung des öffentlichen Personalnahverkehrs (Haltestellen, Verschiebung der Gleise) • Verlegung von querenden Leitungen
Kriterien Folgekosten	
Oberflächenfolgekosten	<ul style="list-style-type: none"> • Oberflächenfolgekosten im Straßenbelag aus Änderungen des Straßenoberbaus oder partiellem Austausch von Bodenschichten (z.B. Setzungen oder Hebungen, Kantenbrüche und Ausbrüche im Asphalt)
Schäden am Privateigentum	<ul style="list-style-type: none"> • Schadensersatz leisten
Verkehrsbeeinträchtigung	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten aus der Veränderung der Fahrzeiten (Länge und Dauer der Umwege, Kraftstoffverbrauch) • Verlust von Parkplätzen • Kosten aus Unfällen durch Verkehrsumlenkung
Schaden am Bewuchs	<ul style="list-style-type: none"> • Kosten aus Sanierungsmaßnahmen oder Wiederherstellungsmaßnahmen z.B. von Bäumen und Wurzeln

6.2.5 Darstellung einer Hierarchie

Für eine Entscheidungsfindung wird zunächst ein hierarchischer Aufbau der Kriterien benötigt, der vollständig die örtlichen Randbedingungen sowie die Auswirkungen der Trassenalternativen auf seine Umgebung erfasst. Für die Ermittlung der Kriterien wurden die verschiedenen Randbedingungen aus dem Genehmigungsplan und den Expertengespräche sowie die getroffenen Annahmen berücksichtigt (vgl. Abbildung 88). Ebenso wurden während zwei Workshops mit dem interdisziplinären Projektkreis „FW-Vegetation“, die im November 2018 sowie Mai 2019 in Osnabrück und Frankfurt am Main stattgefunden haben [71, 72], allgemeine Kriterien und weitere wichtige Informationen zusammengetragen, welche in die Hierarchie- sowie Kriterienentwicklung mit eingeflossen sind.

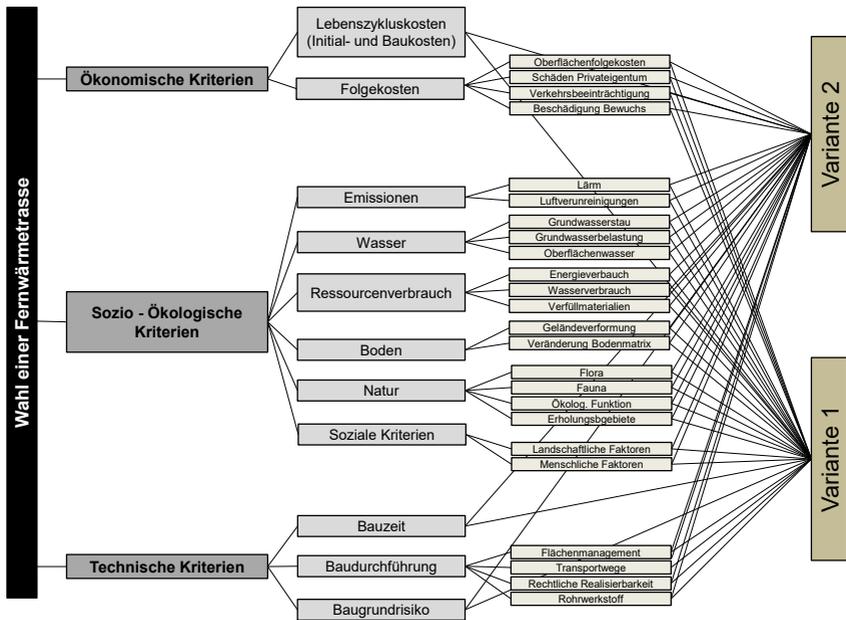


Abbildung 88: Bewertungshierarchie

6.2.6 Anwendung der Bewertungsmethodik

Im vorherigen Abschnitt wurden bereits die projektbezogenen Kriterien und die projektbezogene Hierarchie dargestellt. Die Elemente einer Ebene der zuvor erstellten Hierarchie werden in Paarvergleichen miteinander verglichen, um so die Gewichtungsfaktoren für die spätere Ermittlung der optimalen Trassenalternative zu erhalten. Die Berechnung erfolgt mit dem Software-Tool DEMUS [73]. Die projektspezifischen Tool-Ergebnisse sind in Anlage 7 dargestellt.

Im Folgenden werden auch die unterschiedlichen Gewichtungen sowie die Herangehensweise an die Bewertung der einzelnen Ebenen und Alternativen erläutert, um das Nachvollziehen des angewendeten Verfahrens und der Entscheidungsfindung zu vereinfachen. Basis der Bewertung und Gewichtung des ausgewählten Projektes sind die theoretischen Grundlagen, die Workshops im Projektkreis FW-Vegetation sowie die Praxisunterlagen und Besprechungen mit dem Fernwärmeversorgungsunternehmen.

6.2.7 Bewertung des ausgewählten Projektes

Da im Vorfeld des Projektes noch ungenügend Informationen im Hinblick auf die Prioritäten der einzelnen Kriterien vorhanden sind, ist eine unterschiedliche Gewichtung der Primärkriterien nicht möglich. Daraus ergibt sich die Entscheidung, den verschiedenen Primärkriterien den gleichen Stellenwert zuzuordnen (vgl. Tabelle 22).

Tabelle 22: Gewichtung der Primärkriterien

Kriterium	Gewichtung
Technische Kriterien	0,333
Sozio-Ökologie	0,333
Ökonomische Kriterien	0,333
Konsistenzwert	0,000

Ökonomische Kriterien

Das am stärksten gewichtete Ökonomische Kriterium sind die Lebenszykluskosten, da dieser Bereich den größten Kostenblock umfasst und für die Baumaßnahme anfällt. Folgekosten werden in diesem Fall bei der Planung des Projektes zwar berücksichtigt, jedoch nicht so stark wie das Kriterium Lebenszykluskosten gewichtet (vgl. Tabelle 23). Grund ist, dass beide Trassen in offener Bauweise erstellt werden und die Folgekosten ähnlich hoch ausfallen werden. Die offene Bauweise wird als Standard-Bauweise im Fernwärmeleitungsbau eingesetzt. Geschlossene Bauweisen werden i.d.R. nur bei Unterquerungen von Hindernissen bzw. Objekten, wie z.B. Straßen, Bahntrassen und Gewässern, durchgeführt [71].

Tabelle 23: Gewichtung der Subkriterien der Ökonomischen Kriterien

Kriterium	Gewichtung
LZK: Initial- und Baukosten	0,90
Folgekosten	0,10
Konsistenzwert	0,000

Hinsichtlich der Folgekosten erfordern Verkehrsbeeinträchtigungen beispielsweise die Einrichtung von Umleitungen oder Ampeln, und verursachen somit Kosten durch erhöhten Spritverbrauch, Zeitverlust etc. und sind deshalb am stärksten gewichtet. Oberflächenfolgekosten stehen an zweiter Stelle, da auch an dieser Stelle hohe Kosten durch Umbau der vorhandenen Verkehrsführung entstehen können. Durch umsichtige Planung können Schäden am Privateigentum und Bewuchs weitestgehend vermieden werden, was sich positiv auf die Gesamtkosten auswirkt. Die Gewichtung der Folgekosten ist in Tabelle 24 dargestellt.

Tabelle 24: Gewichtung der Subkriterien der Folgekosten

Kriterium	Gewichtung
Oberflächenfolgekosten	0,238
Verkehrsbeeinträchtigung	0,634
Schäden Bewuchs	0,085
Schäden Privateigentum	0,044
Konsistenzwert	0,068

Sozio-ökologische Kriterien

Im Rahmen der sozio-ökologischen Subkriterien erhalten die Kriterien Natur sowie Ressourcenverbrauch die höchsten Stellenwerte, da diese innerhalb des Projektes die größte Belastung darstellen. Der kontrollierte Verbrauch von Ressourcen stellt heutzutage eine wichtige Aufgabe in Bezug auf die Ökologie dar. Der Betrachtungsraum zeigt darüber hinaus die typischen Merkmale einer relativ verdichteten, durch urbane/industrielle Nutzung geprägten Stadtlandschaft. Ebenso sind einzelne Naturschutzgebiete zu durchqueren. Für die Kriterien Boden und Wasser ist jeweils eine geringe Gewichtung gewählt worden, da mit einer geringeren Beeinträchtigung zu rechnen ist, zumal beide Trassen ähnliche Randbedingungen aufweisen. Den Kriterien Emissionen und Soziale Kriterien sind in diesem Zusammenhang ebenfalls geringe Gewichtungen vergeben worden (vgl. Tabelle 25).

Tabelle 25: Gewichtung der Subkriterien der sozio-ökologischen Faktoren

Kriterium	Gewichtung
Emissionen	0,057
Ressourcenverbrauch	0,333
Boden	0,051
Wasser	0,039
Soziale Kriterien	0,067
Natur	0,453
Konsistenzwert	0,040

Aufgrund unzureichender Informationen werden beide Sub-Kriterien der Emission gleich bewertet (vgl. Tabelle 26).

Tabelle 26: Gewichtung der Subkriterien der Emissionen

Kriterium	Gewichtung
Lärm	0,500
Luftverunreinigungen	0,500
Konsistenzwert	0,000

Folgend werden die Subkriterien des Ressourcenverbrauchs bewertet (vgl. Tabelle 27). Als Standard-Verfüllmaterial werden im Fernwärmeleitungsbau Sandmischungen nach DIN EN 13941-2 [74] eingesetzt. Weitere Verfüllmaterialien, wie z.B. ZFSV, spielen bisher in der Praxis eher eine untergeordnete Rolle. Die Ergebnisse aus Laborversuchen und In-situ-Aufgrabungen des hier vorliegenden Forschungsvorhabens zeigen, dass eine Interaktion zwischen Wurzeln und Fernwärmerohrleitungen schadensfrei möglich ist. Ein Einsatz von ZFSV als reine Schutzmaßnahme vor Wurzeleinwuchs ist als zusätzlicher Schutz möglich, jedoch sollten dabei weitere Anforderungen an den ZFSV insbesondere hinsichtlich der Rohrstatik berücksichtigt werden [75]. Somit ist die Auswahl des Verfüllmaterials derzeit i.d.R. eher untergeordnet zu betrachten. Aus diesem Grund wird für beide Trassenalternativen als Verfüllmaterial Sand ausgewählt. Werden in Zukunft weitere Verfüllmaterialien vermehrt eingesetzt bzw. im Planungsprozess diskutiert, so können diese auch in der Szenarienanalyse berücksichtigt werden.

Tabelle 27: Gewichtung der Subkriterien der Ressourcenverbrauch

Kriterium	Gewichtung
Energieverbrauch	0,114
Wasserverbrauch	0,072
Verfüllmaterialien	0,814
Konsistenzwert	0,052

Hinsichtlich des Subkriteriums Boden werden die Geländevertorfung und Bodenmatrix gleich gewichtet, da die Folgen im Vergleich beider Trassen identisch ausfallen können (vgl. Tabelle 28).

Tabelle 28: Gewichtung der Subkriterien des Bodens

Kriterium	Gewichtung
Geländeverformung	0,500
Veränderung Bodenmatrix	0,500
Konsistenzwert	
	0,000

Innerhalb der Subkriterien des Wassers weist die Grundwasserbelastung den größten möglichen negativen Einfluss auf die Umwelt vor und ist folglich am stärksten gewichtet, zumal sich in unmittelbarer Nähe auch ein Fluss befindet (vgl. Tabelle 29).

Tabelle 29: Gewichtung der Subkriterien des Wassers

Kriterium	Gewichtung
Grundwasserstau	0,125
Grundwasserbelastung	0,750
Verschmutzung Oberflächenwasser	0,125
Konsistenzwert	
	0,000

Folgend wird das Subkriterium Natur gewichtet. Die Nutzungs-/Biototypen als Lebensraum wildwachsender Pflanzen sind von hoher Bedeutung. Da gerade die Flora während der Bauzeit besonders beeinträchtigt wird (z.B. für Baustelleneinrichtungen, Lagerplätze, Arbeitsstreifen) ist diese somit am höchsten zu bewerten.

Bezüglich trassennaher Lebensräume, vor allem der straßenbegleitenden Gehölzbäume und Baumreihen ist anzumerken, dass derartige Habitate durchaus in etwas größerem Maße vorhanden sind. Gebiete zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere sind im vorliegenden Untersuchungsraum dementsprechend vorhanden. Aufgrund der Eingriffe in die Flora, Fauna und Erholungsgebiete, ist die Erhaltung der ökologischen Funktion am drittstärksten bewertet worden.

Die Analyse und Bewertung der Grünflächen und des Freiraumes zeigen, dass sich die besonders bedeutsamen Bereiche über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilen und somit als empfindlich eingestuft worden sind. Daher die etwas stärkere Gewichtung der Erholungsgebiete.

Die Ergebnisse des hier vorliegenden Forschungsvorhabens zeigen, dass Wärmefelder im Erdreich von nach Stand der Technik betriebenen Fernwärmeleitungen das Baum- und Wur-

zelwachstum nicht beeinflussen. Somit fließen die Wärmefelder von Fernwärmeleitungen, insbesondere an Baumstandorten, nicht in die Bewertung von Trassenalternativen mit ein. Führen diese Forschungsergebnisse in Zukunft dazu, dass Fernwärmetrassenalternativen häufiger an Baumstandorten berücksichtigt werden, so sind beim Neubau der Fernwärmetrassen Vorgaben zum Baum- und Wurzelschutz zu beachten. Die Gewichtung der Subkriterien Natur ist in Tabelle 30 dargestellt.

Tabelle 30: Gewichtung der Subkriterien der Natur

Kriterium	Gewichtung
Flora	0,489
Fauna	0,307
Erhaltung ökologischer Funktion	0,078
Erholungsgebiete	0,126
Konsistenzwert	0,054

Es ergeben sich gestalterisch unbefriedigende Auswirkungen durch die Einrichtung von baustellenbedingten Anlagen bei den sozialen Kriterien. Diese Anlagen sind mehr oder weniger unabhängig von den Trassenalternativen in reichlichem Umfang vorhanden. Ein Bauprojekt sollte immer mit der notwendigen Rücksichtnahme in Bezug auf die Betroffenen angegangen werden. Heutzutage ist der Widerstand der betroffenen Menschen zu einflussreich, um diesen Aspekt zu ignorieren bzw. ihn nicht im Rahmen der Projektplanung mit einzubeziehen. Es ist davon auszugehen, dass jede neue Lärmbelästigung oder Schadstoffemissionen von den direkten Anwohnern bzw. Gewerbetreibenden als Belastung empfunden wird, woraus eine starke Gewichtung für die menschlichen Faktoren abzuleiten ist.

Tabelle 31: Gewichtung der Subkriterien der sozialen Kriterien

Kriterium	Gewichtung
Landschaftliche Faktoren	0,200
Menschliche Faktoren	0,800
Konsistenzwert	0,000

Technische Kriterien

Im Rahmen der Gewichtung der technischen Kriterien wird dem Kriterium der Bauzeit die höchste Gewichtung zuteil (vgl. Tabelle 32). Hierbei fließen politische Hintergründe wie z.B. Kostensparnisse und geringere Belästigung der Anwohner/Gewerbetreibender mit ein. Dar-

über hinaus verringern sich durch eine kürzere Bauzeit die durch den Bauvorgang entstehenden Störungen des Verkehrs. Als zweitwichtigstes Kriterium folgt das Risiko, das sich auf die Bauzeit auswirken kann. Betrachtet man den Stopp einer Verlegung aufgrund unerwarteter Bodenstörungen, der zu einer Verlängerung der Bauzeit führt, bringt diese schwerwiegenden Nachteile mit sich als beispielsweise eine verlängerte Behinderung der oberirdischen Verkehrsinfrastruktur.

Tabelle 32: Gewichtung der Subkriterien der technischen Faktoren

Kriterium	Gewichtung
Baudurchführung	0,073
Bauzeit	0,761
Baugrundrisiko	0,166
Konsistenzwert	0,071

Da im Rahmen des Projektes der Bedarf an Fläche relativ groß ist, der vorhandene Bereich durch die angrenzenden Gewerbegebiete sowie Verkehrsstraßen jedoch beschränkt ist, bedarf es eines gut konzipierten Flächenmanagements. Folglich ist das Flächenmanagement etwas stärker gewichtet als alle anderen Kriterien. Die Bewertung der Subkriterien der Baudurchführung sind in Tabelle 33 dargestellt.

Tabelle 33: Gewichtung der Subkriterien der Baudurchführung

Kriterium	Gewichtung
Flächenmanagement	0,400
Transportwege	0,200
Rechtliche Realisierbarkeit	0,200
Rohrwerkstoffe	0,200
Konsistenzwert	0,000

6.2.8 Bewertung der Alternativen

Bei den Alternativen handelt sich um die in Kapitel 6.2.1 dargestellten Trassenvarianten. Jedes Kriterium und Subkriterium mit direkter Verbindung zu den beiden Alternativen werden in Bezug auf diese Alternativen gegenübergestellt. Im Folgenden werden die Gewichtungsfaktoren der Alternativen in tabellarischer Form in Bezug zu dem jeweiligen Kriterium gestellt und für jede getroffene Entscheidung eine kurze Erläuterung bzw. Beschreibung aufgeführt, die diese begründet.

Eine intensive Bewertung ist hier nicht möglich, da die Informationen in zu geringem Umfang vorliegen. Für die Bewertung werden Untersuchungen und Erläuterungen aus den vorhandenen Unterlagen, Vor-Ort-Begehungen sowie Experteninterviews herangezogen und Annahmen getroffen. Daher handelt es sich um qualitative Kriterien, die subjektiv durch die Autoren nach bestem Wissen bewertet werden.

Es wird grob geschätzt, dass die Initialkosten für Trassenvariante 2 bedeutend höher sind als die der Trassenvariante 1. Das liegt in erster Linie auch daran, dass im Zuge der Trassenvariante 2 die Leitungen teilweise unter einer befahrenen Straße verlegt werden müssen und somit Straßen aufgerissen werden. Darüber hinaus sind aufgrund von Bestandsbäumen im Verlauf der Trassenalternative 2 vor der Baumaßnahme Suchschachtungen hinsichtlich des Wurzelwuchs in der geplanten Trasse und während der Tiefbauarbeiten Baum- und ggf. Wurzelschutzmaßnahmen notwendig, wodurch mit weiteren Kosten für Alternative 2 zu rechnen ist. Ggf. sind aufgrund des Standortes und einer möglichen starken Ausprägung des Wurzelwuchses auch weitere bauliche aktive und/oder passive Schutzmaßnahmen sinnvoll, wodurch ebenfalls die Kosten steigen könnten. Somit erhält Trassenalternative 1 die höhere Bewertung für die Initial- und Baukosten (vgl. Tabelle 34).

Tabelle 34: Variantenvergleich des Sub-Kriteriums der Ökonomischen Kriterien

AHP	Qualitativ	
2. Ebene	Lebenszykluskosten (Initial- und Baukosten)	
1	Trassenvariante 1	0,857
2	Trassenvariante 2	0,143

Oberflächenfolgekosten entstehen erst nach Beendigung des Bauvorhabens und sollten mehr in der Trassenvariante 2 auftreten. Bei den Kriterien Verkehrsbeeinträchtigung sowie Beschädigung am Bewuchs ist ebenfalls Variante 1 etwas besser eingestuft worden, da in Trasse 2 mit mehr Verkehr sowie mehr Baumbewuchs zu rechnen ist. Das Schadenspotential am Privateigentum wird für beide Varianten gleich bewertet (vgl. Tabelle 35).

Tabelle 35: Variantenvergleich der Subkriterien der Folgekosten

AHP	Qualitativ	
3. Ebene	Oberflächenfolgekosten	
1	Trassenvariante 1	0,667
2	Trassenvariante 2	0,333
3. Ebene	Verkehrsbeeinträchtigung	
1	Trassenvariante 1	0,667
2	Trassenvariante 2	0,333
3. Ebene	Beschädigung Bewuchs	
1	Trassenvariante 1	0,667
2	Trassenvariante 2	0,333
3. Ebene	Schäden am Privateigentum	
1	Trassenvariante 1	0,500
2	Trassenvariante 2	0,500

Für beide Alternativen ist keine zusätzlich große Lärmbelastung sowie Luftverunreinigung zu erwarten, da beide Alternativen in offener Bauweise erstellt werden sollen (vgl. Tabelle 36).

Tabelle 36: Variantenvergleich der Subkriterien der Emissionen

AHP	Qualitativ	
3. Ebene	Lärm	
1	Trassenvariante 1	0,500
2	Trassenvariante 2	0,500
3. Ebene	Luftverunreinigung	
1	Trassenvariante 1	0,500
2	Trassenvariante 2	0,500

Der Energieverbrauch beider Alternativen ist gleichbedeutend bewertet. Grund dafür ist, dass für einen Unterschied des Energieverbrauchs der Alternativen zu vielen Annahmen getroffen werden müssten. Es könnte sein, dass bei Alternative 2 mehr Energie verbraucht wird, da z.B. ein deutlich größerer Eingriff notwendig sein wird. Allerdings kann es auch aufgrund der etwas

schwierigeren Zugänglichkeit zu der Alternative 1 zu einem höheren Energieverbrauch kommen. Folglich werden hier beide Alternativen mit 0,500 bzw. mit 1 gemäß der Saaty Skala gewichtet. Der Wasserverbrauch ist bei Alternative 2 wahrscheinlich am größten, da während der Tiefbauarbeiten ggf. eine Bewässerung von freiliegenden Wurzeln durchgeführt werden müsste. Als Verfüllmaterial wird für beide Alternativen eine Sandbettung eingesetzt, womit beide Alternativen mit 0,500 gewichtet werden (vgl. Tabelle 37).

Tabelle 37: Variantenvergleich der Subkriterien des Ressourcenverbrauchs

AHP	Qualitativ	
3. Ebene	Energieverbrauch	
1	Trassenvariante 1	0,500
2	Trassenvariante 2	0,500
3. Ebene	Wasserverbrauch	
1	Trassenvariante 1	0,667
2	Trassenvariante 2	0,333
3. Ebene	Verfüllmaterialien	
1	Trassenvariante 1	0,111
2	Trassenvariante 2	0,889

In Bezug auf die Geländeformverformung und Veränderung der Bodenmatrix werden beide Alternativen zunächst gleich bewertet, weil beide Trassen durch die entsprechenden Sicherungsmaßnahmen als setzungsarm ausgeführt gelten. Ebenso wird für beide Trassenalternativen der gleiche Verfüllstoff verwendet, so dass eine Veränderung der Bodenmatrix für beide Alternativen nicht zu erwarten ist (vgl. Tabelle 38).

Tabelle 38: Variantenvergleich des Subkriteriums des Bodens

AHP	Qualitativ	
3. Ebene	Geländeformverformung	
1	Trassenvariante 1	0,500
2	Trassenvariante 2	0,500
3. Ebene	Veränderung der Bodenmatrix	
1	Trassenvariante 1	0,500
2	Trassenvariante 2	0,500

Eine Grundwasserbelastung sowie ein Grundwasserstau sind aufgrund des gewählten Bauverfahrens für beide Trassenalternativen nicht zu erwarten, so dass beide Alternativen gleich bewertet werden. Oberflächengewässer sind zwar vorhanden, es ist allerdings nur mit einer Verschmutzung des Regenwassers durch Bodenaushub zu rechnen. Dementsprechend werden die beiden Alternativen als gleich wichtig bewertet (vgl. Tabelle 39).

Tabelle 39: Variantenvergleich der Subkriterien des Wassers

AHP	Qualitativ	
3. Ebene	Grundwasserstau	
1	Trassenvariante 1	0,500
2	Trassenvariante 2	0,500
3. Ebene	Grundwasserbelastung	
1	Trassenvariante 1	0,500
2	Trassenvariante 2	0,500
3. Ebene	Verschmutzung Oberflächenwasser	
1	Trassenvariante 1	0,500
2	Trassenvariante 2	0,500

Bezüglich der Flora ergeben sich während der Bauzeit vor allem bei Trassenalternative 2 Gefährdungen angrenzender Gehölzbestände im Stamm-, Kronen- und Wurzelbereich. Betroffen sind hier Flächen in einer Länge von ca. einem Kilometer. Tiere sind im vorliegenden Planungsraum vor allem in den kleineren Naturschutzgebieten vorhanden. Es wird davon ausgegangen, dass sich bodennah bewegende Tierarten während der Durchführung vor allem bei Trassenalternative 2 beeinträchtigt werden, weil die Naturschutzgebiete gequert werden. Die Bewertung für das Kriterium Erhaltung der ökologischen Funktion beruht hauptsächlich auf Eingriffen in den Boden und dadurch auf den Lebensraum von Pflanzen und Tieren. Da der Einfluss auf Flora und Fauna für Alternative 1 als geringer gesehen wird, erhält diese die höhere Bewertung. Dadurch wird auch die Erhaltung der ökologischen Funktion etwas höher bewertet. Der Verlust erholungsrelevanter Grünflächen (Erholungsgebiete) erscheint unvermeidbar für beide Alternativen. Es wird angenommen, dass Trassenalternative 1 weniger temporär baubedingte Inanspruchnahme von Grünflächen benötigt. Als logische Konsequenz erhält diese Alternative die bessere Bewertung (vgl. Tabelle 40).

Tabelle 40: Variantenvergleich der Subkriterien der Natur

AHP	Qualitativ	
3. Ebene	Flora	
1	Trassenvariante 1	0,667
2	Trassenvariante 2	0,333
3. Ebene	Fauna	
1	Trassenvariante 1	0,667
2	Trassenvariante 2	0,333
3. Ebene	Erhaltung der ökologischen Funktion	
1	Trassenvariante 1	0,667
2	Trassenvariante 2	0,333
3. Ebene	Erholungsgebiete	
1	Trassenvariante 1	0,667
2	Trassenvariante 2	0,333

Die wesentlichen Beeinträchtigungen der Gestaltqualität durch den Verlust prägender Gehölzstrukturen oder die Einrichtung von Betriebsgebäuden sind im Zuge der Bauarbeiten unvermeidbar, so dass mit einer Beeinträchtigung der Landschaftlichen Faktoren zu rechnen ist. Für beide Alternativen werden die gleichen Eingriffe vorhergesagt, so dass beide Alternativen gleich gewichtet werden.

Während der Bauzeit sind die Einwohner/Gewerbetreibende der Trassenalternative 2 im mittelbaren, als auch im unmittelbaren Baugebiet durch Erschütterungen/Lärm/Verkehrsbeeinträchtigungen etc. stärker betroffen als bei der Trassenvariante 1. Daher sind die menschlichen Faktoren für die Trassenvariante 2 schlechter bewertet (vgl. Tabelle 41).

Tabelle 41: Variantenvergleich der Subkriterien der sozialen Kriterien

AHP	Qualitativ	
3. Ebene	Landschaftliche Faktoren	
1	Trassenvariante 1	0,500
2	Trassenvariante 2	0,500
3. Ebene	Menschliche Faktoren	
1	Trassenvariante 1	0,667
2	Trassenvariante 2	0,333

In Bezug auf die Bauzeit ist gemäß den Angaben der Projektbeteiligten davon auszugehen, dass die Trassenalternative 1 schneller realisiert werden kann. Aus diesem Grund wird diese Alternative etwas besser bewertet (vgl. Tabelle 42).

Tabelle 42: Variantenvergleich des Subkriteriums der Technischen Kriterien

AHP	Qualitativ	
2. Ebene	Bauzeit	
1	Trassenvariante 1	0,750
2	Trassenvariante 2	0,250

Konsequenzen unerwarteter Störungen durch den Boden sind für beide Alternativen gleichbedeutend, womit sich ein ähnliches Baugrundrisiko ergibt. Es müsste eine genauere Untersuchung vorgenommen werden, um die Risiken hierbei besser zu beurteilen. Folglich werden beide Alternativen gleich bewertet (vgl. Tabelle 43).

Tabelle 43: Variantenvergleich des Subkriteriums der Technischen Kriterien

AHP	Qualitativ	
2. Ebene	Baugrundrisiko	
1	Trassenvariante 1	0,500
2	Trassenvariante 2	0,500

Folgend werden die Subkriterien zur Baudurchführung gewichtet. In Bezug auf das Kriterium Flächenmanagement wird Trassenalternative 2 besser bewertet. Die Auswirkungen der vorübergehenden Flächenbeanspruchung beschränken sich auf die Bauzeit. In den bei der Bewertung vorliegenden Zeichnungen sind einige Flächen genannt worden, die in der Alternative 1 schwierig zu erreichen sind (Grenze Deponie). Es wird deswegen angenommen, dass die Inanspruchnahme von Flächen bei Ausführung der Trassenvariante 2 geringer ist. Die Transportwege zwischen den Einrichtungen der Baustelle sind aus gleichen Gründen für Alternative 1 etwas schlechter zu bewerten. Mögliche öffentlich/privat-rechtliche Probleme können hier im Tangieren privaten Eigentums entstehen. Bei Alternative 2 ist die Gefahr hierbei etwas größer, so dass diese Alternative etwas schlechter bewertet wird (vgl. Tabelle 44).

Als Standard-Rohrwerkstoff der offenen Bauweise im Fernwärmeleitungsbau werden Kunststoffmantelrohrleitungen eingesetzt [76]. Die Ergebnisse aus dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben zeigen zudem, dass an Baumstandorten keine Schäden durch Wurzeln an Kunststoffmantelrohrleitungen zu erwarten sind. Daher werden für beide Trassenalternativen Kunststoffmantelrohrleitungen ausgewählt.

Tabelle 44: Variantenvergleich der Subkriterien der Baudurchführung

AHP	Qualitativ	
3. Ebene	Flächenmanagement	
1	Trassenvariante 1	0,333
2	Trassenvariante 2	0,667
3. Ebene	Transportwege	
1	Trassenvariante 1	0,333
2	Trassenvariante 2	0,667
3. Ebene	Rechtliche Realisierbarkeit	
1	Trassenvariante 1	0,667
2	Trassenvariante 2	0,333
3. Ebene	Rohrwerkstoffe	
1	Trassenvariante 1	0,500
2	Trassenvariante 2	0,500

6.2.9 Gesamtbewertung

Im Anschluss der Kriterien- und Alternativengewichtung wird das Gesamtergebnis berechnet. Im Rahmen der Untersuchung hat sich gezeigt, dass in Bezug auf die Kriterien und Subkriterien die Trasse 1 die bessere Alternative ist. Insbesondere belegt das vorliegende Resultat, dass Trasse 1 mit ca. doppelter Wichtung die meisten Vorteile aufweist (vgl. Tabelle 45). Trotz deutlichem Unterschied bietet sich immer eine Sensitivitätsanalyse an, um die Stabilität des Ergebnisses zu überprüfen.

Tabelle 45: Gesamtgewichtung

Gesamtgewichtung	
Alternative	Gewichtung
Trassenalternative 1	0,666
Trassenalternative 2	0,334

6.2.10 Sensitivitätsanalyse

Mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse kann die Stabilität bzw. Instabilität eines Ergebnisses durch prozentuale Änderung der Gewichtung der Kriterien gemessen werden. Erfolgt durch geringfügige Änderung ein Rangfolgewechsel unter den Alternativen spricht dies für die Instabilität des Ergebnisses.

Wie in der Abbildung 89 zu sehen ist, kommt es bei der Ökonomie zu keinem Rangwechsel. Das Ergebnis rückt allerdings näher zusammen, wenn die Gewichtung der Ökonomischen Kriterien auf null Prozent gesetzt wird. Bei den technischen Kriterien kommt es ebenfalls zu keinem Rangwechsel (vgl. Abbildung 90). Bei den sozio-ökologischen Kriterien kommt es bei Änderungen der Gewichtung zu einem Rangfolgewechsel, da der grafische Verlauf der Alternativen einen Schnittpunkt bei ca. 92% aufweist. Dies bedeutet, dass Trassenalternative 2 zu bevorzugen wäre, wenn das Hauptaugenmerk nahezu ausschließlich auf die sozio-ökologischen Kriterien gelegt werden würde (vgl. Abbildung 91).

Sensitivitätsanalyse Ökonomische Kriterien

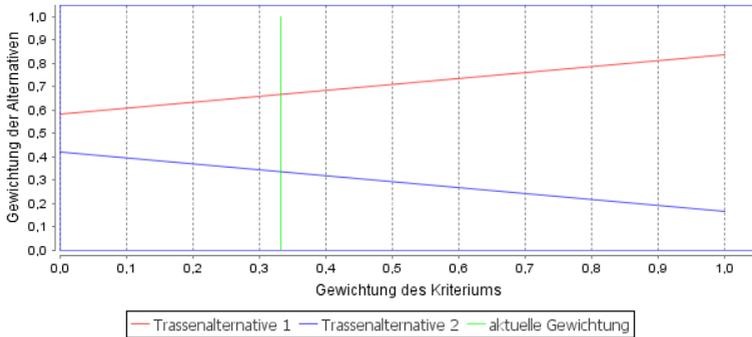


Abbildung 89: Sensitivitätsanalyse ökonomische Kriterien

Sensitivitätsanalyse Technische Kriterien

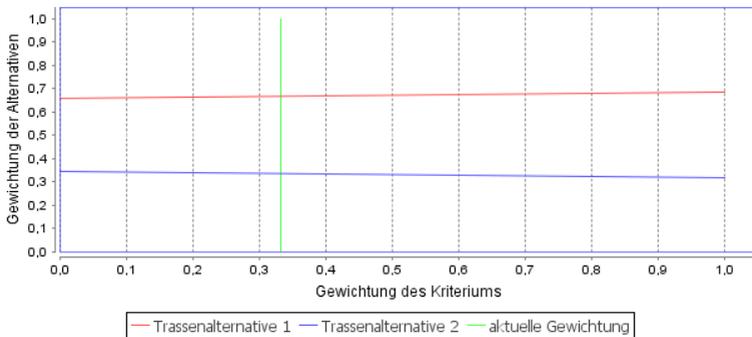


Abbildung 90: Sensitivitätsanalyse technische Kriterien

Sensitivitätsanalyse Sozio-Ökologische Kriterien

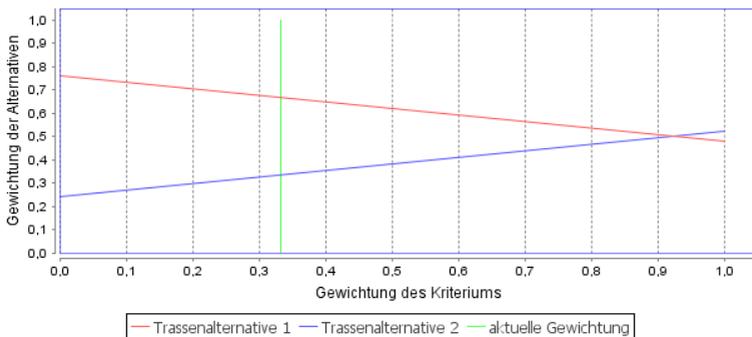


Abbildung 91: Sensitivitätsanalyse ökologische Kriterien

6.2.11 Kritische Analyse

Anhand dieser Szenarienanalyse kann eine komplizierte Entscheidung auf eine einfache Art getroffen werden, da komplexe Zusammenhänge in logische Strukturen (Hierarchie) aufgedeutet wurden. Dadurch wird dem Entscheidungsträger selbst, aber auch Dritten, eine große Transparenz gewährt, die ermöglicht getroffene Entscheidungen nachzuvollziehen. Darüber hinaus lässt sich ermitteln, unter welchen Bedingungen bzw. Veränderungen der Kriterien sich doch ein anderes Ergebnis als das Beste ergibt, sofern es sich zuvor um ein instabiles Ergebnis gehandelt hat. Umgekehrt lässt sich somit ebenfalls sicherstellen, ob ein ermitteltes Ergebnis gegenüber Änderungen der Kriterien stabil ist.

Es ist hervorzuheben, dass im Rahmen dieser Bewertung ausschließlich mit qualitativen Kriterien gearbeitet worden ist, für die auf Grundlage der Einschätzungen des Projektkreises „FW-Vegetation“ ein Gewichtungsvorschlag entwickelt wurde. Das aus der Analyse ermittelte Ergebnis zeigt die Vorteilhaftigkeit einer Trassenalternative an, die jedoch aufgrund der zuvor beschriebenen Subjektivität vom Entscheidungsträger und dessen Prioritäten (der Kriterien) abhängig ist. An dieser Stelle wäre es von Vorteil gewesen, quantitative Daten zur Verfügung zu haben, da dadurch die Genauigkeit der Gewichtungen bzw. des Ergebnisses erhöht worden wäre. Beispielsweise könnten die Baukosten für beide Alternativen mittels quantitativer Kriterien beschrieben werden. Durch die kombinierte Anwendung quantitativer und qualitativer Kriterien hätte man die Präzision des Ergebnisses folglich zusätzlich erhöhen können. Abschließend lässt sich festhalten, dass je mehr Informationen dem Entscheidungsträger vorliegen, desto genauer kann der Entscheidungsprozess erfolgen. Dies kann mit Hilfe eines externen Moderators erfolgen, welcher die Aufgabe hat, nicht nur den Prozess zu steuern, sondern aktiv Projektbeteiligte befragt, Ergebnisse und Meinungen zusammenfasst und bei Unstimmigkeiten konsequent nachhakt. Diese elementar wichtigen Prozessschritte erhöhen somit die Transparenz der gemachten Entscheidung, was letztendlich eines der wichtigen Ziele innerhalb der Entscheidungsanalyse darstellt.

6.2.12 Zusammenfassung

Die Szenarienanalyse wurde für die Auswahl von Fernwärmetrassen angepasst und beispielhaft an einem realen Projekt durchgeführt und getestet. Der Praxis-Test zeigt, dass die entwickelten Kriterien in einer Szenarienanalyse in der Praxis mit geringem Mehraufwand angewendet werden können. Darüber hinaus wurde das Ergebnis ermittelt, dass die Alternative 1, welche auch tatsächlich zur Ausführung kam, eine höhere Präferenz aufweist als die ebenfalls untersuchte Alternative 2. Durch die Szenarienanalyse konnte nunmehr den Projektbeteiligten und weiteren Stakeholdern ein direkter und transparenter Einblick in die Bewertung und den Entscheidungsprozess gegeben werden.

Der Nutzen einer Szenarienanalyse ist durch einen transparenten und ganzheitlichen Blick auf die bestmögliche Trassenalternative gegeben, insbesondere durch die interdisziplinäre Betrachtung der Trassenalternativen und -kriterien. Eine Durchführung von fachübergreifenden Workshops zur Entwicklung von Kriterien zur Fernwärme-Trassenauswahl ist in der Zukunft aufgrund von Perspektivwechseln hilfreich.

7 Erste Schlussfolgerungen für die Praxis

Übergeordnetes Ziel des Forschungsvorhabens sind erste Empfehlungen für die Praxis. Grundlage dafür sind die in Kapitel 2 bis 6 beschriebenen Untersuchungen und Ergebnisse. Die Planung und Durchführung der Untersuchungen erfolgten **in engem Austausch und Abstimmung** mit dem interdisziplinären **Projektkreis „FW-Vegetation“** (vgl. Danksagung). Die wissenschaftlichen Ergebnisse zur Interaktion zwischen Fernwärmeleitungen und Baumwurzeln wurden in Projektkreistreffen fachübergreifend diskutiert. Die folgenden Empfehlungen sind ein **interdisziplinärer Konsens** für Planung und Bau von Fernwärmeleitungen an Baumstandorten. Die folgenden zwei Ziele werden in den Empfehlungen besonders berücksichtigt:

- Planung und Bau von Fernwärmeleitungen an Baumstandorten in urbanen Räumen
- Schutz der Bäume bei Baumaßnahmen

In Zeiten von **Klimaveränderungen**, wie z.B. lange Hitzeperioden oder Starkregen, werden **Bäume und Grünstreifen** in den städtischen Straßen einen immer höheren Stellenwert für die **Lebensqualität** der Bürgerinnen und Bürger einnehmen. Mit mehr Bäumen in den Städten steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Tiefbauarbeiten an urbanen Baumstandorten in der Zukunft weiter zunehmen werden. Um einen fachgerechten Ausbau der unterirdischen (Fernwärme-)netze weiterhin zu ermöglichen, sollen die o.g. **Ziele in der Praxis bestmöglich in Einklang** gebracht werden.

Die Empfehlungen für Planung und Bau basieren auf den **Untersuchungsergebnissen des hier vorliegendem Forschungsvorhabens** und der **Praxisbetrachtung durch den interdisziplinären Projektkreis „FW-Vegetation“** und können in sechs Leitsätzen beschrieben werden.

Folgend bilden die Leitsätze bzw. maßgebenden Untersuchungsergebnisse die Grundlage für Empfehlungen für Planung und Bau, Hinweise zu Ausschreibung und Vergabe sowie Arbeitsanweisungen und Schulungskonzepte. Die Kommunikation zwischen Baum- und Infrastrukturtägern wird gefördert, Empfehlungen für Produktprüfungen von ZFSV werden (weiter-)entwickelt und die Ergebnisse fließen in die Regelwerksarbeit des AGFW mit ein.

7.1 Empfehlungen für Planung und Bau

Als Empfehlungen für Planung und Bau werden **Arbeitsanweisungen und Kommunikationshinweise** sowie **Hinweise für Ausschreibung und Vergabe zu Planung und Bau von Fernwärmeleitungen an Baumstandorten** entwickelt, die sich an den **Leitsätzen des Forschungsvorhabens** orientieren.

Die folgenden Vorschläge für Arbeitsanweisungen und Kommunikationshinweise sowie Hinweise für Ausschreibungen und Vergabe richten sich an die Beteiligten von Planungs- und Bauvorhaben von Fernwärmeleitungen an Baumstandorten. Beteiligte sind u.a. Fernwärmeversorger, Grünflächenämter, Stadtplanungsämter, Planungsbüros, Tiefbaufirmen und Baumsachverständige.

Die Arbeitsanweisungen und Kommunikationshinweise sind Teil des Abschlussberichtes zum Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen“. Gliederung und Inhalte der Arbeitsanweisungen und Kommunikationshinweise orientieren sich an den Leitsätzen und wissenschaftlichen Ergebnissen des Forschungsvorhabens. Die folgenden Hinweise sollen die neuen wissenschaftlichen Erkenntnisse direkt für die Praxis nutzbar machen. Die Vorschläge und Hinweise sind nicht rechtlich bindend und bedürfen einer weitergehenden individuellen Betrachtung für den Einzelfall.

Die Arbeitsanweisungen und Kommunikationshinweise wurden mit einem interdisziplinären projektbegleitenden Arbeitskreis abgestimmt. An dem Projektkreis „FW-Vegetation“ waren Praxisvertreter u.a. aus Fernwärmeversorgern, Grünflächenämtern, Stadtplanung, Baumsachverständigen- und Fernwärmeplanungsbüros beteiligt.

Arbeitsanweisungen und Kommunikationshinweise zur Planung von Fernwärmeleitungen an Baumstandorten werden in den Leitsätzen 1 und 2 beschrieben, für den Bau von Fernwärmeleitungen an Baumstandorten in den Leitsätzen 3 bis 6. Die direkten Adressaten der Arbeitsanweisungen und Kommunikationshinweise werden je nach Leitsatz individuell dargestellt.

7.1.1 Leitsatz 1 „Szenarienanalyse zur Trassenauswahl“

Durch eine strukturierte Szenarienanalyse können die Vor- und Nachteile verschiedener Trassenalternativen transparent und nachvollziehbar bewertet werden.

Eine Szenarienanalyse kann zur Wahl von Trassenalternativen herangezogen werden. Auf diese Weise ist eine transparente Abwägung aller Vor- und Nachteile der betrachteten Trassenalternativen möglich. Dadurch lassen sich beispielsweise Trassenverläufe in Vegetationsnähe, inklusive Mehraufwand für Baum- und Leitungsschutzmaßnahmen, mit entsprechenden Umgehungsalternativen vergleichen und transparent bewerten.

Durch die Integration individueller Bewertungskriterien lassen sich die subjektiven Meinungen aller Projektbeteiligten zusammenführen. Auf diese Weise können die verschiedenen Fachdisziplinen (z.B. Fernwärmeversorgungsunternehmen und Grünflächenamt) bestmöglich in Einklang gebracht und eventuelle Vorbehalte abgebaut werden.

Fernwärmetrassen sind aus betrieblichen Gründen grundsätzlich von Hindernissen freizuhalten, weshalb in der Planungsphase bereits der spätere Betrieb zu berücksichtigen ist. Hierbei gilt es im Besonderen zu klären, wie in einem Schadenfall an der Leitung mit etwaigen notwendigen Baumfällungen (organisatorisch und finanziell) umzugehen ist. Durch lokale unterschiedliche Vorgaben und Verantwortlichkeiten sollte hier vorab ein Gespräch mit den jeweils zuständigen Behörden (z.B. Grünflächenamt) erfolgen.

Arbeitsanweisung für Planungsbüro und Fernwärmeversorgungsunternehmen:

Im Zuge der Szenarienanalyse sollte das Ziel der Entscheidung klar ausformuliert sein. Als Beispiel hierzu können Ziele wie „Minimierung von Kosten“, „kurze Bauzeit“ oder „geringe Umwelteinwirkungen“ formuliert werden. Zu den einzelnen Trassenalternativen sind darüber hinaus individuelle Bewertungskriterien zu entwickeln, die das Planungsprojekt beschreiben sollen und mit denen die unterschiedlichen Trassenvarianten transparent und nachvollziehbar eingestuft werden können. Es reicht aus, wenn zwei Einstufungsebenen definiert werden, wobei die erste Ebene folgende Kriterien beinhalten sollte: Ökonomische, sozio-ökologische sowie technische Kriterien. Die zweite Ebene ist variabel und bei jeder Trassenplanung individuell zu identifizieren. Informationen zu den Bewertungskriterien und Trassenalternativen sollten umfangreich gewonnen werden. Abschließend ist die Kriterien- und Alternativenbewertung im Idealfall nach der im o.g. Forschungsvorhaben erarbeiteten Methodik durchzuführen.

Kommunikationshinweis zwischen Planungsbüro, Fernwärmeversorgungsunternehmen und Grünflächenamt:

Eine in dieser Phase funktionierende Kommunikation bildet das Hauptgerüst und bietet viele konkrete Ansatzpunkte zur Optimierung des laufenden Bewertungs- und Entscheidungsprozesses. Im Rahmen von Workshops, Meetings und weiteren Experteninterviews sollen die verschiedenen Perspektiven und Interessen einzelner Entscheider (z.B. Fernwärmeversorgungsunternehmen, Grünflächenamt) herausgearbeitet werden. Kommunikation zu Projektbeteiligten sowie eine intakte Interaktion mit diesen ist sicherzustellen, um eine ausreichend große Anzahl an qualitativen und quantitativen Daten zu sammeln. Im Fokus dieser Experten- und Entscheidergruppen werden moderationsgestützt entscheidungsrelevante Kriterien und auch K.O.-Kriterien entwickelt. Der Moderator steuert den Kommunikations- und Entscheidungsprozess und bringt die erarbeiteten Ergebnisse zusammen.

Hinweis für Ausschreibung und Vergabe:

Die Szenarienanalyse sollte bereits die Planungsphase begleiten und muss bei Bedarf als zusätzliche Planungsleistung kalkuliert werden.

7.1.2 Leitsatz 2 „Wärmefeld im Erdreich“

Die Wärmeabstrahlung von KMR-Fernwärmeleitungen hat keinen erkennbaren Einfluss auf das Wurzelwachstum von Bäumen (auch bei Unterschreitung des nach DIN 18920 [9] empfohlenen Mindestabstandes). An den Bau und Betrieb von FW-Leitungen (KMR) an Baumstandorten müssen somit keine weitergehenden Anforderungen im vgl. zu anderen unterirdischen Leitungen und Kanälen gestellt werden.

Beim Bau von FW-Leitungen ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass die aktuellen Maßnahmen für den Baum- und Wurzelschutz (z.B. nach DIN 18920[9] und RAS-LP4 [10]) bei Arbeiten im Wurzelbereich auch bei FW-Leitungen einzuhalten sind. Dies gilt insbesondere bei Unterschreitung des empfohlenen Mindestabstandes zwischen Baumachse und Leitung (vgl. DIN 18920 [9] und DWA M 162 [7]).

Arbeitsanweisung für Planungsbüro und Fernwärmeversorgungsunternehmen:

Die Erkenntnis aus dem vorliegenden Projekt, dass die Wärmeabstrahlung von nach Stand der Technik betriebenen Fernwärmeleitungen in den Versuchen keine nachweisbar relevanten Auswirkungen auf das Wachstum von Wurzeln und Bäumen hatte, öffnet insbesondere in urbanen Räumen weitergehende Möglichkeiten für einen zukünftigen Ausbau von Fernwärmenetzen. Eine Aufbereitung der Projektergebnisse für die Wissensverbreitung und Schulung von Mitarbeitern von planenden Ingenieurbüros und Fernwärmeversorgungsunternehmen von Fernwärmeleitungen an Baumstandorten kann helfen, um ggf. bisherigen Einschränkungen

oder Bedenken in der Planung von Fernwärmetrassen an Baumstandorten entgegenzuwirken und eine Trassenplanung im Interessensausgleich technischer, sozio-ökologischer und ökonomischer Aspekte wählen zu können.

Kommunikationshinweis zwischen Planungsbüro, Fernwärmeversorgungsunternehmen und Grünflächenamt:

Das Planungsbüro und/oder der Fernwärmeversorger sollte das lokale Grünflächenamt über die Forschungsergebnisse informieren und beraten, um möglichen Bedenken bei Fernwärmeausbau an Baumstandorten entgegenzuwirken und in Zukunft abgestimmte Planungsleistungen und Bauabläufe zu gewährleisten. Vorbehalte gegen Fernwärmeleitungen können in einem Informationsaustausch abgebaut und der Baumschutz durch die enge Abstimmung gewährleistet werden.

7.1.3 Leitsatz 3 „Muffenverbindungen an KMR“

Nur bei fachgerecht (nach den Vorgaben der gültigen Technischen Regeln AGFW FW 401-14 [77] und DIN EN 13941 Teil 2 [78]) ausgeführten Fernwärmeleitungen ist kein Wurzeleinwuchs zu erwarten. Die Einhaltung der Qualitätssicherungsstandards, der vorgenannten Technischen Regeln, sind bei der Errichtung von Fernwärmeleitungen an Baumstandorten zwingend erforderlich. Tritt überschüssiger Schmelzklebstoff an den Muffenenden aus, ist auch dort eine stoffschlüssige Verbindung vorhanden, die verhindert, dass an der Muffe potentielle Angriffspunkte (kleinste Hohlräume/ Schlitze) für die Wurzel entstehen.

Arbeitsanweisung für ausführende Baufirma:

Insbesondere in der Nähe von Baumstandorten und/oder wenn Wurzeln im Leitungsgraben vorzufinden sind, müssen die Qualitätsstandards zur Herstellung von Fernwärmeverbindungen nach FW 401-12 [77] und DIN EN 13941 Teil 2 [78] eingehalten werden. In nicht-fachgerecht ausgeführten Muffen können Wurzeln einwachsen und somit die Dauerhaftigkeit der Fernwärmeleitungen beeinträchtigen. Zusätzlich wird empfohlen darauf zu achten, dass auch an den Muffenenden ausreichend Schmelzklebstoff die Kontaktfläche zwischen Muffenrohr und der Ummantelung des KMR verschließt. Es ist darauf hinzuweisen, dass je nach System der Muffenverbindung nach Angabe des Inverkehrbringers ein Austritt von Schmelzklebstoff nicht gefordert ist und keine entsprechenden Schadensfälle bekannt sind. Dennoch können so potentielle Angriffspunkte für die Wurzeln vermieden werden.

Kommunikationshinweis in der ausführenden Baufirma:

Die Vorgesetzten bzw. Vorarbeiter der Baufirma sollten das ausführende Personal hinsichtlich der Risiken für den Wurzeleinwuchs in Fernwärmeverbindungen informieren und sensibilisieren.

7.1.4 Leitsatz 4 „Interaktion von Wurzeln und FW-Leitungen“

Eine Interaktion zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitung ist weitestgehend schadensfrei möglich.

Die Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitungen“ zeigen, dass eine Interaktion von Wurzeln mit Fernwärmeleitungen während des Betriebes weitestgehend schadensfrei möglich ist. Es konnten bei Feld- und Laborversuchen sowie In-situ-Aufgrabungen weder Beschädigungen durch Wurzeln an fachgerecht ausgeführten Fernwärmeleitungen und -verbindungen noch eine Beeinflussung der Vitalität des Baumes oder des Wurzelwachstums durch Wärmefelder im Erdreich festgestellt werden. Im Einzelfall können zusätzliche Maßnahmen ergänzenden Schutz für Leitung und Baum bieten.

Bei KMR ist nach Bartsch et al. [79] der Einfluss von Bäumen unter Windlast auf die Rohrstatik zu prüfen.

Beim Bau von Fernwärmeleitungen im Wurzelbereich von Bäumen ist der Baum- und Wurzelschutz nach folgenden Regelwerken zu beachten:

- DIN 18920 - Schutz von Bäumen, Pflanzenbeständen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen [9]
- RAS-LP4 – Richtlinie für die Anlage von Straßen, Teil Landschaftspflege, Abschnitt 4: Schutz von Bäumen, Vegetationsbeständen und Tieren bei Baumaßnahmen (Ausgabe 1999) [10]

Arbeitsanweisung für ausführende Baufirma:

Beim Bau von Fernwärmeleitungen ist ausdrücklich darauf hinzuweisen, dass die aktuellen Maßnahmen für den Baum- und Wurzelschutz (z.B. nach DIN 18920 [9] und RAS-LP4 [10]) bei Arbeiten im Wurzelbereich auch bei FW-Leitungen einzuhalten sind. Dies gilt insbesondere bei Unterschreitung des maßgebenden Mindestabstandes zwischen Baumachse und Leitung von mindestens 2,5 Metern (vgl. DIN 18920 [9] und DWA M 162 [7]). Sind Bauarbeiten innerhalb des Mindestabstandes durchzuführen, muss nach Regelwerk die Herstellung des Leitungsgrabens in Handarbeit oder mit Absaugtechnik erfolgen. Wenn Baumwurzeln entfernt werden müssen, sind sie mit Schneidewerkzeugen glatt durchzutrennen. Freigelegte Wurzeln

sind vor Austrocknung und Frosteinwirkung über die gesamte Zeit der Bauausführung zu sichern (vgl. DIN 18920 [9]).

Unter Beachtung dieser Planungs- und Ausführungsgrundsätze ist eine „Interaktion“ zwischen Fernwärmeleitungen und Wurzeln im Betrieb schadensfrei möglich.

Kommunikationshinweis zwischen ausführender Baufirma, Fernwärmeversorgungsunternehmen und Grünflächenamt:

Wesentlicher Leitsatz für die ausführende Baufirma ist die Prämisse, dass Wurzeln in der Baugrube mit einem Durchmesser von mehr als zwei Zentimetern möglichst nicht durchtrennt werden sollten (vgl. DIN 18920 [9]). Ist dieses trotzdem aufgrund der Baumaßnahmen notwendig, ist dies vor den Schnittmaßnahmen mit dem örtlichen Grünflächenamt abzustimmen. Weiterhin ist in Abhängigkeit des Ausmaßes des Wurzelverlusts und/oder der Wurzelbeschädigung eine Abstimmung mit dem örtlichen Grünflächenamt notwendig, um ggf. weitere Vorgehensweisen, z.B. über Art und Umfang von Ausgleichsschnittmaßnahmen an der Baumkrone, abzustimmen (vgl. ZTV-Baumpflege [80]). Dazu sind ebenfalls erste Abstimmungsgespräche im Vorfeld der Baumaßnahme sinnvoll.

7.1.5 Leitsatz 5 „Zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV)“

ZFSV-Rezepturen können, unter Berücksichtigung der Eigenschaften des anstehenden Erdreichs, so eingestellt werden, dass sie schlechter durchwurzelt werden können als der anstehende Boden und so vor Wurzeleinwuchs schützen.

Arbeitsanweisung für Auftraggeber und Planungsbüro:

Um einen möglichst dauerhaften Schutz vor Wurzeleinwuchs an unterirdischen Leitungen und Kanälen zu gewährleisten, ist der Einsatz von angepassten ZFSV-Rezepturen nach ersten Ergebnissen in dem hier vorliegendem Forschungsvorhaben bisher vielversprechend. Beim Einsatz von ZFSV als Schutz vor Wurzeleinwuchs sollte der an der Baugrube anstehende Boden bei der ZFSV-Rezepturerstellung berücksichtigt werden.

Wird ein ZFSV primär für den Schutz vor Wurzeleinwuchs verwendet, ist auch für diesen Fall weiterhin darauf zu achten, dass die relevanten Anforderungen für das jeweilige Einsatzgebiet und den spezifischen Einsatzzweck erfüllt werden. (vgl. u.a. DWA M 162 [7], AGFW Heftreihe F&E Heft 43 [51] und Heft 50 [81]).

Kommunikationshinweis zwischen Planungsbüro, Fernwärmeversorgungsunternehmen und Grünflächenamt:

Beim Einsatz von ZFSV an Baumstandorten ist darauf zu achten, dass ggf. bisheriger zur Verfügung stehender Wurzelraum verringert wird. Die (berechnete) Wurzelraumverringering und mögliche Ausgleichsmaßnahmen (vgl. u.a. Leitsatz 6) sollten im Vorfeld der Baumaßnahme mit dem Grünflächenamt abgestimmt werden.

Hinweis für Ausschreibung und Vergabe:

Planungsleistungshinweis zur „Nutzung von ZFSV als Schutz vor Wurzeleinwuchs im Leitungsgraben“:

Nach DWA M 162 [7] ist eine Möglichkeit unterirdische Leitungen und Kanäle vor Wurzeleinwuchs zu schützen das Verfüllen des Leitungsgrabens mit ZFSV.

Es ist möglich, ZFSV-Rezepturen mit unterschiedlichen Materialeigenschaften einzustellen, die sich allerdings teilweise gegenseitig beeinflussen können. Wird ein ZFSV primär für den Schutz vor Wurzeleinwuchs verwendet, ist darauf zu achten, dass die relevanten Anforderungen (für das jeweilige Einsatzgebiet und den spezifischen Einsatzzweck) weiterhin erfüllt werden (vgl. u.a. DWA M 162 [7], AGFW Heftreihe F&E Heft 43 [51] und Heft 50 [81]). Zudem ist darauf zu achten, dass durch den Einsatz von ZFSV an Baumstandorten oftmals bisheriger Wurzelraum verkleinert wird. Daher ist im Vorfeld jeder Baumaßnahme mit ZFSV individuell zu untersuchen, um wieviel der bisherige Wurzelraum verkleinert wird und falls notwendig, ob zusätzlicher Wurzelraum, z.B. in Form von Substraten (vgl. Leitsatz 6), hergestellt werden muss.

7.1.6 Leitsatz 6 „Substrate“

Durch das Einbringen von porenreichen Böden (Substrate) am Baumstandort kann, bei fachgerechtem Einbau, das Wurzelwachstum auf diese Bereiche konzentriert werden, sodass die Wahrscheinlichkeit von Wurzelwachstum in andere Bereiche (z.B. Leitungsbereich Leitungszone) verringert wird.

Arbeitsanweisung für die ausführende Baufirma:

Während des Einbaus von Substraten ist insbesondere auf die Verdichtung zu achten. Sind Substrate zu stark verdichtet, finden Wurzeln nicht genügend Raum zum Wachsen. Bei überbauten Pflanzgruben ist ein Verdichtungsgrad von maximal 95 % herzustellen, bei nicht überbauten Pflanzgruben ein Verdichtungsgrad zwischen 83 und 87 % [12].

Kommunikationshinweis zwischen Planungsbüro, Fernwärmeversorgungsunternehmen und Grünflächenamt:

Das Fernwärmeversorgungsunternehmen bzw. das Planungsbüro sollte die Auswahl des Substrates hinsichtlich Zusammensetzung und Eigenschaften mit dem örtlichen Grünflächenamt abstimmen.

Hinweis für Ausschreibung und Vergabe:

Planungsleistungshinweis zur „Nutzung von Substraten zum gezielten Wurzelwachstum“:

Beim Einsatz von Substraten ist aufgrund eines geforderten Pflanzgrubenvolumens bei Neupflanzungen eine Mindestmenge von 12 m³ erforderlich (vgl. FLL Empfehlungen für Baumpflanzungen, Teil 2 [12]). Je nach Standort und Bodenbeschaffenheit sind ggf. auch größere Mengen erforderlich, dies ist mit dem Grünflächenamt abzustimmen.

Substrate können nur als qualitativ hochwertiger Wurzelraum genutzt werden, wenn sie fachgerecht eingebaut werden. Daher sind beim Einbau von Substraten u.a. Qualitätsstandards und Grenzwerte nach den Regelwerken der RAL [82] und FLL [12] einzuhalten. In der Praxis ist ein oftmals auftretender Ausführungsfehler die zu starke Verdichtung des Substrates. Nach FLL [12] sollten folgende Verdichtungsgrade (in Abhängigkeit der Bauweise) eingehalten werden, um ausreichend Wurzelraum zu gewährleisten:

- Nicht überbaute Pflanzgrube: Verdichtungsgrad 83 % - 87 %
- Überbaute Pflanzgrube: Verdichtungsgrad \leq 95 %

7.2 Schulungskonzepte und -materialien

Die neuen Erkenntnisse des hier vorliegenden Forschungsvorhabens sollen in der Praxis schnellst möglich Anwendung finden. Zur schnellen Wissensvermittlung der Praxisergebnisse ist ein Schulungskonzept für Planung und Bau von Fernwärmeleitungen an Baumstandorten notwendig. Da Planung und Bau i.d.R. durch unterschiedliche Personen durchgeführt werden, wird ein Schulungskonzept für den Bereich Planung und ein Schulungskonzept für den Bereich Bau entwickelt. Die Schulungskonzepte werden mit beispielhaften Schulungsmaterialien in Form von Präsentationsfolien ergänzt und sind in der Anlage 8 dargestellt. Die Gliederung und Inhalte der Konzepte orientieren sich an den Leitsätzen aus Kapitel 7.1 und können für die Schulungskonzepte als folgende Leitfragen formuliert werden:

- Können (Baum-) Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen oder negativ beeinflussen?
- Hat der Wärmeeintrag von Fernwärmeleitungen einen Einfluss auf das Wachstumsverhalten oder die Vitalität von Bäumen?
- Welchen Einfluss hat das Verfüllmaterial auf das Wurzelwachstum?
- Welche Besonderheiten sind bei der Planung von Fernwärme und Wurzeln in möglichen Interaktionsbereichen zu berücksichtigen?

Die Grundlagen zu diesen Leitfragen werden in beiden Schulungskonzepten vermittelt, jedoch nach Zielgruppe mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Die Schwerpunkte der Schulungskonzepte werden folgend detailliert dargestellt.

7.2.1 Schulungskonzept für die Planung von Fernwärmetrassen an Baumstandorten

Das Schulungskonzept für die Planung von Fernwärmetrassen an Baumstandorten richtet sich an Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von Fernwärmeversorgungsunternehmen im Bereich Netzplanung, in Planungs- und Ingenieurbüros, aber auch in Grünflächen- und Stadtplanungsämtern sowie bei Straßenbausträgern und in Baumsachverständigenbüros. Ziel ist eine fundierte Wissensverbreitung, um zukünftige Fernwärmetrassen im Einklang aller Beteiligten bestmöglich und effizient planen zu können.

Zunächst werden die **Grundlagen des Wurzelwachstums** und der o.g. Leitfragen in einem Vortrag vermittelt, damit alle Teilnehmer die gleichen Grundkenntnisse für die darauf aufbauende Schulung besitzen.

Vertiefende Lernziele sind insbesondere die Vermittlung von Basiswissen hinsichtlich der neuen **Erkenntnisse zu Wärmefeldern im Erdreich durch Fernwärmeleitungen**. Maßgeblich soll auf Grundlage der Forschungsergebnisse dargestellt werden, dass Wärmefelder bei

nach Stand der Technik betriebenen Fernwärmeleitungen keinen schädlichen Einfluss auf das Wurzelwachstum haben. Somit können mögliche Vorbehalte gegenüber Fernwärmetrassen an Baumstandorten abgebaut und somit zukünftig neue Fernwärmetrassen-Alternativen im Planungsprozess berücksichtigt werden. Die wesentlichen Erkenntnisse werden per Präsentation durch einen Experten dargestellt und in einer Gesprächsrunde die Erfahrungen der Teilnehmer diskutiert.

Zur Auswahl der bestmöglichen **Trassenalternative** sollen die Möglichkeiten einer **Szenarianalyse** dargestellt werden. In einem Workshop werden zunächst die Grundkenntnisse für eine Szenarianalyse mittels Vortrags durch einen Experten aufbereitet. Anschließend werden Trassenalternativen anhand von Praxisbeispielen aus dem Teilnehmerkreis oder von fiktiven Beispielen für eine Szenarianalyse ausgewählt. Es werden je nach Teilnehmeranzahl mehrere Beispiele ausgewählt, um anschließend in Gruppenarbeiten für das jeweilige Beispiel geeignete Kriterien zu diskutieren und zu definieren. Anhand dieser Kriterien kann jede Teilnehmerin/jeder Teilnehmer individuell an einem PC oder Notebook mit einem Online-Tool die Trassenalternativen mittels der definierten Kriterien bewerten. Die individuellen Ergebnisse werden anschließend zunächst in den kleineren Gruppen diskutiert. Anschließend erarbeiten die Gruppen einen Kurzvortrag, warum eine Trassenalternative ausgewählt wurde und präsentieren dem gesamten Teilnehmerkreis die Ergebnisse.

Da die Planung von Fernwärmetrassen an Baumstandorten ein sehr interdisziplinärer Vorgang ist, an dem unterschiedliche Stakeholder mit unterschiedlichen Interessen und Meinungen beteiligt sind, sind **Workshops und Rollenspiele** sinnvoll. Erfahrungsgemäß bringt ein Perspektivenwechsel Verständnis für anderen Interessen und Meinungen. Dazu definiert ein externer Moderator unterschiedliche Rollen und Konfliktsituationen, in die sich die Teilnehmer hineinversetzen und vor der Gruppe durchspielen sollen. Mit dieser Methode sollen eigene **Argumentationsstrukturen** gestärkt und das **Verständnis für andere Sichtweisen** erhöht werden.

Bei der Planung von Fernwärmetrassen an Baumstandorten sind **aktive und passive Schutzmaßnahmen** oftmals eine Möglichkeit, unterirdische Leitungen und Wurzeln in Einklang zu bringen. Passive Schutzmaßnahmen, z.B. ZFSV, können die Leitungen vor Wurzeleinwuchs schützen. Aktive Schutzmaßnahmen, z.B. Baumsubstrate, fördern das Wurzelwachstum in diesen Bereichen. In Vorträgen sollen zunächst die Eigenschaften und Möglichkeiten dieser und weiterer Schutzmaßnahmen geschult werden. Anschließend werden beispielhaft entsprechende Situationen in Übungen simuliert. Dazu soll anhand der Beispiele „neue Fernwärmetrasse an bestehenden Baumstandort“, „neuer Baum an bestehender Fernwärmetrasse“ oder „neuer Baum und neue Fernwärmetrasse“ durch die Teilnehmer individuell ein Konzept mit Schutzmaßnahmen entwickelt werden. In diesen Konzepten sollen die Teilnehmer u.a. mit

Hilfe von Schutzmaßnahmen versuchen bestmöglich ein Zusammenwirken zwischen Baum und Fernwärmeleitung zu planen. Dabei ist auch zu berücksichtigen, wie mit notwendigen betrieblichen Maßnahmen an Fernwärmeleitungen in Wurzelbereichen (z.B. bei Neuanschluss oder Schadensfall) umzugehen ist, bei denen die Vegetation aufgrund der betrieblichen Maßnahmen ggf. kurzfristig entfernt werden muss. Denn Fernwärmetrassen sind i.d.R. aus betrieblichen Gründen grundsätzlich von Hindernissen freizuhalten. Die Konzepte werden anschließend dem Teilnehmerkreis vorgestellt und diskutiert.

Eine finale Abschlussrunde wird durchgeführt, um die neuen Erkenntnisse der Teilnehmer zu ermitteln und dadurch das Schulungskonzept stetig weiterentwickeln zu können.

7.2.2 Schulungskonzept für den Bau von Fernwärmetrassen an Baumstandorten

Das Schulungskonzept für den Bau von Fernwärmeleitungen richtet sich insbesondere an Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von Leitungs- und Tiefbauunternehmen, aber auch an Mitarbeiter von Bauüberwachungen, Fernwärmeversorgungsunternehmen sowie Baumsachverständigenbüros und Grünflächenämtern.

Auch hier ist zunächst die Schulung der **Grundlagen des Wurzelwachstums** und der Leitfragen durch eine Präsentation eines Fachexperten notwendig, um allen Teilnehmern die gleichen Grundkenntnisse zu vermitteln.

Ein Schwerpunkt der Schulung ist das **Verhalten bei (Tiefbau-)Arbeiten an Baumstandorten**. Die Arten von möglichen Verletzungen von Bäumen und Wurzeln durch Bauarbeiten sollen dargestellt und mögliche Konsequenzen diskutiert werden. Ziel ist eine Sensibilisierung der Teilnehmer, um zukünftige Beschädigungen von Bäumen zu vermeiden. Eine mögliche Bildersammlung von nachträglichen Schädigungen an Bäumen kann hilfreich sein, um nachträgliche Baumschäden bildlich zu verdeutlichen, die teilweise durch einen kleinen Schnitt an einer Wurzel entstehen können.

Ein weiterer wesentlicher Schulungsschwerpunkt ist die Sensibilisierung für die Einhaltung der geltenden Qualitätsstandards bei der **Herstellung von KMR-Muffenverbindungen an Baumstandorten**. Anhand der Forschungsergebnisse kann deutlich gezeigt werden, dass in nicht fachgerecht und unsauber verarbeiteten KMR-Muffen Wurzeln potentiell einwachsen können. Hierzu sollen ausgewählte Fehlerbilder und mögliche Ursachen vorgestellt werden sowie auf die Zertifizierung von Muffen Monteuren nach AGFW FW 603 [83] verwiesen werden.

Zudem soll der **Einbau von Baumsubstraten** geschult werden. Dazu werden zunächst in einer Präsentation die aktiven und passiven Schutzmaßnahmen nach Regelwerk erläutert. Anschließend werden vertiefend die Eigenschaften und Einbauweisen von Baumsubstraten

betrachtet. Hier liegt ein Schwerpunkt auf der fachgerechten Einbauweise. Durch Live-Vorfürungen können fachgerecht und nicht fachgerecht ausgeführte Einbauarbeiten vorgestellt werden und die Unterschiede der Substrate direkt bildlich und händisch wahrgenommen werden.

Eine Abschlussrunde wird durchgeführt, um die neuen Erkenntnisse der Teilnehmer zu ermitteln, um dadurch das Schulungskonzept stetig weiter entwickeln zu können.

7.3 Empfehlungen für Produktprüfungen und Nachweise porenraumarer Verfüllmaterialien

Die Verfüllung des Leitungsgrabens mit porenraumarmen Verfüllstoffen ist nach DWA-M 162, DVGW GW 125 und FGSV Nr. 939 [7] eine passive Schutzmaßnahme vor Wurzeleinwuchs im Leitungsgraben. Zu diesen porenraumarmen Bettungsmaterialien gehören zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (kurz ZFSV). Nach [28, 29] können die Rezepturen so eingestellt werden, dass sie weitestgehend wurzelhemmend sind. Dabei ist jedoch der umgebende Boden mit zu betrachten. (Langzeit-)Nachweise von ZFSV sind bisher jedoch nicht allgemeingültig bekannt und sind somit auch nicht in Regelwerken oder Normen beschrieben. Die Untersuchungsergebnisse aus dem Versuchsfeld Dodesheide (vgl. Kapitel 4.4.2) geben erste wertvolle Hinweise zu möglichen Nachweisen und Parametern, wann ZFSV weitgehend wurzelabweisend ist. Die ZFSV-Parameter konnten dabei mit den Bodenkennwerten aus den In-situ-Aufgrabungen verglichen werden (vgl. Kapitel 5).

Auf Basis der Untersuchungsergebnisse werden folgende Empfehlungen für Nachweise und Produktprüfungen von ZFSV entwickelt, die ggf. in Folgeprojekten auf ihre Eignung getestet werden können.

7.3.1 Ermittlung durchgängiger Poren im ZFSV

Mit einem vereinfachten technischen Prüfkonzept zur Ermittlung des Wassersättigungs- und Wasserdurchflussverhaltens von ZFSV-Probekörpern sollen erste Rückschlüsse hinsichtlich der Wurzeldurchlässigkeit von ZFSV dahingehend gewonnen werden, ob die Durchgängigkeit von Poren in Zusammenhang mit Wurzeleinwuchs steht. Ziel sind relativ schnelle und technisch einfach erzielbare Ergebnisse zur Produktprüfung. Die ZFSV-Probekörper können entweder direkt bei Herstellung flüssig in einen Prüfzylinder oder -quader gefüllt oder an ausgehärteten ZFSV mittels Prüfzylinder entnommen werden. Das Prüfkonzept unterteilt sich in zwei aufeinander folgende Versuche. Im ersten Versuch wird der Probekörper bis zur Gewichtskonstanz mit Wasser gesättigt. In einem zweiten Versuch wird an dem gesättigten Probekörper eine vereinfachte Wasserdurchlässigkeitsprüfung durchgeführt.

Die Proben werden in einem Wasserbad gesättigt und in bestimmten Intervallen gewogen (vgl. Abbildung 92). Je schneller die Gewichtszunahme ist, desto größer und durchgängiger sind vermutlich die Poren im ZFSV. Tritt die Gewichtskonstanz ein, so ist der erste Versuch abgeschlossen.

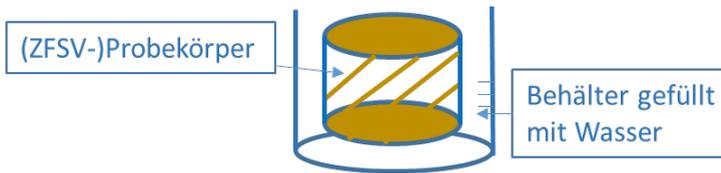


Abbildung 92: Versuchsaufbau zur Wassersättigung eines ZFSV-Probekörpers

Anschließend wird der gesättigte Probekörper vertikal befestigt und mit Wasserdruck, z.B. mit einem Meter Wassersäule, beaufschlagt (vgl. Abbildung 93). Das vertikal durchfließende Wasser wird in einer Messeinrichtung gemessen und die dafür benötigte Zeit dokumentiert. Zur Verifizierung der Versuchsergebnisse können z.B. zeitgleich hergestellte oder entnommene ZFSV-Proben genutzt werden, um daran die Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130-1 [39] zu bestimmen.

Erste Messungen haben ergeben, dass Wurzeln vermutlich mindestens 100 μm weite Poren brauchen, um in einen ZFSV einzuwachsen zu können. Um Schäden verursachen zu können, müsste die Wurzel den ZFSV zusätzlich plastisch verformen können oder es müssten temperatur- oder wassergehaltsbedingt Volumenänderungen auftreten, die es der Wurzel ermöglichen, den ZFSV passiv zu zerstören. Letzteres ist eher unwahrscheinlich und deswegen ist es theoretisch denkbar, ZFSV so zu gestalten, dass eine gewisse Wasserdurchlässigkeit möglich ist, ohne dass die Wurzeln Angriffsmöglichkeiten haben. Wo ein möglicher Kompromiss liegen kann, kann nur im direkten Vergleich von technischer Prüfung und biologischem Wachstumsexperiment festgestellt werden. Ziel der hier beschriebenen Versuche ist es somit, die Relevanz der technischen Normversuche für die biologische Praxis zu ermitteln, indem die Versuche an die biologischen Fragestellungen angepasst werden.

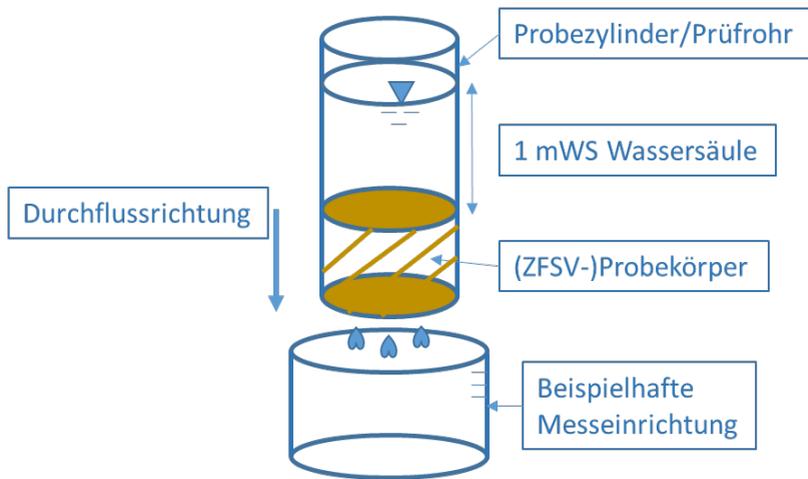


Abbildung 93: Versuchsaufbau zur vereinfachten Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit mit 1 mWS an einem gesättigten ZFSV-Probekörper

Ergebnisse aus der Porosimetrie sagen viel über das Volumen und auch über die Größenverteilung der Poren. Leider sagen sie nur sehr wenig über die Form und Ausdehnung der Poren, die ihrerseits wieder die entscheidende Größe für Angriffsmöglichkeiten von Wurzeln sind. Durchströmungsversuche zusammen mit Porosimetrie können hier bessere Aussagen ermöglichen. Für die biologische Unbedenklichkeit ist es weiterhin wesentlich, dass das durchgeströmte Wasser im Anschluss auf seinen pH-Wert geprüft und im Wachstumsexperiment auf seine Pflanzenverträglichkeit getestet wird. Die reine pH-Bestimmung ist hier nicht ausreichend, da auch pH-neutrale Lösungen pflanzenunverträglich sein können (vgl. Kapitel 7.3.2).

7.3.2 Einfluss von pH-Wert auf Wurzelwachstum

Hinsichtlich des pH-Wertes gibt es u.a. für Baumsubstrate Grenzwerte [12]. Der Einfluss des pH-Wertes auf das Wurzelwachstum und die maximalen Grenzen sollen mit dem folgenden Versuch nachgewiesen werden. Für den Versuchsaufbau werden in einem Substratbehälter ZFSV-Bruchstücke (oder auch Betonbruchstücke) eingebaut und darauf Pflanzen gesetzt (vgl. Abbildung 94). Vor dem Einbau muss der pH-Wert des ZFSV bzw. Betons ermittelt und dokumentiert werden. In weiteren Substratbehältern werden zum Wachstums- und Vitalitätsvergleich Pflanzen in Mutterboden mit ebenfalls erhöhtem pH-Wert eingesetzt. Als Kontrollversuche werden zusätzlich Pflanzen in Mutterboden mit normalen pH-Wert gepflanzt. Nach einer Wachstumsperiode wird die Vitalität der Pflanzen betrachtet, das Wurzelwachstum ausgewertet und erneut der pH-Wert im ZFSV bzw. Beton und den Mutterböden bestimmt. Beeinflusst der erhöhte pH-Wert das Wachstum negativ, so sollten die Pflanzen, die im ZFSV und Mutterboden mit erhöhtem pH-Wert eingesetzt wurden, eine schlechtere Vitalität aufweisen als die

Pflanzen, die im normalen Mutterboden eingepflanzt wurden. Mit diesen Versuchen kann nachgewiesen werden, ob ein erhöhter pH-Wert einen Einfluss auf das Wurzel- und Pflanzenwachstum hat und wenn ja, ob ein Unterschied zwischen ZFSV und Mutterboden besteht. Durch den Einsatz von ZFSV und Mutterböden mit unterschiedlichen pH-Werten wird geprüft, ab welcher Grenze der pH-Wert das Pflanzenwachstum beeinflusst.

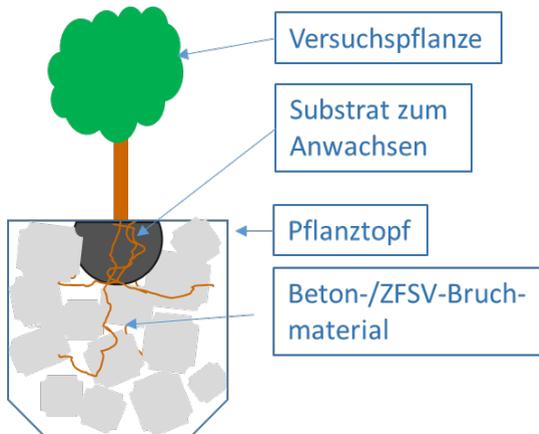


Abbildung 94: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Wuchsverhaltens in ZFSV mit erhöhten pH-Werten

7.3.3 Paarweiser Wurzelfestigkeitsvergleich von Böden und ZFSV

Mit Hilfe von paarweisen Vergleichen können die Wurzelfestigkeiten unterschiedlicher Böden und ZFSV experimentell ermittelt werden. Die Ergebnisse des hier vorliegenden Forschungsvorhabens geben weitere wertvolle Hinweise zu den möglichen maßgeblichen Bodenparametern für Wurzeleinwuchs in Böden. Dazu gehört u.a. die Durchlässigkeit. Bezugnehmend auf das Dichtenfallenmodell (vgl. Kapitel 5) wachsen Wurzeln an einer Trennfläche zwischen zwei Böden in den porenreicheren Boden. Jedoch ist bisher nicht bekannt, in welchen Boden die Wurzeln wachsen, wenn ein sandiger Boden und ein ZFSV, z.B. mit gleicher Durchlässigkeit, zur Verfügung stehen. Dabei sollten zusätzlich Böden mit unterschiedlichen Anteilen von Ton und Schluff berücksichtigt werden. Dies soll mit einem paarweisen Vergleich nachgewiesen werden. Für Vergleichswerte können die eingesetzten Böden und ZFSV z.B. nach DIN 18130-1 [39] hinsichtlich ihrer Wasserdurchlässigkeit bestimmt werden. Ein beispielhaftes Prüfprogramm ist in Tabelle 46 dargestellt.

Tabelle 46: Versuchsprogramm zum paarweisen Vergleich

(Erläuterung der Kürzel: ZA: ZFSV mit Durchlässigkeit A; BA: Boden mit Durchlässigkeit A; ZB: ZFSV mit Durchlässigkeit B; BB: Boden mit Durchlässigkeit B; etc.)

ZA	ZB	ZC	ZD	BA	BB	BC	Legende: Z = ZFSV B = Boden ZA/BA = 10^{-6} m/s ZB/BB = 10^{-7} m/s ZC/BC = 10^{-8} m/s ZD/BD = 10^{-9} m/s Insgesamt 28 Versuche
ZB							
ZC	ZC						
ZD	ZD	ZD					
BA	BA	BA	BA				
BB	BB	BB	BB	BB			
BC	BC	BC	BC	BC	BC		
BD							

In einem Pflanztopf werden vertikal nebeneinander ZFSV oder Böden mit gleichen oder unterschiedlichen Durchlässigkeiten eingebaut. Vor Einbau wird eine temporäre Trennplatte installiert, damit die ZFSV/Böden nebeneinander eingefüllt werden können. Nach Einfüllen wird die Trennplatte wieder entfernt und auf die Böden wird eine Versuchspflanze mit etwas Substrat zum Anwachsen gesetzt (vgl. Abbildung 95).

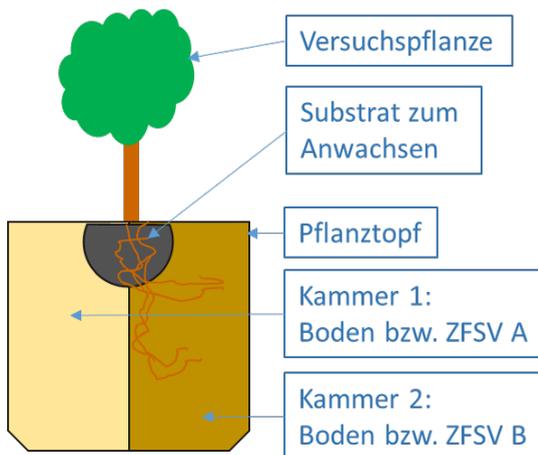


Abbildung 95: Versuchsaufbau zum paarweisen Vergleich von ZFSV und Böden

Nach einer bestimmten Versuchslaufzeit (z.B. einer Wachstumsperiode) können die Substratbehälter geöffnet und das Wurzelwachstumsverhalten ausgewertet werden. Mit Blick auf das Dichtenfallenmodell sollte die Wurzel entlang der Trennfläche wachsen und in den Boden/ZFSV, der eine größere Durchlässigkeit besitzt. Neben der Durchlässigkeit kann z.B. auch das Porenvolumen als maßgeblichen Parameter der Untersuchungen herangezogen werden. Durch den paarweisen Vergleich können anschließend statistische Annäherung durchgeführt werden, ab wann ein ZFSV in der Praxis wurzelabweisender ist als der anstehende Boden.

7.4 Regelwerksarbeit

Die Leitsätze (vgl. Kapitel 7.1) wurden während der Projektlaufzeit dem AGFW Expertenkreis „Netzplanung und –bau“ bereits vorgestellt und Anmerkungen in Bezug auf die Regelwerksarbeit des Gremiums in den Leitsätzen berücksichtigt [84]. Die abschließenden Leitsätze aus Kapitel 7.1 werden den Fachgremien des AGFW für die Regelwerksarbeit zur Verfügung gestellt. Eine Aufnahme der relevanten Forschungsergebnisse in das Regelwerk des AGFW wird durch die Aufnahme eines entsprechenden Fachberichts angestrebt.

Zudem wurde die DWA-Fachausschüsse ES-2 „Systembezogene Planung“ und ES-3 „Anlagenbezogene Planung“ durch den Sprecher der Arbeitsgruppe ES-3.6 „Baumstandorte, Kanäle und Leitungen“ über das Forschungsvorhaben und die dazugehörige Regelwerksarbeit des AGFW informiert [85]. Falls zielführend, werden sich die Regelwerksgremien in Zukunft zu diesem Thema austauschen.

8 Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

Übergeordnetes Ziel des Forschungsvorhabens ist ein bestmöglicher **Einklang zwischen Bäumen und unterirdischen Leitungen im urbanen Raum**. Die Neupflanzung und der Erhalt von Großbäumen in Innenstädten sind maßgeblich für die Erhaltung der Lebensqualität in den wachsenden urbanen Räumen. Klimafreundliche Wärmeversorgung durch unterirdische Fernwärmeleitungen ist ein wichtiger Baustein zur Erreichung der Klimaziele und trägt ebenfalls zum Erhalt der Lebensqualität bei.

Im unterirdischen Straßenraum kann es somit zur **Konkurrenz zwischen Wurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen** kommen. Die Einflüsse durch Wärmefelder im Erdreich von Fernwärmeleitungen auf Wurzeln wurden vorab nicht systematisch untersucht. Auch waren bisher mögliche Auswirkungen von Wurzelwuchs an Fernwärmeleitungen nur geringfügig bekannt. Aus diesem Grund wurden in dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben mögliche Interaktionsarten zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitungen untersucht.

Grundlage für das ausführliche entwickelte Versuchsprogramm bildete eine **Literaturstudie**. Die Durchführung von **In-situ-Aufgrabungen** an Fernwärmeleitungen in der Nähe von Baumstandorten ermöglichte umfassende Praxis-Beobachtungen von Bäumen und Wurzeln an Fernwärmeleitungen. Ergänzt wurden diese In-situ-Aufgrabungen mit **Temperatur- und Feuchtemessungen** an und um erdverlegten Fernwärmeleitungen an Baumstandorten. Der Aufbau von komplexen FEM Simulationsmodellen ermöglichte weitergehende Berechnungen zu Einflussparametern auf **Wärmefelder** im Erdreich. Anhand von **Laborversuchen mit Pflanzen** konnte sowohl der **Einfluss von Wärmefeldern auf das Wurzelwachstum** untersucht werden als auch das „Schädigungspotential“ von Wurzeln an **KMR-Muffen und –ummantelungen (beispielsweise durch Einwachsen von Wurzeln in Muffen oder durch die Beschädigung des PE- Außenmantels)**. In Feldversuchen wurden einerseits zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (**ZFSV**) als Schutz vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsgraben, andererseits gezielter Wurzelwuchs in **Baumsubstraten** untersucht. Die erzielten Ergebnisse flossen in ein **fachübergreifendes Konzept zur Auswahl von Fernwärmetrassen-Alternativen** mit ein.

Als ein **Ergebnis des hier vorliegenden Forschungsvorhabens** ist festzuhalten, dass der physikalische Wärmeverlust von nach dem Stand der Technik betriebenen Fernwärmeleitungen keinen erkennbaren Einfluss auf das Wurzelwachstum von Bäumen hat. Schäden durch Wurzeln an nach Stand der Technik errichteten KMR-Trassen konnten ebenfalls nicht festgestellt werden. Die Forschungsergebnisse zeigen, dass eine Interaktion zwischen Fernwärmeleitungen und Wurzeln durchaus schadensfrei möglich ist. ZFSV-Rezepturen können so ein-

gestellt werden, dass sie einen Schutz vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsgraben bieten. Porreiche Böden (Substrate) am Baumstandort ermöglichen, bei fachgerechtem Einbau, dass sich das Wurzelwachstum auf diese Bereiche konzentriert. Durch eine strukturierte Szenarioanalyse lassen sich die Vor- und Nachteile verschiedener Trassenalternativen transparent und nachvollziehbar bewerten. Die Ergebnisse des hier vorliegenden Forschungsvorhabens sind in sechs Leitsätzen zusammengefasst und bilden die Basis für entsprechende Praxishinweise. Diese wurden als Arbeitsanweisungen, Kommunikationshinweise, Hinweise für Ausschreibung und Vergabe sowie Schulungskonzepte und -materialien entwickelt und zusammengestellt. Begleitet wurde das Forschungsvorhaben durch einen interdisziplinären Arbeitskreis, den Projektkreis „FW-Vegetation“. Diesem wurden Fragestellungen, Versuchskonzepte, Zwischenergebnisse und gewonnene Erkenntnisse zur Diskussion vorgestellt. Dadurch konnte ein ständiger Austausch zwischen Forschungsvorhaben und Praxis erfolgen, was besonders für die Überführung von Erkenntnissen zu relevanten Praxishinweisen eine notwendige Qualitätssicherung darstellt. Ziel war es, dass die wissenschaftlichen Ergebnisse zeitnah auch in der Praxis umgesetzt werden können. Zusätzlich konnten die Ergebnisse regelmäßig in regelsetzenden Gremien des AGFW vorgestellt und diskutiert werden, wodurch diese direkt in die Regelwerksarbeit des AGFW einfließen. Auch die relevanten Gremien des DWA wurden über das hier vorliegende Forschungsvorhaben und die Ergebnisse informiert.

Die Ergebnisse des hier vorliegenden Forschungsvorhabens zeigen, dass Wurzeln und Fernwärmeleitungen schadensfrei interagieren können. Jedoch sind für **weitergehende und ggf. abschließende Aussagen Langzeituntersuchungen notwendig**. Wurzeln wachsen langsam und die Einflüsse auf das Wurzelwachstum in urbanen Räumen sind vielfältig. In diesem Forschungsvorhaben wurden die **Grundlagen für weitergehende Langzeituntersuchungen** geschaffen. In mehreren Versuchsfeldern können Langzeituntersuchungen im Maßstab 1:1 durchgeführt werden, neuentwickelte und modifizierte Konzepte für Laboruntersuchungen ermöglichen die Untersuchung weitreichenderer offener Fragestellungen.

Während der Projektbearbeitung konnten weiterführende Fragestellungen und ergänzender Forschungsbedarf identifiziert werden. Im Folgenden sind weitergehende Untersuchungsschwerpunkte aufgeführt, deren Umsetzung in einem nachfolgenden Forschungsvorhaben anzustreben ist:

Untersuchungsschwerpunkt 1: Langzeit-Temperaturmessungen

Das im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsvorhabens entwickelte Messkonzept (vgl. Kapitel 3) zu **Langzeit-Temperaturmessungen an Fernwärmeleitungen im Baumbestand** konnte während der Projektlaufzeit implementiert werden. Durch die baubegleitende Umsetzung konnten bereits relevante Bodenkennwerte ermittelt werden und nachdem die fehlerhaften Messsensoren identifiziert wurden, zeichnen die Datenlogger die Messwerte auch über

das Projektende hinaus auf. Die dadurch entstehende Datenbasis des Messkonzepts, welches konkret auf die Fragestellungen im Kontext der Wärmefelder im Erdreich und besonders in Wurzelnahe hin konzipiert wurde, bildet eine einmalige Grundlage für weitere FEM-Rechenmodelle. Die bereits in diesem Forschungsvorhaben erstellten Simulationsmodelle können auf die individuellen Randbedingungen der Messstelle angepasst und durch Adaption der zusätzlichen Informationen weiter verbessert werden. Ziel ist es dabei möglichst valide Modelle zu erzeugen, die anschließend eine Bewertung gezielter Manipulationen einzelner Randbedingungen ermöglichen. So lassen sich beispielsweise auch die Auswirkungen von möglichen klimatischen Veränderungen oder neuartiger Bettungsmaterialien simulieren. Die Langzeit-Messdatenerfassung ermöglicht es mittelfristig auch Unregelmäßigkeiten, wie beispielsweise außergewöhnliche Niederschläge oder Trockenperioden, zu identifizieren und zu extrahieren. Neben den Messungen im durchwurzelten Rohrgrabenbereich werden auch Messungen im Wurzelbereich eines Baumes neben der FW-Trasse durchgeführt. Hier lassen sich in Kombination mit der visuellen Prüfung der Baum-Vitalität eventuell weitere Fragestellungen zum Thema Stadtbäume beantworten.

Darauf aufbauend können anschließend weitere Laborversuche geplant und durchgeführt werden, z.B. **weitere Laborversuche zum Wurzelwachstum in Wärmefeldern mit unterschiedlichen Baumarten**. Zudem wurde bisher nicht ermittelt, welcher maximale Temperatur-Grenzwert für das Wurzelwachstum unterschiedlicher Bäume maßgeblich ist, bis ein möglicher Einfluss des Wärmegradienten auf das Wurzelwachstum festgestellt werden kann.

Im Versuchsfeld werden auch **Feuchtemessungen im anstehenden Erdreich, in der Bettung der Leitungszone und im Wurzelbereich der Bäume** durchgeführt. Durch diese Messungen können wertvolle Hinweise zum möglichen Austrocknungsverhalten von Fernwärmesandbettungen ermittelt werden. Die Bodenauswertungen der In-situ-Aufgrabungen zeigen, dass im Bereich der Sandbettungen von Fernwärmeleitungen ein im Vergleich zum anstehenden Boden geringerer Wassergehalt festgestellt wurde. Hier kann hinterfragt werden, ob die im Vergleich zum anstehenden Boden geringeren Wassergehalte der Bettung auf Wärmefelder oder die tiefere Lage der Fernwärmeleitung allgemein zurückzuführen sind. Die Messergebnisse können dazu genutzt werden, um in weitergehenden FEM-Berechnungen den Wassertransport im Erdreich simulieren zu können.

Untersuchungsschwerpunkt 2: Langzeitbeobachtungen zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitungen

In einem weiteren „Versuchsfeld“ (Kapitel 2.5) können **Langzeituntersuchungen zu Wurzelinteraktionen an Fernwärmeleitungen im Betrieb** durchgeführt werden. Dabei liegt ein wesentlicher Blick der Untersuchungen auf das Verhalten **unterschiedlicher Baumarten**.

Im hier vorliegenden Forschungsvorhaben konnten bereits grundlegende Erkenntnisse zu Interaktionen zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen gewonnen werden. Für die Überführung aus dem „Stand des Wissens“ in den, im Regelwerk abgebildeten, „Stand der Technik“ sind weitere Praxiserfahrungen notwendig. So ist für die Erschließung neuer urbaner Räume auch von Interesse praktische Erkenntnisse über das Interaktionsverhalten von zeitgleich neu gepflanzten Bäumen und neugebauten Fernwärmetrassen zu erlangen. Bei den im abgeschlossenen Projekt untersuchten Praxisfällen sind Leitung und Vegetation nicht zeitgleich entstanden bzw. waren die Daten und Verhältnisse zum Errichtungszeitpunkt nicht vollständig bekannt. Bei dem nun errichteten Versuchsfeld ist eine Fernwärmetrasse mit Versorgungsaufgabe, mit Ausnahme der Abstände zur Vegetation, nach dem Stand der Technik, ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen für eine Vegetationsinteraktion, errichtet worden. Baubegleitend wurden Bodenproben entnommen und die Baumaßnahme dokumentiert. Gemeinsam mit dem örtlichen Grünflächenamt konnten Neubepflanzungen auf dem Leitungsgraben vorgenommen werden. Die Konzipierung sieht vor, dass einzelne Bäume zu unterschiedlichen Zeitpunkten aus der Strecke entnommen werden können, um diese im Wurzelbereich und im Labor untersuchen zu können. Dabei sind nicht nur botanische und technische Fragestellungen hinsichtlich möglicher Wurzelinteraktionen interessant, sondern auch betriebliche und **vertragliche Fragen**, die potentiell für vergleichbare Baumaßnahmen **zwischen Fernwärmeversorgungsunternehmen und Grünflächenamt** im Vorfeld abgestimmt werden müssen. Hier ist die Erarbeitung von Hinweisen zu vertraglichen Gestaltungen sinnvoll. Insbesondere bei gleichzeitiger Neupflanzung von Bäumen und Neubau von Fernwärmetrassen.

Die Feldversuche zur Interaktion von Fernwärmeleitungen und Bäumen werden durch Langzeit-Eindrückversuche von Bäumen an PE-Ummantelungen ergänzt (vgl. Kapitel 4.3). Ziel der Untersuchungen ist es zu klären, ob durch das Dickenwachstum der Wurzeln die PE-Ummantelung beschädigt werden kann. Das Dickenwachstum ist ein langjähriger Prozess, der in dem Folgevorhaben weitergehend untersucht werden kann. Zudem sind weitere Untersuchungen zum Quell- und Setzungsverhalten von Böden notwendig, um mögliche Schädigungsprozesse durch das Dickenwachstum bzw. durch das Quellen und Setzen von Böden betrachten zu können.

Untersuchungsschwerpunkt 3: Langzeit-Beobachtungen von Bäumen in der Nähe von Fernwärmetrassen

Um die **Periodizität von Bäumen in Wärmefeldern** tiefergehend untersuchen zu können, sind kontinuierliche Langzeitbeobachtungen von Bäumen an unterirdischen Fernwärmeleitungen sinnvoll. In dem Folgevorhaben können in den Versuchsfeldern und an weiteren Bäumen aus dem hier vorliegendem Forschungsvorhaben, z.B. der bisher durchgeführten In-situ-Aufgrabungen (vgl. Kapitel 2), über zwei Jahre monatlich Begutachtungen durchgeführt werden

hinsichtlich der Vitalität des Baumes und der Periodizität der Pflanze. Etwaige Beeinflussungen, wie z.B. verspäteter Laubfall oder verfrühtes Blühen, können somit beobachtet und dokumentiert werden. Es werden Bäume ausgewählt, in deren Umfeld vergleichbare Bäume vorzufinden sind, die nicht durch Wärmefelder beeinträchtigt werden, um mögliche Unterschiede in der Vitalität des Baumes und der Baum-Periodizität feststellen zu können. Bereits in dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben wurde dem Projektkonsortium kurz vor Projektende die Möglichkeit angeboten einen Trassenabschnitt eines AGFW Mitgliedunternehmens zu untersuchen, in dessen Versorgungsgebiet eine Fernwärmtrasse einseitig unter der Baumreihe einer Allee verläuft.

Untersuchungsschwerpunkt 4: Ergänzende In-situ-Aufgrabungen

An weiteren oder sofern möglich auch an Teilen der bisher durchgeführten **In-situ-Aufgrabungen sind erneute Aufgrabungen** sinnvoll, um die Entwicklung von Wurzeln beobachten zu können. Als Erweiterung des Versuchsprogramms wäre auch die Erweiterung des Bodenprüfprogramms, z.B. pF-Werte, sinnvoll, um u.a. den Hintergrund, Grenzwerte und die Auswirkungen einer ggf. möglichen „Austrocknung“ von Fernwärme-Sandbettungen auf Wurzeln in Zukunft besser verstehen zu können. Für die Erweiterung der Stichprobenanzahl sind auch anlassbezogene In-situ-Aufgrabungen an weiteren Fernwärmetrassen an Baumstandorten sinnvoll, bestmöglich an Baumarten, die bisher nicht betrachtet wurden. Ggf. ist dabei auch eine Betrachtung von kritischen und unkritischen Baumarten nach DVGW GW 125 Beiblatt 1 [86] zielführend.

Untersuchungsschwerpunkt 5: Schutzmaßnahmen nach DWA, DVGW und FGSV

Die Ergebnisse des **Versuchsfelds Dodesheide** (vgl. Kapitel 4.4) zeigen, dass innerhalb eines Jahres keine Wurzeln in den ZFSV eingewachsen sind. Jedoch werden ZFSV für mehrere Jahre eingesetzt. Daher sind Langzeituntersuchungen von ZFSV als Schutzmaßnahme vor Wurzeleinwuchs im Leitungsgraben notwendig, um umfassende In-situ-Ergebnisse für den Praxiseinsatz auswerten zu können. Zudem sind Langzeitmessungen hinsichtlich des pH-Wertes mit Blick auf das Ausspülverhalten in anstehende Böden zielführend. Hier werden einzelne Aspekte der Umweltverträglichkeit und Wiederverwertung des ZFSV aufgegriffen. Weitergehend kann das Wurzelwachstum in den Substraten untersucht und ausgewertet werden.

Mit Blick auf das Wurzelwachstumsverhalten im und am ZFSV sind **Nachweise und Produktprüfungen im Labormaßstab** notwendig. In dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben konnten weitere Erkenntnisse hinsichtlich möglicher Bodenparameter ermittelt werden. Mit Hilfe weiterer Laborversuche können diese Bodenparameter weitergehend analysiert werden (vgl. Kapitel 7.3). Dazu gehören Versuche zum Einfluss der Durchlässigkeit und des pH-Wertes auf das Wurzelwachstum.

Untersuchungsschwerpunkt 6: Praxisdokumente

Erfahrungen mit der Umsetzung der Leitsätze und Praxisempfehlungen aus dem hier vorliegenden Forschungsvorhaben können in einem Folgevorhaben bei den Fernwärmeversorgungsunternehmen und Grünflächenämtern ermittelt werden, um so den Praxisnutzen zu bewerten und falls notwendig die erstellten Hinweise anzupassen und zu erweitern. Die ist eine wichtige Grundlage, um den bisherigen Kenntnisstand zu validieren und so eine Überführung zum „Stand der Technik“ zu ermöglichen, der unter anderem auch im AGFW Regelwerk abgebildet ist.

Untersuchungsschwerpunkt 7: Brancheninformation und Regelwerksarbeit

Über die aktuellen Entwicklungen des in diesem Bericht behandelten Forschungsvorhabens war die Fernwärme-Branche, durch Fachveröffentlichungen und regelmäßige Berichterstattung in unterschiedliche AGFW Fachgremien, stets informiert. Auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse und der daraus abgeleiteten Empfehlungen kann der Austausch mit den unterschiedlichen Expertengremien zur Regelwerksarbeit zielgerichteter und mit konkreten Beispielen erfolgen. Durch die kritische Diskussion mit Fachexperten sollen die Leitsätze stetig weiterentwickelt und um relevante Fragestellungen ergänzt werden. Die aktuellen und zukünftigen Ergebnisse fließen weiterhin in die Regelwerksarbeit des AGFW ein und auch die regelsetzenden Gremien von DWA, DVGW und FGSV werden über die Forschungsergebnisse weiterhin informiert.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Interaktion zwischen Wurzeln und Fernwärmerohrleitung, Vorlauf (links) und Rücklauf (rechts)	28
Abbildung 2:	Skizze von Trassenverlauf, Baumstandort mit ungefährender Lage der Kopflöcher 1 und 2	29
Abbildung 3:	Feinwurzeln in der Bettung bei Kopfloch 1 (links) und Feinwurzeln an und zwischen Vor- und Rücklauf bei Kopfloch 2 (rechts).....	30
Abbildung 4:	Gekappte Starkwurzel nah an der Rohroberfläche während der Neubaumaßnahmen der Fernwärmetrasse 2013 (links; Bildquelle: ZORN Sachverständigen Büro Gartenbau) und an der Rohroberfläche während der anlassbezogenen Aufgrabung 2020 (rechts, gelber Pfeil zeigt die Rohroberfläche).....	31
Abbildung 5:	Großteil der Wurzelmasse in Baumsubstrat bis 1,5 Meter unter GOK (links) und seit 2013 vereinzelte neu gewachsene Feinwurzeln in der Bettung (rechts).....	32
Abbildung 6:	Feinwurzeln in Bettung der Fernwärmeleitung (links; roter Pfeil zeigt zur Fernwärmeleitung, eingekreist sind die Feinwurzeln, rechts im Bild das Telekommunikationskabel) und Wurzeln, die an dem Telekommunikationskabel axial entlang wuchsen (rechts; ohne Telekommunikationskabel).....	34
Abbildung 7:	Starkwurzel (19 Zentimeter) neben der Fernwärmeleitung (links; roter Pfeil Wurzel, gelber Pfeil Fernwärmeleitung) und Wurzelwachstum oberhalb der Fernwärmeleitung (rechts).....	35
Abbildung 8:	Fein- und Starkwurzel oberhalb der Bettung (links) und Feinwurzeln in der Bettung (rechts, u.a. gelber Pfeil)	36
Abbildung 9:	Blick in Haubenkanal, kein Wurzeleinwuchs sichtbar (links), Wurzel in Oberflächennähe (rechts, Bildquelle Gartenpflege Adamek)	37
Abbildung 10:	Vereinzelte Feinwurzeln an Grabenwand (links), hochgesetzte Baumscheibe (rechts).....	38
Abbildung 11:	Baum 1 direkt an Fernwärmetrasse (links), Wurzeln in 0,2 Metern Tiefe unter GOK oberhalb der Fernwärmetrasse in ca. zwei Metern Abstand von Baum 1 und fünf Metern Abstand von Baum 2 (rechts)	39

Abbildung 12:	Wurzelgeflecht in Vegetationstragschicht (links) und keine sichtbaren Wurzeln in Sandbettung (rechts)	40
Abbildung 13:	Wurzelwuchs in Trennfläche zwischen Telekommunikationskabel und Bettung (links) und zwischen Sandbettung und Tragschicht (rechts) bei Aufgrabung Nr. 6	42
Abbildung 14:	Darstellung der Situation (links: Trassenverlauf, rechts: Leitungsgaben mit querenden Wurzeln und Gehölzbestand)	43
Abbildung 15:	Wiederbepflanzung auf der Leitungstrasse.....	44
Abbildung 16:	Skizze - Aufbau eines KMR	46
Abbildung 17:	Schematische Darstellung der 90°-Bögen, inkl. Anordnung der Temperatursensoren und der resultierenden Dämmdicke an ausgewählten Punkten [45].....	47
Abbildung 18:	Zeitliche Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit von Rohren verschiedener Dimensionen [46]	48
Abbildung 19:	Skizze zur Berechnung von Q durch Zylinderschalen	49
Abbildung 20:	Skizze des Querschnittes der Forschungsstrecke (kein typischer FW-Rohrleitungsgaben).....	50
Abbildung 21:	Gemessene Temperaturdifferenzen von Sand-ZFSV Bettung	51
Abbildung 22:	FEM Berechnungsergebnisse dargestellt als Isothermen um ein Kunststoffmantelrohr [15]	52
Abbildung 23:	Anzahl der Gemessenen Temperaturen im Heizwasser (in Tausend)	54
Abbildung 24:	Anzahl der gemessenen Temperaturwerte pro Temperatur (in Tausend) ...	55
Abbildung 25:	Temperaturdaten an der Forschungsmessstrecke (von Juli bis April).....	56
Abbildung 26:	Einfache Simulation der Wärmeversuche	57
Abbildung 27:	Geometriemodell zur FEM Berechnung mit DN 500 Leitungen.....	58
Abbildung 28:	Isothermen bei sehr trockenem (links) und sehr feuchtem (rechts) Erdreich und 0°C Umgebungstemperatur	59
Abbildung 29:	Temperaturverlauf am Übergang Erdreich/ Luft nach sprunghaftem Anstieg der Umgebungstemperatur von 0°C auf 20°C	60
Abbildung 30:	Temperaturverlauf an der GOK (links) und dazu senkrecht (rechts) mit einem Sprung der Vorlaufemperatur von 110°C auf 130°C (weitere Details siehe Anlage 1).....	60

Abbildung 31: Realer Tagesverlauf der Sonneneinstrahlung (Leistung der Sonneneinstrahlung pro m ² über einen Tag) am Breitengrad/Längengrad: 50.083, 8.715 (PVGIS)	61
Abbildung 32: Zeitlicher Unterschied im Temperaturverlauf an der GOK bei T _{Umgebung} = 20°C und starker Sonneneinstrahlung	61
Abbildung 33: BAUM Set mit zehn Temperatur- (T, TK) und sechs Feuchte- (F) Sensoren ..	64
Abbildung 34: GRABEN Set mit 13 Temperatur- und zwei Feuchtesensoren.....	65
Abbildung 35: Skizze des geplanten Trassenverlaufs (nach Planungsunterlagen des Versorgers)	66
Abbildung 36: Blick in den Rohrgraben nach Installation der KMR Trasse samt Armaturen (vor Muffenmontage; unten rechts Sensorkabel)	67
Abbildung 37: Übersichtsskizze der Mess-Sets im Rohrleitungsgraben aus der „Vogelperspektive“ inklusive markanter Wurzelverläufe (braun) und Armaturen (grau stilisiert)	68
Abbildung 38: Set "Ungestört" – Temperaturen.....	70
Abbildung 39: Querschnitt Set "Ungestört"	70
Abbildung 40: Set "Ungestört" Temperaturen inkl. Umgebungstemperatur	71
Abbildung 41: Umgebungsbedingungen am Standort der Messstelle.....	72
Abbildung 42: Set "Graben" – Temperaturen (Ausfallzeitraum linear interpoliert zwischen letztem verfügbaren und nächstem gemessenen Wert).....	73
Abbildung 43: Set "Baum" Temperaturen Datenlücken (Ausfallzeitraum linear interpoliert zwischen letztem verfügbaren und nächstem gemessenen Wert)	74
Abbildung 44: Anordnung Messpunkte Set "Baum".....	74
Abbildung 45: Temperaturfeld V2 (feuchtes Erdreich) im Sommer	77
Abbildung 46: Temperaturfeld V2 (feuchtes Erdreich) im Winter	78
Abbildung 47: Temperaturfeld V4 (Schatten) im Sommer	78
Abbildung 48: Temperaturfeld V4 (Schatten) im Winter.....	79
Abbildung 49: Versuchsaufbau zur Auswirkung von Wärmefeldern auf das Wurzelwachstum	81

Abbildung 50:	Anordnung der Messsensoren in den Versuchskisten A (links oben), B (rechts oben), C (links mittig), D (rechts mittig) und E (links unten).....	83
Abbildung 51:	Wuchsverhalten der Weidenstecklinge (links) und Wachstumsverhalten zur Hauswand (rechts) im Juli 2018	84
Abbildung 52:	Versuchskisten v.l.n.r. A bis E (links), seitlicher Blick auf Versuchskiste E (mittig) und seitlicher Blick auf Versuchskiste A (rechts) zum Ende der Versuchslaufzeit im Juli 2019	84
Abbildung 53:	Temperaturverlauf vom 27.04.2018 bis zum 13.07.2019, hier beispielhaft an Versuchskiste B (Anordnung der Temperatursensoren rechts oben oder vgl. Abbildung 50 (rechts oben))	85
Abbildung 54:	Temperaturverläufe der horizontalen und vertikalen Temperatursensoren im jeweiligen Abstand von 120 und 240 mm von der Heizpatrone, hier beispielhaft an Versuchskiste B (Anordnung der Temperatursensoren vgl. Abbildung 50 (rechts oben))	86
Abbildung 55:	Abmessungen der Temperatursensoren zum Ende der Versuche im September 2019 (links) und zu Beginn der Versuche April 2018 (rechts)	87
Abbildung 56:	Temperaturmessungen an Zulauf (Versuchskisten A (blauer Graph)) und Ablauf der Kaltwasserleitung bzw. „Rücklaufleitung“ (Versuchskiste E (roter Graph)).....	88
Abbildung 57:	Feuchtemessungen beispielhaft an Versuchskiste A dargestellt (Anordnung der Temperatursensoren vgl. Abbildung 50 (links oben)).....	90
Abbildung 58:	Vertikales Wachstum bis zur Versuchskistensohle auf Seite der Heizpatrone (rote Einkreisung) und auf Seite der Kaltwasserleitung (blaue Einkreisung) (links) und horizontales Wurzelwachstum an der Versuchskistensohle (rechts) beispielhaft dargestellt an Versuchskiste C - Reihe 2	91
Abbildung 59:	Versuchskiste D: Horizontales Wurzelwachstum von warmer zur kalten Seite in Reihe 2 (links) und kalter zur warmen Seite in Reihe 3 (rechts).....	92
Abbildung 60:	Wurzelwachstum von der warmen zur kalten Seite (rote Pfeile) und von der kalten zur warmen Seite (blauer Pfeil) in Versuchskiste C, Reihe 1	92
Abbildung 61:	Wurzelwachstum von der warmen zur kalten Seite (roter Pfeil), Versuchskiste E Reihe 1 (links) und Reihe 2 (rechts)	93
Abbildung 62:	Wurzelwachstum oberflächennah auf der kalten Seite von Reihe 1 bis zur Reihe 3 in Versuchskiste E (blauer Pfeil).....	93

Abbildung 63:	Versuchsaufbau zur Wurzelfestigkeit von KMR-Muffenverbindungen.....	95
Abbildung 64:	Vorgehensweise zur Öffnung der Probekörper (Links: Vertikales Aufschneiden des Blumentopfes, Mitte: Vertikales Aufschneiden des durchwurzelten Substrats, Rechts: Entfernen der Schrumpfmanschette von der Rohroberfläche bei einer unvernetzten Muffe).....	96
Abbildung 65:	Wurzelanwuchs in den nicht-stoffschlüssig verbundenen Spalt zwischen Muffe ohne Dichtband und Kunststoffmantelrohroberfläche (links), Wurzeleinwuchs in eine Muffenverbindung, bei der durch bewusst eingebrachte Fremdstoffe keine adhäsive Verbindung zwischen Muffenrohr und Ummantelung des KMR erfolgen konnte (rechts)	97
Abbildung 66:	Schematische Darstellung einer fachgerecht applizierten Schrumpfmuffe aus PE-X mit Schmelzklebstoff (rot); nach AGFW FW 401-6 [53]	98
Abbildung 67:	KMR-Muffenverbindung mit Schmelzklebstoffwulst am Ende	98
Abbildung 68:	Wurzeln am nicht mit Schmelzklebstoff ausgefüllten Spalt am Ende des Muffenrohres von Probekörper IV b (links); Wurzeln unter dem Montagepatch von Probekörper II b (rechts).....	100
Abbildung 69:	Versuchsaufbau zu Auswirkungen des Dickenwachstums von Wurzeln auf Kunststoffmantelrohre: Versuchskiste A im Mai 2020 mit ausgeprägtem Wachstum an der Oberfläche (links), Versuchsaufbauschema (rechts).....	101
Abbildung 70:	Draufsicht auf die Versuchskiste A (links), B (mittig), C (rechts) mit den gemessenen Durchmesser der Weidenstecklinge an der GOK und dem Abstand zwischen den Rohrleitungen.....	102
Abbildung 71:	Wurzelwachstum zwischen den Rohrleitungen, Versuchskiste A, Steckling 1 (Querschnitt, links), Versuchskiste C, Steckling 2 (Draufsicht, rechts)	103
Abbildung 72:	Versuchskiste C, Steckling 2 Vorderansicht auf radiales Wurzelwachstum von 18,5 mm (links), Seitenansicht auf axiales Wurzelwachstum von 64,0 mm (rechts) jeweils mit gelbem Pfeil markiert.....	103
Abbildung 73:	Rohrmanteloberflächen aus Versuchskiste A (links) und Versuchskiste C (rechts).....	104
Abbildung 74:	Draufsicht auf das Versuchsfeld "Dodesheide" nach der Umpflanzung im Jahre 2009 mit aktueller Nummerierung in Klammern (links) [54], seitlicher Blick auf einen Abschnitt des Versuchsfeldes „Dodesheide“ im Jahr 2019 (rechts).....	105
Abbildung 75:	Schematische Darstellung der Aufgrabungen 2018.....	108

Abbildung 76:	Wurzeln der Esche (Baum Nr.20) im November 2018: Feinwurzeln im oberflächennahen Bereich, insbesondere stark ausgeprägt in Rehabilitationszone (links), Starkwurzel im oberflächennahen Bereich im Außenbereich der Rehabilitationszone (rechts)	108
Abbildung 77:	Wurzeln der Platane (Baum Nr.11) im November 2018. Fein- und Starkwurzeln in der Rehabilitationszone (links), Durchwurzelung von Starkwurzeln aus Rehabilitationszone in den anstehenden Boden (rechts)....	109
Abbildung 78:	Wurzeln der Linde (Baum Nr.10) im November 2018: Fein- und Starkwurzeln in der Rehabilitationszone (links), Durchwurzelung von Starkwurzeln aus Rehabilitationszone in den anstehenden Boden (rechts)	110
Abbildung 79:	ZFSV kurz nach Einbau um die Versuchsbäume (links), Einfüllen des ZFSV in die Baugrube mit Fahrmischern (rechts)	111
Abbildung 80:	Wurzelfilz an Grabenwand (links), umgeworfener ZFSV-Probekörper mit wenigen Erd- und Wurzelanhaftungen (rechts).....	112
Abbildung 81:	Abgestorbene Wurzelspitze (links), regenerierte Wurzeln ca. 5-10 Zentimeter entfernt von ZFSV (rechts)	113
Abbildung 82:	Dokumentation der ZFSV-Probestücke (links) und Aufnahme mit 5-facher Vergrößerung der ZFSV-Bruchflächen mittels Mikroskops, in der Mitte eine Auffälligkeit in Form eines schwarzen „Flecks“ erkennbar (rechts)	115
Abbildung 83:	Aufnahmen mit 25-facher Vergrößerung: Pore bis zu einer Größe von einem Millimeter (links) und Pore mit einer Größe von einem halben Millimeter (rechts, vgl. Abbildung 82, rechts, „schwarzer Fleck“ bei 5-facher Vergrößerung).....	115
Abbildung 84:	Durchwurzelung des nicht festen ZFSV an der GOK am Baumstandort Linde	116
Abbildung 85:	Das Schild an der Eiche wird nicht vom Baum weggedrückt, sondern umwachsen	128
Abbildung 86:	Neben vertikalen Bodenbewegungen sind auch reversible, bis in den Wurzelhorizont reichende Schwund- und Quellungsbewegungen bekannt. Ihre Auswirkung auf Schadensereignisse durch Wurzeln ist jedoch bisher nicht untersucht.....	130
Abbildung 87:	Beispielhafte Sensitivitätsanalyse.....	135
Abbildung 88:	Bewertungshierarchie.....	142

Abbildung 89: Sensitivitätsanalyse ökonomische Kriterien	157
Abbildung 90: Sensitivitätsanalyse technische Kriterien	157
Abbildung 91: Sensitivitätsanalyse ökologische Kriterien	157
Abbildung 92: Versuchsaufbau zur Wassersättigung eines ZFSV-Probenkörpers.....	174
Abbildung 93: Versuchsaufbau zur vereinfachten Ermittlung der Wasserdurchlässigkeit mit 1 mWS an einem gesättigten ZFSV-Probekörper	175
Abbildung 94: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Wuchsverhaltens in ZFSV mit erhöhten pH-Werten.....	176
Abbildung 95: Versuchsaufbau zum paarweisen Vergleich von ZFSV und Böden	177

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassung der Aufgrabungsergebnisse	25
Tabelle 2:	Ermittelte Bodenparameter in den Sandbettungen der In-situ-Aufgrabungen...41	
Tabelle 3	Wärmeleitfähigkeiten von Böden.....	49
Tabelle 4	Berechnung der abgegebenen Wärmeleistung in Abhängigkeit der Betriebstemperaturen	52
Tabelle 5:	Übersicht zu den Temperaturmessungen an RUK und ROK.....	54
Tabelle 6:	Übersicht zu den Messwerten der Forschungsmesstrecke	56
Tabelle 7:	Veränderte Kennwerte in den untersuchten Szenarien	58
Tabelle 8	Ereignisse IBN Messtechnik	68
Tabelle 9:	Varianten des FEM Rechenmodells	76
Tabelle 10:	Übersicht Wärmeversuche	94
Tabelle 11:	Ergebnisübersicht der Outside-In-Versuche.....	99
Tabelle 12:	Vergleichende Messwerte der Eindrückversuche an der Oberfläche zum Mutterboden und zwischen den Rohrleitungen (in Millimeter)	104
Tabelle 13:	Versuchsprogramm und -ergebnisse des im Versuchsfeld eingebauten ZFSV	113
Tabelle 14:	Ergebnisse der pH-Wert-Messungen im Versuchsfeld Dodesheide	117
Tabelle 15:	9-Punkte-Bewertungsskala, nach [69].....	132
Tabelle 16:	Reziproke 9-Punkte-Bewertungsskala	132
Tabelle 17:	Schema zur Berechnung der AHP-Gewichtung [70].....	133
Tabelle 18:	Technische Kriterien	139
Tabelle 19:	Sozio-ökologische Kriterien – Teil 1	139
Tabelle 20:	Sozio-ökologische Kriterien – Teil 2	140
Tabelle 21:	Ökonomische Kriterien.....	141
Tabelle 22:	Gewichtung der Primärkriterien.....	143
Tabelle 23:	Gewichtung der Subkriterien der Ökonomischen Kriterien	143
Tabelle 24:	Gewichtung der Subkriterien der Folgekosten.....	144
Tabelle 25:	Gewichtung der Subkriterien der sozio-ökologischen Faktoren	144

Tabelle 26: Gewichtung der Subkriterien der Emissionen.....	145
Tabelle 27: Gewichtung der Subkriterien der Ressourcenverbrauch	145
Tabelle 28: Gewichtung der Subkriterien des Bodens	146
Tabelle 29: Gewichtung der Subkriterien des Wassers.....	146
Tabelle 30: Gewichtung der Subkriterien der Natur	147
Tabelle 31: Gewichtung der Subkriterien der sozialen Kriterien.....	147
Tabelle 32: Gewichtung der Subkriterien der technischen Faktoren	148
Tabelle 33: Gewichtung der Subkriterien der Baudurchführung.....	148
Tabelle 34: Variantenvergleich des Sub-Kriteriums der Ökonomischen Kriterien.....	149
Tabelle 35: Variantenvergleich der Subkriterien der Folgekosten	150
Tabelle 36: Variantenvergleich der Subkriterien der Emissionen	150
Tabelle 37: Variantenvergleich der Subkriterien des Ressourcenverbrauchs	151
Tabelle 38: Variantenvergleich des Subkriteriums des Bodens	151
Tabelle 39: Variantenvergleich der Subkriterien des Wassers.....	152
Tabelle 40: Variantenvergleich der Subkriterien der Natur.....	153
Tabelle 41: Variantenvergleich der Subkriterien der sozialen Kriterien	154
Tabelle 42: Variantenvergleich des Subkriteriums der Technischen Kriterien.....	154
Tabelle 43: Variantenvergleich des Subkriteriums der Technischen Kriterien.....	154
Tabelle 44: Variantenvergleich der Subkriterien der Baudurchführung	155
Tabelle 45: Gesamtgewichtung	156
Tabelle 46: Versuchsprogramm zum paarweisen Vergleich (Erläuterung der Kürzel: ZA: ZFSV mit Durchlässigkeit A; BA: Boden mit Durchlässigkeit A; ZB: ZFSV mit Durchlässigkeit B; BB: Boden mit Durchlässigkeit B; etc.).....	177

Literaturverzeichnis

- [1] Bennerscheidt, C.; Goerke, M.; Schmiedener, H.: „Erarbeitung eines Konzepts für die Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen (Vorstudie)“. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH in Kooperation mit dem AGFW - Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., 2013.
- [2] Bosseler, B., Bennerscheidt, C., Bartel, M., Schmiedener, H.: „Ökologische Auswirkungen von Wurzeleinwuchs in Abwasserkanälen und –leitungen und ökonomische Maßnahmen zur Schadensvermeidung und Sanierung“. IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur in Kooperation mit Gelsenkanal (Auftraggeber), gefördert vom Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft NRW.
- [3] Stützel, Th.; Bosseler, B.; Bennerscheidt, C.; Schmiedener, H.: „Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen- und -kanäle“; IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur, in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Spezielle Botanik der Ruhr-Universität Bochum unter Beteiligung verschiedener NRW-Netzbetreiber im Auftrag des Umweltministeriums NRW (MUNLV), Juli 2004.
- [4] Stützel, Th.; Bosseler, B.; Bennerscheidt, C.; Schmiedener, H.; Streckenbach, M.: „Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen- und -kanäle - Ergänzungsvorhaben“; Lehrstuhl für Evolution und Biodiversität der Pflanzen der Ruhr-Universität Bochum in Kooperation mit dem IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur unter Beteiligung verschiedener NRW-Netzbetreiber im Auftrag des Umweltministeriums NRW (MUNLV), Juni 2007.
- [5] Bennerscheidt, C.; Schmiedener, H.; Streckenbach, M.; Hüben, S.; Schunicht, J.; Ströcker, K.: „Wurzeleinwuchs in Abwasserleitungen und Kanäle – ergänzende Feldversuche“. IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Biodiversität und Evolution der Pflanzen an der Ruhr-Universität Bochum und dem FIW – Forschungsinstitut für Wasser- und Abfallwirtschaft an der RWTH Aachen. Gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- [6] Bennerscheidt, C.: „Betriebs- und Sanierungsmaßnahmen bei Wurzelschäden in öffentlichen und privaten Abwasserleitungen und –kanälen – Inspektionen“. IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH in Kooperation mit der Gemeinde Raesfeld und dem Lehrstuhl für Biodiversität und Evolution der Pflanzen an der Ruhr-Universität Bochum Gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.

- [7] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.: DWA-M 162 „Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle“. Hennef, Februar 2013. Textgleich als DVGW GW 125 und FGSV Nr. 939 erschienen.
- [8] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 1998:2018-07 „Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Flächen; Richtlinien für die Planung“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 2018.
- [9] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18920:2014-07 „Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Schutz von Bäumen, Pflanzenbeständen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 2014.
- [10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV): „Richtlinie für die Anlage von Straßen, Teil Landschaftspflege, Abschnitt 4: Schutz von Bäumen, Vegetationsbeständen und Tieren bei Baumaßnahmen“, RAS-LP4, 1999.
- [11] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL): „Empfehlungen für Baumpflanzungen - Teil1: „Planung, Pflanzarbeiten, Pflege“. 2015.
- [12] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (FLL): „Empfehlungen für Baumpflanzungen - „Teil 2: Standortvorbereitungen für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterung, Bauweisen und Substrate“. 2010.
- [13] Stützel, T.: „Vortrag zur Genese von Schäden an Straßenbelegen durch Wurzeln“. IKT-Seminar, 2011.
- [14] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV): „Merkblatt über Baumstandorte und unterirdische Ver- und Entsorgungsleitungen“. Köln, 1989.
- [15] Arbeitsgemeinschaft Fernwärme e.V. bei der VDEW e.V. (1988): „Bodenbeeinflussung durch Bau und Betrieb erdverlegter Fernwärmeleitungen“. Eine Ausarbeitung der Arbeitsgruppe "Bodenbeeinflussung" im AK "Netzbautechnik". Merkblatt 4.2.2. Unter Mitarbeit von Altenöder, Block, Gerke-Reineke, Hagemeister, König, Marschinski et al. Frankfurt (Main) (Merkblätter der Fernwärmeversorgung, 4), 02.08.1988 (46).
- [16] Mosler, J.: „Wärmeverlust von Fernwärmeleitungen“. Dissertation, Universität Dortmund, Fachbereich Chemietechnik, 1987. Zitiert aus [15].
- [17] Lyr, H.: „Effect of the root temperature on growth parameters of various European tree species“. Ann Sci For Hefreihe 53, Seiten 317-323, 1996.
- [18] Heidger, Clemens, IHK-Hannover ö.b.u.v. Sachverständiger für Garten- und Landschaftsbau: Vortrag auf dem IKT-Lehrgang „Sachkundiger für Vegetation und unterirdischer Infrastruktur“.

- [19] Dengler, Roland: „Sachverständigen-Gutachten Nr. 72/86 BV - Erneuerung der Promenade - Untersuchungen des vorhandenen Baumbestandes sowie der Silberahorn-Reihe in de Fürstenberg-Allee“.
- [20] Richner, Walter: „Wurzelwachstum junger Maispflanzen in Abhängigkeit von der Temperatur“. Dissertation, ETH Zürich, 1992.
- [21] Engels, Ch.; Marschner, H.: „Einfluss suboptimaler Wurzeltemperaturen auf Wachstum und Nährstoffaufnahme bei Mais“. Universität Hohenheim, Institut für Pflanzenernährung, Mitt. Ges. Pflanzenbauwis., Heftnummer 1, Seiten 58-60, 1988.
- [22] Canham, A.E.: “Soil Temperature and Plant Growth”. Advan. Hort. Sci., Seiten 440-451, 1962.
- [23] Macduff, J.H.; Hopper, M.J.; Dhanoa, M.S.: “Wild Effect of temperature on parameters of root growth”. Plant and Soil, Heftnummer 94, Seiten 321-332, 1996.
- [24] Rogler, R.-D.; Loth, C.: „Parameterstudie zur Erwärmung erdverlegter Kabelanlagen unter Berücksichtigung von Geometrie und Materialeigenschaften der Bettung“. IRO-Tagungsband „Rohrleitungen – Transportmedium für Trinkwasser und Abwasser“ Tagungsband zum 33. Oldenburger Rohrleitungsforum, Band 46, S.713. Vulkan-Verlag GmbH, Essen, 2019.
- [25] Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV NRW): „Technische Anforderungen und Empfehlungen für Deponieabdichtungssysteme - Konkretisierungen und Empfehlungen zur Deponieverordnung, LANUV-Arbeitsblatt 13“. Recklinghausen, 2015.
- [26] Kutschera, L.; Lichtenegger, E.: „Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher“. Leopold Stocker Verlag, Graz, 2002. Zitiert aus [25].
- [27] Hausen, Robert: „Das Wetter und der Rasen“. Deutscher Wetterdienst DWD, Offenbach, 2016. URL: https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2016/5/9.html, abgerufen am 22.05.2020.
- [28] Simon, J.; Felde, V.; Peth, S.; Kimm-Friedenberg S.; Middendorf B.: „Entwicklung selbstverdichtender Verfüllbaustoffe mit hohem Durchwurzelungswiderstand unter bevorzugter Verwendung des entnommenen Bodenaushubs“. Kassel: Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2016.
- [29] Simon, J.: „Granulometrische Anpassung von ZFSV zur Optimierung von Wurzelhemmung und thermischer Leitfähigkeit“. Dissertation, Universität Kassel, Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 31, kassel university press GmbH, Kassel, 2019.

- [30] Glück, Bernd: „Wärmeverlustströme von erdverlegten Rohrleitungen“. Stadt- und Gebäudetechnik Vol. 38 No. 5, pp 65-68, 1984
- [31] Süddeutsche Zeitung GmbH (Hg.): „Leck in Leitung für Fernwärme. Pro Tag versickern 50 000 Liter Wasser an Karl-Theodor-Straße“. 2018. Online verfügbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/muenchen-leck-in-leitung-fuer-fernwaerme-1.3959766>, abgerufen am 27.04.2018.
- [32] IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH: „Wurzeln und Fernwärmeleitungen: Neues Forschungsvorhaben von IKT und AGFW“. Veröffentlicht im IKT-Newsletter, September 2017.
- [33] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.: „Forschungsvorhaben: Interaktion von Wurzel und Fernwärmeleitungen“. Veröffentlicht in AGFW Aktuell, Ausgabe 29/17, Frankfurt am Main, November 2017.
- [34] Salomon, M.; Grimm, S.: „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen und Fernwärmeleitungen“. Veröffentlicht in „Fernwärme + KWK – durch Forschung fit für die Zukunft, 2. Auflage. AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt am Main, Oktober 2018.
- [35] Grimm, S. (2018): „Interaktion von Wurzeln und Fernwärmeleitungen“. Neues Forschungsvorhaben von IKT und AGFW. In: EuroHeat&Power 47 (9), S. 44.
- [36] Salomon, M. (2018): „Praxisrelevantes Wissen für eine Optimierung der Trassenfindung“. In: EuroHeat&Power 47 (9), S. 46–47.
- [37] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 17892-4 „Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung (ISO 17892-4:2016)“; Deutsche Fassung EN ISO 17892-4:2016. Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 2017.
- [38] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18125-2:2011-03 „Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Dichte des Bodens - Teil 2: Feldversuche“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 2011.
- [39] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18130-1:1998-05 „Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 1998. Zurückgezogen. Ersetzt durch DIN EN ISO 17892-11 „Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 11: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit“ (ISO 17892-11:2019-05); Deutsche Fassung EN ISO 17892-11:2019-05. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2019.

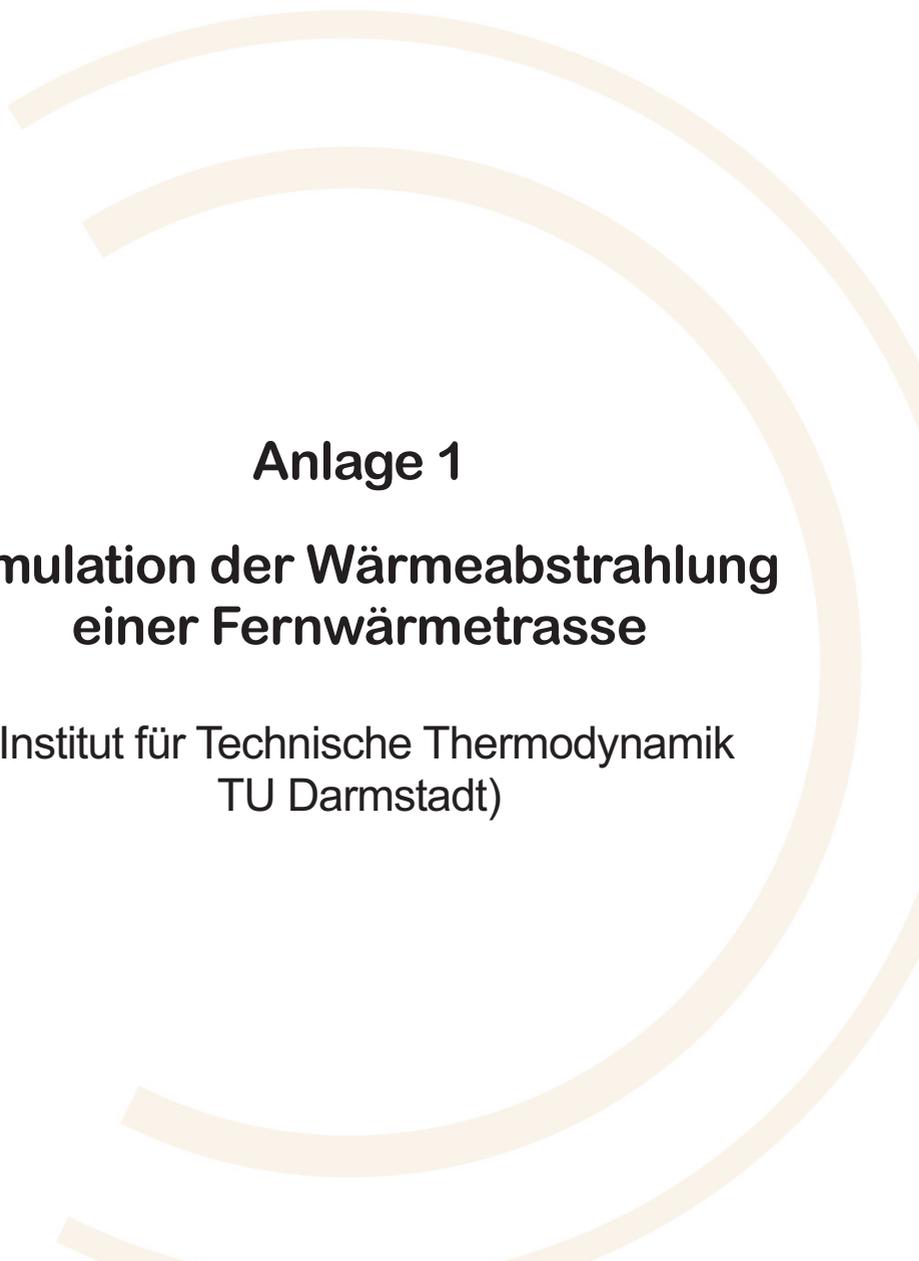
- [40] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 18128:2002-12 „Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung des Glühverlustes“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2002.
- [41] Männer, Jörg: „Untersuchung des thermischen Verhaltens von Böden“. Kurzfassung Projektarbeit. Hg. v. Technische Universität Dresden (Fakultät Bauingenieurwesen). Institut für Geotechnik. Dresden, 2012. Online verfügbar unter https://tu-dresden.de/bu/bauingenieurwesen/geotechnik/ressourcen/dateien/studium/abschlussarbeiten/abgeschlossene-arbeiten/projektarbeiten/2012/Kurzfassung_JM.pdf?lang=de, zuletzt geprüft am 09.11.2017.
- [42] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.: FW 401 Teil 1: „Verlegung und Statik von KMR für Fernwärmenetze - Anwendungsbereich und Gliederung“. Frankfurt am Main, Dezember 2007.
- [43] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 253 „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 GmbH, Berlin, März 2020:
- [44] Frederiksen, Svend; Werner, Sven: „District heating and cooling“. Verlag: Studentlitteratur AB, Lund, ISBN: 978-91-44-08530-2, 2013.
- [45] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (Hg.): „EnEff: Wärme - Technische Gebrauchsdaueranalyse von Wärmenetzen unter Berücksichtigung volatiler erneuerbarer Energien. Teil I: Untersuchungsergebnisse zur Materialdegradation“. Frankfurt am Main: AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH (Forschung & Entwicklung, 55). Frankfurt am Main, 2020.
- [46] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.: FW 401-3: Teil 3: „Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze. Bauteile; Gerade Verbundmantelrohre“. In: AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (Hg.): Regelwerk Fernwärme. Acknowledged rules of technology for district heating. cooling and CHP. Frankfurt am Main: AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH, 2019.
- [47] Stephan, Peter: „Thermodynamik. Band 1: Einstoffsysteme, Grundlagen und technische Anwendungen; mit 43 Tabellen“. 16., vollständig neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch), 2006. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-29262-4>.

- [48] Rogler, Ralf-Dieter: „Wärmeleitfähigkeit verschiedener Bettungsmaterialien erdverlegter Stromtrassen und ihre Wirkung auf den Nennstrom. Rohrleitungen - innovative Bau- und Sanierungstechniken“. Vortrag Block 12 - Innovative Bettungsverfahren für Höchstspannungs-Erdkabeltrassen - 32. Oldenburger Rohrleitungsforum, 2018.
- [49] Germanpipe; Brugg: „Herstellerdatenblatt“. Permanent Fernwärmeleitung, 2015.
- [50] Dahlem, Karl-Heinz: „Der Einfluß des Grundwassers auf den Wärmeverlust erdreichberührter Bauteile. The effect of groundwater on the heat loss of building parts in contact with the ground“. Zugl.: Kaiserslautern, Univ., Diss., 2000. Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern. Architektur/ Raum- und Umweltplanung/ Bauingenieurwesen.
- [51] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.: „EnEff:Wärme - Einsatz fließfähiger Verfüllstoffe zur KMR-Verlegung“. Frankfurt am Main: AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH (Forschung & Entwicklung, 43). Frankfurt am Main, 2017.
- [52] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.: FW 401-7 - Teil 7: „Bauteile; Kompensationselemente und sonstige Systembauteile“. In: AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V. (Hg.): Regelwerk Fernwärme. Acknowledged rules of technology for district heating. cooling and CHP. Frankfurt am Main: AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH. Frankfurt am Main, 2019.
- [53] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.: AGFW-Arbeitsblatt FW 401 - Teil 6: „Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze - Bauteile; Rohrverbindungen“. Frankfurt am Main, Dezember 2007.
- [54] Bennerscheidt, C.; Bludau, F.; Schmiedener, H.; Schröder, K.; Streckenbach, M.; Stützel, T.: „Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre - Teil 1: Verpflanzung von Großbäumen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück“. Gelsenkirchen: Institut für unterirdische Infrastruktur gGmbH, 2011.
- [55] Streckenbach, M.; Bennerscheidt, C.; Schröder, K.: „Umweltsicherer Kanalbau durch wurzelfeste Bettung der Rohre - Teil 2: Anlage von Rehabilitationszonen an den verpflanzten Großbäumen mit unterirdischer Versuchsanlage (Wurzelgräben) am Standort Osnabrück“. Sachverständigen Büro für urbane Vegetation, Bochum und IKT - Institut für unterirdische Infrastruktur gGmbH, Gelsenkirchen, 2013.

- [56] Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA): „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen: Teil II: Technische Regeln für die Verwertung 1.2 Bodenmaterial (TR Boden)“. November 2004.
- [57] Glück, Bernd: „Wärmeverlustströme von erdverlegten Rohrleitungen“. Stadt- und Gebäudetechnik Vol. 38, No. 5, pp 65-68, 1984.
- [58] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen FGSV: „Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau - H ZFSV“. FGSV Verlag GmbH, Köln, 2012.
- [59] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.: DWA-A 139 „Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen“. Hennef, März 2019.
- [60] IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH: „Präsentation der 8. Lenkungsreissitzung im IKT-Warentest „ZFSV“ am 23. April 2020“. (unveröffentlicht)
- [61] Kadereit, J.W., Körner, C., Kost, B., Sonnewald, U.: „Strasburger - Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften“. Springer Spektrum, 37. Auflage, ISBN 978-3-642-54434-7, Heidelberg, 2014.
- [62] Lüttge, U.; Kluge, M.; Thiel, G.: „Botanik – Die umfassende Biologie der Pflanzen“. Wiley-VCH, Weinheim, ISBN: 978-3-527-32030-1, 1. Auflage, 2010.
- [63] vom Orde, J.: „Induziertes Wachstum von Wurzeln unter befestigten Wegen - Eine Fallstudie im botanischen Garten Bochum.“ Bachelorarbeit, Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl Evolution und Biodiversität der Pflanzen, 2009.
- [64] Thewes, M.; Kamarianakis, S.; Bielecki, R.: „Analyse zur ökologischen und ökonomischen Bewertung offener und geschlossener Bauverfahren zur Herstellung unterirdischer Infrastrukturmaßnahmen – Phase II“. Endbericht der Kooperationspartner Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Ruhr-Universität Bochum, GSTT Beratungsservice GmbH, Berlin, 2011.
- [65] Saaty, T. L.: „The Analytic Hierarchy Process“. RWS Publications, Pittsburgh, 1980.
- [66] Zhang, K.: „Entwicklung eines integrierten multikriteriellen Entscheidungsunterstützungssystems für Gruppen“. 1. Auflage. Aachen: Shaker Verlag, 2004.
- [67] Zimmermann, H.-J., Gutsche, L.: „Multi-Criteria Analyse; Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen“. 1.Auflage. Berlin: Springer Verlag, 1991.

- [68] Ossadnik, W.: „Mehrzielorientiertes strategisches Controlling: methodische Grundlagen und Fallstudien zum führungsunterstützenden Einsatz des Analytischen Hierarchie-Prozesses“. Heidelberg, 1998.
- [69] Saaty, T. L.: “Decision Making for Leaders”. 3. Aufl., RWS Publications, Pittsburgh, 2001.
- [70] Ossadnik, W.: „Mehrzielorientiertes strategisches Controlling: methodische Grundlagen und Fallstudien zum führungsunterstützenden Einsatz des Analytischen Hierarchie-Prozesses“. Heidelberg, 1998.
- [71] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.; IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH: 2. Projektkreissitzung - Protokoll vom 27.-28.11.2018. Osnabrück, 2018.
- [72] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.; IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH: 3. Projektkreissitzung - Protokoll vom 07.05.2019. Frankfurt a.M., 2019.
- [73] Kamarianakis, S.: „Ein multikriterielles fuzzy- und risikobasiertes Entscheidungsmodell für die Planung unterirdischer Infrastruktur“. Lehrstuhl für Tunnelbau, Leitungsbau und Baubetrieb, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 2013.
- [74] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN 13941-2 „Fernwärmerohre - Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr-Verbundsystemen für direkt erdverlegte Heißwasser-Fernwärmenetze - Teil 2: Installation“ Deutsche Fassung EN 13941-2:2019-12. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2019.
- [75] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.; IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH: 5. Projektkreissitzung - Protokoll vom 28.04.2020. Webmeeting, 2020.
- [76] Rohrleitungsverband e.V.: „Netzmeister – Technisches Grundwissen – Gas – Wasser – Fernwärme“. München: Oldenburg Industrieverlag, 2008.
- [77] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.: AGFW-Arbeitsblatt FW 401 – Teil 14: „Verlegung und Statik von Kunststoffmantelrohren (KMR) für Fernwärmenetze – Muffenmontage“. Frankfurt am Main, Dezember 2007.
- [78] Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN 13941 „Fernwärmerohre - Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr-Verbundsystemen für direkt erdverlegte Heißwasser-Fernwärmenetze - Teil 2: Installation“. Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2019.

- [79] Bartsch D., Buchner P., Schleyer A., Eigner G., „Bäume verursachen Verschiebung bei kaltverlegten KMR-Leitungen“, Euroheat & Power 5/2001 S. 52-59.
- [80] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL): „ZTV-Baumpflege - Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die Baumpflege“. Bonn, 2017.
- [81] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.: „Nachhaltige Sektordurchdringung von ZFSV als Bettungsmaterial im Fernwärmeleitungsbau“ Frankfurt am Main: AGFW-Projektgesellschaft für Rationalisierung, Information und Standardisierung mbH (Forschung & Entwicklung, 50). Frankfurt am Main, November 2019.
- [82] RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V.: „Substrate für Pflanzen – Gütesicherung RAL-GZ 250“. Beuth-Verlag GmbH, Berlin, Mai 2018.
- [83] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.: FW 603 „Muffenmontage an Kunststoffmantelrohren (KMR) und flexiblen Rohrsystemen, Prüfung von Muffenmonteuren“. Frankfurt am Main, Mai 2020.
- [84] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V.; IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH: Sitzung AGFW-Regelwerksgremium EK Netze - Protokoll vom 10.06.2020. Webmeeting, 2020. (unveröffentlicht)
- [85] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.: Auszug aus dem Protokoll der Sitzung der DWA-Fachausschüsse ES-2 „Systembezogene Planung“ und ES-3 „Anlagenbezogene Planung“. 09. Juni 2020 als Webkonferenz. (unveröffentlicht)
- [86] DVGW – Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches: GW 125-B1 Merkblatt „1. Beiblatt zu GW 125-B1 Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle: Beurteilungskriterien für Baumwurzel- Gasrohrleitungs-Interaktionen“. Bonn, März 2016.



Anlage 1

**Simulation der Wärmeabstrahlung
einer Fernwärmetrasse**

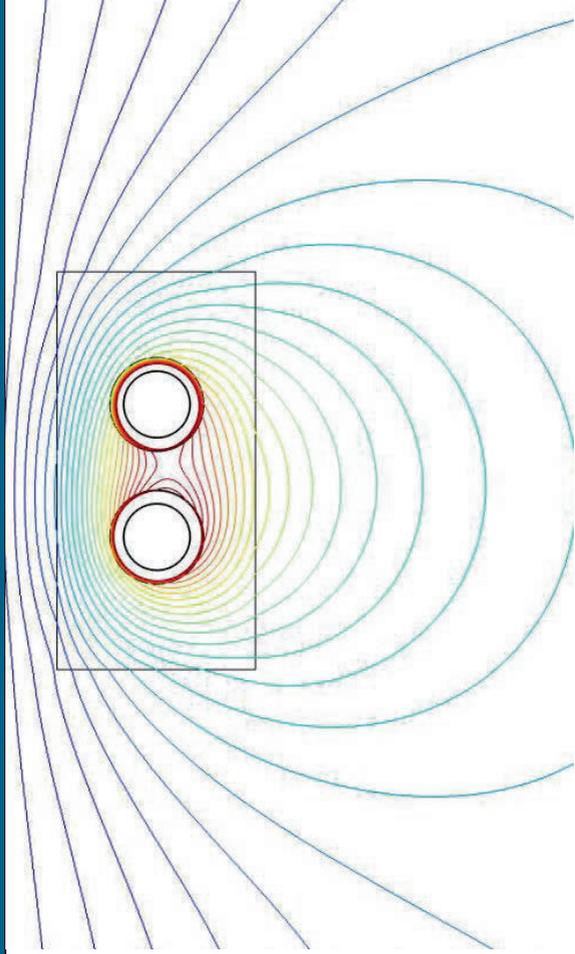
(Institut für Technische Thermodynamik
TU Darmstadt)

Simulation Wärmefelder

Abschlusspräsentation



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

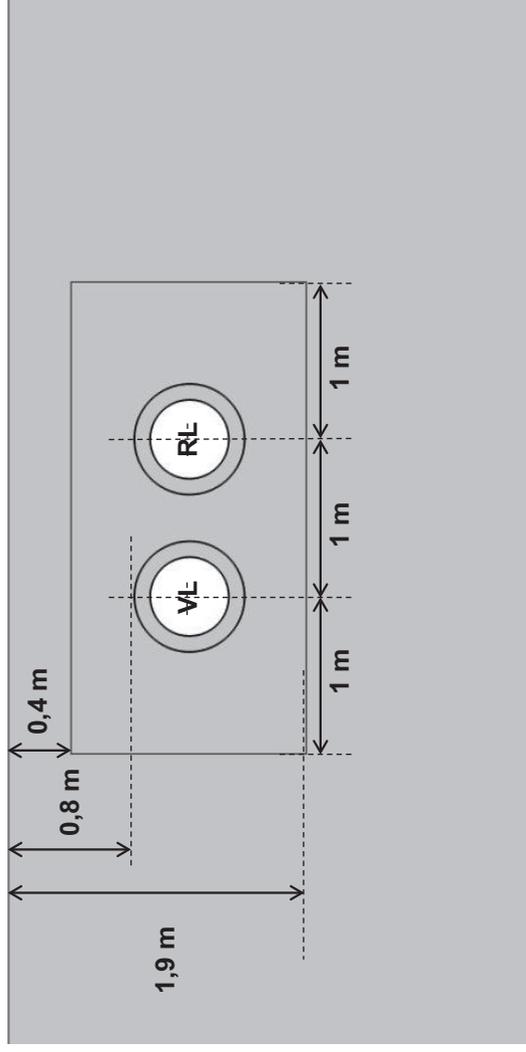


Untersuchte Geometrie



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Nennweite: DN 500
- Dämmstärke 1



Stoffwerte



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Bereich	Mediumrohr	Dämmschicht	Mantel	Bettung	Erdreich
Material	Stahl (P235GH)	PUR Schaum	PE (PEHD)	Sand trocken → feucht	Ton/Schluff trocken → feucht
λ [W/mK]	57 ²⁾	0,026 ¹⁾	0,4 ¹⁾	0,3 2,7 ³⁾	0,53 2,8 ³⁾
c [J/kgK]	461 ²⁾	1300 ⁶⁾	1900 ⁵⁾	725 1190 ⁷⁾	815 1142 ⁷⁾
ρ [kg/m³]	7850 ²⁾	55 ⁴⁾	963 ⁵⁾	2000 2100 ⁷⁾	1900 2100 ⁷⁾

Quellen:

- 1) „Randbedingungen für Temperaturfelder um Fernwärmeleitungen im Erdreich“; AGFW; Grimm, Sebastian; 31.07.2018
- 2) Datenblatt Thyssen Krupp
- 3) Persönliche Kommunikation Hr. Grimm 14.06.2018
- 4) Nach DIN EN 253
- 5) Datenblatt kern.de
- 6) waerme-daemmstoffe.de
- 7) Nach VDI 4640

Allgemeine Randbedingungen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Vorlauftemperatur: $T_{VL} = 110 \text{ °C}$
- Rücklauftemperatur: $T_{RL} = 80 \text{ °C}$
- Erdreichtemperatur: $T_E = 9,8 \text{ °C}$ (in 10 m Tiefe)
- Umgebungstemperatur: $T_U = 0 \text{ °C}$ oder $T_U = 20 \text{ °C}$
- An Oberfläche: Wärmeübertragung durch Strahlung ($\epsilon_{\text{trocken}} = 0,92$ und $\epsilon_{\text{feucht}} = 0,95$)¹⁾ und freie Konvektion, jeweils an Umgebung

Quelle:

1) kleiberinfrared.de

Untersuchte Szenarien

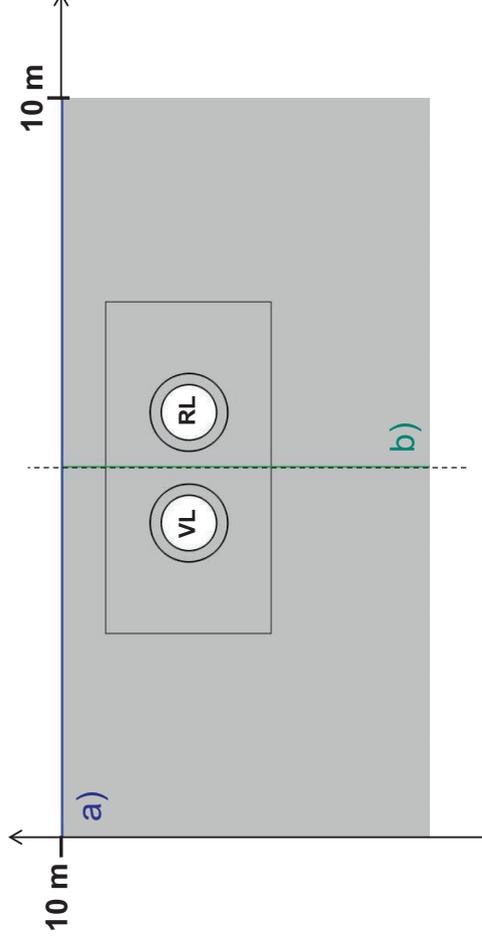


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- 1) Stationärer Zustand mit $T_U = 0\text{ °C}$ und $T_U = 20\text{ °C}$
 - a) Erdreich und Bettung trocken
 - b) Erdreich und Bettung feucht
- 2) Sprung der Umgebungstemperatur von $T_U = 0\text{ °C}$ auf $T_U = 20\text{ °C}$
 - a) Erdreich und Bettung feucht
- 3) Sprung der Vorlauftemperatur von $T_{VL} = 110\text{ °C}$ auf $T_{VL} = 130\text{ °C}$ bei $T_U = 20\text{ °C}$
 - a) Erdreich und Bettung feucht
- 4) Einfluss der Sonneneinstrahlung (Tagesverlauf) bei $T_U = 20\text{ °C}$
 - a) Erdreich und Bettung feucht

Untersuchte Szenarien

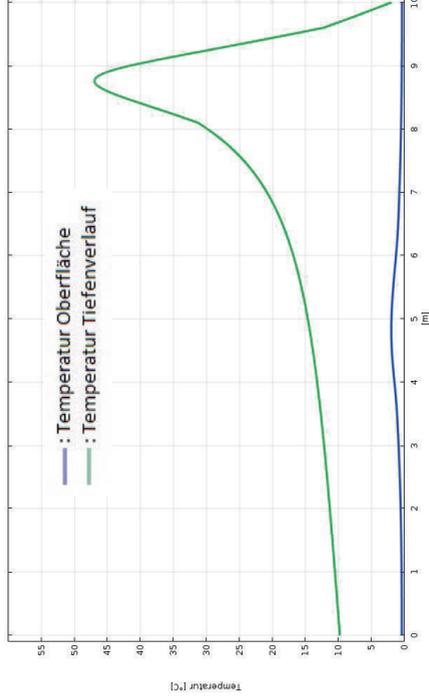
- Betrachtung von:
 1. Temperaturverlauf an der Oberfläche entlang a)
 2. Temperaturverlauf in Erdreich entlang b)



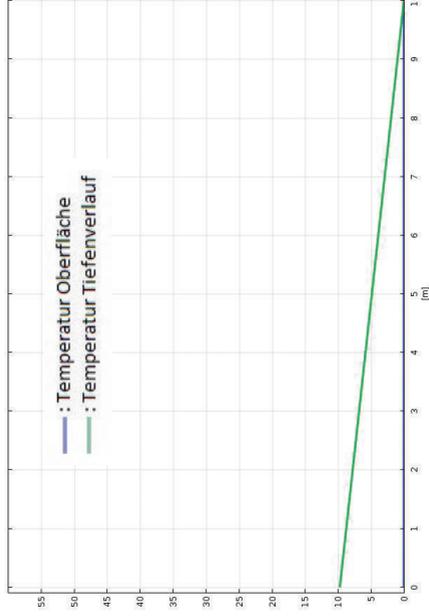
Szenario 1 – a) trocken

- Stationärer Zustand mit $T_U = 0\text{ °C}$

Erdeich mit Fernwärmeleitung



Erdreich - ungestört

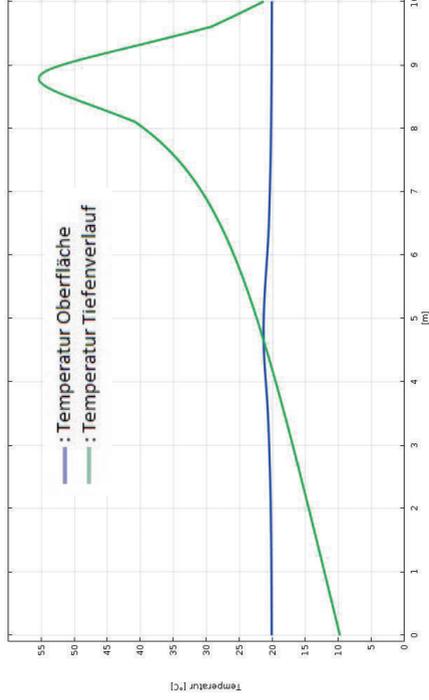


- Maximale Temperatur an der Oberfläche $2,0\text{ °C}$ ($\Delta T = 1,9\text{ K}$)
 - Maximale Temperatur im Erdreich $47,0\text{ °C}$ (Tiefe: $1,3\text{ m}$)
- ΔT : Differenz zu ungestörtem Erdreich

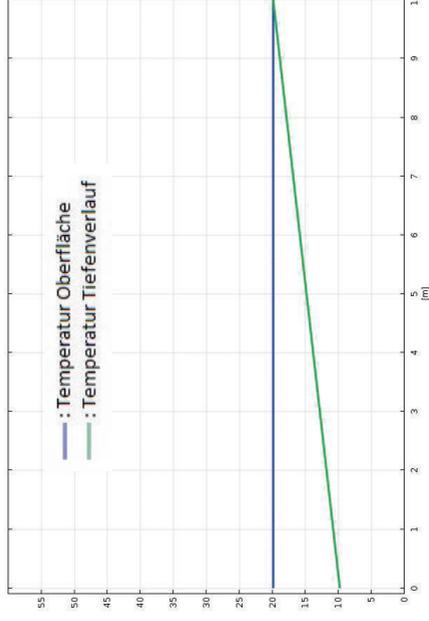
Szenario 1 – a) trocken

- Stationärer Zustand mit $T_U = 20\text{ °C}$

Erdeich mit Fernwärmeleitung



Erdeich - ungestört

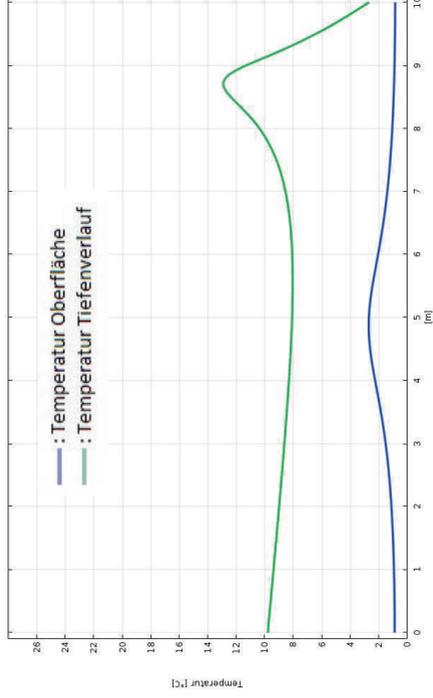


- Maximale Temperatur an der Oberfläche $21,4\text{ °C}$ ($\Delta T = 1,5\text{ K}$)
 - Maximale Temperatur im Erdeich $55,4\text{ °C}$ (Tiefe: $1,2\text{ m}$)
- ΔT : Differenz zu ungestörtem Erdeich

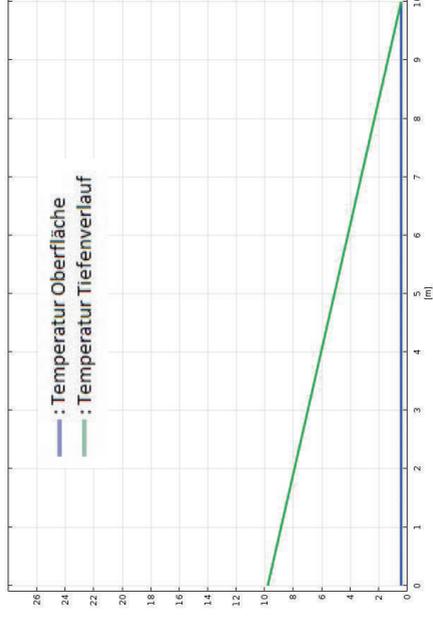
Szenario 1 – b) feucht

- Stationärer Zustand mit $T_U = 0\text{ °C}$

Erdeich mit Fernwärmeleitung



Erdreich - ungestört

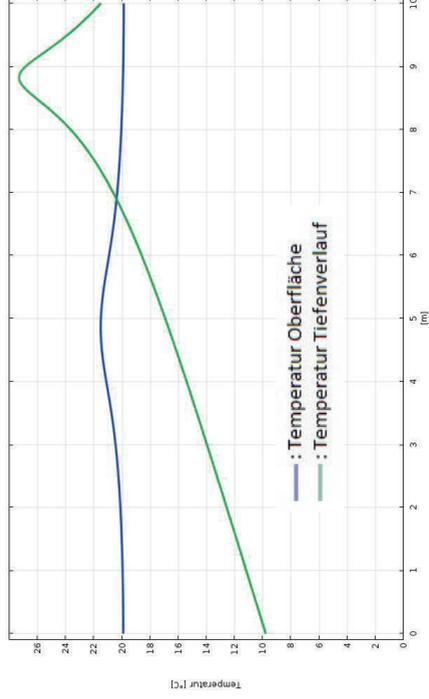


- Maximale Temperatur an der Oberfläche $2,7\text{ °C}$ ($\Delta T = 2,2\text{ K}$)
 - Maximale Temperatur im Erdreich $12,9\text{ °C}$ (Tiefe: $1,3\text{ m}$)
- ΔT : Differenz zu ungestörtem Erdreich

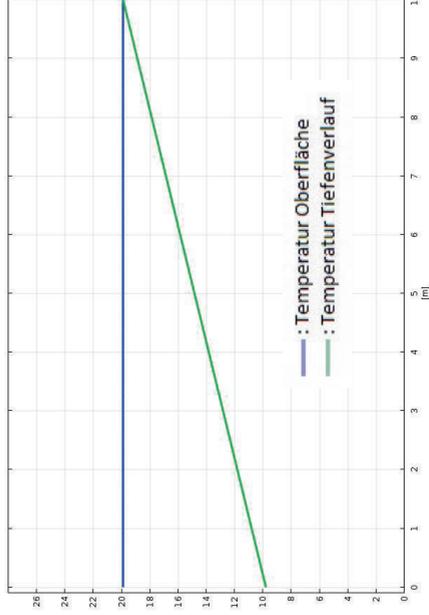
Szenario 1 - feucht

- Stationärer Zustand mit $T_U = 20\text{ °C}$

Erdeich mit Fernwärmeleitung



Erdeich - ungestört

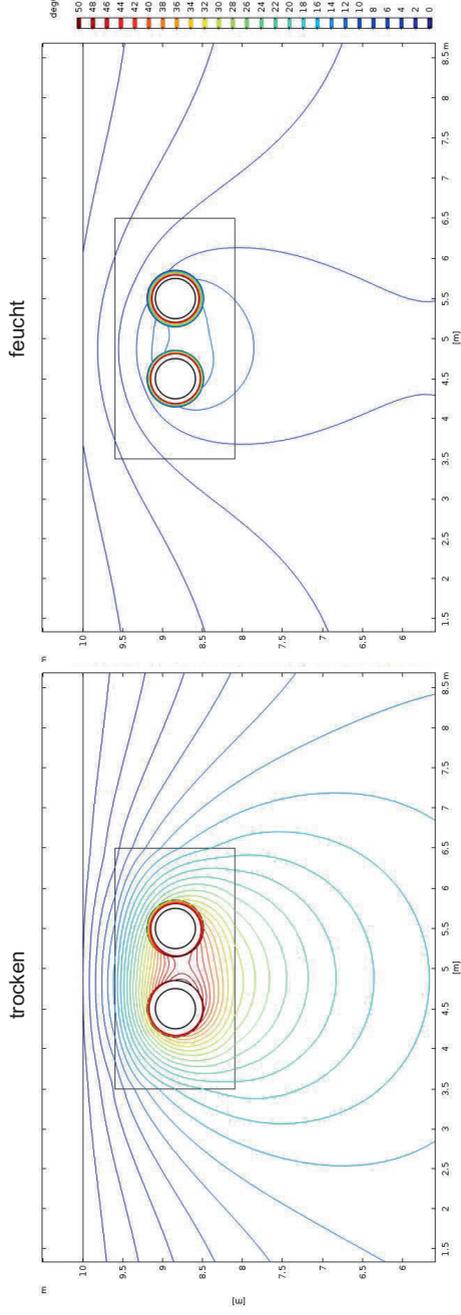


- Maximale Temperatur an der Oberfläche $21,5\text{ °C}$ ($\Delta T = 2,0\text{ K}$)
- Maximale Temperatur im Erdeich $27,3\text{ °C}$ (Tiefe: $1,2\text{ m}$)

ΔT : Differenz zu
ungestörtem Erdeich

Gegenüberstellung - trocken vs. feucht

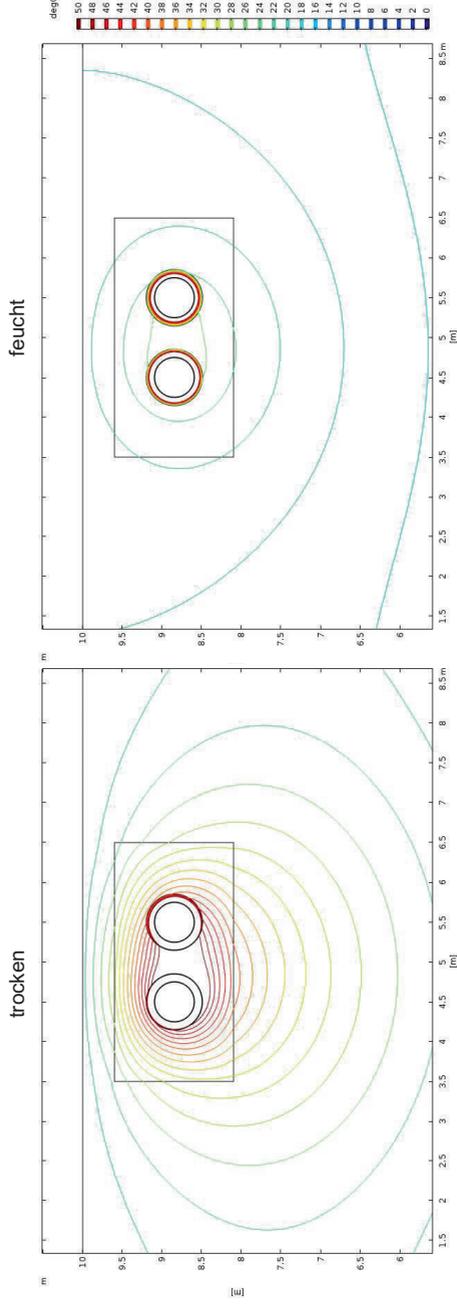
- Stationärer Zustand mit $T_U = 0\text{ °C}$



- Stärkere Aufheizung des Erdrreichs im trockenem Zustand → bessere Wärmeabfuhr an Umgebung im feuchten Zustand

Gegenüberstellung - trocken vs. feucht

- Stationärer Zustand mit $T_U = 20\text{ °C}$



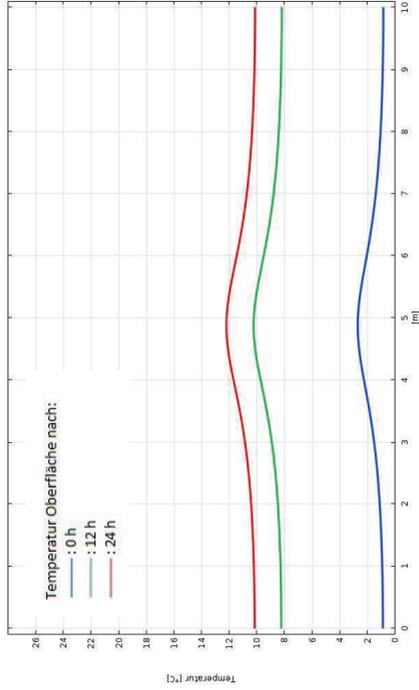
- Stärkere Aufheizung des Erdreichs im trockenen Zustand → bessere Wärmeabfuhr an Umgebung im feuchten Zustand

Szenario 2

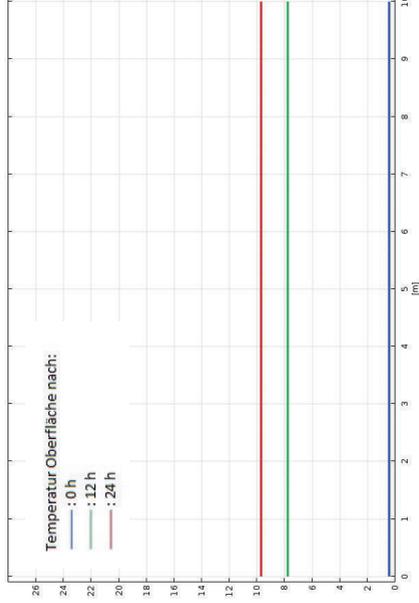


- Sprung von $T_U = 0 \text{ °C}$ auf $T_U = 20 \text{ °C}$

Erdeich mit Fernwärmeleitung



Erdeich - ungestört



- Maximale Temperatur an der Oberfläche:

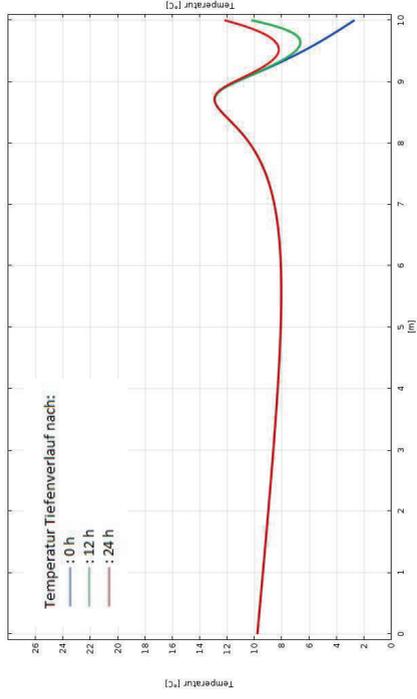
- Nach 0 h: $2,7 \text{ °C}$ ($\Delta T = 2,2 \text{ K}$)
 - Nach 12 h: $10,2 \text{ °C}$ ($\Delta T = 2,4 \text{ K}$)
 - Nach 24 h: $12,2 \text{ °C}$ ($\Delta T = 2,5 \text{ K}$)
- ΔT : Differenz zu ungestörtem Erdeich

Szenario 2

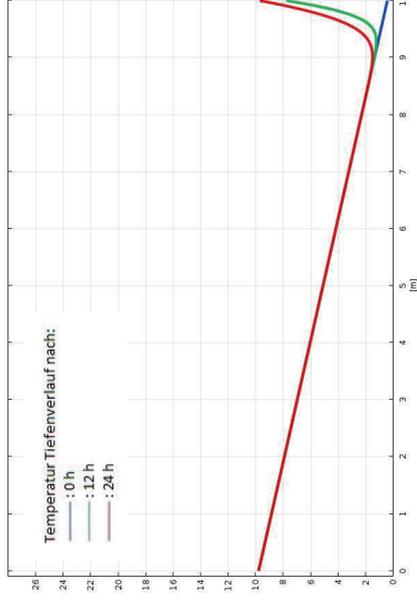


- Sprung von $T_U = 0\text{ °C}$ auf $T_U = 20\text{ °C}$

Erdeich mit Fernwärmeleitung



Erdeich - ungestört



- Signifikanter Einfluss des Temperatursprungs ($\Delta T \geq 0,5\text{ K}$) in beiden Fällen nur oberhalb 0,8 m Tiefe

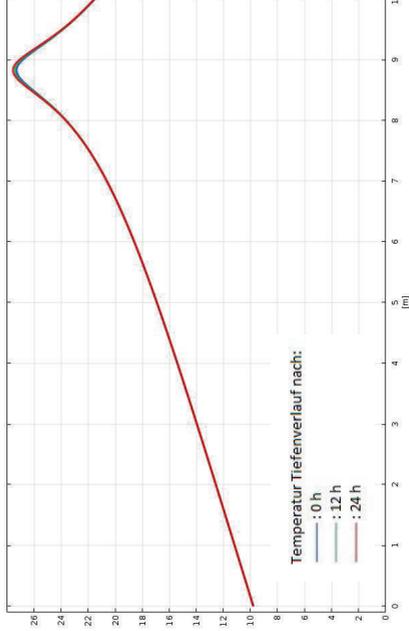
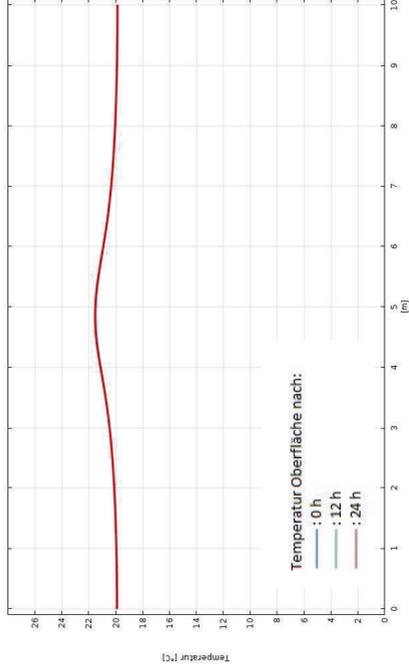
ΔT : Differenz zwischen
0 h und 24 h

Szenario 3



- Sprung von $T_{VL} = 110\text{ °C}$ auf $T_U = 20\text{ °C}$ bei $T_U = 20\text{ °C}$

Erdreich mit Fernwärmeleitung



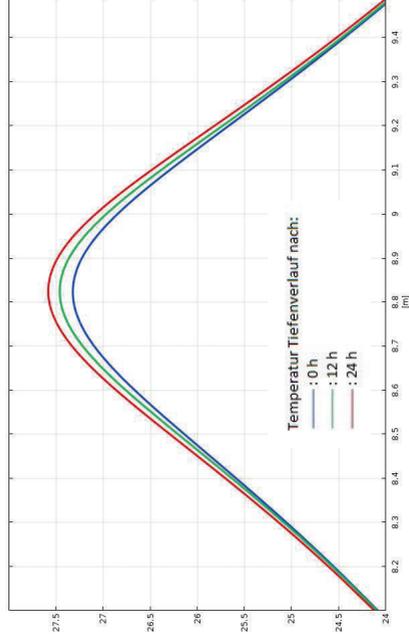
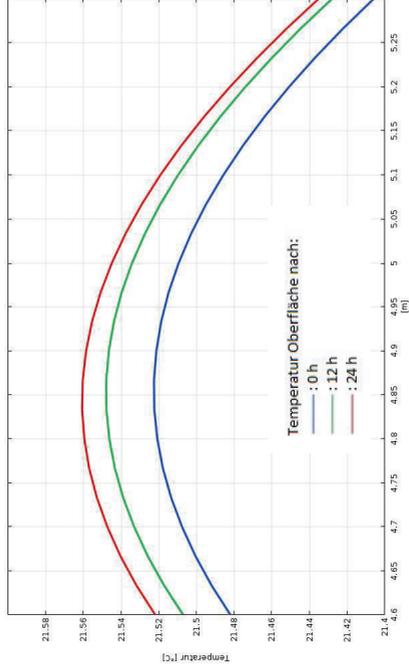
ΔT : Differenz zwischen
0 h und 24 h

- Maximale Temperaturdifferenzen nach 24h:
- An Oberfläche: $\Delta T = 0,04\text{ K}$
- In Erdreich: $\Delta T = 0,3\text{ K}$ (Tiefe: 1,2 m)

Szenario 3 - Detailansicht

- Sprung von $T_{VL} = 110\text{ °C}$ auf $T_{VU} = 130\text{ °C}$ bei $T_U = 20\text{ °C}$

Erdreich mit Fernwärmeleitung



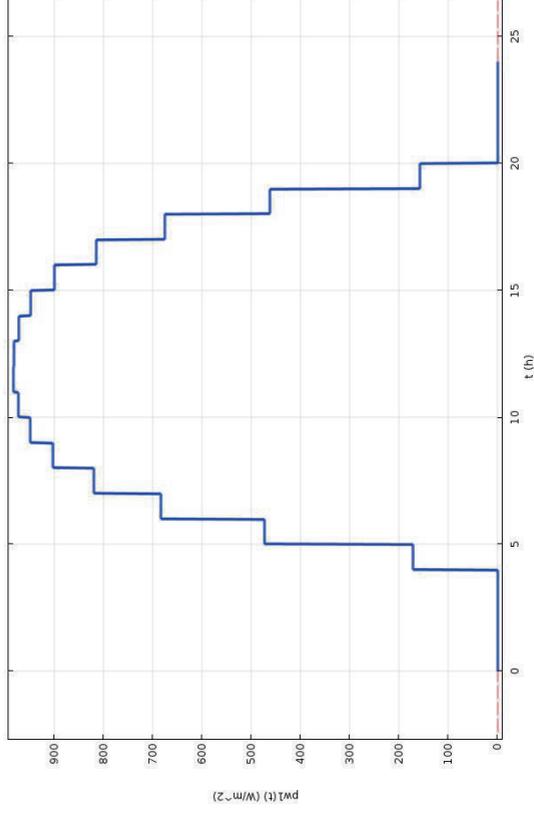
ΔT : Differenz zwischen
0 h und 24 h

- Maximale Temperaturdifferenzen nach 24h:
- An Oberflache: $\Delta T = 0,04\text{ K}$
- In Erdreich: $\Delta T = 0,3\text{ K}$ (Tiefe: 1,2 m)

Szenario 4



- Tagesverlauf Sonneneinstrahlung (Juni, klarer Himmel):



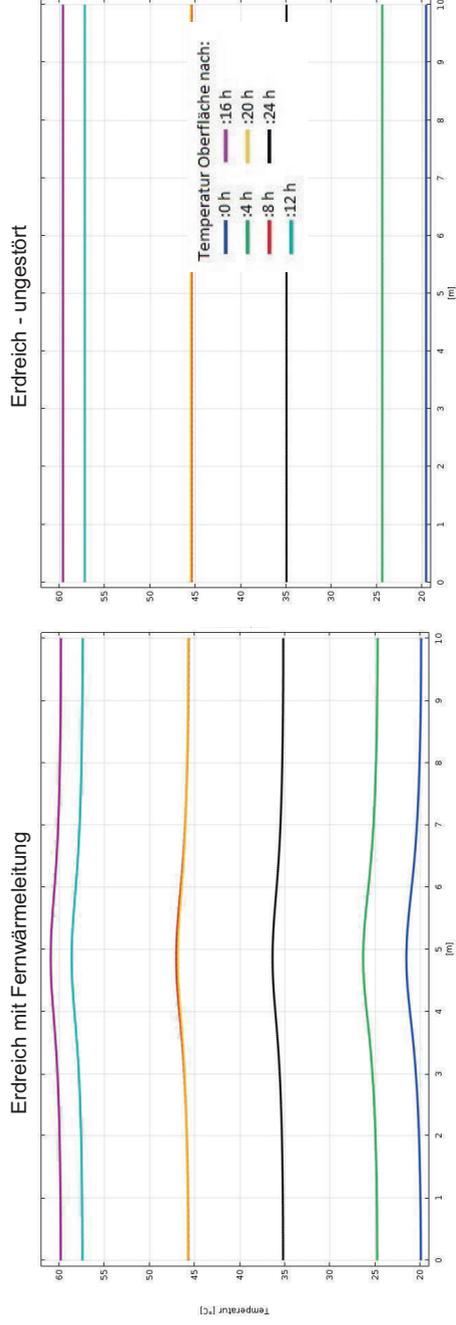
Breitengrad/Längengrad: 50.083, 8.715

Quelle:
- European Commission
Joint Research Centre,
Photovoltaic Geographical
Information System
(PVGIS)

Szenario 4



- Einfluss der Sonneneinstrahlung bei $T_U = 20\text{ °C}$



- nach 12 h: Verringerung der Wärmezufuhr
- weiterer Temperaturanstieg an Oberfläche bis 16 h
- maximale Temperatur an der Oberfläche nach 16 h: 61 °C ($\Delta T = 1,4\text{ K}$)

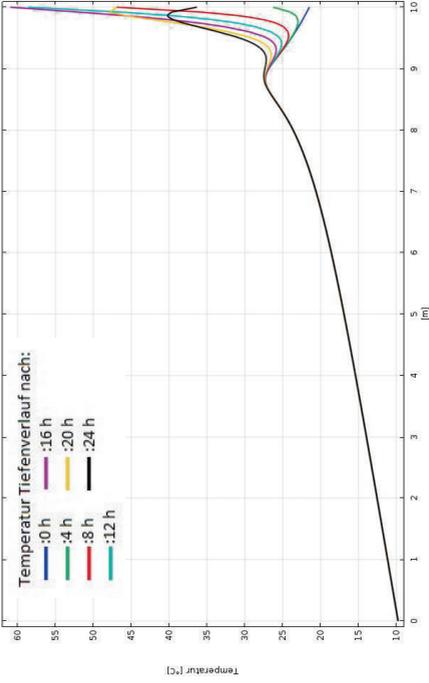
ΔT : Differenz zu ungestörtem Erdbreich

Szenario 4

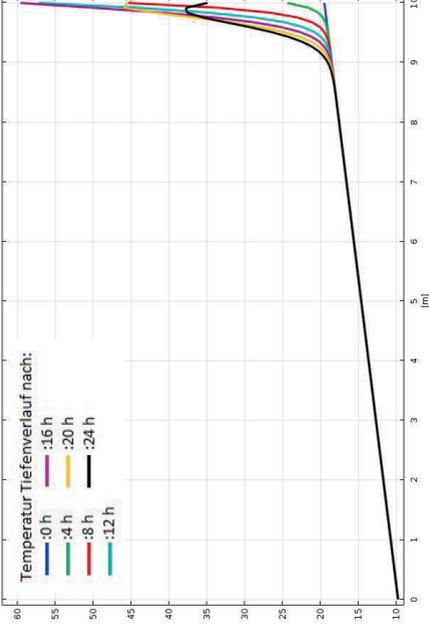


- Einfluss der Sonneneinstrahlung bei $T_U = 20\text{ °C}$

Erdreich mit Fernwärmeleitung



Erdreich - ungestört



- Lokale Maxima im Erdreich:

- Nach 20 h: $47,9\text{ °C}$ in 0,1 m Tiefe ($\Delta T = 1,9\text{ K}$)
- Nach 24 h: $40,3\text{ °C}$ in 0,1 m Tiefe ($\Delta T = 2,5\text{ K}$)
- Nach 24 h: $27,5\text{ °C}$ in 1,1 m Tiefe ($\Delta T = 0,2\text{ K}$)

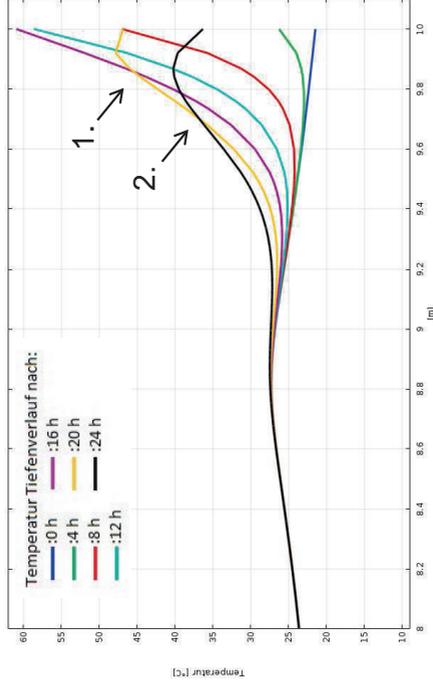
ΔT : Differenz zu ungestörtem Erdreich

Szenario 4 – Detailansicht Tiefenverlauf

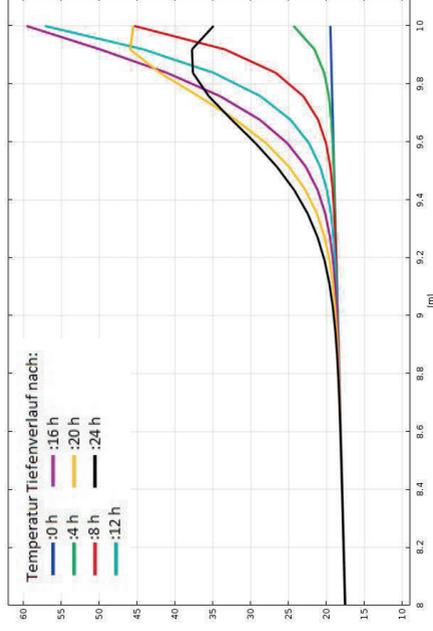


- Einfluss der Sonneneinstrahlung bei $T_U = 20\text{ °C}$

Erdeich mit Fernwärmeleitung



Erdeich - ungestört



- Nach 12 h: Verringerung der Wärmezufuhr

- Weiterer Temperaturanstieg in Erdeich bis 20 h bis 0,14 m Tiefe ($\Delta T = 2,7\text{ K}$)
- Weiterer Temperaturanstieg in Erdeich bis 24 h bis 0,3 m Tiefe ($\Delta T = 3,4\text{ K}$)

ΔT : Differenz zu ungestörtem Erdeich

Fazit



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

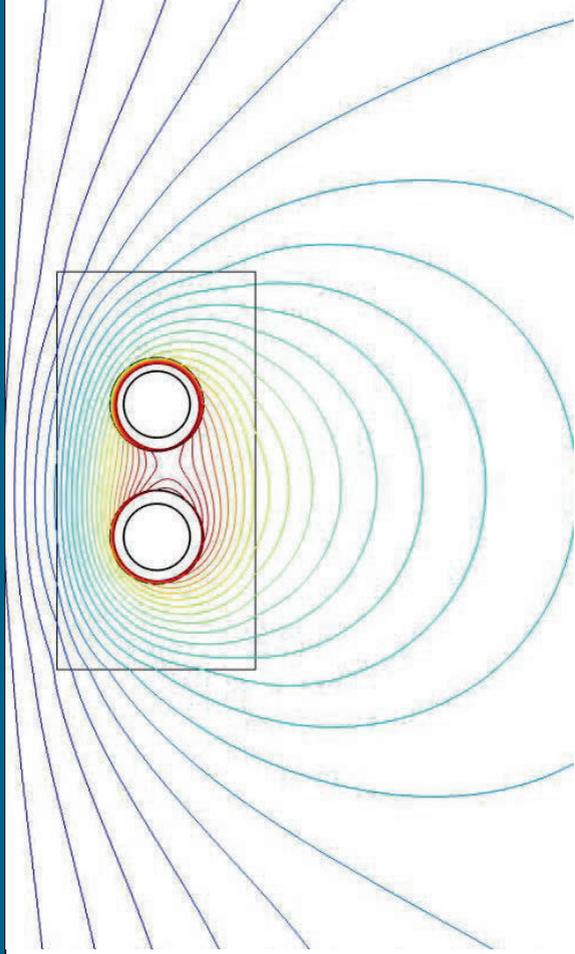
- Stärkere Aufheizung des Erdreichs im trockenen Zustand als im feuchten Zustand
- Einfluss durch Sprung in Vorlauftemperatur gering
- Einfluss durch Sonneneinstrahlung auf die Temperatur an der Oberfläche ist deutlich höher als Einfluss durch die Fernwärmeleitung
- Ungestörtes Erdreich kühlt im Tagesverlauf schneller ab

Simulation Wärmefelder

Ergänzungen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

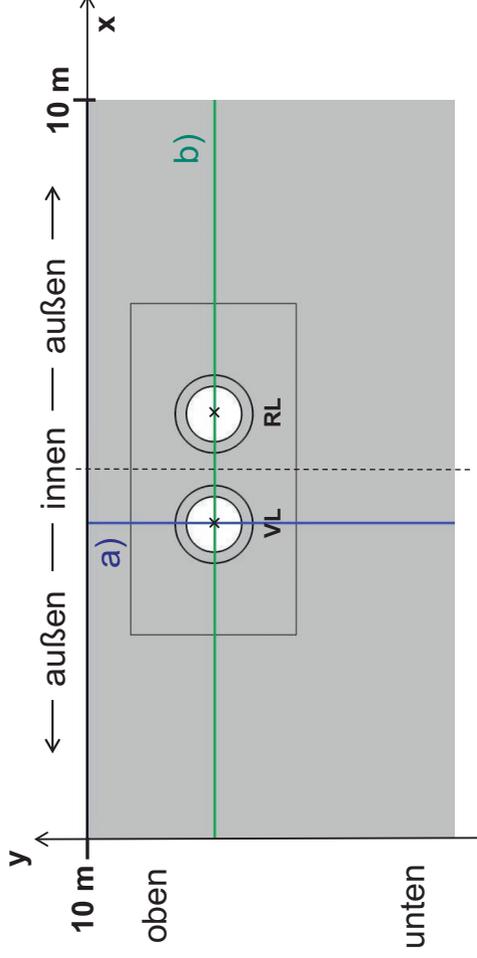


Ergänzungen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

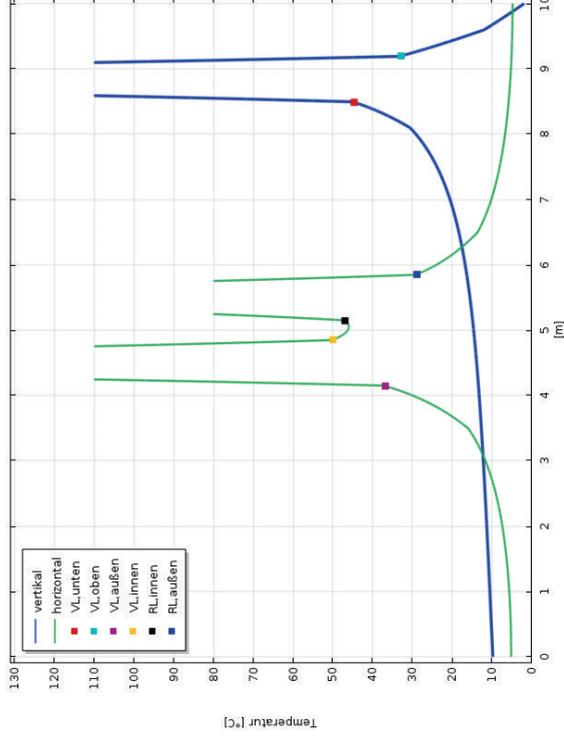
- Temperaturverlauf entlang a) und b) für alle Szenarien (s. Abschlusspräsentation)
- Zyklische Wiederholung von Szenario 4



Szenario 1 – a) trocken

- Stationärer Zustand mit $T_U = 0\text{ °C}$

Temperaturverteilung Erdreich durch Fernwärmeleitung



- Temperaturen an

Manteloberfläche:

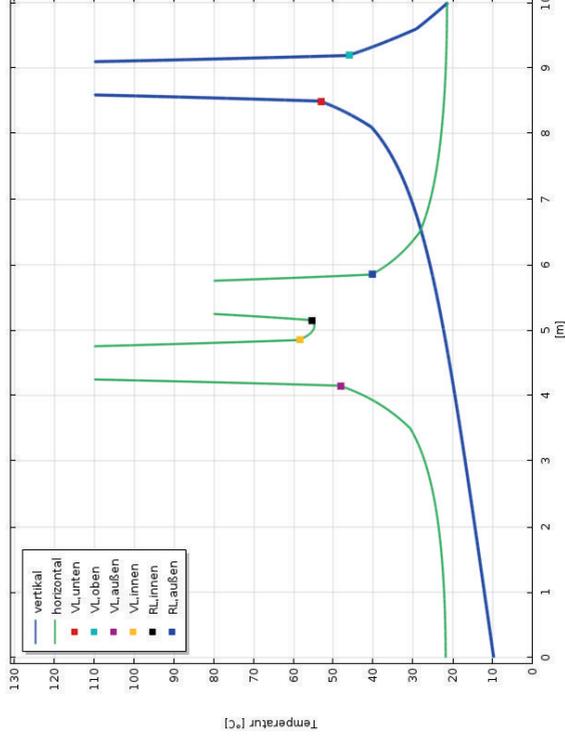
- Horizontal:
 - Vorlauf: $T_{VL,außen} = 37,1\text{ °C}$,
 - $T_{VL,innen} = 50,2\text{ °C}$
- Rücklauf: $T_{RL,außen} = 29,1\text{ °C}$,
- $T_{RL,innen} = 47,1\text{ °C}$
- Vertikal (nur Vorlauf):
 - unten: $T_{VL,unten} = 44,9\text{ °C}$
 - oben: $T_{VL,oben} = 33,2\text{ °C}$

Szenario 1 – a) trocken



- Stationärer Zustand mit $T_U = 20\text{ °C}$

Temperaturverteilung Erdreich durch Fernwärmeleitung



- Temperaturen an

Manteloberfläche:

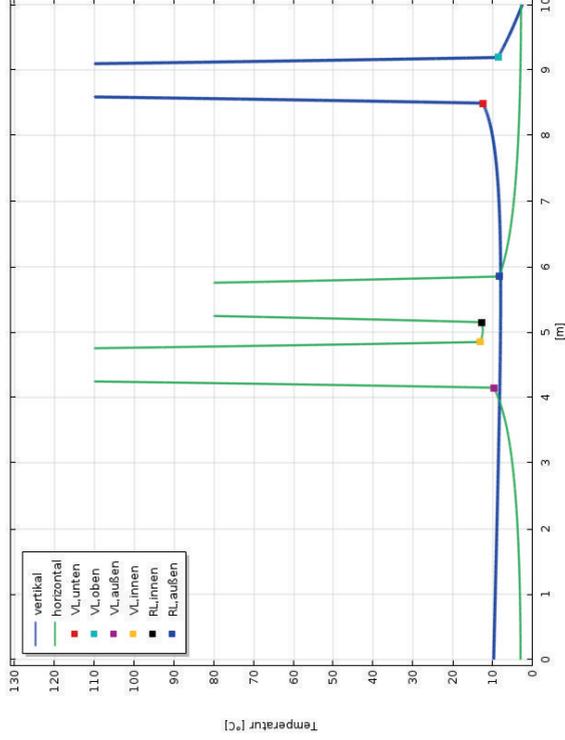
- Horizontal:
 - Vorlauf: $T_{VL,außen} = 48,4\text{ °C}$,
 - $T_{VL,innen} = 58,6\text{ °C}$
- Rücklauf: $T_{RL,außen} = 40,4\text{ °C}$,
- $T_{RL,innen} = 55,5\text{ °C}$
- Vertikal (nur Vorlauf):
 - unten: $T_{VL,unten} = 53,3\text{ °C}$
 - oben: $T_{VL,oben} = 46,3\text{ °C}$

Szenario 1 – b) feucht



- Stationärer Zustand mit $T_U = 0\text{ °C}$

Temperaturverteilung Erdreich durch Fernwärmeleitung



- Temperaturen an

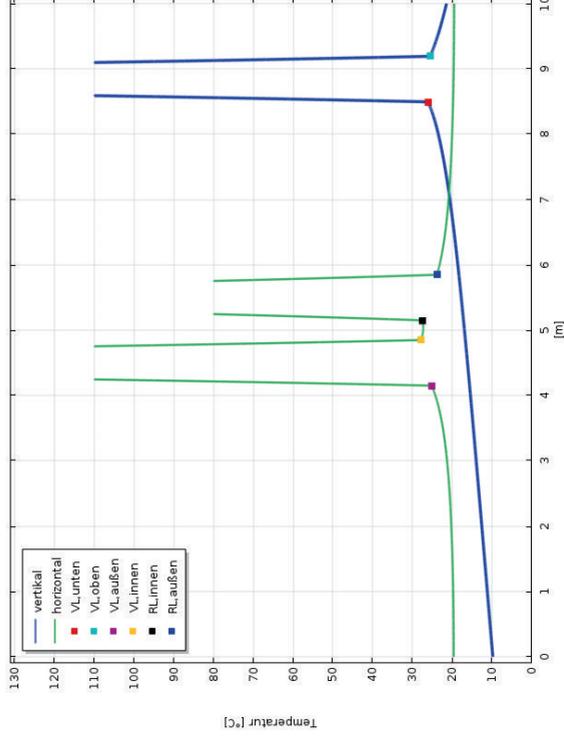
Manteloberfläche:

- Horizontal:
 - Vorlauf: $T_{VL,außen} = 9,7\text{ °C}$,
 - $T_{VL,innen} = 13,2\text{ °C}$
- Rücklauf: $T_{RL,außen} = 8,4\text{ °C}$,
- $T_{RL,innen} = 12,8\text{ °C}$
- Vertikal (nur Vorlauf):
 - unten: $T_{VL,unten} = 12,5\text{ °C}$
 - oben: $T_{VL,oben} = 8,7\text{ °C}$

Szenario 1 – b) feucht

- Stationärer Zustand mit $T_U = 20\text{ °C}$

Temperaturverteilung Erdreich durch Fernwärmeleitung

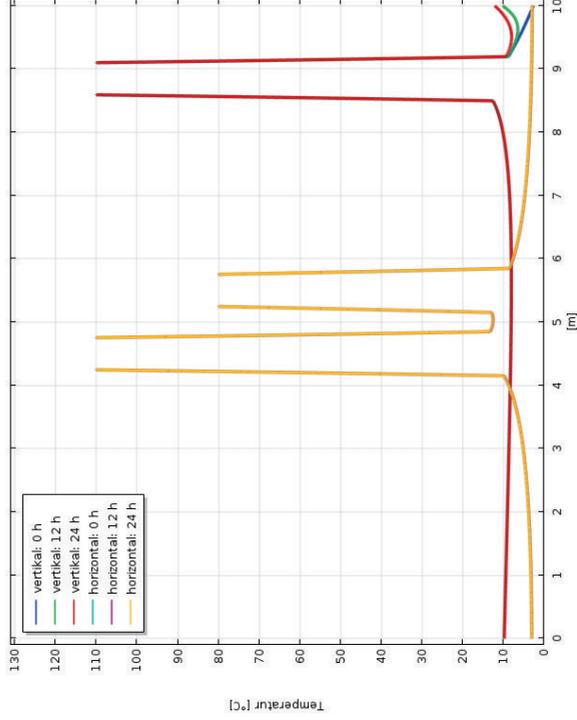


- Temperaturen an der Rohraußenseite:
 - Horizontal:
 - Vorlauf: $T_{VL,außen} = 25,2\text{ °C}$,
 - $T_{VL,innen} = 27,9\text{ °C}$
 - Rücklauf: $T_{RL,außen} = 23,8\text{ °C}$,
 - $T_{RL,innen} = 27,5\text{ °C}$
- Vertikal (nur Vorlauf):
 - unten: $T_{VL,unten} = 26,0\text{ °C}$
 - oben: $T_{VL,oben} = 25,5\text{ °C}$

Szenario 2 - feucht

- Sprung von $T_U = 0\text{ °C}$ auf $T_U = 20\text{ °C}$

Temperaturverteilung Erdreich durch Fernwärmeleitung

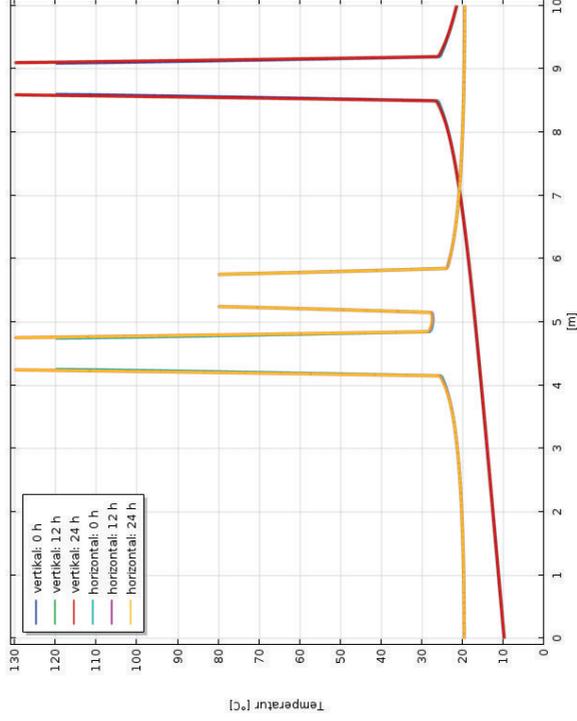


- $T_{VL, \text{oben}} = 9,3\text{ °C}$ (nach 24 h:
 $\Delta T = 0,6\text{ °C}$)
- Sonst keine signifikanten
Änderungen der Temperatur
an Rohraußenseite nach
24 h ($\Delta T \leq 0,5\text{ °C}$)

Szenario 3 - feucht

- Sprung von $T_{VL} = 110\text{ °C}$ auf $T_{VL} = 130\text{ °C}$ bei $T_U = 20\text{ °C}$

Temperaturverteilung Erdreich durch Fernwärmeleitung

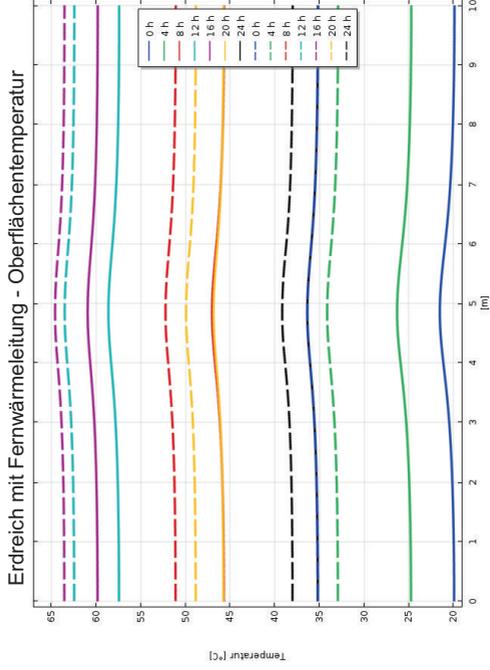


- Keine signifikanten Änderungen der Temperatur an Rohraußenseite nach 24 h ($\Delta T \leq 0,5\text{ K}$)

Szenario 4 - feucht



- Zyklus 1 vs. Zyklus 2: Einfluss der Sonneneinstrahlung bei $T_U = 20\text{ °C}$



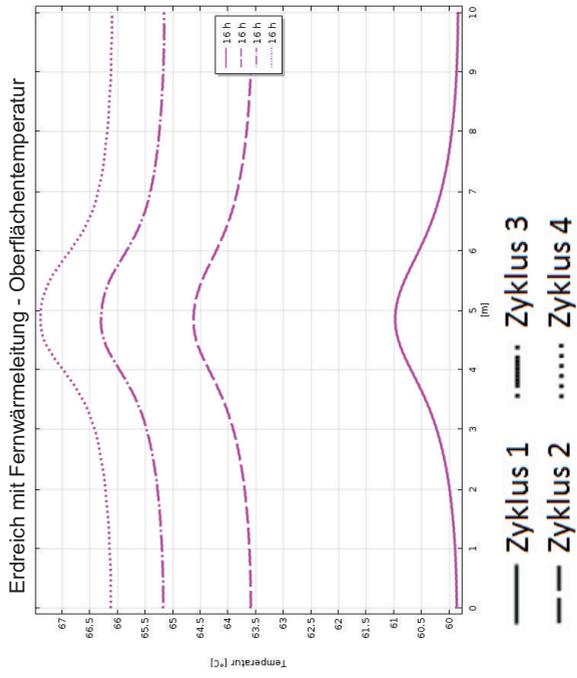
Temperaturdifferenz zu ungestörtem Erdreich:
 $1,2\text{ K} < \Delta T < 1,5\text{ K}$

— Zyklus 1
- - - Zyklus 2

Szenario 4 - feucht



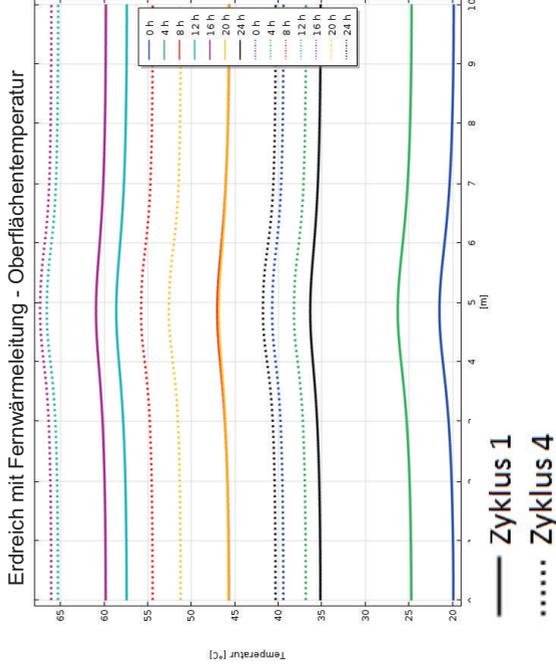
- Gegenüberstellung des Temperaturanstiegs über 4 Zyklen



- Temperaturanstieg wird mit jedem Durchlauf geringer:
 - $\Delta T_{1,2} = 3,6 \text{ K}$
 - $\Delta T_{2,3} = 1,7 \text{ K}$
 - $\Delta T_{3,4} = 1,1 \text{ K}$
 - ...

Szenario 4 - feucht

- Zyklus 1 vs. Zyklus 4: Einfluss der Sonneneinstrahlung bei $T_U = 20\text{ °C}$



- Maximale Temperatur nach 16 h:

$$T_{\max,1} = 61,0\text{ °C}$$

$$T_{\max,4} = 67,4\text{ °C}$$

$$\rightarrow \Delta T = 6,4\text{ K}$$

- Endtemperatur nach 24 h:

$$T_{\text{ende},1} = 36,4\text{ °C}$$

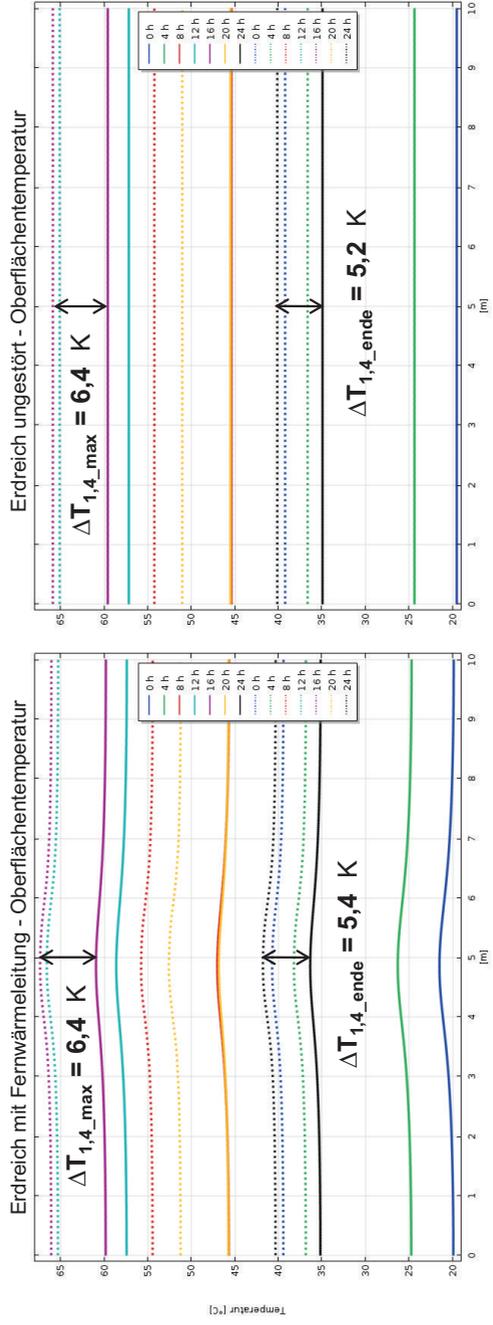
$$T_{\text{ende},4} = 41,8\text{ °C}$$

$$\rightarrow \Delta T = 5,4\text{ K}$$

Szenario 4 - feucht



- Zyklus 1 vs. Zyklus 4: Einfluss der Sonneneinstrahlung bei $T_U = 20^\circ$

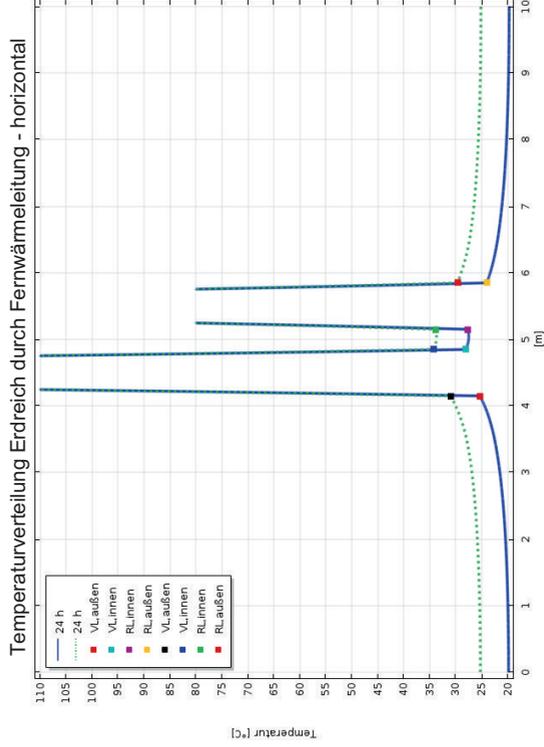


- Zyklus 1 • Temperaturdifferenzen zwischen Zyklus 1
- Zyklus 4 und 4 in beiden Fällen nahezu gleich

Szenario 4 - feucht



- Zyklus 1 vs. Zyklus 4: Einfluss der Sonneneinstrahlung bei $T_U = 20^\circ$



Nach 24 h sind die Temperaturen an der Rohraußenseite maximal:

- Zyklus 4, horizontal:
 - Vorlauf:
 - $T_{VL,aussen} = 31,0^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 5,5\text{ K}$)
 - $T_{VL,innen} = 34,3^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 6,4\text{ K}$)
 - Rücklauf:
 - $T_{RL,aussen} = 29,6^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 5,8\text{ K}$)
 - $T_{RL,innen} = 33,9^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 6,4\text{ K}$)

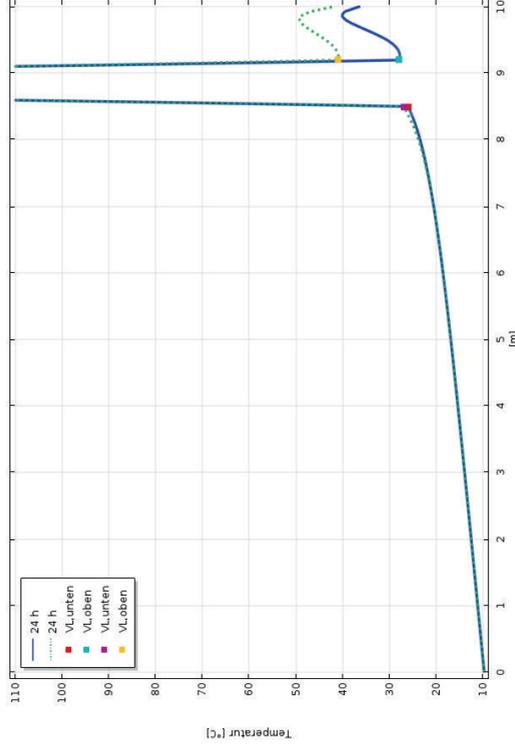
- Zyklus 1 • Temperaturanstieg zwischen Zyklus 1 und ΔT : Differenz zu Start (Zyklus 1, 0 h)
- Zyklus 4 4 ähnlich wie an Oberfläche

Szenario 4 - feucht



- Zyklus 1 vs. Zyklus 4: Einfluss der Sonneneinstrahlung bei $T_U = 20^\circ$

Temperaturverteilung Erdreich durch Fernwärmeleitung - vertikal



Nach 24 h sind die Temperaturen an der Rohraußenseite maximal:

- Zyklus 4, vertikal (nur Vorlauf):
- unten: $T_{VL,unten} = 26,9^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 0,9\text{ K}$)
- oben: $T_{VL,oben} = 41,0^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 15,5\text{ K}$)

— Zyklus 1 • Größter Einfluss der Sonneneinstrahlung

..... Zyklus 4 in Oberflächennähe

ΔT : Differenz zu Start
(Zyklus 1, 0 h)

Anlage 2

**„Konzept und Dokumentation zur
Langzeitmessung an einer
Fernwärmetrasse im
Wurzelbereich von Bäumen“**

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
1 Messungen von Wärmefeldern	3
2 Die Fernwärmetrasse.....	4
3 Messtechnik.....	9
4 Messkonzept und Umsetzung.....	10
4.1 Das Messset GRABEN	11
4.2 Das Messset BAUM	15
4.3 Das Messset UNGESTÖRT	18
5 Ausblick	24

1 Messungen von Wärmefeldern

Ziel der Messstelle ist es die Ausbreitung von Wärmefeldern erdverlegter Fernwärmetrassen im Wurzelbereich möglichst detailliert zu erfassen, um dadurch Berechnungsmodelle zur Simulation von Wärmefeldern zu validieren. Anhand valider Modelle können, in Kombination mit den entsprechenden Messergebnissen, relevante Einflussparameter identifiziert und die Auswirkung von Änderungen der Anfangsbedingungen abgeschätzt werden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „FW-Vegetation“ konnte bei einem Fernwärmeversorgungsunternehmen der Neubau einer Trasse in einem innerstädtischen Grünflächenstreifen genutzt werden, um ein umfassendes Messprogramm umzusetzen. In Abstimmung mit dem Projektkonsortium, Experten des AGFW und Vertretern des Fernwärmeversorgers wurde ein Messkonzept mit drei unterschiedlichen Messsets entwickelt und umgesetzt. Für jeden der drei Teile wurde ein eigenes Konzept entwickelt und ein individuelles Set an Messtechnik aufgebaut. Nachfolgend wird kurz der Abschnitt der Fernwärmetrasse und die eingesetzte Messtechnik vorgestellt, bevor zu jedem Teil auf das geplante Konzept, die notwendigen Anpassungen bei der Umsetzung und erste Ergebnisse eingegangen wird.

2 Die Fernwärmetrasse

Der zur Errichtung der Messstelle gewählte Trassenabschnitt ist Teil eines innerstädtischen Trassenneubaus, der durch einen Grünstreifen führt. Die in Abbildung 1 am linken Bildrand skizziert Leitung unterquert den Straßenraum in einem Schutzrohr, weshalb sich am Ende ein Kompensationselement (U-Dehner) zur Aufnahme der Leitungsbewegungen befindet.

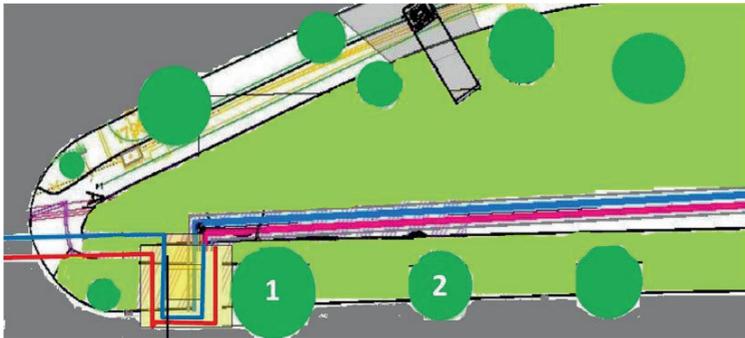


Abbildung 1: Skizze des Trassenverlaufs (nach Planungsunterlagen des Versorgers) inklusive der Bäume Nr. 1 und Nr. 2

Ausgehend vom Dehnungselement (links von Baum Nr. 1) verläuft die Trasse weiter in östlicher Richtung fast parallel zum Vegetationsbestand (vorbei an Baum Nr.1 und Nr. 2), der sich nah an der Straße befindet. Bei den erdverlegten Rohrleitungen handelt es sich um KMR (DN 300) der Dämmserie 1. In Abbildung 2 ist der Trassenbereich vor Beginn des Grabenaushubs zu sehen.



Abbildung 2: Trassenbereich vor Baubeginn; zentral im Bild Baum Nr. 1 (Standort westlicher Rand der Grünfläche; Blickrichtung Osten, Januar 2019)

Während des Grabenaushubs zeigt sich, dass sich in diesem Bereich zahlreiche Wurzeln befinden (siehe Abbildung 3), teilweise reichen diese auch deutlich über den Kronenbereich der Bäume hinaus.

Die Tiefbaumaßnahmen wurden in Vegetationsnähe durch Baumsachverständige begleitet, welche die eventuelle Notwendigkeit von Wurzelkappungen bewerteten und während der Baumaßnahme dafür sorgten, dass die freigelegten Wurzeln feucht und vor Sonnenlicht geschützt blieben (siehe Abbildung 4).

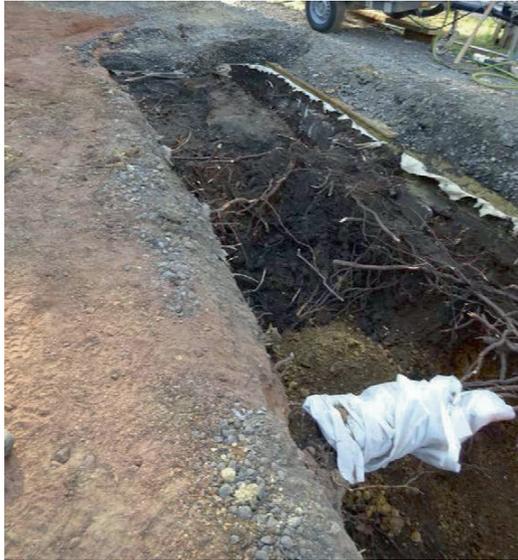


Abbildung 3: Blick in den Rohrleitungsgraben



*Abbildung 4: Blick in den Rohrgraben mit geschützten Wurzeln; zentral im Bild Baum Nr. 2
(Blickrichtung Osten, April 2019)*

Zur geschützten Unterbringung der Datenlogger wurde ein Schacht installiert, der sich in einem möglichst wurzelfreien Bereich zwischen Baum Nr.1 und Baum Nr. 2 befindet. In Abbildung 5 sind, neben dem Schacht, auch erste Leitungskomponenten (Entlüftungs- und Absperrarmaturen) zu erkennen, deren Positionierung an die Wurzelverläufe angepasst wurde.



Abbildung 5: Blick in den Rohrleitungsgraben mit installiertem Messschacht und ersten Armaturen

Die Armaturen wurden vor der Grabenverfüllung mit elastischem Material (Dehnpolster), geschützt, welches zur Begrenzung von Spannungen und der Ermöglichung von axialen und lateralen Verschiebungen dient (siehe Abbildung 6). Dehnpolstermaterialien weisen in der Regel niedrige Wärmeleitfähigkeiten auf, weshalb diese auch die Wärmeabstrahlung der Leitung an die Umgebung beeinflussen.



Abbildung 6: Armatur mit Dehnpolster (links) und mit Fließ umwickelten Dehnpolster (rechts)

Unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten (Wurzeln, Armaturen) wurden die Messkonzepte angepasst. In Abbildung 7 sind die drei Sets „Ungestört“ (blau), „Graben“ (rot) und „Baum“ (hellgrün) an ihrer finalen Position dargestellt. Neben den Rohrleitungen sind auch markante Wurzeln, Armaturen, der Messschacht und der nächste Baum (Nr. 2) skizziert. Wichtige chronologische Ereignisse für die Inbetriebnahme der Messtechnik sind in Tabelle 1 aufgeführt.

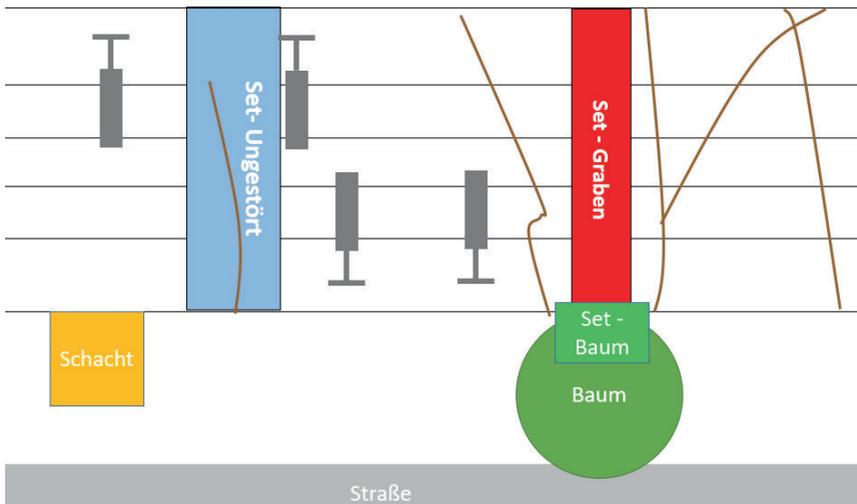


Abbildung 7: Übersichtsskizze der Mess-Sets im Rohrleitungsgraben aus der „Vogelperspektive“

Tabelle 1: Ereignisse IBN Messtechnik

Datum	Ereignis
04.06.2019	Inbetriebnahme Messtechnik „Baum, Graben, Ungestört“
03.07.2019	Positionierung der Sensoren „Graben, Ungestört“
27.08.2019	Inbetriebnahme & Positionierung Sensor „Baumkrone“
KW 39 - 2019	Inbetriebnahme der Trasse (Nach Messwerten)
14.11.2019	Positionierung der Sensoren „Baum“

3 Messtechnik

Bei den ins Erdreich bzw. in den Leitungsgraben eingebrachten Messsensoren handelt es sich um verlorene Messtechnik, da eine Bergung eine Freilegung großer Teile der Fernwärmeleitungen gleichkäme, was grundsätzlich mit organisatorischem und finanziellem Aufwand verbunden ist. Auf Grundlage guter Erfahrungen, im Rahmen anderer Forschungsvorhaben mit AGFW Beteiligung, wurden für die Messstelle *HOB0*-Messtechnik der Firma *Onset Computer Corporation* ausgewählt. Insgesamt sind in der Messstelle 28 Temperatur- und 12 Feuchtesensoren verbaut. Für die Messung der Umgebungstemperatur ist ein Bluetooth Sensor des gleichen Herstellers in einer Baumkrone installiert, dieser misst auch die relative Luftfeuchte.

Aufgrund der lokalen Gegebenheiten musste auf Batteriebetriebene Logger zurückgegriffen werden, die sich zum Schutz vor Umgebungseinflüssen in einem separaten Schachtbauwerk befinden. Die Batterien müssen regelmäßig getauscht und dabei die Daten manuell ausgelesen werden. Als Kompromiss zwischen Datenquantität und davon abhängiger Laufzeit bis zum nächsten Batteriewechsel speichern die Datenlogger die Werte in 15 min Intervallen. Dadurch entstehen rund 4.000 Messdaten am Tag.

Die „Temperatur-Smart-Sensoren (S-TMB-M0XX)“ arbeiten nach technischem Datenblatt des Herstellers in einem Messbereich von 0 °C - +50 °C mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,03$ K.

Zur Feuchtemessung sind „Soil Moisture Smart Sensoren (S-SMC-M005)“ eingesetzt, die nach technischem Datenblatt des Hersteller in einem Temperaturbereich zwischen 0 °C - +50 °C eine Genauigkeit von $\pm 3,1$ %, bei einem Messbereich von 0 – 0,55 m³/m³ volumetrischem Wassergehalt aufweisen.

Für jedes der drei Sets befindet sich ein eigener Datenlogger (HOB0 ® Micro Station H21-USB) mit fünf Sensorschnittstellen im Messschacht, diese wurden jeweils nach Bedarf mit 1-2

Erweiterungen (S-ADAPT-6) ausgestattet um maximal bis zu 15 Sensoren an einem Datenlogger anschließen zu können.

Der eigenständige Logger mit internen Sensoren zur Erfassung der Umgebungstemperatur (HOBO ® MX2301A Data Logger) arbeitet in einem Bereich von -40 °C - 0 °C mit einer Genauigkeit $\pm 0,25\text{ K}$ und in einem Bereich von 0 °C - $+70\text{ °C}$ mit $\pm 0,2\text{ K}$. Die relative Feuchte wird bei Temperaturbedingungen zwischen -40 °C - $+70\text{ °C}$ mit einer Genauigkeit von $\pm 2\%$ gemessen. Sinkt die relative Feuchte unter 10% oder steigt sie über 90% wird die Messgenauigkeit mit $\pm 5\%$ angegeben.

4 Messkonzept und Umsetzung

Die Positionierung der Messsensoren im Leitungsgraben wurde baubegleitend geplant, da diese so deutlich optimaler erfolgen kann als bei einer nachträglichen Verlegung. Zusätzlich wird so vermieden, dass das Erdreich (z.B. durch Auflockerung des verdichteten Leitungsbereichs oder das Einbringen anderen Verfüllmaterials bei Verschließen der Löcher, etc.) zusätzliche Störungen erfährt, welche die späteren Messungen zusätzlich beeinflussen können. Aus diesem Grund musste das Messkonzept erstellt und die Messtechnik vorbereitet werden, bevor der Leitungsgraben vollständig ausgehoben und der Untergrund im Detail bekannt war. Für die Erstellung des ersten Entwurfs des Messkonzepts wurde deshalb auf Grundlagen bisheriger Erfahrungen mit Fernwärmemessstellen des AGFW zurückgegriffen. Unter Einbezug der bis dato vorliegenden Erkenntnisse des Vorhabens FW-Vegetation, sieht das erste Messkonzept, neben den Temperaturen im Erdreich, auch Messungen des Feuchtegehalts und der Umgebungstemperatur im Kronenbereich der Bäume vor. Dieses erste Messkonzept wurde mit den Projektpartnern und einem externen Ingenieurbüro für Mess-/Steuer-/ Regelungstechnik und Energiemanagement diskutiert und weiterentwickelt. Die daraus resultierende Überarbeitung bildete dann die Grundlage für die Rücksprache mit dem Versorger und weiteren AGFW FW-Experten, sowie für den Vegetationsfokus mit einem entsprechenden Sachverständigenbüro.

Aus dem Bauablauf heraus ergab sich die Notwendigkeit den Planungsprozess stetig an die tatsächlichen Gegebenheiten anzupassen. Nicht nur der Bauablauf, der von den Fortschritten der einzelnen Bauabschnitte der gesamten Baumaßnahme abhängt, erforderte die Flexibilität aller Beteiligten, sondern auch die tatsächlichen Bodenverhältnisse beeinflussten den tatsächlich umsetzbaren Aufbau der Sensorfelder. So mussten Anpassungen im Rohrleitungsbau, unerwartete extreme Bodenschichten oder das sehr ausgedehnte Wurzelwachstum der Bäume, auch über dem Kronenbereich hinaus, berücksichtigt werden. Aus diesem Grund konnte auch das ursprünglich für Baum Nr. 1 geplante Messfeld nicht errichtet werden, sodass das Konzept für Baum Nr. 2 angepasst werden musste, der ein Stück

weiter von der Rohrleitung entfernt ist. Der umfassende Wurzelwuchs ermöglicht auch an dieser Stelle Messungen im Interaktionsbereich von Wurzeln und Fernwärmeleitungen.

Das finale Messkonzept wurde dann vor Ort, unter Berücksichtigung der realen Gegebenheiten an der Baustelle (Wurzeln, Armaturen, etc.), umgesetzt.

Die ursprünglichen drei konzipierten Teilabschnitte (Sets), die jeweils einen unabhängigen Messbereich mit unterschiedlichem Fokus darstellen, wurden unter Berücksichtigung notwendiger Anpassungen beibehalten (vgl. Abbildung 7). Im nachfolgenden werden die einzelnen Abschnitte vom Konzept über die Umsetzung hin zu ersten Messergebnissen vorgestellt.

4.1 Das Set GRABEN

Die Messungen im Messet GRABEN dienen primär zur Erfassung der Temperaturen um die KMR Leitungen, mit dem Ziel dadurch Rückschlüsse auf die tatsächliche Wärmeabstrahlung zu ziehen und die FEM Modelle zu validieren.

4.1.1 Konzept

Die Anordnung der 13 Temperatursensoren erfolgt weitestgehend symmetrisch. Aufgrund von Erfahrungen an anderen Messstellen, an denen sich unterschiedliche Temperaturen an Rohrober- und Rohrunterkante zeigten, wurden Vor- und Rücklauf mit je zwei Temperatursensoren ausgestattet. Weiterhin sind Temperatursensoren an der Trennschicht zwischen sandigem Bettungsmaterial in der Leitungszone und dem Füllmaterial darüber vorgesehen. Aufgrund des notwendigen Abstandes der Feuchtesensoren zu metallischen Komponenten, wurde nur je ein Sensor über Vor- und Rücklauf vorgesehen. Weitere Messungen im gleichen Grabenquerschnitt sollen im Wurzelbereich des nahen Baumes erfolgen (Set BAUM). In Abbildung 8 ist die geplante Anordnung der Sensoren skizziert.

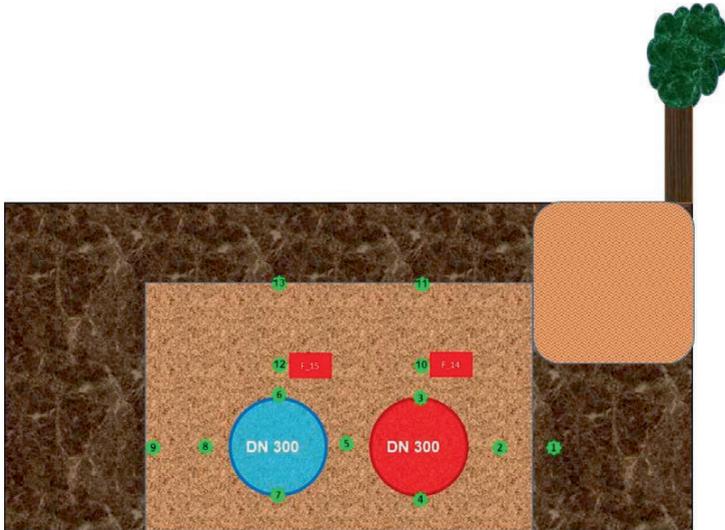


Abbildung 8: Skizze Querschnitt des Sets GRABEN

4.1.2 Umsetzung

Wie bereits beschrieben waren große Teile des für die Messungen vorgesehenen Grabenbereichs durchwurzelt. Dennoch konnte das Set GRABEN weitestgehend wie geplant direkt neben Baum Nr. 2 errichtet werden. Die vorhandenen Wurzeln umrahmen (wie in Abbildung 7 skizziert) den Messquerschnitt. Abbildung 9 zeigt einen Ausschnitt aus dem Rohrgraben während der Errichtung des Sensorfeldes. In Abbildung 10 ist die finale Anordnung der Messsensoren skizziert.



Abbildung 9: Blick auf die südliche Rohrgrabenwand; Bereich zur Anordnung der Messsensoren (grünes Rechteck), Wurzelbündel (rote Kreise) und Baum Nr. 2 (gestricheltes, blaues Rechteck)

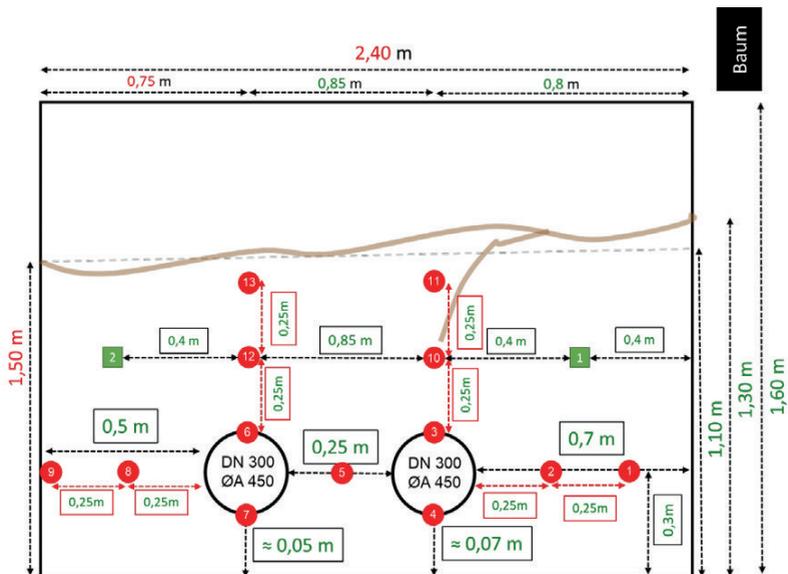


Abbildung 10: Skizze des finalen Messquerschnitts Graben

4.1.3 Messwerte

Die Messwerte des Sets „Graben“ konnten zu Beginn problemlos aufgezeichnet werden und die Messwerte bilden vor Ihrer Verlegung die ungefähre Umgebungstemperatur ab. Während der Statusüberprüfung nach der Positionierung der Sensoren zeigten sich ebenfalls keine Unstimmigkeiten in den Messwerten. Nach der ersten planmäßigen Auswertung der Messdaten wurde ersichtlich, dass es an dieser Messstelle massive Probleme bei der Datenerfassung gab. Gemeinsam mit dem Hersteller und dem Messtechniker wurde der Datenlogger eingeschickt und auf Funktionsfehler überprüft. Es konnten allerdings keine Auffälligkeiten nachgewiesen werden, weshalb die Fehlerursache bei den erdverlegten Sensoren liegen muss. Nachdem der Datenlogger wieder zur Verfügung stand wurde dieser, zusammen mit zwei zusätzlichen Datenloggern installiert. Anschließend wurden die Messsensoren auf mehrere Datenlogger aufgeteilt. Nach 2-3 Wochen ist der Fehler erneut aufgetreten und durch die wiederholte Anpassung der Belegung, konnten die defekten Sensoren identifiziert werden. Bis zum Projektende wurden 2 defekte Sensoren identifiziert und die Messwerterfassung wird weiter begleitet. In Abbildung 11 sind die Sensoren inklusive der großen Datenlücke dargestellt. Die Datenlücke wurde zwischen letzten und nächsten Messwert linear interpoliert. Die Datenmenge ist für eine umfassende Diskussion an dieser Stelle nicht ausreichend.

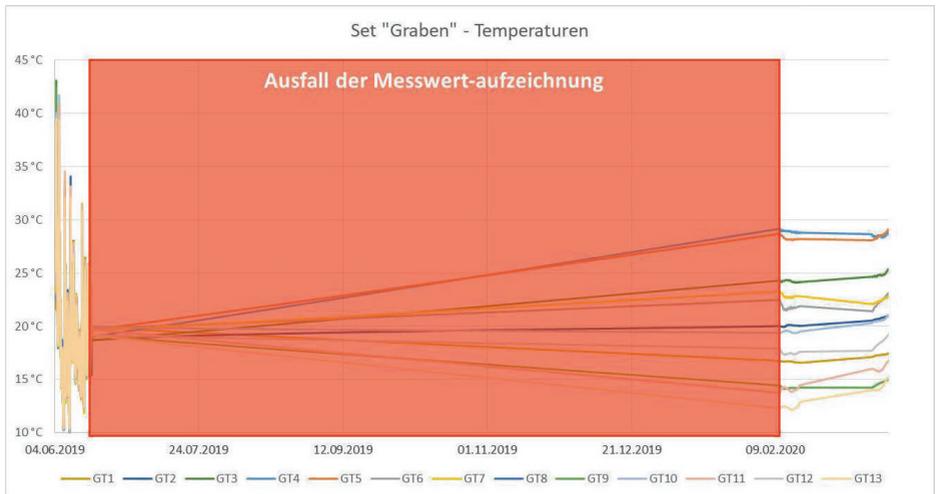


Abbildung 11: Set "Graben" - Temperaturen

4.2 Das Set BAUM

Der Teilabschnitt (BAUM) dient primär zur Erfassung der Situation im Wurzelbereich des Baumes. Hierzu sind die Temperatur in der Krone des Baumes (TK) sowie die Feuchte (F) und Temperaturen (T) im Wurzelbereich zu erfassen.

4.2.1 Konzept

Das Konzept sieht Temperatur- und Feuchtemessungen in unterschiedlichen Tiefen (30 – 90 cm) vor. In Abbildung 12 sind die drei Achsen skizziert, die messtechnisch erfasst werden sollen. Hauptachsen sind einmal nahe an der Baumachse (B 1, grün) und einmal an einem möglichst markanten Wurzelpunkt nahe der Fernwärmetrasse (B 3, rot). Dazwischen werden entlang einer Hauptwurzel die Temperaturen erfasste (B 2, violett).

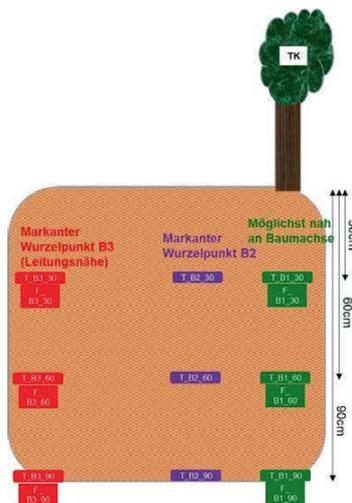


Abbildung 12: BAUM Set mit 10 Temperatur (T, TK) und 6 Feuchte (F) Sensoren

4.2.2 Umsetzung

Der, in nächster Nähe zum Baum, befindliche Wurzelbereich wurde während der Rohrleitungsarbeiten nicht aufgegraben, sodass die geplanten Achsen nur durch kleine Suchschürfungen identifiziert werden konnten. Zur Umsetzung des, unter fachlicher Begleitung einer Baumsachverständigen, errichteten Mess-Sets, wurden die kabelgebundenen Sensoren aus dem Messgraben heraus zu den „Achsen“, in die entsprechende Tiefe verlegt. Um zu vermeiden, dass die Messwerte von Kabeln anderer

Sensoren beeinflusst werden, wurde jeder Messpunkt mit einem Temperatur- bzw. einem Temperatur und einem Feuchtesensor separat ins Erdreich geführt. Wurzeln, Steine oder feste Erdschichten verwehrten an einigen Stellen das Erreichen der gewünschten Tiefe, sodass mehrfach Anpassungen bei der Positionierung notwendig waren. In Abbildung 13 ist die finale Anordnung der Sensoren in der Draufsicht dargestellt.

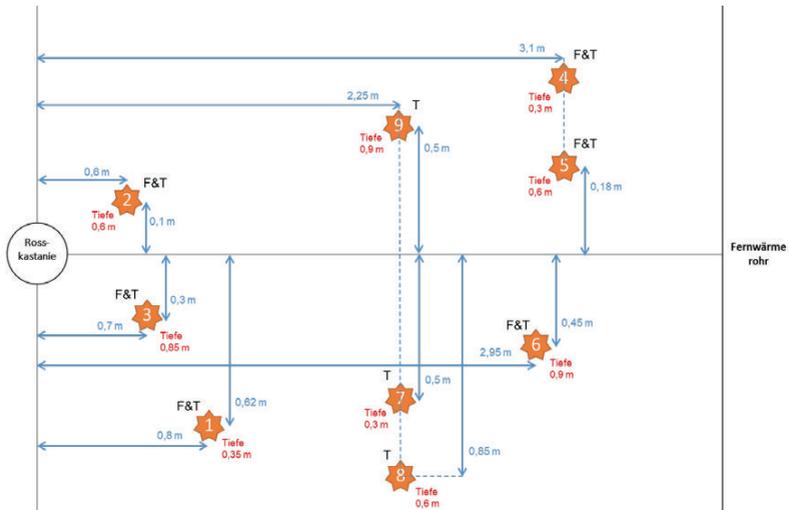


Abbildung 13: Skizze der Sensoranordnung im Set BAUM aus der Vogelperspektive

4.2.3 Messwerte

Die Sensoren des Set „Baum“ konnten erst nach weitestgehend Abschluss der Oberflächenarbeiten im Grünstreifen positioniert werden. Die von November 2019 an gemessenen Daten wurden erstmalig im Januar 2020 ausgelesen, dabei wurden diverse Ausfälle der Messwerterfassung festgestellt. Bis zum Projektende dauert die Fehlersuche, in Abstimmung mit dem Hersteller und Messtechniker, noch an. Als Ursache für die Messwertausfälle ist eine nicht nachvollziehbare Entladegeschwindigkeit der Batterien in den Datenloggern (≈ 1 Monat anstatt 6 Monate) identifiziert worden. In Abbildung 14 sind die verfügbaren Temperaturdaten für das 1. HJ 2020 dargestellt und die linear interpolierten Zeiträume des Datenausfalls markiert. In Abbildung 15 ist die farbliche Zuordnung der Messwerte anhand der Querschnittsanordnung der Messpunkte am Set „Baum“ skizziert.

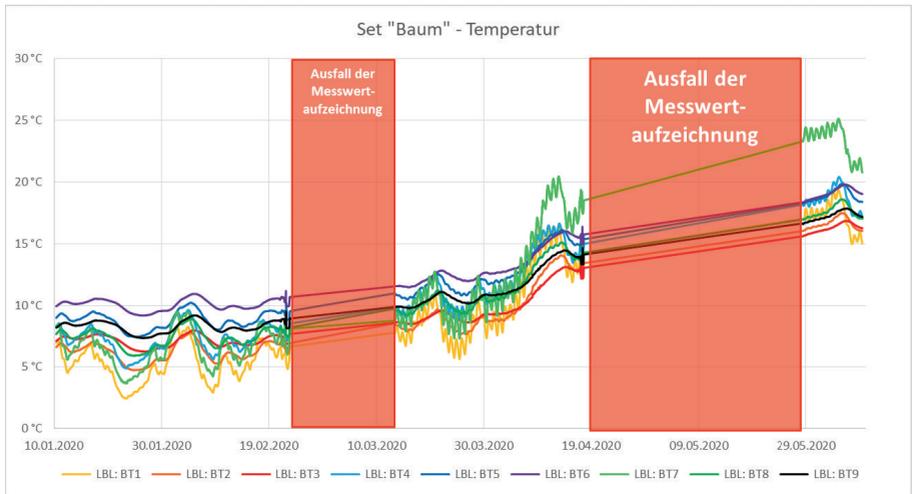


Abbildung 14: Set "Baum" Temperaturen Datenlücken

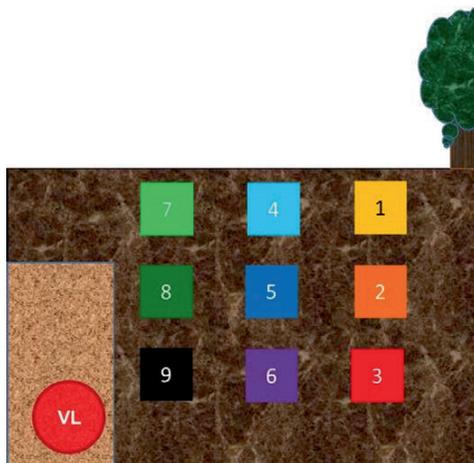


Abbildung 15: Anordnung Messpunkte Set "Baum"

4.2.4 Baumkrone

Während der Projektlaufzeit zeichnete ein in einer Baumkrone angebrachter Bluetooth Datenlogger die Umgebungstemperatur und die relative Feuchte am Standort der Messstelle auf. Für den Zeitraum von August 2019 bis Mitte Juni 2020 sind diese Daten in Abbildung 16 dargestellt. Der Abgleich zwischen Daten des Deutschen Wetter Dienstes (DWD) und den gemessenen Daten konnte vorerst nur für die Temperaturen durchgeführt werden, da für die

relative Feuchte keine direkt vergleichbaren Daten verfügbar sind. Wie im Vergleich in Abbildung 23 zu sehen, scheinen die gemessenen Temperaturdaten valide zu sein.

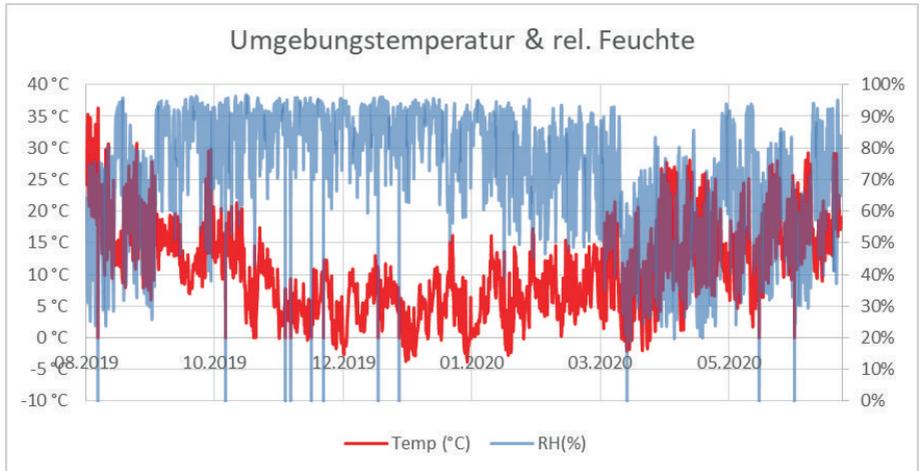


Abbildung 16: Umgebungsbedingungen am Standort der Messstelle

4.3 Das Set UNGESTÖRT

Ziel des Sets UNGESTÖRT ist die Messung eines von Wurzeln nicht durchzogenen Bereichs neben dem Rohrgraben, der dem Set BAUM nachempfunden ist, um etwaige Unterschiede zu identifizieren. Ungestört bedeutet in diesem Zusammenhang auf einen Bereich, der möglichst nicht von Wurzeln gestört ist. Da es hierbei auch zu Überschneidungen mit dem Rohrgraben kommen kann, ist nicht von einem komplett ungestörten (natürlich gewachsenen) Boden auszugehen.

4.3.1 Konzept

Die Anordnung der Sensoren (6 x T, 4 x F) erfolgt nach Vorlage des Sets BAUM. Da kein markanter Wurzelstrang als zweite Achse verfolgt werden kann, wird der Messereich auf eine Achse nahe dem Baumstamm und eine nahe der Rohrleitung reduziert.

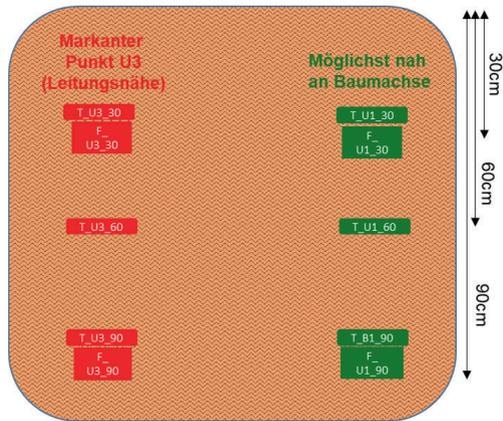


Abbildung 17: Skizze des Konzepts zum Set UNGESTÖRT

4.3.2 Umsetzung

Ein ungestörter Bereich, in dem das geplante Messkonzept umgesetzt werden konnte, war unter der realen Situation vor Ort nicht vorhanden. Da die Bäume durch die Errichtung der Fernwärmetrasse und der Messquerschnitte nicht geschädigt werden sollten, stand die Entfernung von Wurzeln nicht zur Debatte. Limitiert durch den „Aktionsradius“ der Messsensoren, konnte das Set UNGESTÖRT nicht umgesetzt werden. Die örtlichen Gegebenheiten und die verfügbare Sensorik ermöglichten allerdings den Aufbau eines abgeänderten Messquerschnitts, der zur Beantwortung weiterer relevanter Fragestellungen dient. Der umgesetzte Messquerschnitt befindet sich direkt im Rohrleitungsgraben und ähnelt daher dem Set GRABEN (siehe Abbildung 18). Durch die Platzierung je eines Temperatursensors unterhalb und oberhalb des Dehnpolsters, sollen die Auswirkungen des Dehnpolsters auf das Wärmefeld erfasst werden (siehe Abbildung 19). Weiterhin wurde die Platzierung so gewählt, dass sich drei Temperatursensoren direkt an einem Wurzelstrang befinden (siehe Abbildung 20). Die verfügbaren Feuchte Sensoren wurden im Rohrgraben verteilt, einmal oberhalb der Wurzel im „Wurzel Substrat“ zweimal im Randbereich (nicht mittig über den Leitungen) und einmal zwischen den beiden KMR (trotz möglicher Beeinflussung durch die Nähe zu den Rohrleitungen).

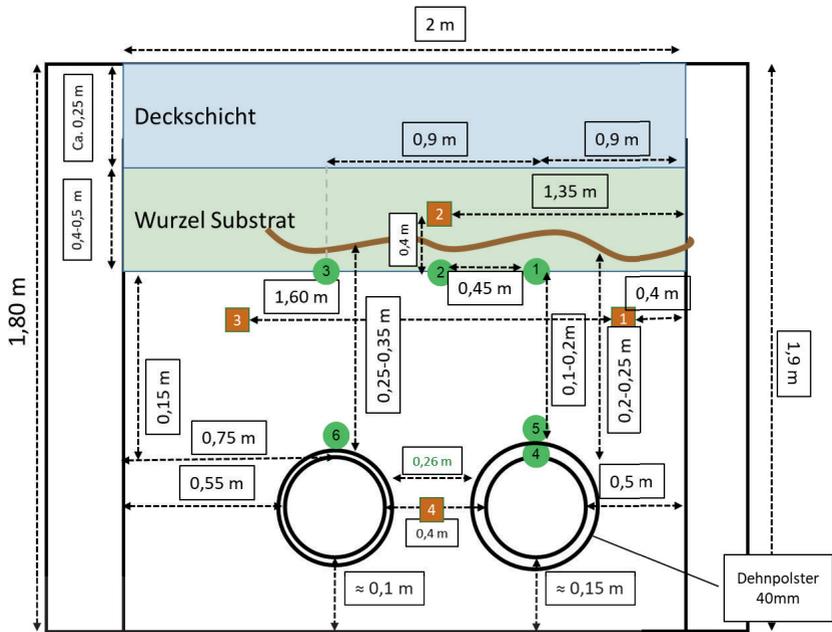


Abbildung 18: Skizze des umgesetzten Sets UNGESTÖRT

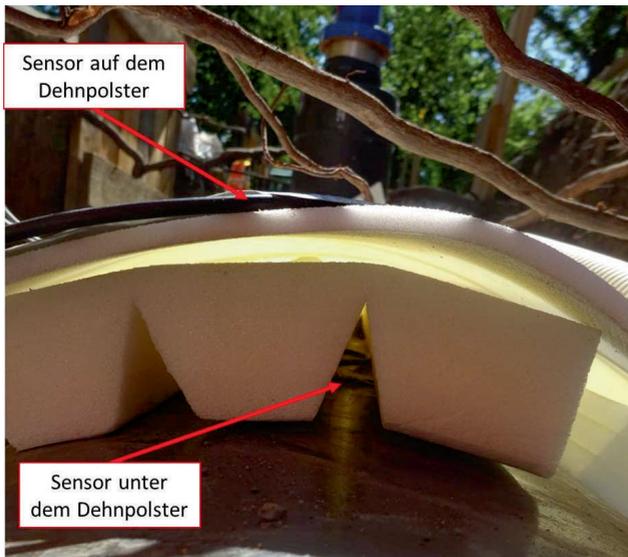


Abbildung 19: Sensoren am Dehnpolster um Set UNGESTÖRT



Abbildung 20: Temperatursensor im Wurzelstrang

4.3.3 Messwerte

Das Set UNGESTÖRT konnte seit Inbetriebnahme der Messtechnik störungsfrei messen. Anhand der grafisch aufbereiteten Messdaten in Abbildung 21 lassen sich einzelne Betriebsphasen der Sensoren, von ihrer (1) Inbetriebnahme über die (2) Positionierung im Erdreich, bis hin zur (3) Aufnahme des Versorgungsbetriebs der FW-Leitung, abgrenzen. Diese sind weitestgehend auch für das Set GRABEN gültig, das Set BAUM konnte erst im November final positioniert werden.

Die farbliche Zuordnung der einzelnen Temperatursensoren zu den jeweiligen Kurven ist in Abbildung 22 dargestellt. Temperatursensor-T4 (rot) befindet sich zwischen dem PE Außenmantel des KMR und dem darüber angebrachten Dehnpolster (Materialstärke 40 mm). Es ist deutlich zu sehen, dass unter dem Dehnpolster im Betrieb der Leitung deutlich höhere Temperaturen auftreten (max. $\approx 43\text{ }^{\circ}\text{C}$) als direkt darüber (T6). Nach (AGFW FW 401-7 2019) sind unter dem Dehnpolster Temperaturen bis maximal $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ zulässig. Weiterhin fällt auf, dass die Temperaturen an der Außenseite des Dehnpolsters (T5 am Vorlauf „orange“ und T6 „blau“ am Rücklauf) geringer sind als die gemessenen Temperaturen von T2 (gelb), in der Nähe der Wurzel.

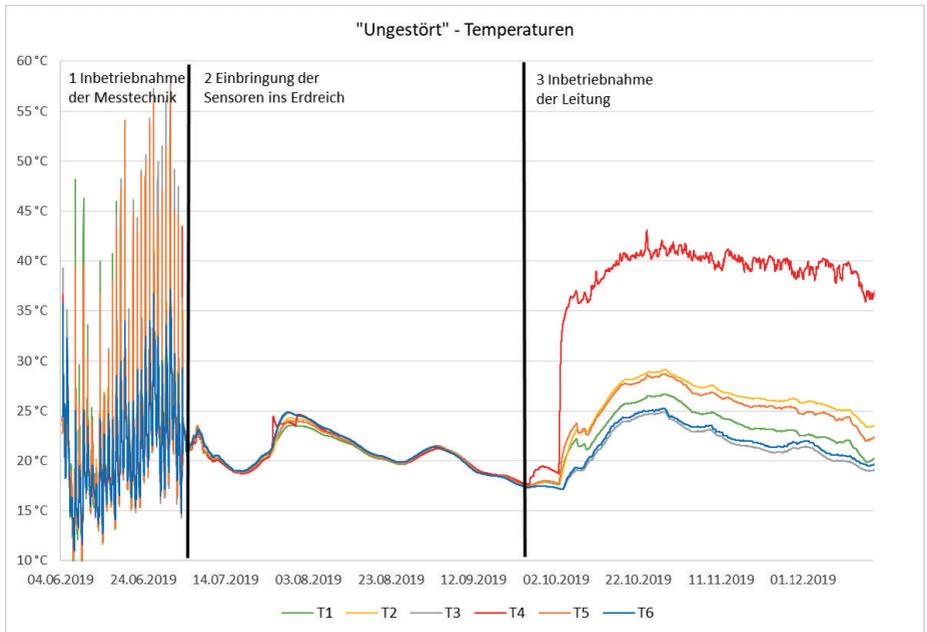


Abbildung 21: Set "Ungestört" – Temperaturen

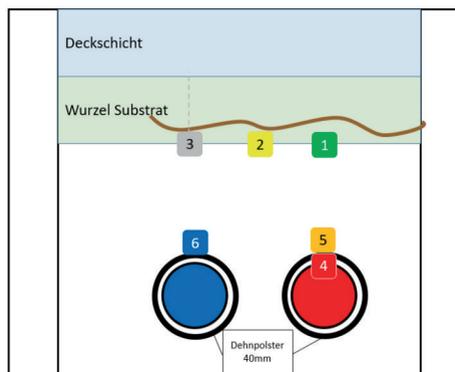


Abbildung 22: Querschnitt Set "Ungestört"

Dieser Effekt kann durch verschiedene Ursachen hervorgerufen werden. Möglich wären einerseits Messungenauigkeiten, welche die Abweichung zwischen den Sensoren hervorrufen. Diese sind allerdings vor der Leitungsinbetriebnahme nicht in dieser Größenordnung aufgetreten. Weitere Ursachen könnten diverse Inhomogenität im Erdreich sein, die einen sehr zielgerichteten erhöhten Wärmestrom der Leitung in Richtung des

Sensors-T2 erzeugen. Ebenfalls möglich sind auch Einflüsse durch die Umgebungsbedingungen im oberen Bereich des Rohrleitungsgrabens. Neben möglicher Inhomogenität in der Überdeckung oder einem Einfluss durch die Wurzel, könnten auch Sonneneinstrahlung oder ähnliches zu einem lokalen Temperaturanstieg führen. In Abbildung 23 sind ergänzend zu den gemessenen Temperaturen im Set UNGESTÖRT die gemessene Umgebungstemperatur und Temperaturdaten des (DWD) dargestellt. Tendenziell lassen sich im qualitativen Verlauf Ähnlichkeiten zwischen der Umgebungstemperatur und den Messwerten (Ausnahme T4 unter dem Dehnpolster) erkennen. Zum besseren Verständnis der Effekte sind vergleichende Auswertungen mit den anderen Sets vorgesehen, außerdem können einzelne Effekte anhand von FEM-Simulationsrechnungen überprüft werden.

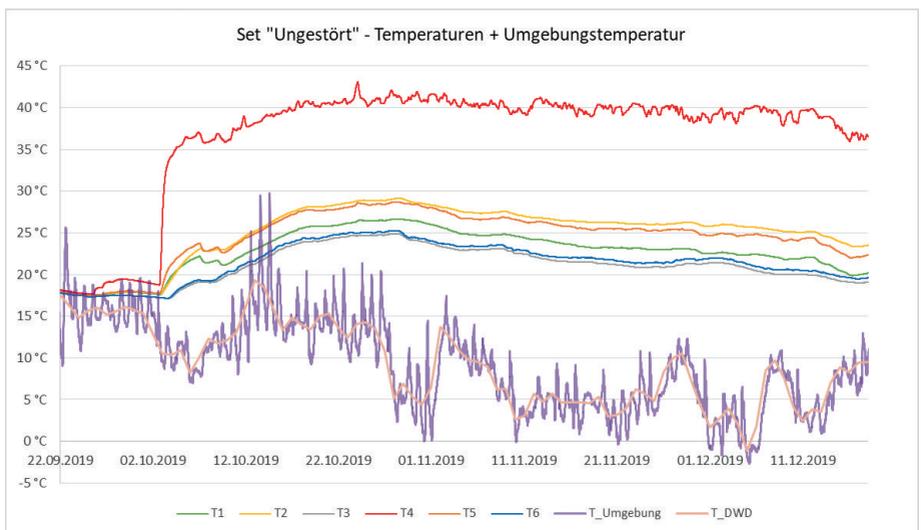


Abbildung 23: Set "Ungestört" Temperaturen inkl. Umgebungstemperatur

Die grafische Aufbereitung der Messwerte der Feuchtesensoren zeigt, dass sich die einzelnen Phasen auch durch markante Messwerte voneinander abgrenzen (siehe Abbildung 24). Mit Inbetriebnahme der Leitung steigen die Messwerte um gut 5 Prozentpunkte an. Erst nachdem ausreichend Daten für einen Abgleich mit den Feuchtesensoren der anderen Sets verfügbar sind, können diese Messergebnisse weiter untersucht und verglichen werden. Sobald eine aussagekräftige und plausible Datenbasis vorhanden ist, können die Messungen mit verschiedenen Witterungsereignissen abgeglichen und mögliche Temperaturkorrelation untersucht werden. Durch die Einbeziehung der Daten in die FEM Simulationen wird eine verbesserte Qualität der Simulationsergebnisse erwartet.

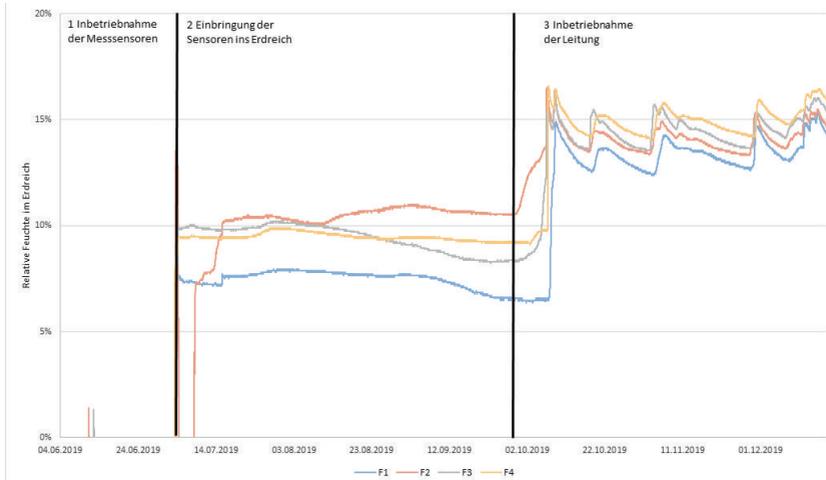


Abbildung 24: Messungen der Feuchtesensoren am Set UNGESTÖRT

5 Ausblick

Aufgrund der, im Kontext des Forschungsvorhabens, langen Zeit von Planung der Messstrecke zur Inbetriebnahme und der aufgetretenen Fehler bei der Messwerterfassung, sind nur für das Set „Ungestört“ ausreichende Datenmengen für eine erste Analyse verfügbar. Aufgrund der lokalen Anpassungen (Armaturen und Dehnpolster im Messquerschnitt) stellt dieses Messset ein sehr individuelles Szenario dar, welches ohne den Bezug zu weiteren Datenpunkten (Manteltemperatur am Rohr ohne Dehnpolster) nicht eindeutig auszuwerten ist. Die verfügbaren Messwerte deuten allerdings darauf hin, dass die Umgebungsbedingungen einen relevanten Einfluss auf die Temperaturen im Erdreich haben können und eventuell auch Sonneneinstrahlung und Verschattung bei der Simulation zu berücksichtigen sind. Die Messdatenaufzeichnung kann über das Projektende hinaus weiterlaufen, woraus ein umfassender Datenpool zur späteren Auswertung der Messstelle und Validierung entsprechender Simulationen in einem Folgevorhaben entsteht. Die weitere Beobachtung und Fotodokumentation der Vegetation kann im Zusammenhang mit den entsprechenden Messwerten im Wurzelbereich helfen, mögliche Langzeiteffekte durch Wärmeabstrahlung von Fernwärmematten abzubilden bzw. zu widerlegen.

Anlage 3

Simulation von Wärmefeldern im Erdreich unter Berücksichtigung von Fernwärmeleitungen

(Gesellschaft für Wissens- und
Technologietransfer der TU Dresden mbH)

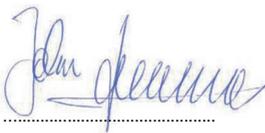
Projekt-Nr.: 250401 / 14372

Projekt: Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln
und unterirdischen Fernwärmeleitungen
Simulation von Wärmefeldern im Erdreich unter Berücksichtigung
von In-situ-Fernwärmeleitungen
– Bauphysikalisch- bauklimatische Begleitung -

Auftraggeber: AGFW Projekt GmbH
Herrn Sebastian Grimm
Stresemannallee 30
60596 Frankfurt
s.grimm@agfw.de
Telefon: +49 69 / 6304 200
Fax: +49 69 / 6304 455

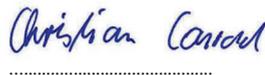
Auftragnehmer: GWT- TUD GmbH
Gesellschaft für Wissens- und Technologietransfer
der TU Dresden mbH
Freiberger Straße 33
01067 Dresden
Telefon: +49 (0) 351 / 463 329 11
Fax: +49 (0) 351 / 463 326 27

Datum: 9. Juli 2020



.....

Prof. Dr.-Ing. John Grunewald
Professur Bauphysik
Institut für Bauklimatik (IBK) der TU Dresden und
Kostenstellenleiter bei der GWT-TUD GmbH



.....

Dipl.-Ing. Christian Conrad
Bearbeiter
Wissenschaftliche Mitarbeiter
GWT-TUD GmbH

Inhaltsverzeichnis

1.	Aufgabenstellung	2
2.	Berechnungsgrundlagen	3
2.1.	Verwendetes Berechnungs- und Simulationswerkzeug.....	3
2.2.	Geometrie und Beschreibung der Messstelle	4
2.3.	Materialkennwerte	7
2.4.	Klimate und Klimarandbedingungen.....	9
2.5.	Fernwärmeleitung	13
2.6.	Simulationsvarianten mit Dokumentation der Randbedingungen.....	16
3.	Simulationsergebnisse.....	17
3.1.	Temperaturfelder Variante 1 bis 4.....	17
3.2.	Oberflächennahe Temperaturmessstellen T1 bis T2	21
3.3.	Temperaturmessstellen T3, T5, T9, T11 und T12.....	24
3.4.	Temperaturmessstellen T7 und T19 zwischen den Fernwärmeleitungen	29
3.1.	Temperaturmessstelle T17 unter dem Vorlauf der Fernwärmeleitung	32
4.	Zusammenfassung und Ausblick.....	34
5.	Verwendete Literatur, Normen und Planungsunterlagen	35

1. Aufgabenstellung

Der AG möchte im Rahmen eines laufenden Forschungsprojektes zur Interaktion zwischen Vegetation und unterirdischen Fernwärmeleitungen ein realitätsnäheres Bild zur Ausbreitung der Temperaturen im Erdreich erlangen. Damit sollen Erkenntnisse zur Wichtung unterschiedlicher Einflüsse (z.B. Fernwärmeleitung, Umgebungsbedingungen, Witterungserscheinungen) gewonnen werden, um deren Größenordnung für zukünftige Projekte mit berücksichtigen zu können und notwendige Abstände zu weiteren Medien und z. B. Bäumen bemessen zu können.

Dazu sollen dynamische Simulationen mit verschiedenen Wichtungseinflüssen durchgeführt werden.

Seitens des AG wurden die geometrischen Vorgaben, Vorgaben zur Rohrlagerung sowie vorhandene Messdaten zur betrachteten Messstrecke übergeben. Gemeinsam mit dem AG wurden die Randbedingungen für die zu erstellenden Simulationen festgelegt (Geometrieumsetzung, Materialwahl und Klimarandbedingungen), diskutiert und bei Bedarf angepasst. Nachfolgend wurde das thermische Simulationsmodell und die Definition der Ausgabefelder und einzelnen Ausgabepunkte für die Simulation in Anlehnung an die übergebenen Messpunkte erstellt. Anschließend erfolgte eine Auswertung und erste Interpretation der Berechnungsergebnisse sowie die Darstellung der Untersuchungsergebnisse in einer Kurzpräsentation im

Rahmen einer Bildschirmpräsentation. In enger Abstimmung mit den AG wurden 3 weitere Simulationsvarianten (z. B. durch Veränderung von Materialkennwerten, Anpassung der Klimadaten usw.) vorgenommen.

2. Berechnungsgrundlagen

Die Ausbreitung der Temperaturen im Erdreich infolge von unterirdisch verlegten Fernwärmeleitungen hängt von vielen Faktoren ab. In diesem Projekt wurde eine erste Studie mit einer konkreten Auswahl an Materialien, Geometrieaufbau und Rand- und Simulationsbedingungen durchgeführt. Nachfolgend sind die mit dem AG abgestimmten Eingangsdaten aufgeführt. Eine Zusammenfassung der gewählten Eingangsdaten wurde dem AG digital übermittelt.

In diesem Kapitel werden nachfolgend das Simulationsmodell und die einzelnen Parameter dokumentiert.

2.1. Verwendetes Berechnungs- und Simulationswerkzeug

Für die Simulation der Wärmefelder im Erdreich unter Berücksichtigung von Fernwärmeleitungen wurde das Programmpaket DELPHIN genutzt.

Das Programm DELPHIN ist ein hochwertiges numerisches Simulationsprogramm für den gekoppelten Wärme-, Feuchte-, Luft- und Salztransport in porösen Materialien und wird weltweit in Forschungsinstituten, Universitäten und Ingenieurbüros zur Lösung bauphysikalischer Fragestellungen verwendet. Die Einbeziehung natürlicher Klima- und Nutzungsrandbedingungen liefert vielfältige Informationen über den Einfluss von Strahlung, Schlagregen, aufsteigender Feuchte oder Einbaufeuchte. Die Simulation von Temperaturfeldern, Feuchtegehalten und der Eisbildung im Erdreich ist ein weiterer Anwendungsfall. Zurzeit wird DELPHIN in mehreren Forschungsprojekten zur Lösung von Aufgaben in diesem Bereich eingesetzt.

In diesem Projekt kommt die Software DELPHIN in der Version 6.1 zum Einsatz [1]. Mit dem Programm POSTPROC 2.2 wurden die großen Datenmengen aus Messwerten und Simulationsvarianten effizient ausgewertet und verglichen [1].

2.2. Geometrie und Beschreibung der Messstelle

Die Messstelle der unterirdischen Fernwärmeleitung befindet sich in der Nähe eines Flusses und ist durch Bäume verschattet (siehe Abbildung 1).

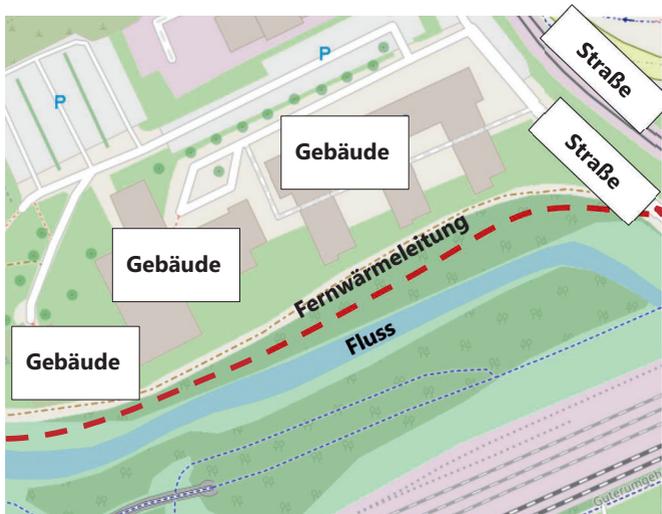


Abbildung 1: Lage der unterirdischen Fernwärmeleitung [2, Quelle: <https://www.openstreetmap.org>]

In Abbildung 2 sind das reale Grabenprofil und die Lage der Sensoren dargestellt. Der Vorlauf der Fernwärmeleitung ist rot und der Rücklauf blau dargestellt. Für das Grabenprofil wurde die Bodenart Sand und für das anstehende Erdreich die Bodenart schluffiger Ton angenommen. Die Geländeneigung wurde im Simulationsmodell vernachlässigt, sowie die kreisförmigen Rohre durch Quadrate gleichen Umfangs ersetzt.

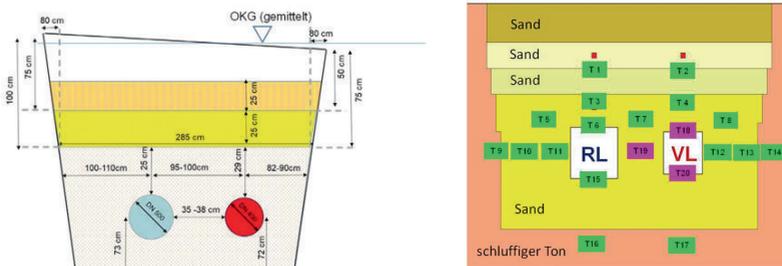


Abbildung 2: Grabenprofil der Messstelle der untersuchten unterirdischen Fernwärmeleitung [Quelle: AGFW Projekt GmbH] mit der Lage der Temperatursensoren

In der Messstrecke wurden insgesamt 20 Temperatursensoren in verschiedenen Tiefen eingebaut. Die Sensoren T6, T15, T18 und T20 befinden sich direkt auf dem Mantel des Vorlauf- bzw. Rücklaufrohres (siehe Abbildung 2). Es wurden sehr hochwertige 12-Bit Temperatur-Smart-Sensoren mit einer Genauigkeit von $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (bei 0 ° bis $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$) und einem Drift $< 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Jahr eingesetzt [3]. Die Messwerte wurden im 10 min-Takt aufgezeichnet.

In den nachfolgenden Abbildungen 3 bis 6 ist der Verlauf der Temperaturen im Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019 dargestellt. Die Daten wurden für die Programme POSTPROC 2.2 und DELPHIN 6.1 aufbereitet.

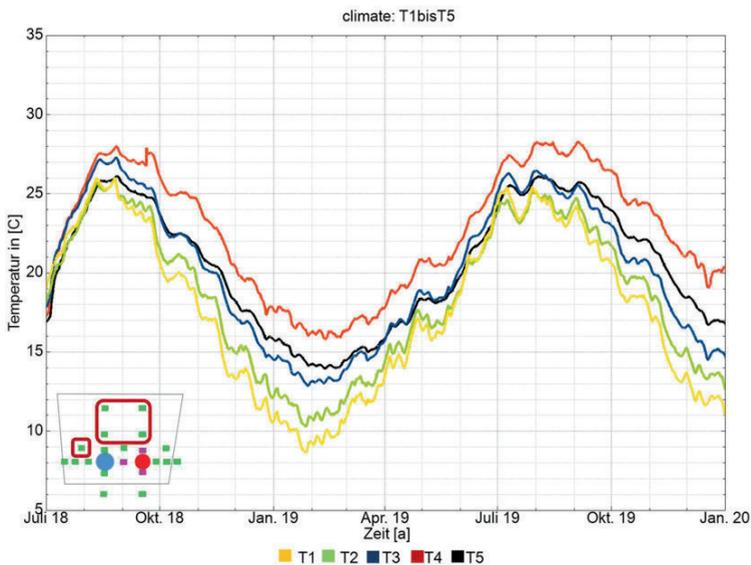


Abbildung 3: Verlauf der gemessenen Temperaturen **T1 bis T5** im Zeitraum vom 01. Jul 18 bis 31. Dez 19

In Abbildung 3 ist der Verlauf der gemessenen oberflächennahen Temperaturen T1 bis T5 dargestellt. Mit zunehmender Tiefe bzw. Verringerung des Abstandes zu den Fernwärmerohren nimmt die Temperatur zu. Der jahreszeitliche Verlauf des Außenklimas dominiert den Verlauf der Temperaturen.

Diese Aussagen treffen auch auf die Temperaturen T6 bis T20 (siehe Abbildungen 4 bis 6) zu. Der Temperatursensor T7 zeigt im Gegensatz zu den anderen Sensoren im Frühsommer 2019 ein stärkeres Maximum. Ggf. ist dies auf eine geringere Nähe zum Vorlauf zurückzuführen (siehe Abbildung 4).

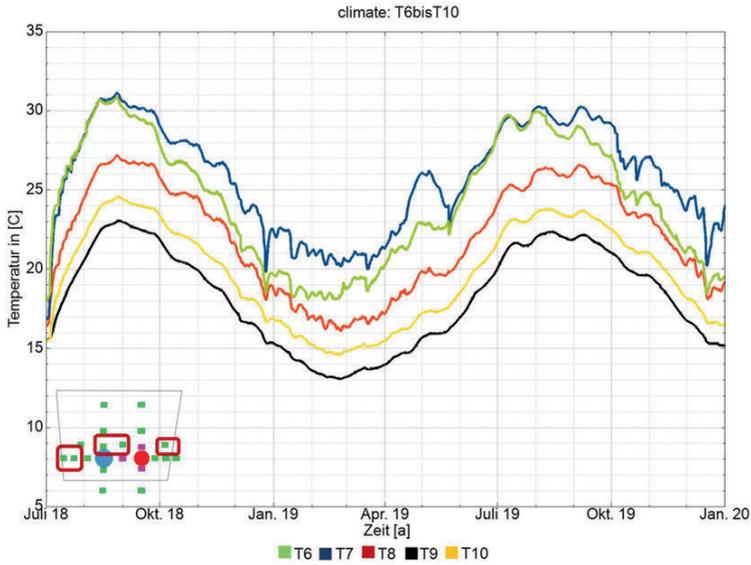


Abbildung 4: Verlauf der gemessenen Temperaturen **T6 bis T10** im Zeitraum vom 01. Jul 18 bis 31. Dez 19

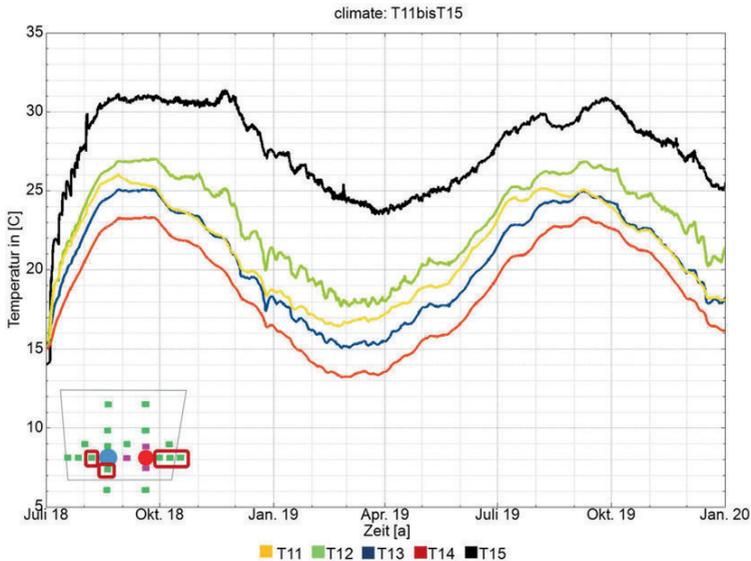


Abbildung 5: Verlauf der gemessenen Temperaturen **T11 bis T15** im Zeitraum vom 01. Jul 18 bis 31. Dez 19

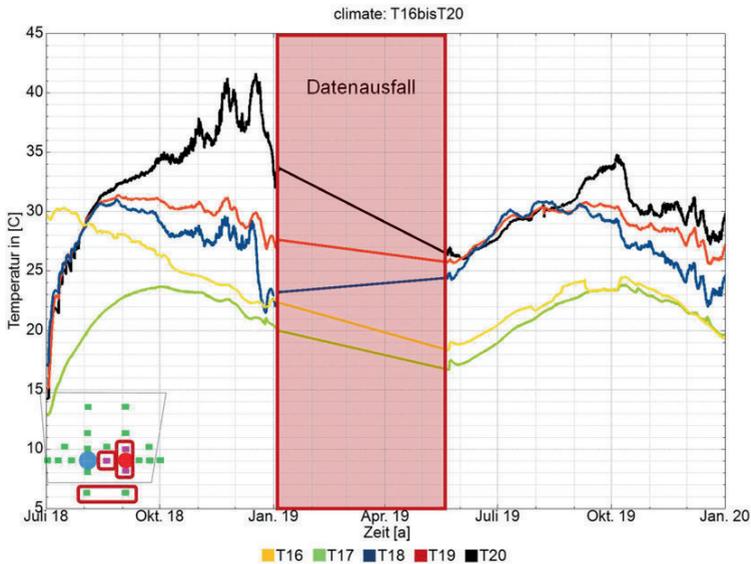


Abbildung 6: Verlauf der gemessenen Temperaturen **T16 bis T20** im Zeitraum vom 01. Jul 18 bis 31. Dez 19

Im Zeitraum vom 04.01.2019 bis 20.05.2019 wurden bei den Datenloggern für T16 bis T20 keine Temperaturen aufgezeichnet (siehe Abbildung 6). Die jeweiligen Temperaturen unterhalb der Fernwärmelieferungen sind wesentlich höher als die an der Oberseite.

2.3. Materialkennwerte

Die Simulationen wurden mit den in Tab. 1 aufgeführten Bodenkennwerten durchgeführt. In der Tabelle sind die Basisparameter der verwendeten Böden dargestellt. Für den anstehenden Boden wurde der Materialdatensatz eines schluffigen Tones und für die Verfüllung des Grabens der Materialdatensatz eines Sandes verwendet (siehe Abbildung 2).

Die verwendenden hygrothermisch charakterisierten Böden wurden aus der Materialdatenbank des DELPHIN-Programmes entnommen. Die Auswahl der einzelnen Bodenarten erfolgte gemeinsam mit dem AG.

Tabelle 1 Thermische Kennwerte der verwendeten Böden

	Rohdichte	spezifische Wärmekapazität	Porosität
schluffiger Ton	1820 kg/m ³	1320 J/(kg*K)	0,37
Sand	1513 kg/m ³	805 J/(kg*K)	0,44

Die in den Simulationen verwendeten Materialfunktionen bestimmen maßgeblich das thermische bzw. hygrothermische Verhalten des Erdreiches. Die Wärmeleitfähigkeit des Bodens hängt beispielsweise vom Wassergehalt ab (siehe Abbildung 7). Wenn die verwendeten Materialfunktionen stark abweichen bzw. andere Materialien eingebaut wurden als in den Simulationen angenommen, kann dies zu einem abweichenden Verhalten führen.

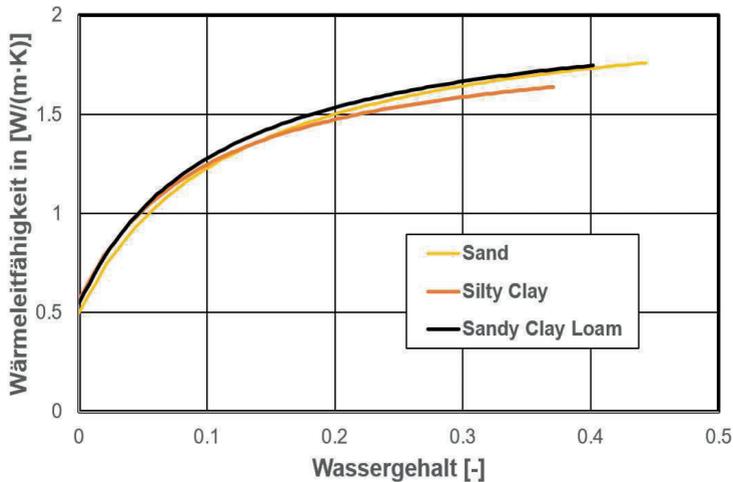


Abbildung 7: Wärmeleitfähigkeit des Bodens in Abhängigkeit vom Wassergehalt

Die thermische Simulation wurde unter Berücksichtigung des Anfangswassergehaltes durchgeführt. Das Programm DELPHIN berücksichtigt dabei die Änderung der spezifischen Wärmekapazität und der Rohdichte des feuchten Bodens in Abhängigkeit des Wassergehaltes.

2.4. Klimate und Klimarandbedingungen

Für die realitätsnahe Simulation sind neben geeigneten Materialkennwerten die Klimabedingungen von besonderer Bedeutung. Dazu zählen Außenlufttemperatur, direkte und diffuse Solarstrahlung, atmosphärische (Himmels-) Gegenstrahlung, Luftfeuchtigkeit, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und Niederschlag.

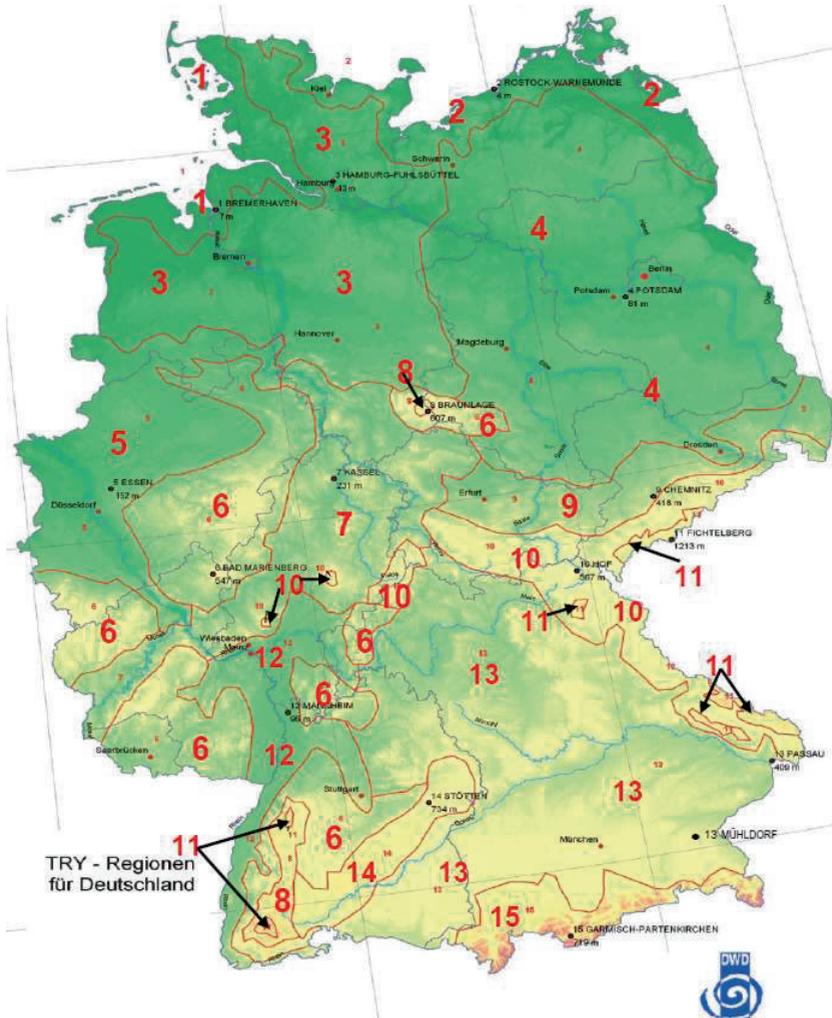


Abbildung 8: Einteilung Deutschlands in 15 Klimaregionen; Testreferenzregion 12 [4]

Die Messstelle der unterirdischen Fernwärmeleitung liegt in der Testreferenzregion 12 u des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Deshalb wurden Stundenwerte der Klimamessungen des Deutschen Wetterdienstes aus einer DWD-Station im Referenzgebiet verwendet [5].

Bei den Klimamessungen des Deutschen Wetterdienstes sind Datenlücken vorhanden, die in [5] dokumentiert worden sind. Die Himmelsgegenstrahlung wurde an diesem Standort erst ab 01.05.2018 gemessen. Die fehlenden Klimadaten wurden durch die Klimadaten des Testreferenzjahres 12 (TRY 12) für den Zeitraum vom 01. Jan. 2018 bis 30. April. 2018 ergänzt [5]. Bei kleineren Datenlücken wurde linear Interpoliert. Bei größeren Datenlücken mit einem markanten Tagesverlauf (z. B. direkte und indirekte Strahlung) wurden die Datenlücken mit den davorliegenden Tagen ergänzt.

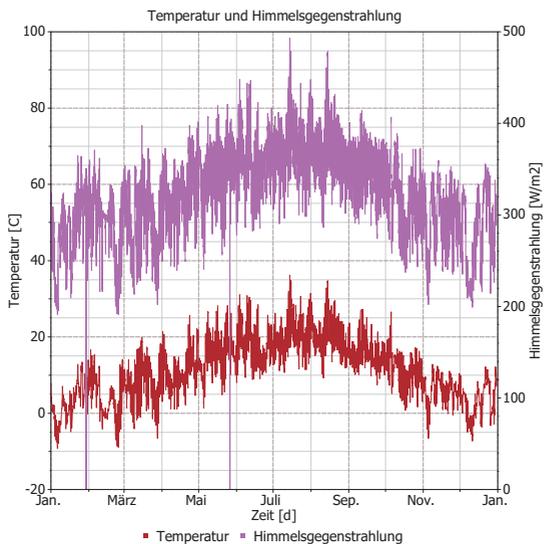


Abbildung 9: Jahresverlauf von Temperatur und Himmelsgegenstrahlung des Testreferenzklimas 12 – DWD Station (durchschnittlicher Winter)

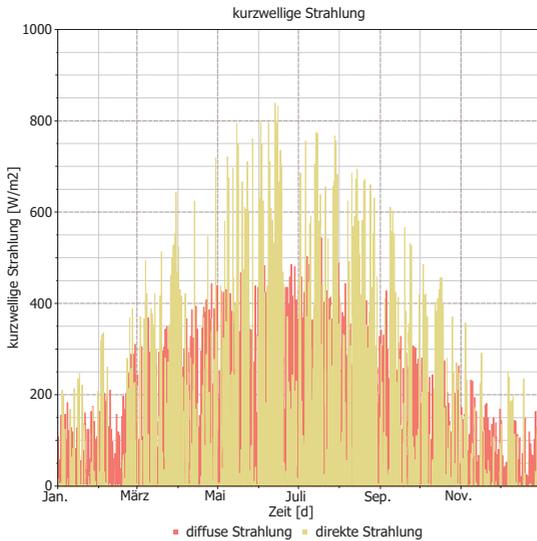


Abbildung 10: Jahresverlauf der diffusen und der direkten Strahlung des Testreferenzklimas 12 – DWD Station (durchschnittlicher Winter)

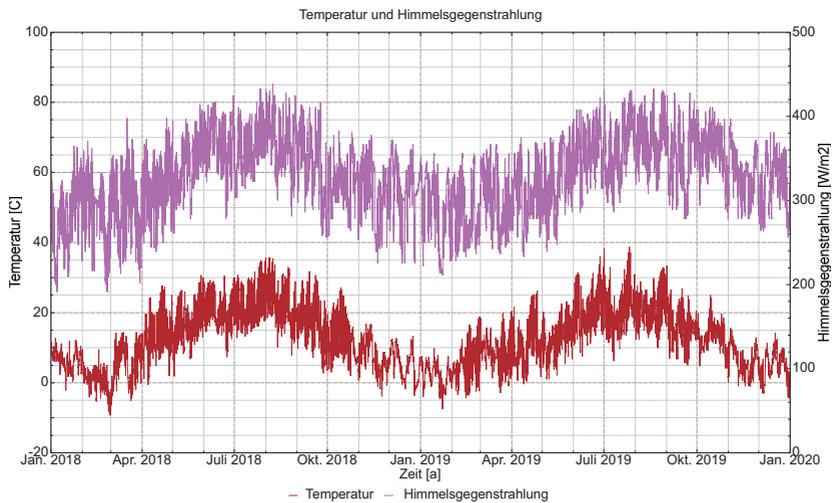


Abbildung 11: Verlauf der Temperatur und der Himmelsgegenstrahlung für die Jahre 2018 und 2019 an der DWD - Station

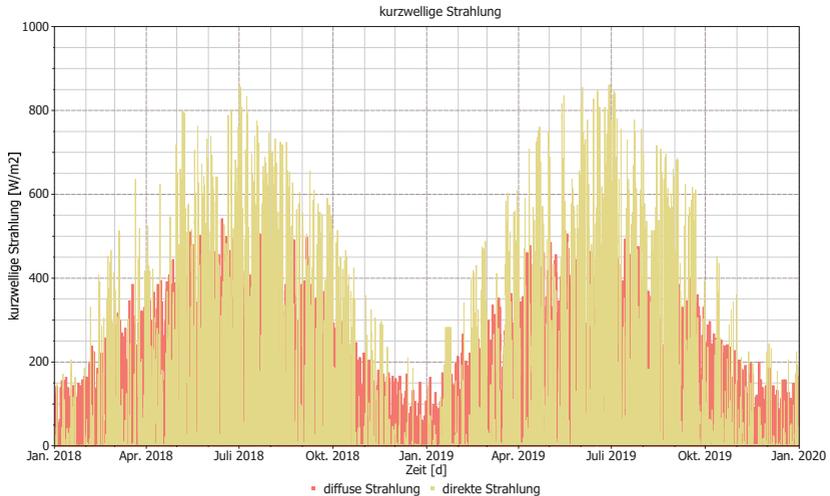


Abbildung 12: Verlauf der diffusen und der direkten Strahlung für die Jahre 2018 und 2019 an der DWD-Station

Der Vergleich der Metadaten des Testreferenzjahres 12 mit den gemessenen Klimadaten des Deutschen Wetterdienstes dieser Station für die Jahre 2018 und 2019 des Referenzstandortes weist eine höhere mittlere Jahrestemperatur und in Summe eine höhere direkte Strahlung auf. Bei der Himmelsgegenstrahlung sind geringe Unterschiede vorhanden (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2 : Vergleich der Klimadaten des Testreferenzjahres 12 (TRY 12) und der DWD Messungen aus den Jahren 2018 und 2019

	Temperatur	direkte Normalstrahlung	diffuse Horizontalstrahlung	Himmelsgegenstrahlung
min. TRY 12	-9.3 °C	0 W/m ²	0 W/m ²	191 W/m ²
mittel TRY 12	9.9 °C	60 W/m ²	64 W/m ²	322 W/m ²
max. TRY 12	36.3 °C	839 W/m ²	544 W/m ²	493 W/m ²
Summe TRY 12		528 kWh/m ²	562 kWh/m ²	2819 kWh/m ²
min. 2018	-9.3 °C	0 W/m ²	0 W/m ²	191 W/m ²
mittel 2018	12.7 °C	75 W/m ²	64 W/m ²	326 W/m ²
max. 2018	35.7 °C	861 W/m ²	542 W/m ²	439 W/m ²
Summe 2018		659 kWh/m ²	564 kWh/m ²	2853 kWh/m ²
min. 2019	-7.4 °C	0 W/m ²	0 W/m ²	211 W/m ²
mittel 2019	11.9 °C	77 W/m ²	62 W/m ²	332 W/m ²
max. 2019	38.8 °C	861 W/m ²	506 W/m ²	433 W/m ²
Summe 2019		678 kWh/m ²	546 kWh/m ²	2907 kWh/m ²

2.5. Fernwärmeleitung

Das verwendete Kunststoffmantelrohr (KMR) besteht aus dem Stahlmediumrohr und einer Um-mantelung aus einer PUR-Schaum-Dämmschicht mit einem PE-Mantel (siehe Abbildung 13). Nach Auskunft des AGs wurde der Anfahrbetrieb der Fernwärmeleitungen am 02. Juli 2018 begonnen (vgl. Abbildung 14).



Abbildung 13: Kunststoffmantelrohr, Beispiel [Quelle: AGFW]

Tabelle 3 Zusammenstellung der Kennwerte der verwendeten Kunststoffmantelrohre (KMR)

	Vorlauf VL	Rücklauf RL	Einheit
DN	400	500	
Stahlrohr Ø_außen	406.4	508	mm
Stahlrohr Wandstärke	6.3	6.3	mm
Stahlrohr Ø_innen	393.8	495.4	mm
PE Mantel Ø_außen	520	630	mm
PE Wandstärke	6	7.2	mm
PE Mantel Ø_innen	508	615.6	mm
Dämmstärke	57.1	60.1	mm
Umfang Ø_außen	1634	1979	mm
Breite/Höhe Ersatzquadratprofil	408	495	mm
Differenz Radius Ersatzprofil	56	68	mm

Die Temperaturen wurden jeweils oberhalb und unterhalb der Manteloberflächen gemessen. Im Zeitraum von 04.01.2019 bis 20.05.2019 lag ein Datenausfall am Rohr des Vorlaufes vor.

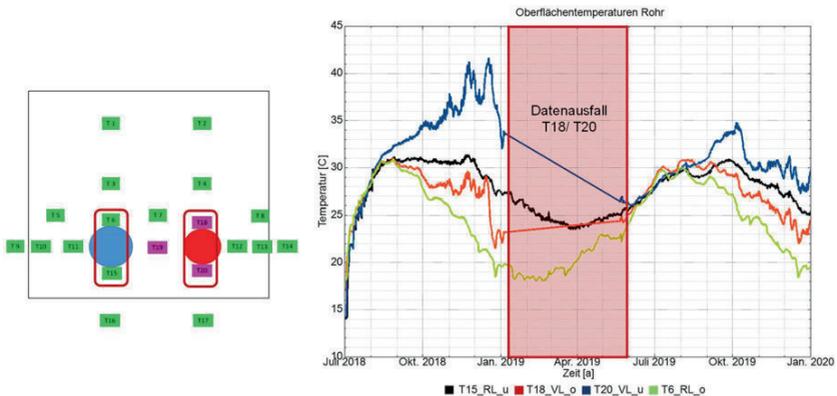


Abbildung 14: Verlauf der gemessenen Rohroberflächentemperaturen am Vor- und Rücklauf für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

Das Grabenprofil mit den Fernwärmeleitungen befindet sich in der Mitte des Berechnungsgebietes. Das zweidimensionale Berechnungsgebiet beträgt 25 m in der Breite und 15 m in der Tiefe (siehe Abbildung 15). Nach unten und zu den Seiten ist das Gebiet adiabatisch begrenzt. Der Energieaustausch findet an der Erdoberfläche und an der Mantelfläche der Fernwärmeleitungen statt. An der Geländeoberfläche wird das gemessene Außenklima des DWD- Standortes verwendet.

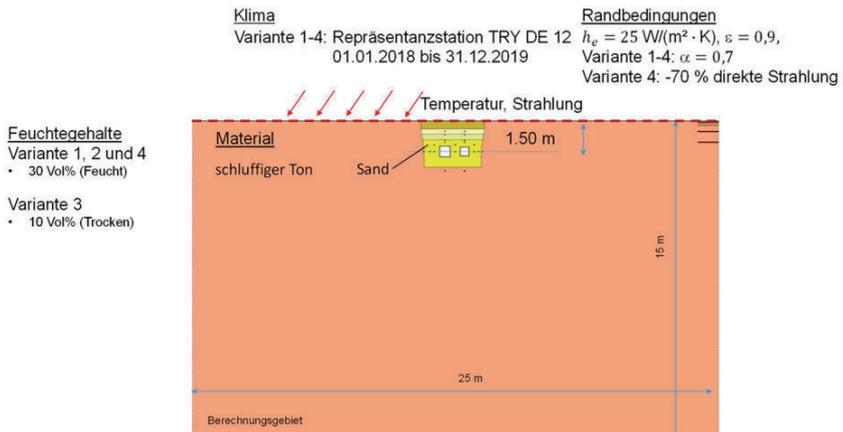


Abbildung 15: Vertikaler Schnitt der unterirdischen Fernwärmeleitungen, Berechnungsgebiet mit Randbedingungen

Als Temperaturrandbedingungen an der Außenoberfläche der Rohre wurden die gemessenen gemittelten Rohroberflächentemperaturen am Vor- und Rücklauf verwendet. Hierzu wurden jeweils die Temperaturen aus dem oberen und unteren Sensor gemittelt (vgl. Abbildung 17).

Der Zeitraum des Datenausfalls wird anhand des Temperatursensors T12 und den Anfangs- und Endwerten vor bzw. nach dem Datenausfall berechnet.

Um die Wärmestromdichten in der Rohrumsgebung korrekt abzubilden, erfolgte die Idealisierung der runden Rohre als Rechteckprofilabmessungen unter der Bedingung einer identischen Mantelfläche entsprechend der Umrechnung in Tabelle 3.

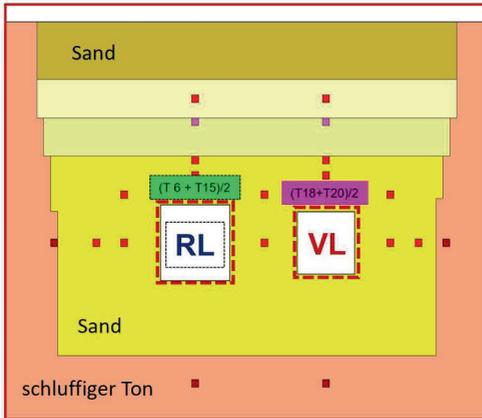


Abbildung 16: Zuordnung der gemittelten Temperaturrandbedingungen zu den idealisierten Rechteckoberflächen der Rohre

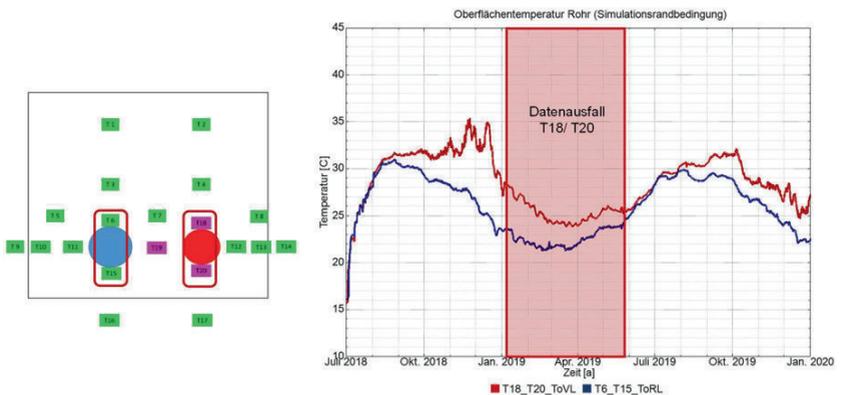


Abbildung 17: Verlauf der gemessenen gemittelten Rohroberflächentemperaturen am Vor- und Rücklauf für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

2.6. Simulationsvarianten mit Dokumentation der Randbedingungen

Es wurden insgesamt 4 Varianten untersucht. Bei der **Variante 1** wurde ein sehr nasser Boden mit einer maximalen Wärmeleitfähigkeit von 2,33 W/mK [6] mit einem Wassergehalt von 30 % angenommen. Die spezifische Wärmekapazität und die Rohdichte wurden in Abhängigkeit dieses Wassergehaltes berechnet.

Bei der **Variante 2** wurde die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit des Anfangswassergehaltes von 30 % ermittelt.

Die **Variante 3** stellte einen sehr trockenen Boden mit einem Anfangswassergehalt von 10 % dar. Die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität und die Rohdichte des trocknen Bodens ergeben sich aus der Abhängigkeit dieses Anfangswassergehaltes.

Auf Grundlage der **Variante 2** wurde die Variante 4 erstellt. Es ist eine starke Verschattung durch sich in unmittelbarer Nähe befindende Bäume vorhanden. Dies wurde durch eine Reduzierung der direkten Strahlung um 70 % berücksichtigt.

Im Abbildung 15 ist das Berechnungsgebiet mit den Randbedingungen dargestellt. Die einzelnen Randbedingungen der Varianten sind in der Tabelle 4 mit den hervorgehobenen Variationen aufgelistet.

Tabelle 4 Zusammenstellung der Simulationsvarianten mit den Randbedingungen

	Variante 1 (erhöhte WLF)	Variante 2 (Boden feucht)	Variante 3 (Boden trocken)	Variante 4 (Verschattet)
Klima	Repräsentanzstation TRY DE 12 2018 und 2019 gemessen, Testreferenzjahr TRY DE 12			
Feuchtegehalt	30 %	30 %	10 %	30 %
Randbedingungen				
Temperatur - Wärmeübergangskoeffizient	$h_e = 25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$			
kurzwellige Strahlung - Absorptionsgrad	$\alpha = 0,7$		$\alpha = 0,7$	
- Abminderung direkte Strahlung (Verschattung)			70%	
Himmelsgegenstrahlung - Emissionsgrad	$\varepsilon = 0,9$			
Materialeigenschaften				
Wärmeleitfähigkeit	$\lambda = 2,33$ W/mK	in Abhängigkeit von der Anfangsfeuchte		

Die thermische Simulation wurde unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

Anfangstemperatur 7,8 °C, Anfangswassergehalte siehe Tabelle 4

Simulationsdauer 2 Jahre mit Einschwingzeit vom 01.01.2018 bis 31.07.2018

Energiebilanzgleichung unter Berücksichtigung der Materialfeuchte

Relative Toleranz: 5×10^{-6} , maximale Zeitschrittweite: 30 min

3. Simulationsergebnisse

Alle Simulationsergebnisse und die Aufbereitung der Temperaturfelder und der Diagramme mittels POSTPROC 2.2 [1] wurden den AG digital übergeben.

3.1. Temperaturfelder Variante 1 bis 4

Für das Berechnungsgebiet wurden für jede Variante die 2D-Temperaturfelder aller 2,5 Tage ausgegeben. Mit POSTPROC kann eine Animation der Temperaturfelder dargestellt werden. Gemeinsam mit dem AG wurden für den Vergleich der Varianten je zwei charakteristische Ausgabezeitpunkte festgelegt, die einmal einen Sommerfall (Niedrige Vorlauftemperatur und hohe Umgebungstemperatur) und einmal einen Winterfall (Hohe Vorlauftemperatur niedrige Umgebungstemperatur) darstellen.

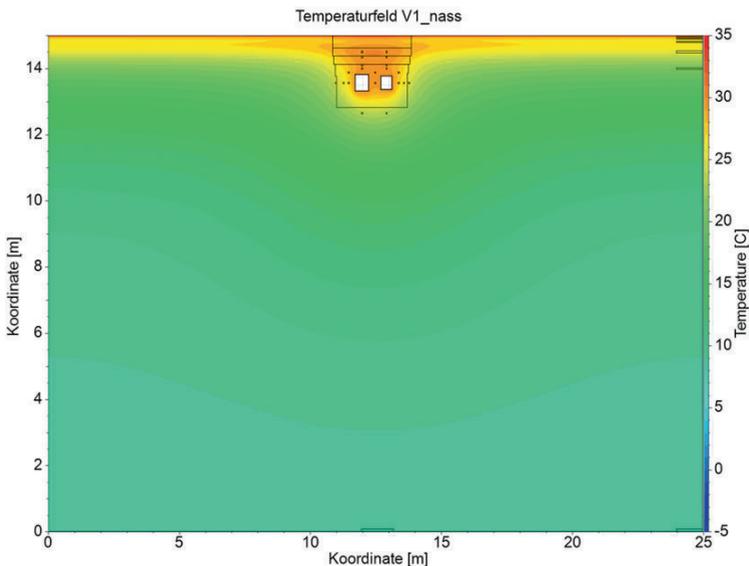


Abbildung 18: Variante 1 – Erhöhte Wärmeleitfähigkeit, dargestellt das Temperaturfeld in [°C] am 27. Juli 2019

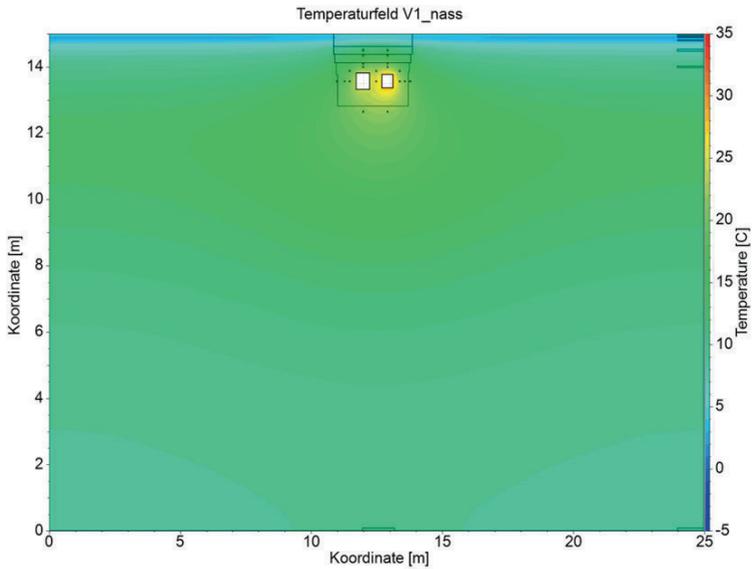


Abbildung 19: Variante 1 – Erhöhte Wärmeleitfähigkeit, dargestellt das Temperaturfeld in [°C] am 04. Dezember 2019

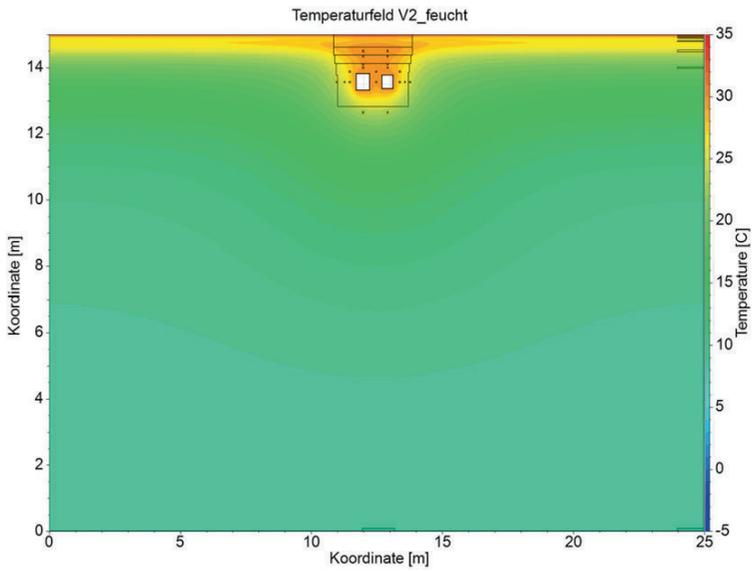


Abbildung 20: Variante 2 – Boden feucht, dargestellt das Temperaturfeld in [°C] am 27. Juli 2019

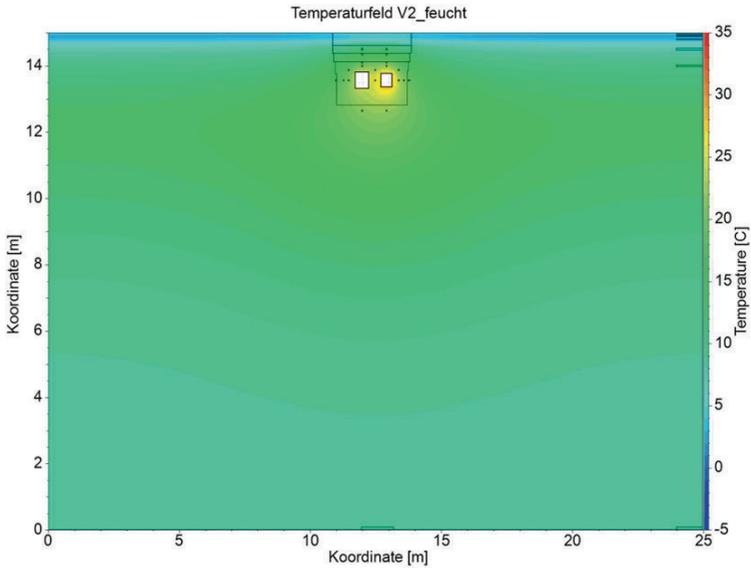


Abbildung 21: Variante 2 – Boden feucht, dargestellt das Temperaturfeld in [°C] am 04. Dezember 2019

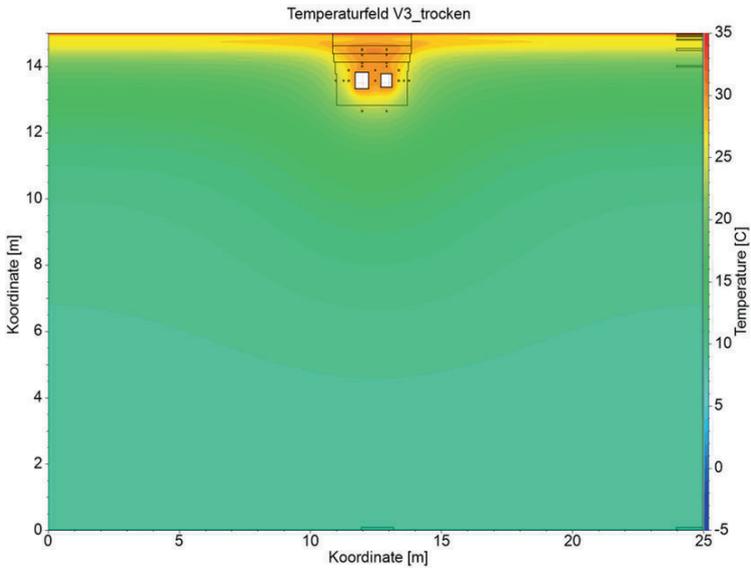


Abbildung 22: Variante 3 – Boden trocken, dargestellt das Temperaturfeld in [°C] am 27. Juli 2019

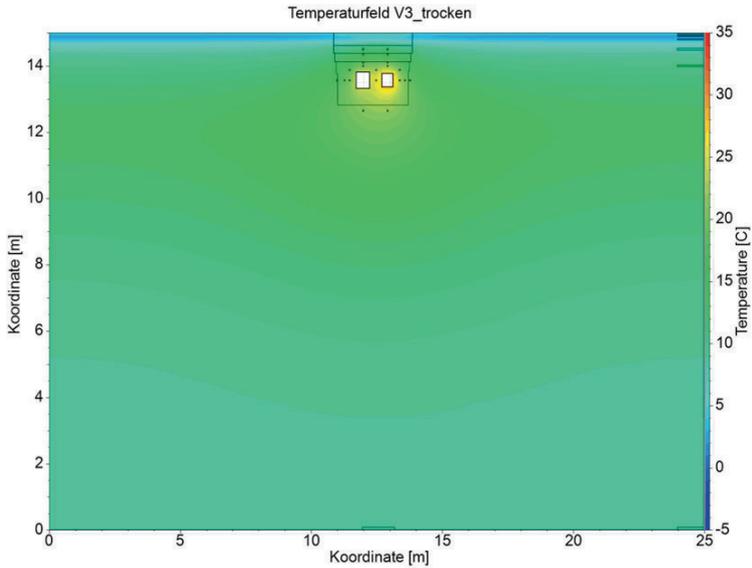


Abbildung 23: Variante 3 – Boden trocken, dargestellt das Temperaturfeld in [°C] am 04. Dezember 2019

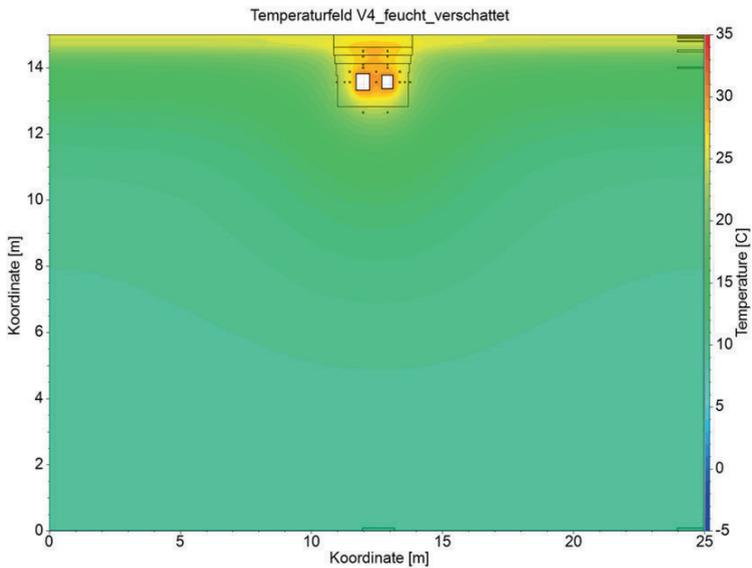


Abbildung 24: Variante 4 – Verschattet, dargestellt das Temperaturfeld in [°C] am 27. Juli 2019

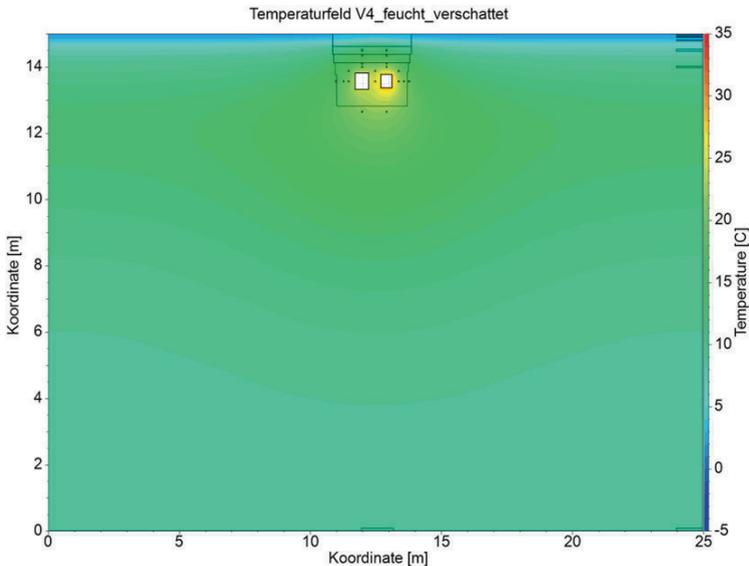


Abbildung 25: Variante 4 – Verschattet, dargestellt das Temperaturfeld in [°C] am 04. Dez 2019

Anhand der Temperaturfelder ist der Einfluss auf tieferliegende Schichte erkennbar. Für den Vergleich zwischen Messung und den 4 Simulationsvarianten wurde für mehrere Temperaturmessstellen ein zeitlich aufgelöstes Liniendiagramm gewählt.

3.2. Oberflächennahe Temperaturmessstellen T1 bis T2

Die Temperaturmessstellen T1 und T2 sind oberflächennah (siehe Abbildung 2). Der zeitliche Verlauf der lokalen Minima und Maxima der Temperaturen der Simulation und Messung stimmen gut überein. Dies ist auf die mittelbare Nähe der Messstelle zur DWD-Repräsentanzstation des Testreferenzjahres DE 12 zurückzuführen.

Die simulierten Temperaturwerte der Varianten 1 bis 3 liegen bei der Temperaturmessstellen T1 im Bereich von 0 bis 4 Kelvin über der gemessenen Kurve. Bei der Temperaturmessstelle T2 sind die Unterschiede geringer. Dies kann ggf. auf eine höhere Überdeckung infolge der Geländeneigung (vgl. Abbildung 2) zurückzuführen sein.

Der Einfluss der verschiedenen Bodenkennwerte (Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Rohdichte) ist bei der Simulation der unterirdischen Fernwärmeleitung gering. Den größten Einfluss in diesem Tiefenbereich hat die Berücksichtigung der vorhandenen Verschattung bei der Variante 4. In den Sommermonaten sind geringere Temperaturen gegenüber der Varianten 1 bis 3 vorhanden; sie liegen aber noch über den gemessenen Temperaturkurven.

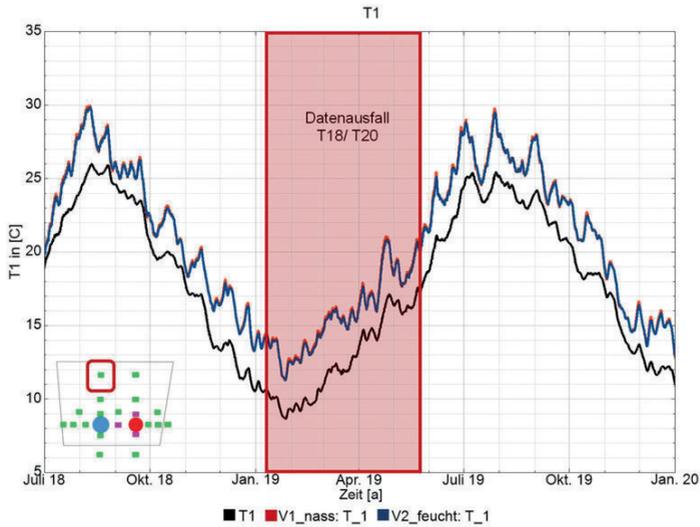


Abbildung 26: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur T_1 mit der simulierten Temperatur der Variante 1 (nass) und Variante 2 (feucht) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

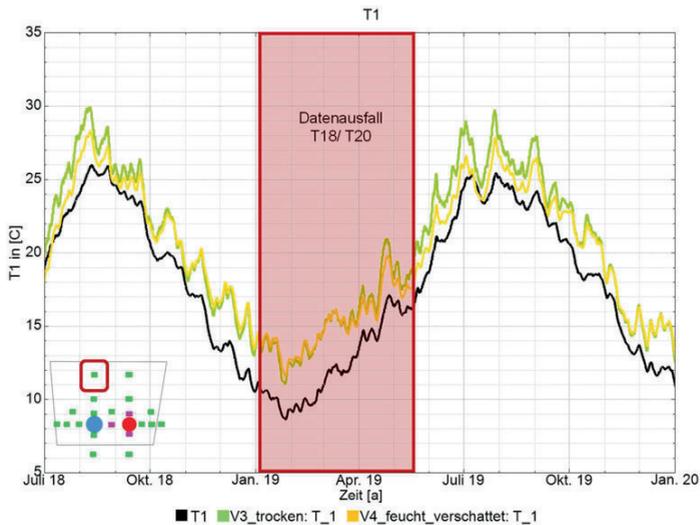


Abbildung 27: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur T_1 mit der simulierten Temperatur der Variante 3 (trocken) und Variante 4 (feucht, verschattet) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

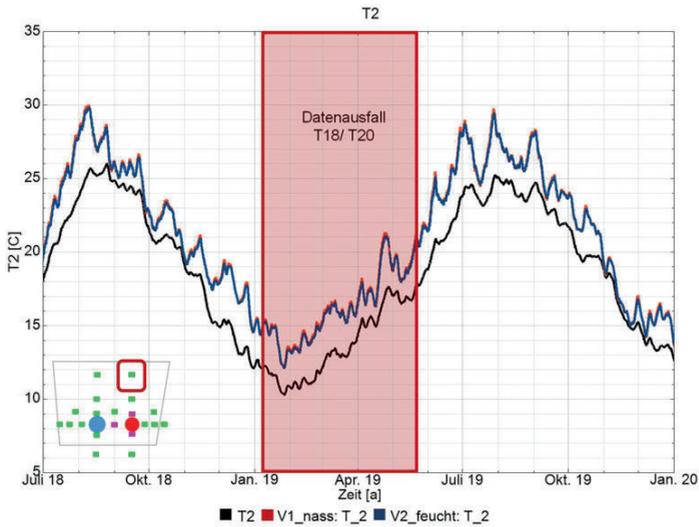


Abbildung 28: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur T_2 mit der simulierten Temperatur der Variante 1 (nass) und Variante 2 (feucht) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

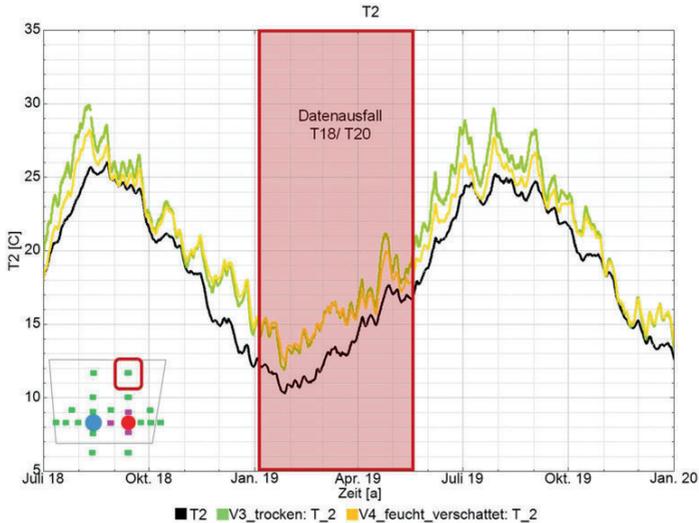


Abbildung 29: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur T_2 mit der simulierten Temperatur der Variante 3 (trocken) und Variante 4 (feucht, verschattet) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

3.3. Temperaturmessstellen T3, T5, T9, T11 und T12

Bei den tieferliegenden Temperaturmessstellen T3, T5, T9, T11 und T12 liegen die simulierten Werte ca. 2 Kelvin über den gemessenen Temperaturen. Der Einfluss der Reduzierung der Strahlung bei der Variante 4 nimmt mit zunehmender Tiefe ab.

Durch die Mittelung der Randbedingung der Oberflächenmanteltemperaturen wird eine höhere Temperatur an der Oberseite der Fernwärmeleitung angenommen (siehe Kapitel 2.5). Dies kann tendenziell zu höheren simulierten Temperaturen oberhalb der Leitungen führen.

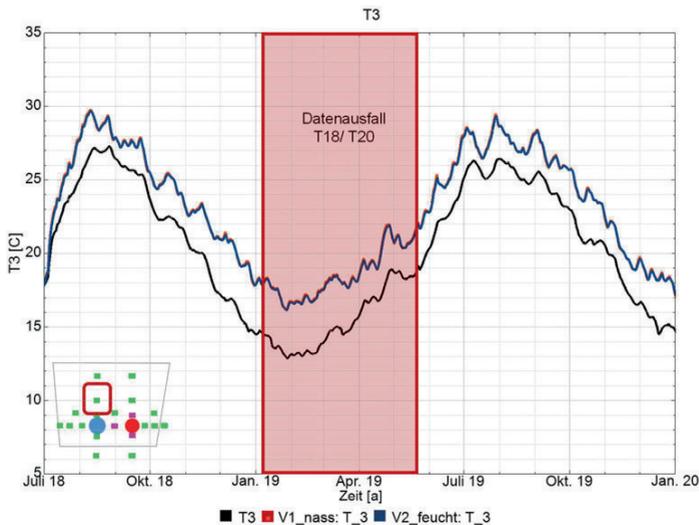


Abbildung 30: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur T_3 mit der simulierten Temperatur der Variante 1 (nass) und Variante 2 (feucht) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

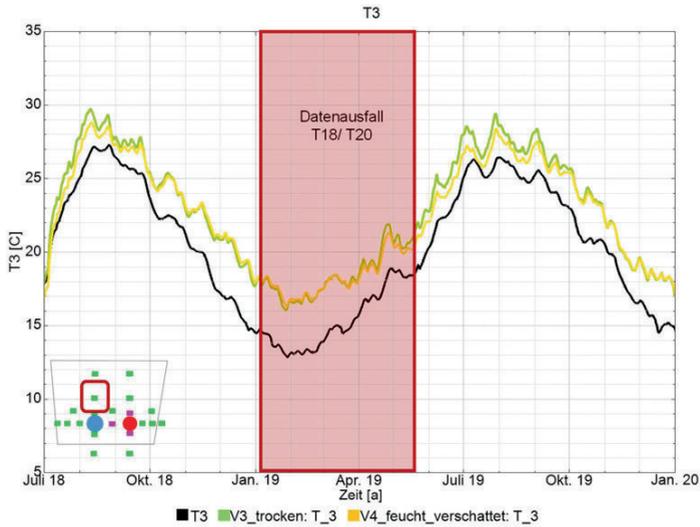


Abbildung 31: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur **T 3** mit der simulierten Temperatur der Variante 3 (trocken) und Variante 4 (feucht, verschattet) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

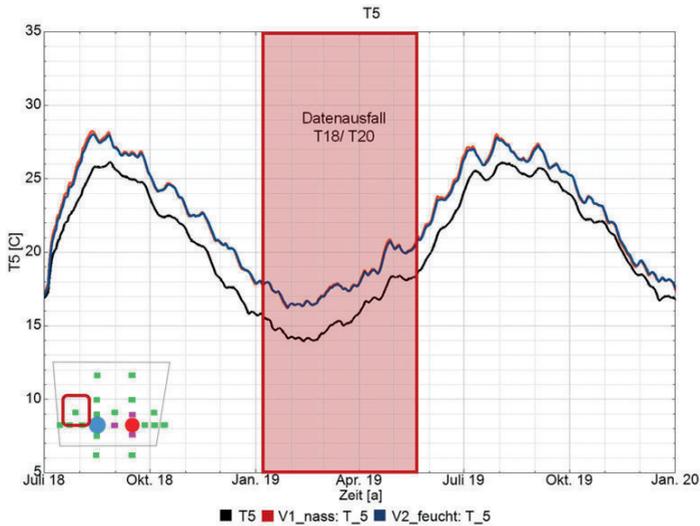


Abbildung 32: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur **T 5** mit der simulierten Temperatur der Variante 1 (nass) und Variante 2 (feucht) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

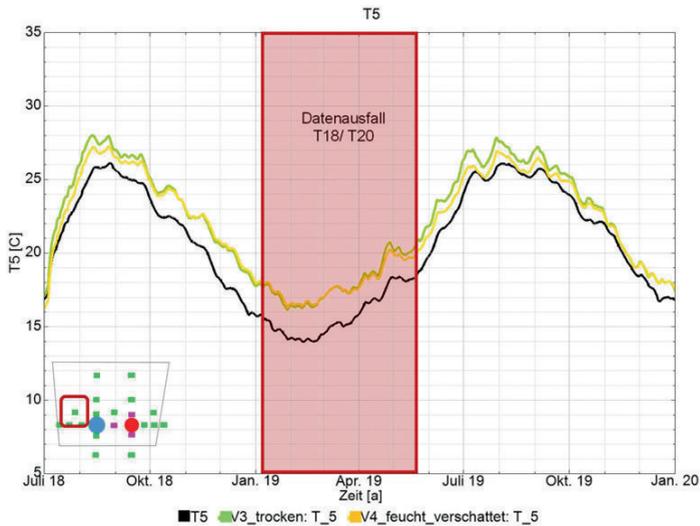


Abbildung 33: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur **T 5** mit der simulierten Temperatur der Variante 3 (trocken) und Variante 4 (feucht, verschattet) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

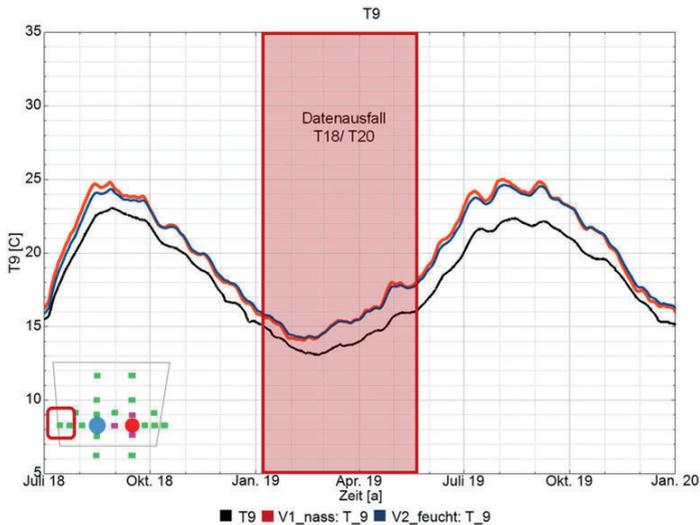


Abbildung 34: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur **T 9** mit der simulierten Temperatur der Variante 1 (nass) und Variante 2 (feucht) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

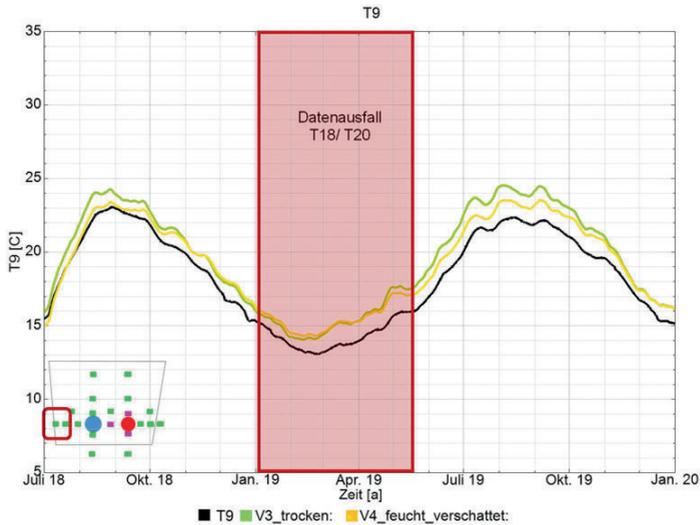


Abbildung 35: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur **T 9** mit der simulierten Temperatur der Variante 3 (trocken) und Variante 4 (feucht, verschattet) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

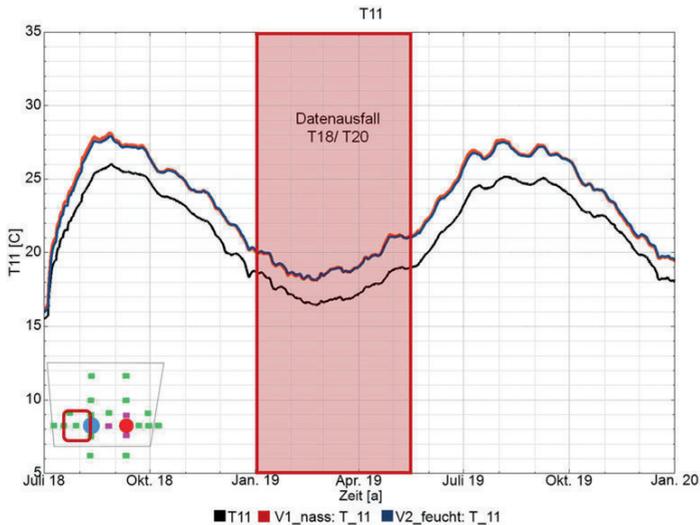


Abbildung 36: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur **T 11** mit der simulierten Temperatur der Variante 1 (nass) und Variante 2 (feucht) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

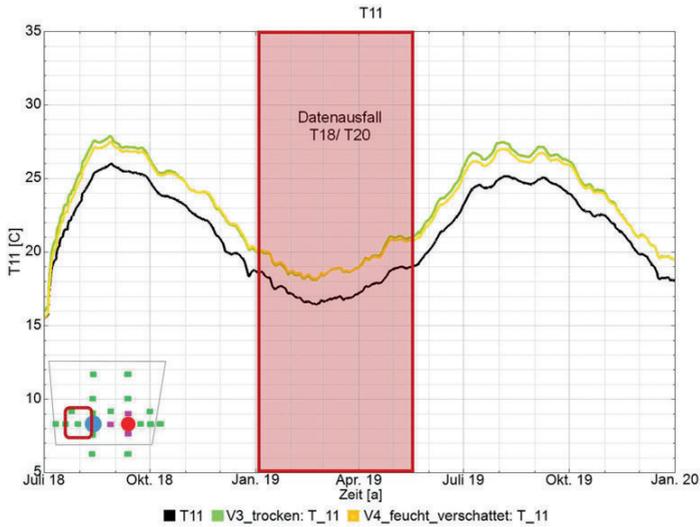


Abbildung 37: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur T_{11} mit der simulierten Temperatur der Variante 3 (trocken) und Variante 4 (feucht, verschattet) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

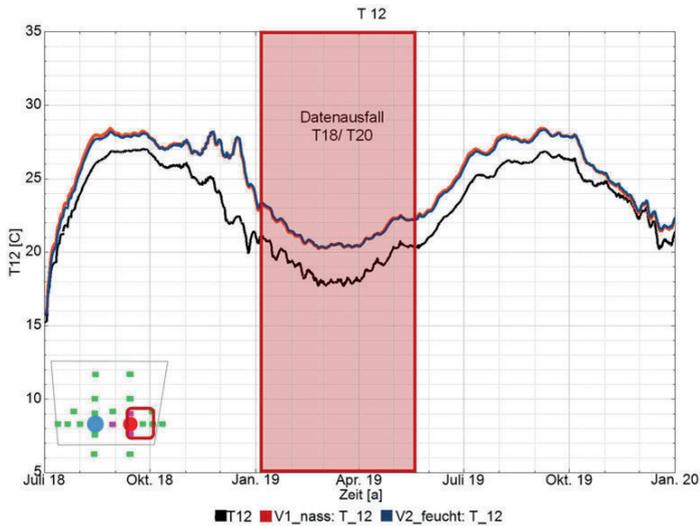


Abbildung 38: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur T_{12} mit der simulierten Temperatur der Variante 1 (nass) und Variante 2 (feucht) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

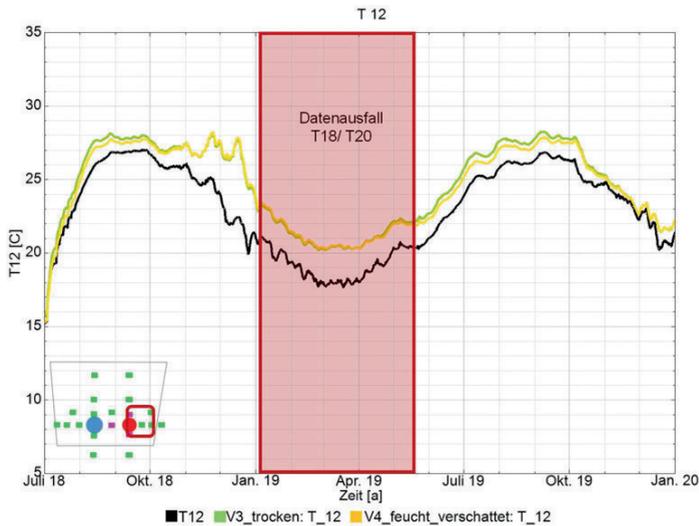


Abbildung 39: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur T_{12} mit der simulierten Temperatur der Variante 3 (trocken) und Variante 4 (feucht, verschattet) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

3.4. Temperaturmessstellen T7 und T19 zwischen den Fernwärmeleitungen

In unmittelbarer Nähe zu den Vor- und Rücklaufrohren (Temperaturmessstelle T7 und T19) sind aufgrund der unmittelbar als Randbedingung gemessenen Oberflächentemperatur der Röhre sehr geringe Unterschiede zwischen Messung und Simulation vorhanden.

Im Gegensatz zu den über und neben der Fernwärme liegenden Temperaturmessstellen sind tendenziell die gemessenen Temperaturen bei den Messstellen zwischen Vor- und Rücklauf höher als die simulierten Temperaturen.

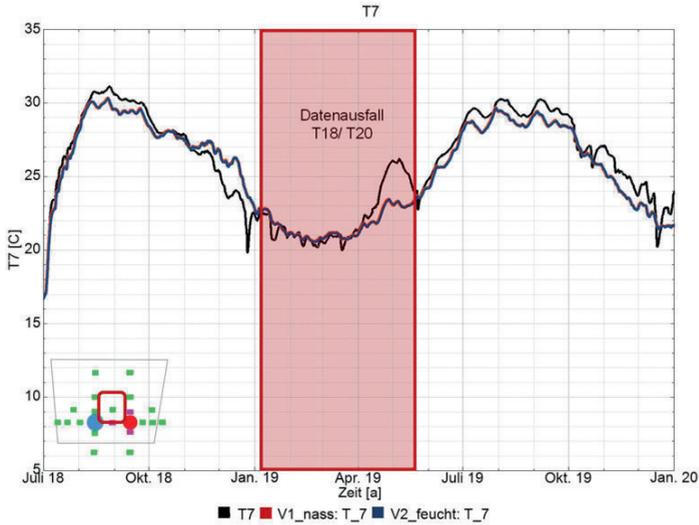


Abbildung 40: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur T_7 mit der simulierten Temperatur der Variante 1 (nass) und Variante 2 (feucht) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

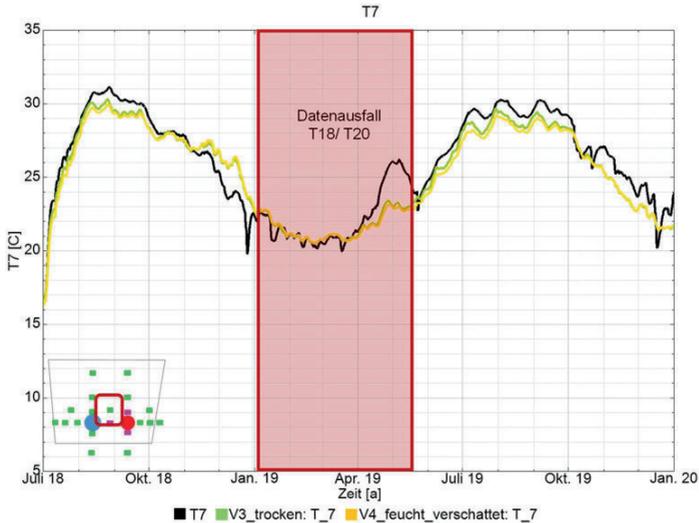


Abbildung 41: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur T_7 mit der simulierten Temperatur der Variante 3 (trocken) und Variante 4 (feucht, verschattet) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

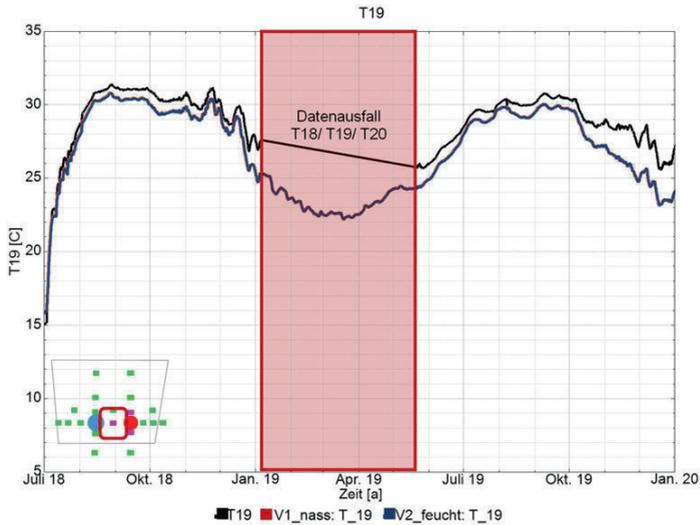


Abbildung 42: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur T_{19} mit der simulierten Temperatur der Variante 1 (nass) und Variante 2 (feucht) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

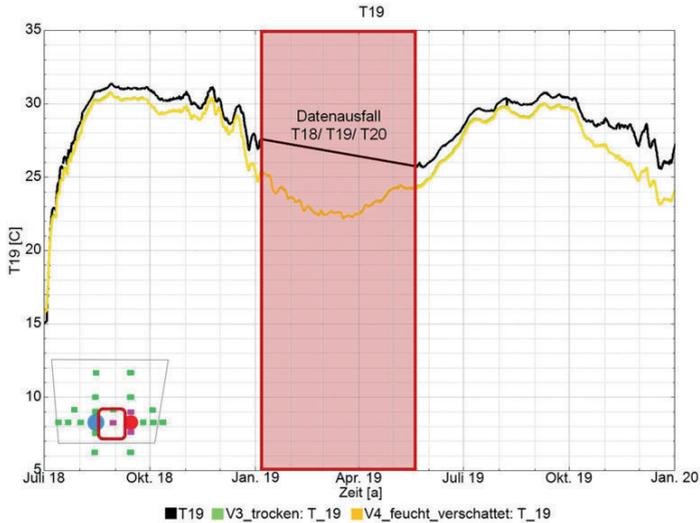


Abbildung 43: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur T_{19} mit der simulierten Temperatur der Variante 3 (trocken) und Variante 4 (feucht, verschattet) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

3.1. Temperaturmessstelle T17 unter dem Vorlauf der Fernwärmeleitung

Die simulierten Temperaturen an der Messstelle T17 unter dem Vorlauf der Fernwärmeleitung sind von Oktober 2018 bis Oktober 2019 höher als die gemessenen Temperaturen. Von Juni 2018 bis Januar 2018 und ab Oktober 2019 ist der maximale Temperaturunterschied zwischen Simulation und Messung kleiner als 1,0 Kelvin.

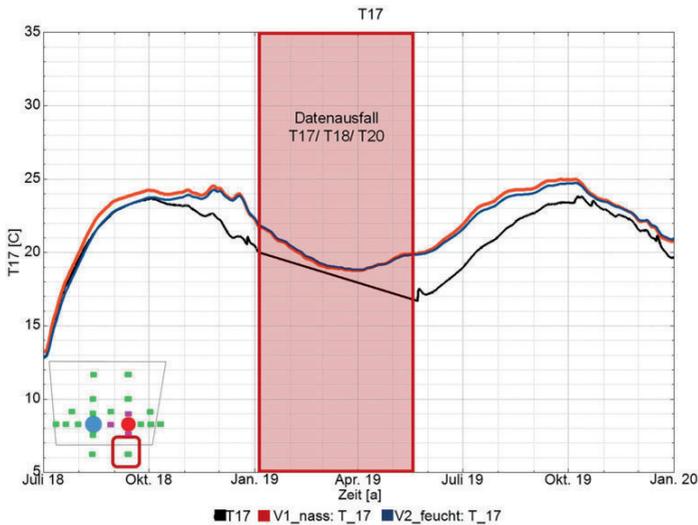


Abbildung 44: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur **T 17** mit der simulierten Temperatur der Variante 1 (nass) und Variante 2 (feucht) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

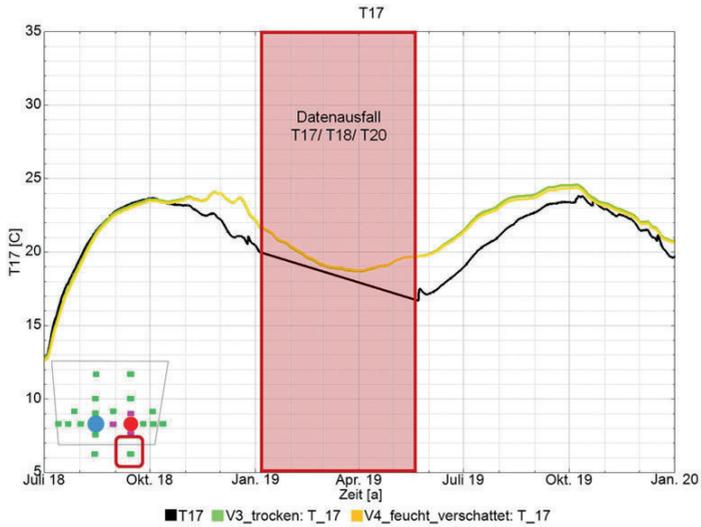


Abbildung 45: Vergleich des Verlaufes der gemessenen Temperatur T 17 mit der simulierten Temperatur der Variante 3 (trocken) und Variante 4 (feucht, verschattet) für den Zeitraum vom 01. Jul 2018 bis 31. Dez 2019

4. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Berücksichtigung des Einflusses unterirdisch verlegter Fernwärmeleitungen auf den zeitlichen Verlauf der Temperaturen im Erdreich wurden numerische Simulationen mit dem Programm DELHIN ausgeführt. Trotz Unsicherheiten in den Parametern (Bodeneigenschaften, Klimadaten, Grundwassereinfluss usw.) konnten die gemessenen Temperaturverläufe sinnvoll nachvollzogen werden.

Eine Voraussetzung dafür war die Verwendung von stündlichen Außenklimadaten als Randbedingung. Im Messezeitraum 2018 und 2019 lagen eine höhere mittlere Jahrestemperatur und eine höhere direkte Strahlung im Vergleich zum Referenzzeitraum des verwendeten Testreferenzjahres TRY 12 [4, 5] vor, was auf einen Einfluss des Klimawandels hindeuten könnte. Dabei ist für Vergleiche zwischen Messung und Simulation die Verwendung von direkt im Messezeitraum gemessenen Klimadaten vorteilhaft gegenüber der Anwendung von Testreferenzjahren. Für Prognosen sollte Zukunftsklima verwendet werden, welches den Klimawandel mit berücksichtigt.

Die im Vergleich zur Messung tendenziell höheren simulierten Temperaturverläufe können auf einen noch nicht berücksichtigten Wärmeentzug durch Grundwasser zurückzuführen sein. Die unmittelbare Lage zum Fluss mit dessen Wassertemperatur sowie der Einfluss des Grundwassers können als Temperaturrandbedingung im Programm DEPHIN berücksichtigt werden. Es ist anzunehmen, dass dadurch ein noch realitätsnäheres Bild zur Ausbreitung der Temperaturen im Erdreich erzielt werden kann. Der ungewöhnlich große Unterschied zwischen der an der Ober- und Unterseite gemessenen Oberflächentemperaturen des Vor- und Rücklaufrohres könnte ein Hinweis auf die Wirkung des Grundwassers sein und sollte weiter untersucht werden.

Die in der Simulation ermittelten Wärmeströme an der Außenoberfläche der Fernwärmerohre lassen Rückschlüsse hinsichtlich der Vor- und Rücklauftemperaturen in den Rohren zu. Unter Einbeziehung der Materialeigenschaften der Wärmedämmschicht können Zeitreihen für die Vor- und Rücklauftemperaturen erstellt werden, die wiederum als Randbedingungen an der Innenoberfläche der Rohre angesetzt werden können.

Durch die Berücksichtigung von Feuchtequellen, Niederschlagsdaten usw. kann eine Bewertung der durch die Fernwärmeleitung eingebrachten thermischen Quellen auf den Feuchtehaushalt des Bodens vorgenommen werden.

5. Verwendete Literatur, Normen und Planungsunterlagen

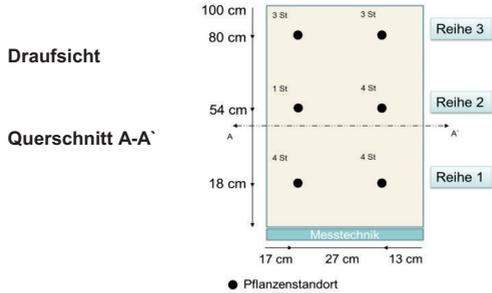
- [1] www.bauklimatik-dresden.de
- [2] <https://www.openstreetmap.org>
- [3] Onset Computer Corporation: 12-Bit Temperatur-Smart-Sensor (S-TMB-M0xx) Handbuch, 2017
- [4] Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, Projektbericht, Deutscher Wetterdienst (DWD), auf https://www.bbsr-energieeinsparung.de/EnEVPortal/DE/Regelungen/Testreferenzjahre/Testreferenzjahre/03_ergebnisse.html am 22.2.2019, 2011
- [5] DWD-Klimadaten Station ftp://ftp-cdc.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/
- [6] AGFW Projekt GmbH: (Bautechnische) Einflüsse auf Wärmeverluste erdverlegter Fernwärmeleitungen „FW-Vegetation“ DBU-Aktenzeichen 33759/01, 2020

Anlage 4

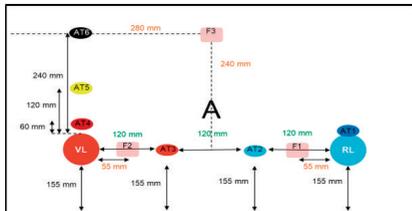
Auswertung der Wärmeversuche zum Wurzelwachstumsverhalten

Auswertung Wärmeversuche

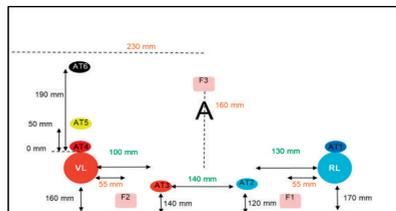
Versuchskiste: A
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Anmerkungen: Beidseitige, vertikale Durchwurzelung des Versuchskörpers bis zur Kistensohle
 In Reihe 3 Tendenz zur kalten Seite
Pflanze: Weide
Vegetation:



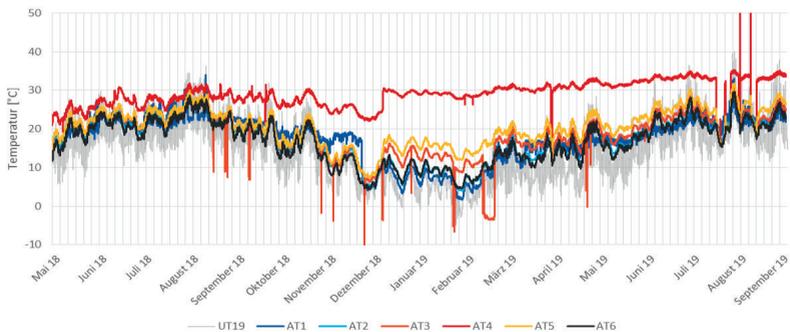
Querschnitt A-A'
Sensorenposition (Versuchsbeginn)



Querschnitt A-A'
Sensorenposition (Versuchsende)



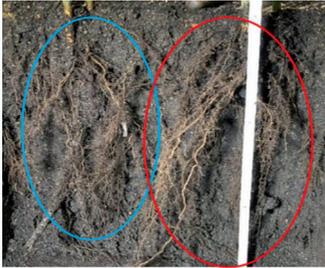
Kiste A Temperatursensoren (27.04.2018-02.09.2019)



Auswertung Wärmeversuche

Reihe 1:

- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
- Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



Reihe 2:

- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
- Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



Reihe 3:

- Vermehrtes Wurzelwachstum auf der warmen Seite
- Dazu Erschließung der kalten Seite



Kiste A

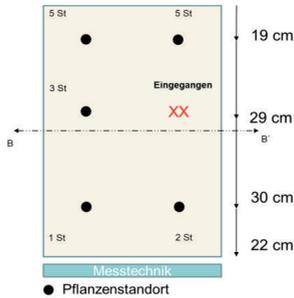
Seite 2

Auswertung Wärmeversuche

Versuchskiste: B
Versuchszeitraum: 04.2018 – 09.2019
Anmerkungen: Beidseitige, vertikale Durchwurzelung des Versuchskörpers bis zur Kistensohle
Pflanze: Weide
Vegetation:

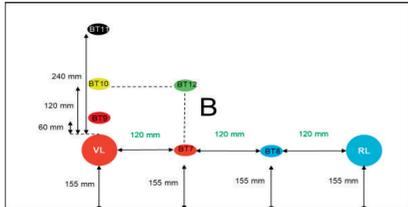
Draufsicht

Querschnitt B-B'



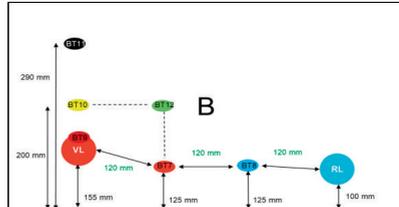
Querschnitt B-B'

Sensorenposition (Versuchsbeginn)

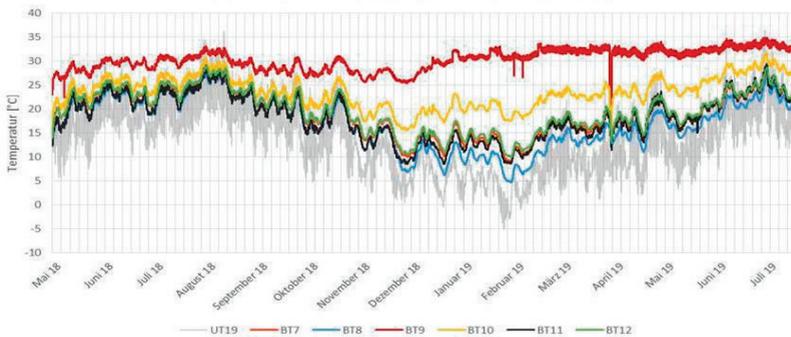


Querschnitt B-B'

Sensorenposition (Versuchsende)

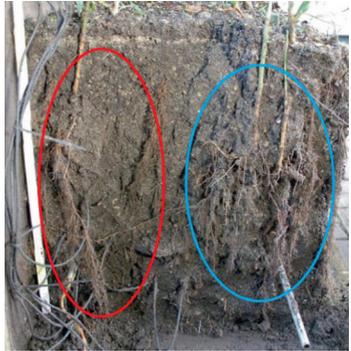


Kiste B Temperatursensoren (27.04.2018-13.07.2019)

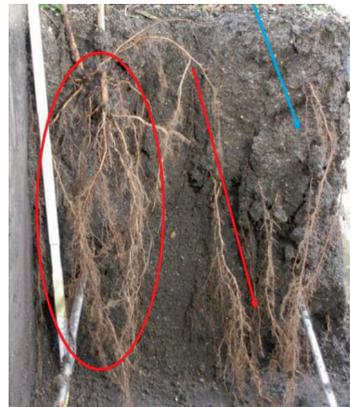


Auswertung Wärmeversuche

- Reihe 1:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



- Reihe 2:**
- Deutlich ausgeprägtes Wurzelwachstum auf der warmen Seite in der Leitungszone
 - Auf der kalten Seite nutzt die Weide der Reihe 3 den Wurzelraum von Reihe 2
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



- Reihe 3:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



Kiste B

Seite 2

Auswertung Wärmeversuche

Versuchskiste: C

Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019

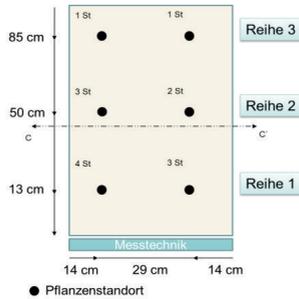
Anmerkungen: Beidseitige, vertikale Durchwurzelung des Versuchskörpers bis zur Kistensohle, Probeöffnung 11.2018: Untersuchung Reihe 1

Pflanze: Weide

Vegetation:

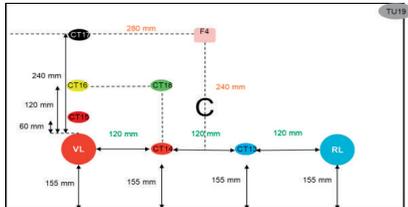
Draufsicht

Querschnitt C-C'



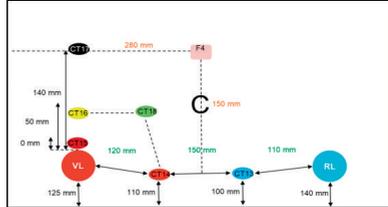
Querschnitt C-C'

Sensorenposition (Versuchsbeginn)

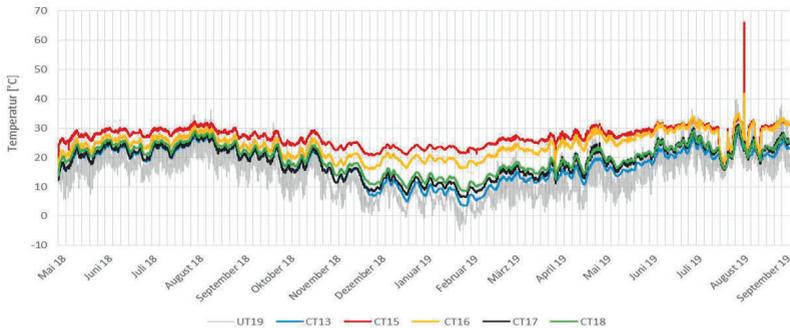


Querschnitt C-C'

Sensorenposition (Versuchsende)



Kiste C Temperatursensoren (27.04.2018-02.09.2019) ~~ohne CT14~~

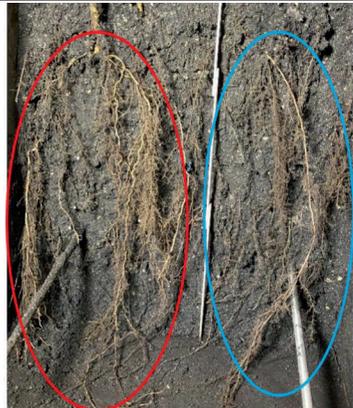


Auswertung Wärmeversuche

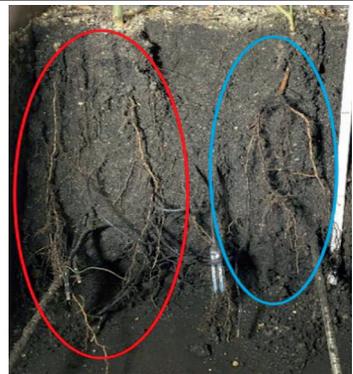
- Reihe 1:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen
 - Horizontales Wurzelwachstum sowohl von warmer zur kalten Seite als auch von kalter zur warmen Seite



- Reihe 2:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen, wobei das Wurzelbild auf der Vorlaufseite ausgeprägter ist
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



- Reihe 3:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Deutlich schwächeres Wurzelbild als in Reihe 1 und 2
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



Kiste C

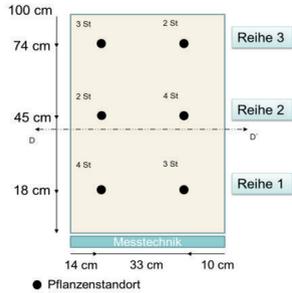
Seite 2

Auswertung Wärmeversuche

Versuchskiste: D
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Anmerkungen: Beidseitige, vertikale Durchwurzelung des Versuchskörpers bis zur Kistensohle, Heizpatrone 03.2019 defekt -> unmittelbare Reparatur
Pflanze: Weide
Vegetation:

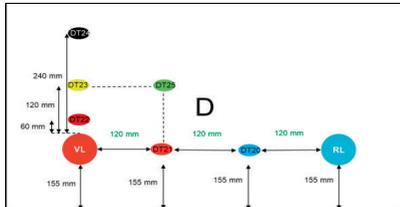
Draufsicht

Querschnitt D-D'



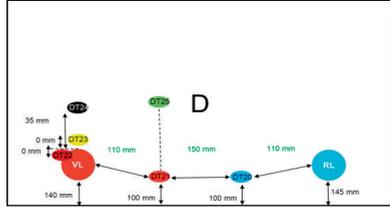
Querschnitt D-D'

Sensorenposition (Versuchsbeginn)

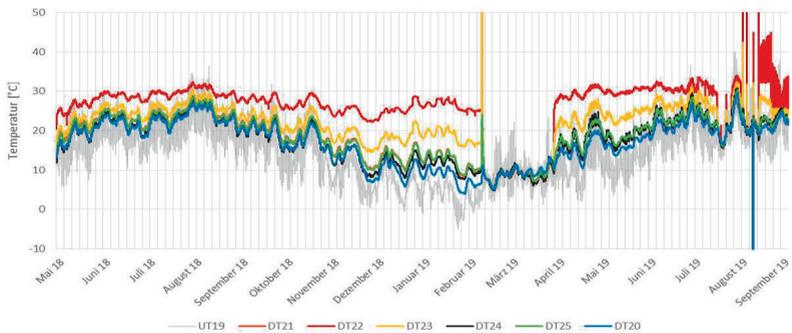


Querschnitt D-D'

Sensorenposition (Versuchsende)



Kiste D Temperatursensoren (27.04.2018-02.09.2019)



Kiste D

Seite 1

Auswertung Wärmeversuche

- Reihe 1:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen
 - Wurzelwachstum auf der kalten Seite entlang der Wand vertikal nach unten



- Reihe 2:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen
 - Horizontales Wurzelwachstum von warmer zur kalten Seite
 - Wurzelwachstum der warmen Seite deutlich ausgeprägter



- Reihe 3:**
- Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen
 - Horizontales Wurzelwachstum von kalten zur warmen Seite
 - Wurzelwachstum der kalten Seite deutlich ausgeprägter
 - Wurzelwachstum auf der warmen Seite entlang der Wand vertikal nach unten



Kiste D

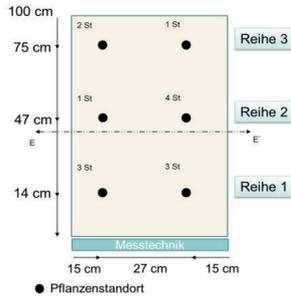
Seite 2

Auswertung Wärmeversuche

Versuchskiste: E
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Anmerkungen: Beidseitige, vertikale Durchwurzelung des Versuchskörpers bis zur Kistensohle
Pflanze: Weide
Vegetation:

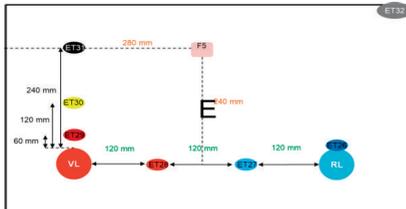
Draufsicht

Querschnitt E-E'



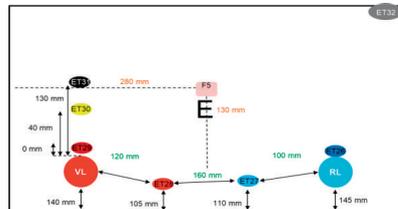
Querschnitt E-E'

Sensorenposition (Versuchsbeginn)

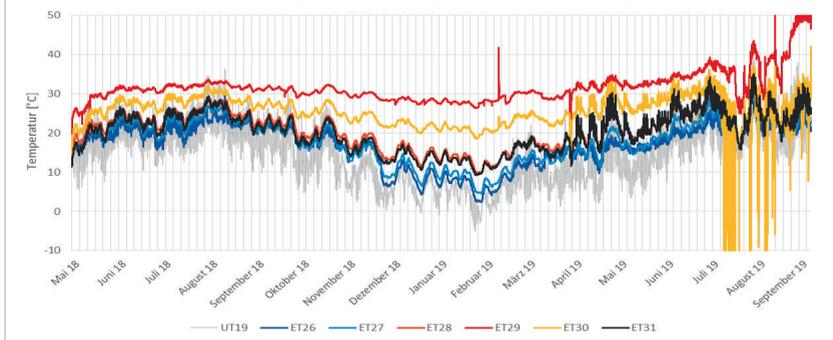


Querschnitt E-E'

Sensorenposition (Versuchsende)



Kiste E Temperatursensoren (27.04.2018-02.09.2019)



Auswertung Wärmeversuche

- Reihe 1:**
- Wachstumstendenz zur kalten Seite
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen
 - Wurzelwachstum auf der kalten Seite oberflächennah entlang der Wand, horizontal von Reihe 1 bis Reihe 3



- Reihe 2:**
- Wachstumstendenz zur kalten Seite
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen



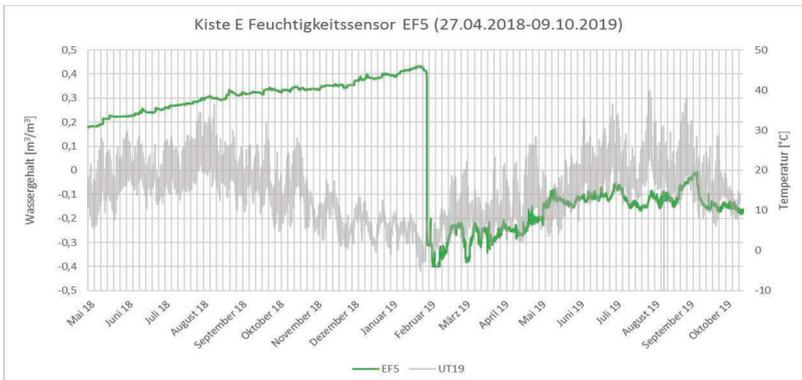
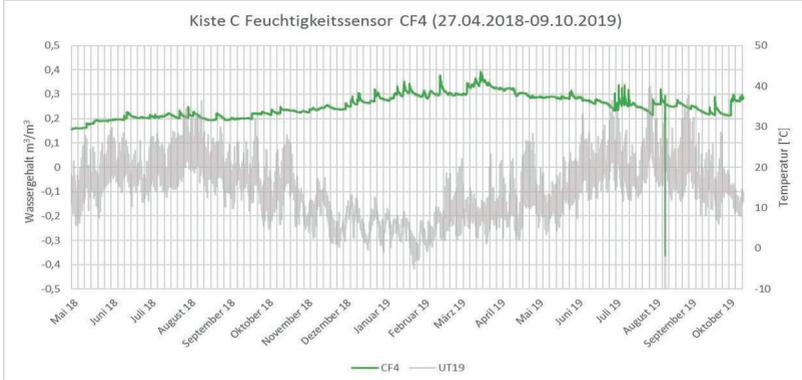
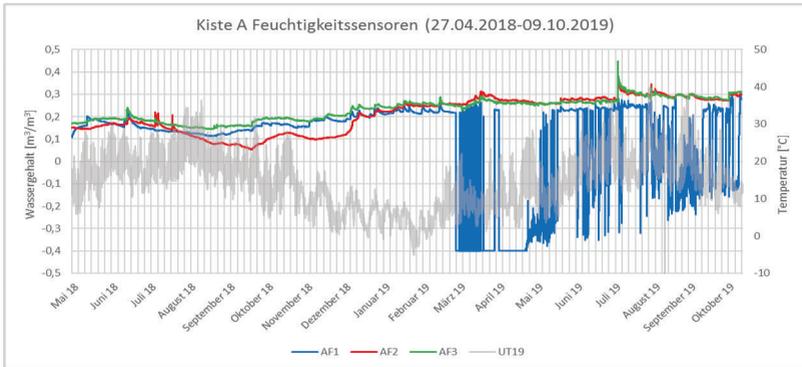
- Reihe 3:**
- Keine Wachstumstendenz zur warmen oder kalten Seite zu erkennen
 - Wurzeln wachsen in beide Leitungszonen

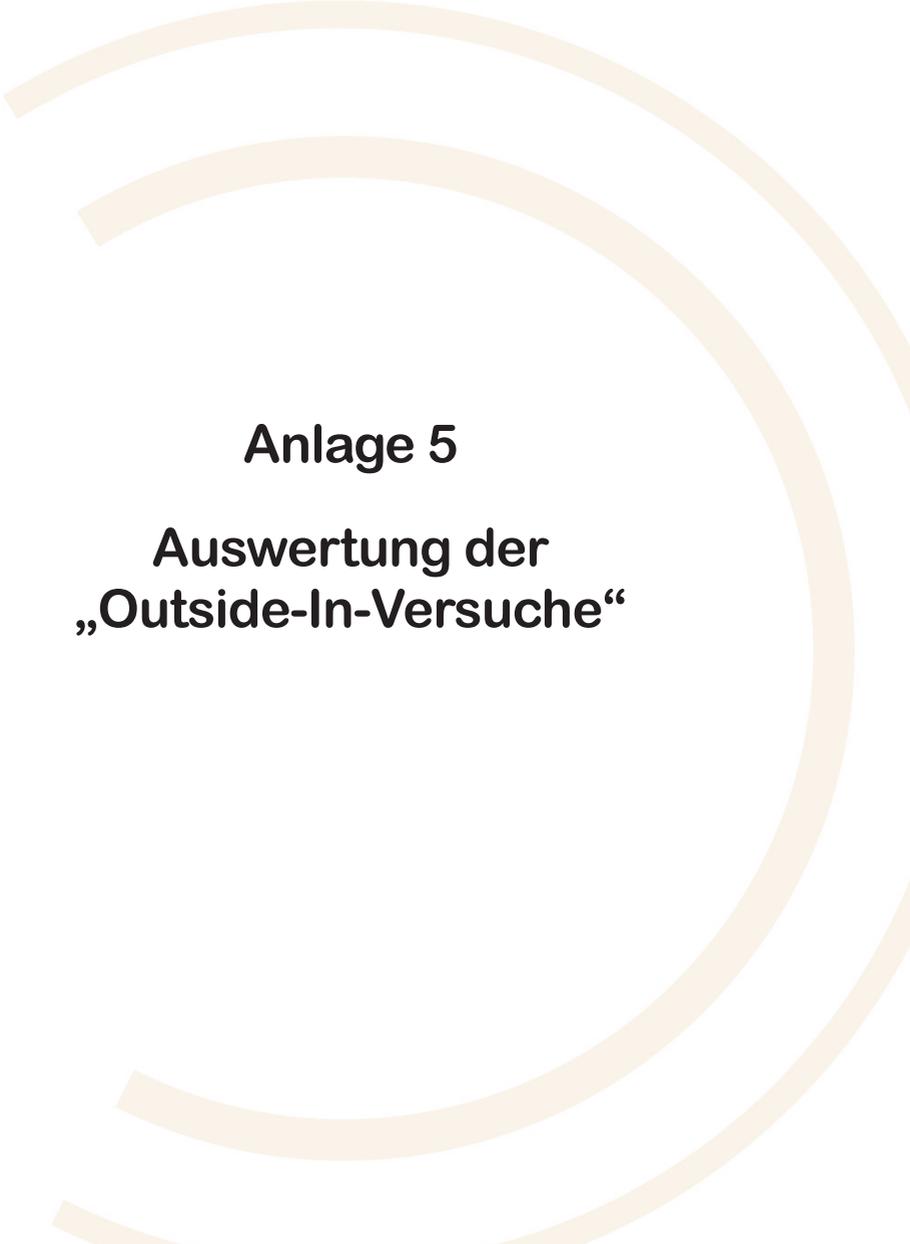


Kiste E

Seite 2

Auswertung Wärmeversuche Feuchtigkeitsmessung





Anlage 5

**Auswertung der
„Outside-In-Versuche“**

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: I a
Versuchszeitraum: 04.2018 – 04.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 04.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Fehlerfrei appliziert

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Nein

Wurzeleinwuchs: Nein



Probe I a

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: I b
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Kein Dichtband

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Nein

Wurzeleinwuchs: Nein



Probe I b

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: II a
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: unvernetzte Muffe
Muffenfehler: Schrumpfmanschette nicht ausreichend erwärmt

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja *
Wurzeleinwuchs: Nein

(* Wurzelanwuchs an Montagehilfe und nicht im Übergangsbereich der Muffe)



Probe II a

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: II b
Versuchszeitraum: 04.2018 – 04.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 04.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: unvernetzte Muffe
Muffenfehler: Schrumpfmanschette nicht ausreichend erwärmt

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja *
Wurzeleinwuchs: Nein

(* Wurzelanwuchs an Montagehilfe und nicht im Übergangsbereich der Muffe)



Probe II b

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: III a
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Unsauber verarbeitet, Fremdkörper eingebracht

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja
Wurzeleinwuchs: Ja



Probe III a

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: III b
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Unsauber verarbeitet, Fremdkörper eingebracht

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja (Wurzeln haftend an Dichtmaterial)
Wurzeleinwuchs: Nein



Probe III b

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: IV a
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Schutzfolie am Dichtband nicht entfernt

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja

Wurzeleinwuchs: Nein



Probe IV a

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: IV b
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Fehlerfrei appliziert

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja
Wurzeleinwuchs: Nein



Probe IV b

Auswertung Outside-In-Versuche

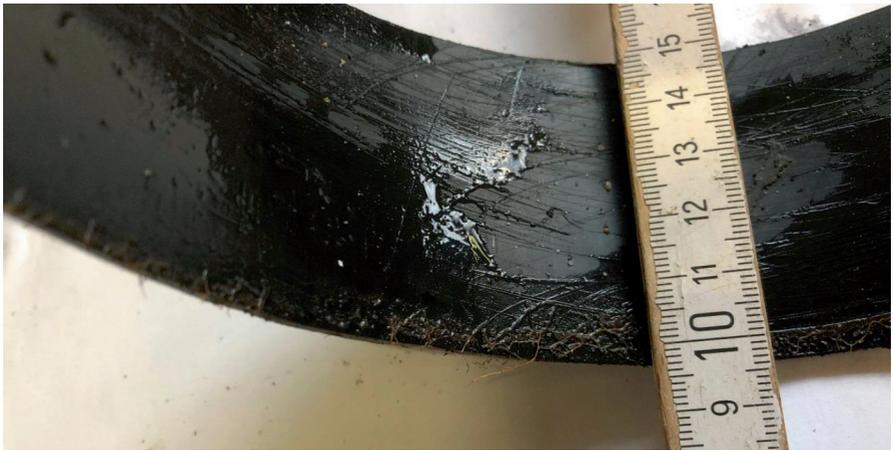
Probekörper: VI a
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Oberfläche der Ummantelung nicht aufgeraut,
kein Dichtband vorhanden

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja
Wurzeleinwuchs: Nein



Probe VI a

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: VI b
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: vernetzte Muffe
Muffenfehler: Kein Dichtband, Fremdstoffe eingebracht

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Ja
Wurzeleinwuchs: Ja



Probe VI b

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: VII a
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2018
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2018
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: unvernetzte Muffe
Muffenfehler: Fehlerfrei appliziert

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

Wurzelanwuchs: Nein

Wurzeleinwuchs: Nein



Probe VII a

Auswertung Outside-In-Versuche

Probekörper: VII b
Versuchszeitraum: 04.2018 – 11.2019
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 11.2019
Ausgeprägtes Wurzelwachstum

Muffenverbindung: unvernetzte Muffe
Muffenfehler: Fehlerfrei appliziert

Rohrtyp: Kunststoffmantelrohr

Pflanze: Weide

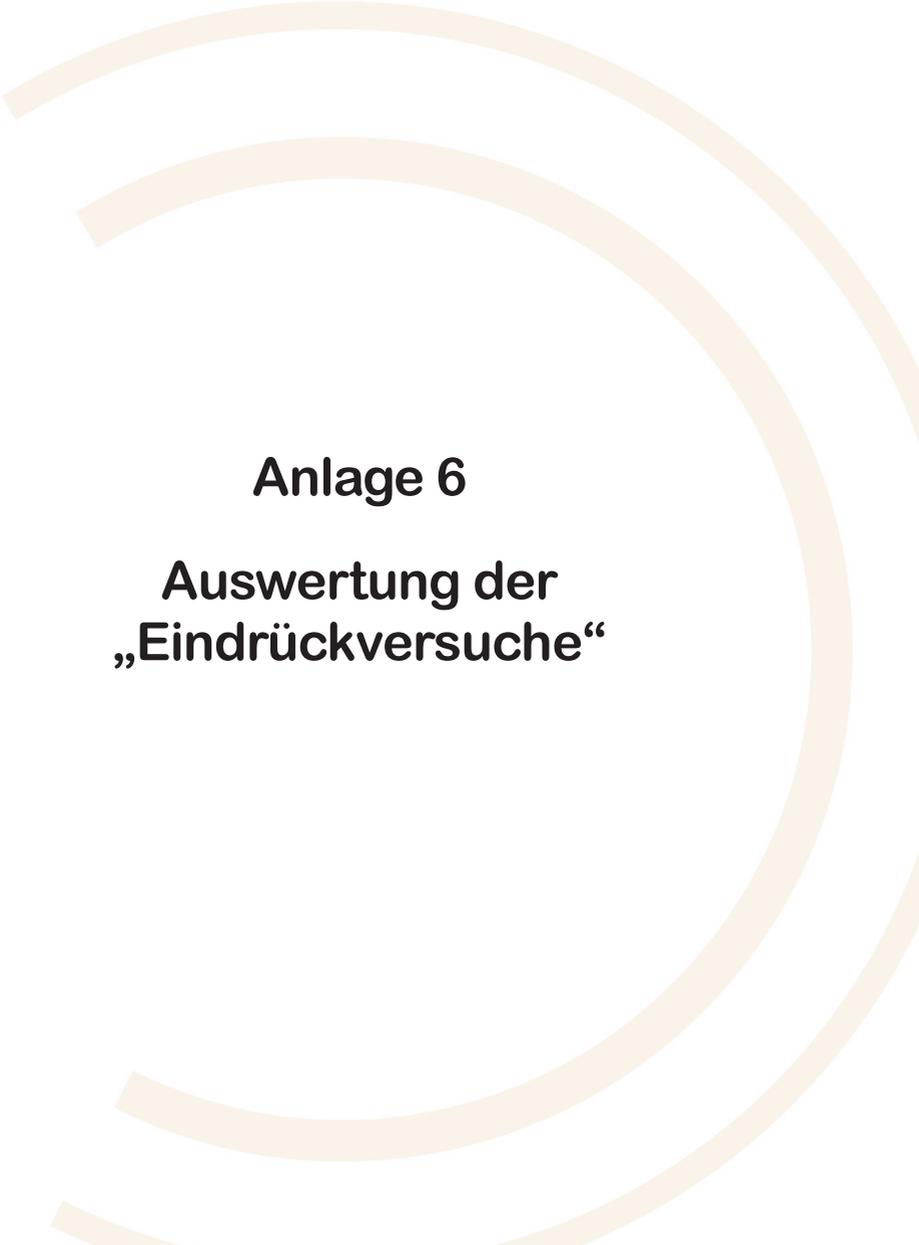
Wurzelanwuchs: Ja *

Wurzeleinwuchs: Nein

(* Wurzelanwuchs an Montagehilfe und nicht im Übergangsbereich der Muffe)



Probe VII b



Anlage 6
Auswertung der
„Eindruckversuche“

Auswertung Eindrückversuche

Versuchskiste: A

Versuchszeitraum: 04.2019 – offen

Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 05.2020

Steckling 1 wurde geöffnet, danach wurde die Kiste wieder verschlossen

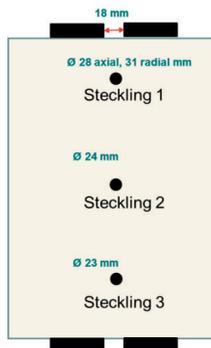
Prüfgegenstand: PE-Außenmantel

Pflanze: Weide

Pflanzenhöhe: ca. 200 cm

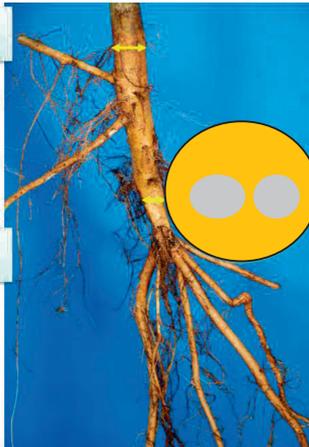
Auffälligkeiten: Keine Schäden an der Rohroberfläche feststellbar

Draufsicht



Steckling 1

Über Rohren:
Radial 28 mm



Zw. Rohren:
Radial 18 mm

Über Rohren:
Axial 31 mm



Zw. Rohren:
Axial 45 mm

Kiste A

Steckling 1

Auswertung Eindrückversuche

Versuchskiste: B
Versuchszeitraum: 04.2019 – offen
Versuchsverlauf: Versuchskiste wurde nicht geöffnet

Prüfgegenstand: PE-Außenmantel
Pflanze: Weide
Pflanzenhöhe: ca. 200 cm

Auffälligkeiten: Die Versuchskiste wurde nicht geöffnet

Draufsicht



Kiste B

Auswertung Eindrückversuche

Versuchskiste: C - Steckling 2
Versuchszeitraum: 04.2019 – 05.2020
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 05.2020
Versuchskiste wurde vollständig geöffnet

Prüfgegenstand: PE-Außenmantel
Pflanze: Weide
Pflanzenhöhe: ca. 200 cm

Auffälligkeiten: Keine Schäden an der Rohroberfläche feststellbar

Draufsicht



Steckling 2

Über Rohren:
Radial 41 mm



Über Rohren:
Axial 28 mm



Zw. Rohren:
Radial 18,5 mm

Zw. Rohren:
Axial 64 mm

Kiste C

Steckling 2

Auswertung Eindrückversuche

Versuchskiste: C - Steckling 3
Versuchszeitraum: 04.2019 – 05.2020
Versuchsverlauf: Öffnung der Probe 05.2020
Versuchskiste wurde vollständig geöffnet

Prüfgegenstand: PE-Außenmantel
Pflanze: Weide
Pflanzenhöhe: ca. 200 cm

Auffälligkeiten: Keine Schäden an der Rohroberfläche feststellbar

Draufsicht



Steckling 3

Über Rohren:
Radial 25 mm



Zw. Rohren:
Radial 15,5 mm

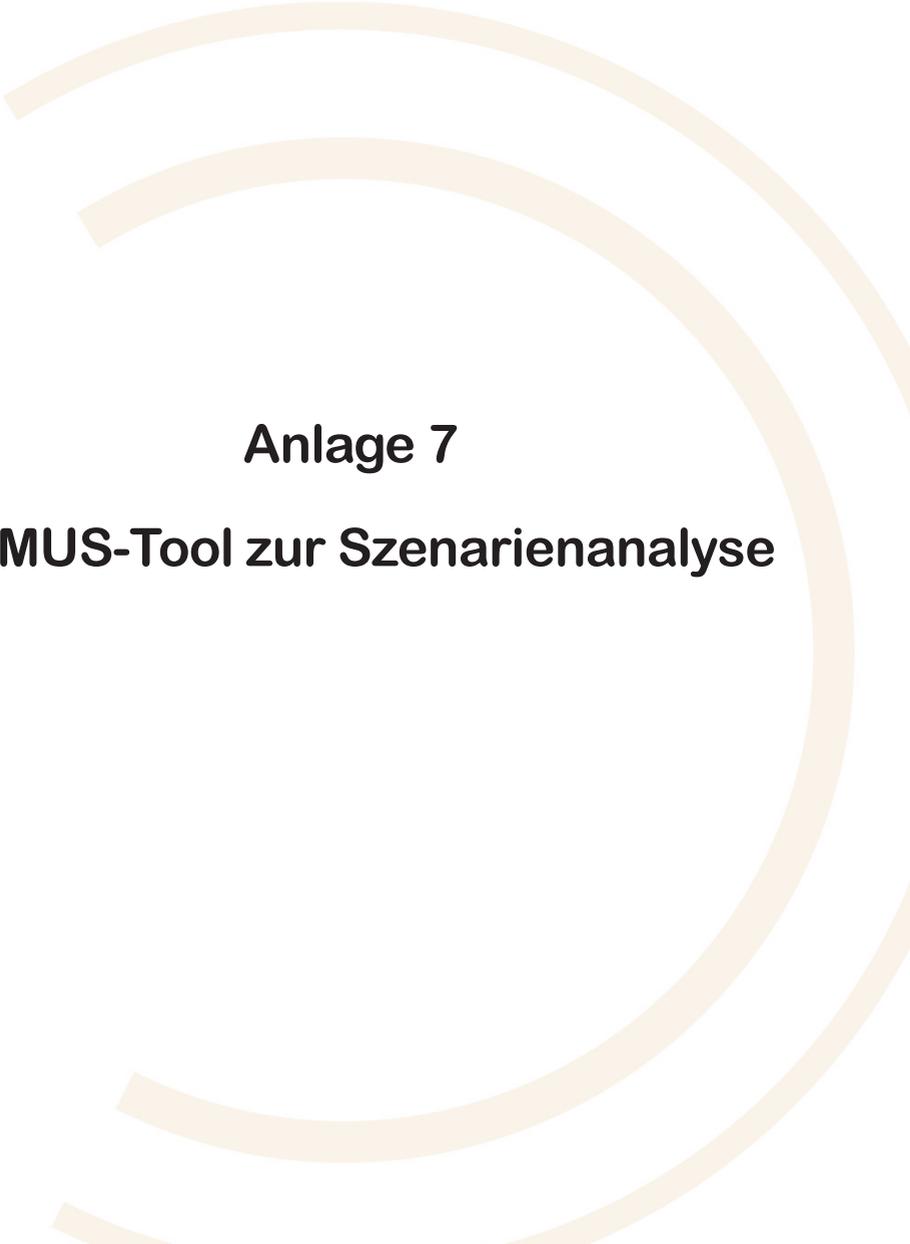
Über Rohren:
Axial 24 mm



Zw. Rohren:
Axial 21 mm

Kiste C

Steckling 3



Anlage 7
DEMUS-Tool zur Szenarienanalyse

Anlage 7 DEMUS-Tool zur Szenarienanalyse

Unter <https://www.agfw.de/fw-vegetation/> steht Ihnen das DEMUS-Tools zur Szenarienanalyse, zum kostenlosen Download zur Verfügung.



Abbildung 1: QR Code zur Projektseite <https://www.agfw.de/fw-vegetation/>

Um das DEMUS Tool nutzen zu können, sollten die Dateien zum Öffnen des Tools (DEMUS2-Classic.jar) und die zweite Datei (Projekt.demus) im gleichen Ordner abgespeichert werden.

Für Rückfragen und Schulungen rund um das Tool und die Szenarienanalyse wenden Sie sich gerne direkt an das IKT.

Institut für unterirdische Infrastruktur in Gelsenkirchen (IKT)

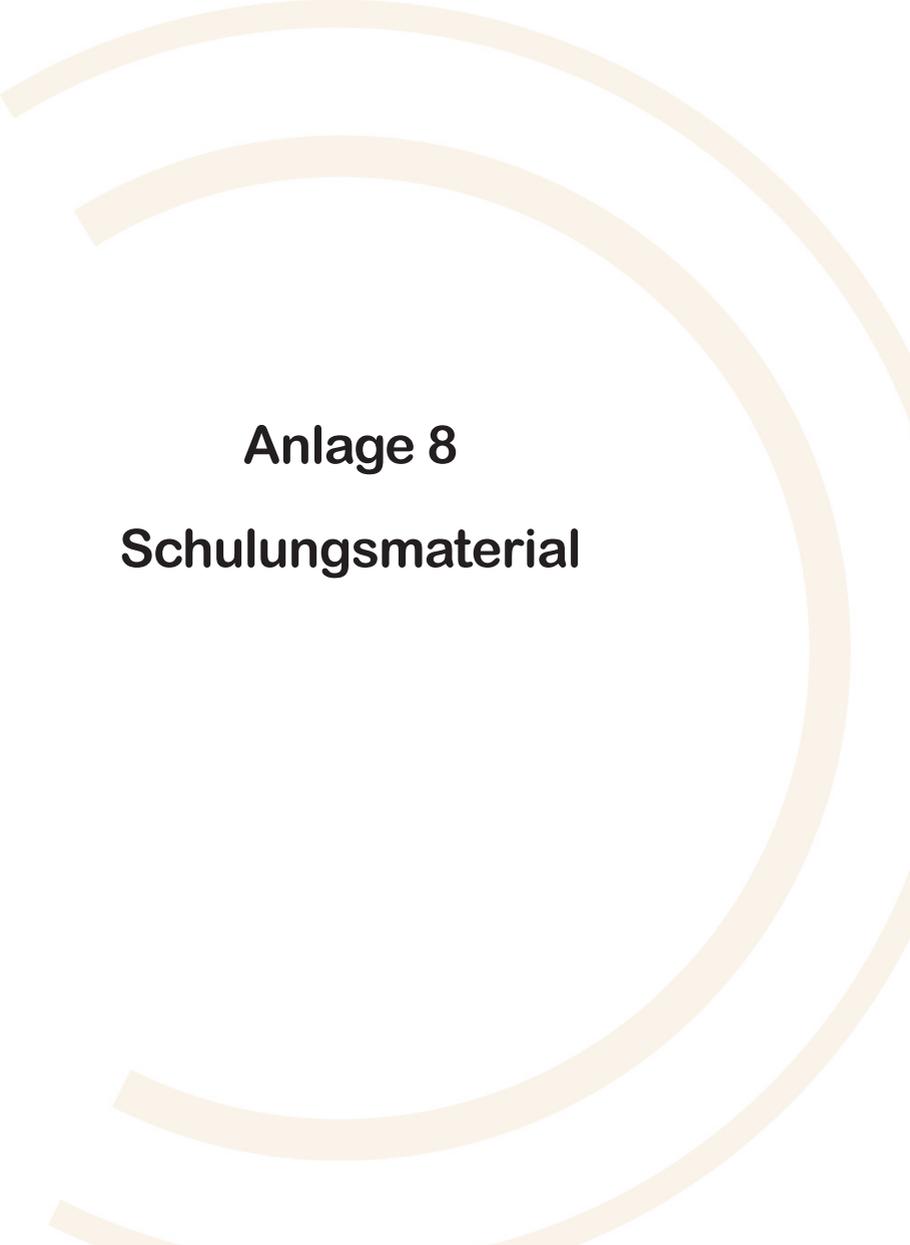
Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Sissis Kamarianakis

Exterbruch 1

D - 45886 Gelsenkirchen

Tel.: +49 (0)209 17806-42

E-Mail: kamarianakis@ikt.de



Anlage 8
Schulungsmaterial

Forschung & Entwicklung



„Fernwärme und Vegetation“

Schulungsmaterial

aus dem Forschungsvorhaben

„Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/ Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“

Inhalt

- » Problemstellung
- » Botanischer Hintergrund
- » Einfluss Wurzeln auf Fernwärme-Leitungen
- » Einfluss Fernwärme auf Wurzeln
- » Schutzmaßnahmen
- » Fachübergreifendes Konzept zur Trassenfindung



Forschungsvorhaben - Problemstellung

- » Wärmenetze sind ein wichtiger Baustein der Energie- bzw. Wärmewende
- » Fernwärmetrassen werden meist als erdverlegte Leitungen ausgeführt
- » Bäume sind u.a. für das urbane Klima sehr wertvoll
- » Konkurrenz im (unterirdischen) Straßenraum durch:
 - anderer leitungsgebundener Infrastruktur (wie beispielsweise Strom, Telekommunikation, Gas, (Ab-) Wasser)
 - Enger werdende Straßenzüge
 - wachsende Bedeutung von Grün zur Steigerung der Lebensqualität
- » Welche Interaktionen sind zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitungen möglich?

Wissensstand

DWA-
Regelwerk

Merkblatt DWA-M 162
Bäume, unterirdische Leitungen und Kanäle

Februar 2013



- » Regelwerk des AGFW FW 401-9:
„Bei der Annäherung an Bäume ist das FGSV-Merkblatt 939 zu beachten“
- » DIN 1998 „Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Flächen; Richtlinien für die Planung“
- » DIN 18920 „Vegetationstechnik im Landschaftsbau – Schutz von Bäumen, Pflanzenbeständen und Vegetationsflächen bei Baumaßnahmen“
- » RAS-LP 4 „Schutz von Bäumen, Vegetationsbeständen und Tieren bei Baumaßnahmen“

Quelle: DWA

Wissensstand

Biologische
Wachstums-
modelle

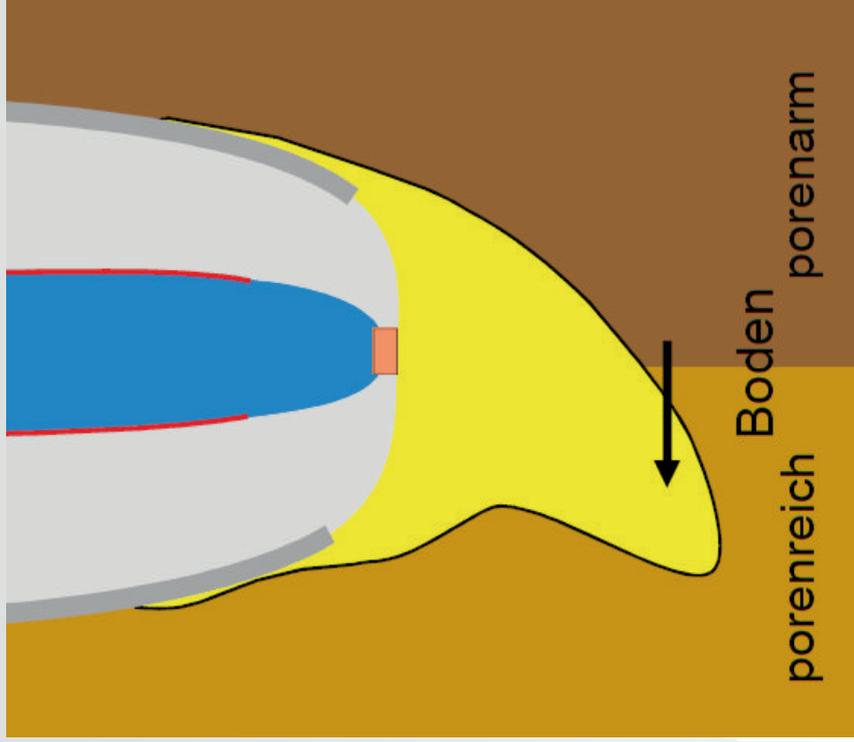
Problemstellung



Wissensstand

Bisherige
Erkenntnisse

Botanischer Hintergrund



Wesentliche Fragestellungen

1. Können (Baum-) Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen oder negativ beeinflussen?
2. Hat der Wärmeeintrag von Fernwärmeleitungen einen Einfluss auf das Wachstumsverhalten oder die Vitalität von Bäumen und Wurzeln?
3. Welchen Einfluss hat das Verfüllmaterial auf das Wurzelwachstum?
4. Welche Besonderheiten sind bei der Planung von Fernwärmetrassen an Baumstandorten zu berücksichtigen?



Wesentliche Fragestellungen

1. Können (Baum-) Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen oder negativ beeinflussen?
2. Hat der Wärmeeintrag von Fernwärmeleitungen einen Einfluss auf das Wachstumsverhalten oder die Vitalität von Bäumen und Wurzeln?
3. Welchen Einfluss hat das Verfüllmaterial auf das Wurzelwachstum?
4. Welche Besonderheiten sind bei der Planung von Fernwärmetrassen an Baumstandorten zu berücksichtigen?



Frage 1:

Können (Baum-) Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen oder negativ beeinflussen?

- a. Können Wurzeln in KMR-Muffenverbindungen einwachsen?
- b. Sind Wurzeln in der Lage KMR zu verformen/ einzudrücken?
- c. Wachsen Wurzeln in den sandigen Bettungsbereich der Leitungszone?
- d. Beeinflussen Wurzeln die Fernwärme-Statik?



Frage 1:

Können (Baum-) Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen oder negativ beeinflussen?

- a. Können Wurzeln in KMR-Muffenverbindungen einwachsen?**
- b. Sind Wurzeln in der Lage KMR zu verformen/ einzudrücken?
- c. Wachsen Wurzeln in den sandigen Bettungsbereich der Leitungszone?
- d. Beeinflussen Wurzeln die FW-Statik?

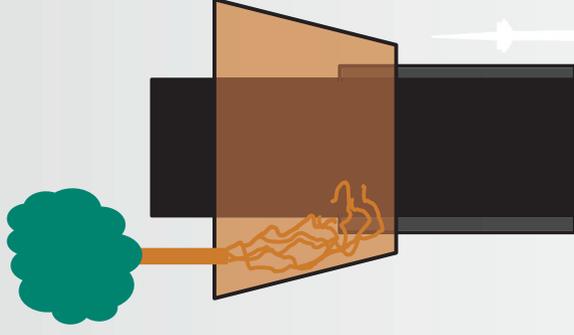


Durchführung von „Outside-In-Versuchen“

- » Ziel: Wurzeleinwuchs in Muffenverbindung untersuchen (vernetzt/unvernetzt)
- » Teilweise Fehler eingebaut (z.B. Fremdkörper eingebracht)



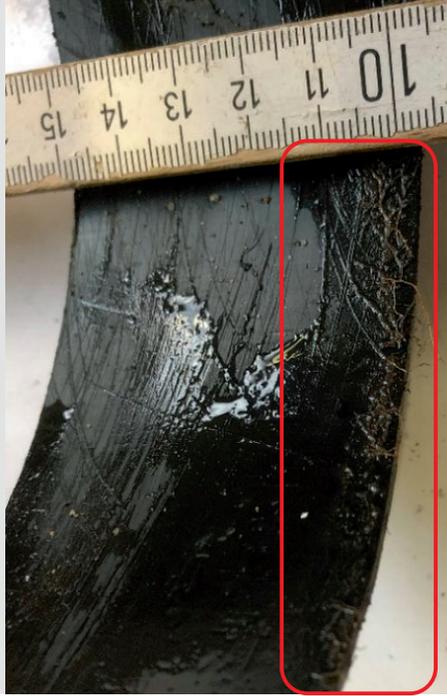
Quelle: IKT



Kein Wurzelinteraktionen bzw. -einwuchs



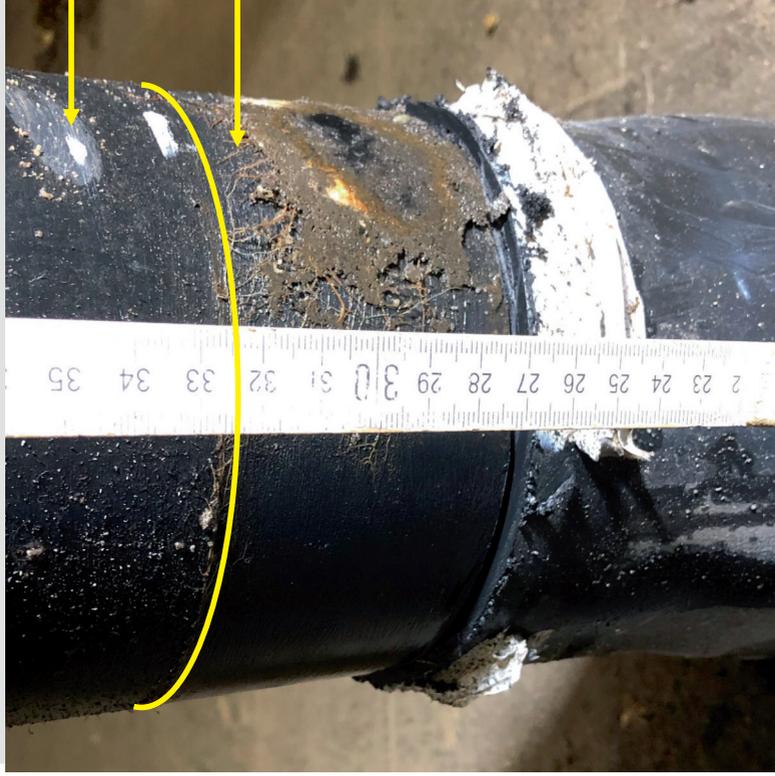
Quelle: IKT



Interaktionen zwischen Wurzel und Manschette

Einfluss Wurzel auf Fernwärme-Leitungen

Wurzeleinwuchs nur aufgrund von Fremdkörpern im eigentlich stoffschlüssigen Verbund festgestellt!



Fachgerecht und saubere
Ausführung der
Schweißarbeiten an
Baumstandorten zwingend
notwendig.

Frage 1:

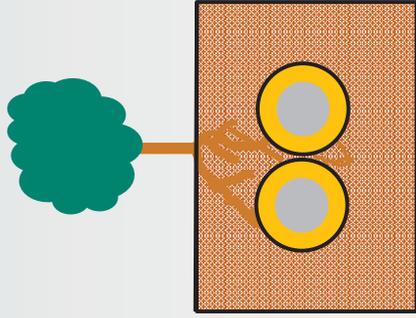
Können (Baum-) Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen oder negativ beeinflussen?

- a. Können Wurzeln in KMR-Muffenverbindungen einwachsen?
- b. Sind Wurzeln in der Lage KMR zu verformen/ einzudrücken?**
- c. Wachsen Wurzeln in den sandigen Bettungsbereich der Leitungszone?
- d. Beeinflussen Wurzeln die FW-Statik?



Durchführung von Eindrückversuchen

- » Ziel: Dickenwachstum an PE-Ummantelung mit Widerlager
- » Können Wurzeln durch Dickenwachstum eine PE-Ummantelung beschädigen?





**Keine Schäden an
der Rohroberfläche
feststellbar.**

Vorderansicht

Über Rohren:
Radial 41 mm



Zw. Rohren:
Radial 18,5 mm

Seitenansicht

Über Rohren:
Axial 28 mm



Zw. Rohren:
Axial 64 mm

Wurzeln passen sich der Umgebung an.



Praxisabgleich.

Frage 1:

Können (Baum-) Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen oder negativ beeinflussen?

- a. Können Wurzeln in KMR-Muffenverbindungen einwachsen?
- b. Sind Wurzeln in der Lage KMR zu verformen/ einzudrücken?
- c. Wachsen Wurzeln in den sandigen Bettungsbereich der Leitungszone?**
- d. Beeinflussen Wurzeln die FW-Statik?



In-situ-Aufgrabungen an Fernwärmeleitungen an Baumstandorten

- » Interaktionen zwischen Bettung und Fernwärmeleitungen sind möglich
- » Keine Beschädigungen festgestellt



Frage 1:

Können (Baum-) Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen oder negativ beeinflussen?

- a. Können Wurzeln in KMR-Muffenverbindungen einwachsen?
- b. Sind Wurzeln in der Lage KMR zu verformen/ einzudrücken?
- c. Wachsen Wurzeln in den sandigen Bettungsbereich der Leitungszone?
- d. **Beeinflussen Wurzeln die Fernwärme-Statik?**

Nach Erkenntnissen der FW-Versorgung Niederrhein und der GEF Ingenieur AG ist bei kaltverlegten KMR im Einflussbereich von Bäumen mit verringerter Reibung zu rechnen.

- Bartsch D., Buchner P., Schleyer A., Eigner G., „Bäume verursachen Verschiebung bei kaltverlegten KMR-Leitungen“, Euroheat & Power 5/2001 S. 52-59.

Wesentliche Fragestellungen

1. Können (Baum-) Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen oder negativ beeinflussen?
2. **Hat der Wärmeeintrag von Fernwärmeleitungen einen Einfluss auf das Wachstumsverhalten oder die Vitalität von Bäumen und Wurzeln?**
3. Welchen Einfluss hat das Verfüllmaterial auf das Wurzelwachstum?
4. Welche Besonderheiten sind bei der Planung von Fernwärmetrassen an Baumstandorten zu berücksichtigen?



Frage 2:

Hat der Wärmeeintrag von Fernwärmeleitungen einen Einfluss auf das Wachstumsverhalten oder die Vitalität von Bäumen und Wurzeln?

1. Beeinflusst der Wärmeeintrag von Fernwärme-Leitungen ins Erdreich das Wurzelwachstum?
2. Ändert sich das (Wachstums-) Verhalten von Bäumen im Fernwärme-Leitungsbereich?



Frage 2:

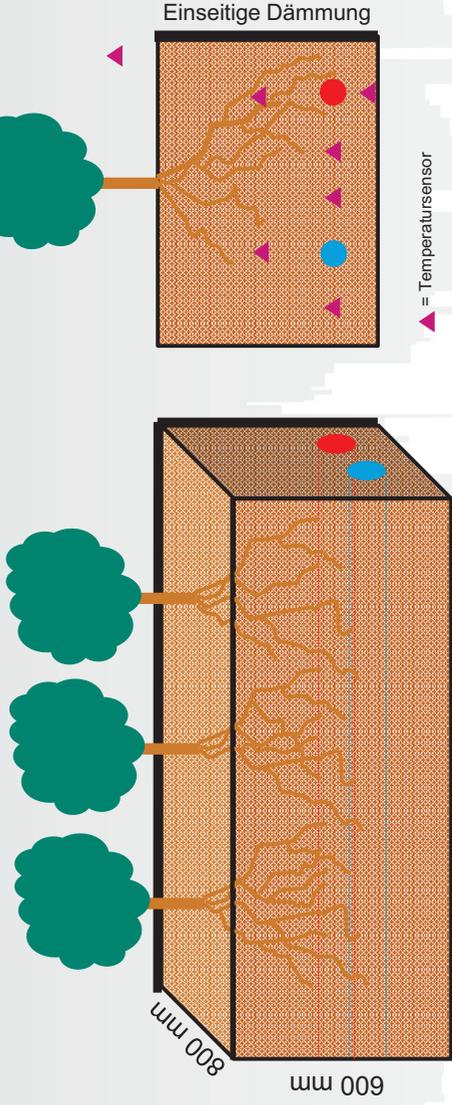
Hat der Wärmeeintrag von Fernwärmeleitungen einen Einfluss auf das Wachstumsverhalten oder die Vitalität von Bäumen und Wurzeln?

- 1. Beeinflusst der Wärmeeintrag von Fernwärme-Leitungen ins Erdreich das Wurzelwachstum?**
2. Ändert sich das (Wachstums-) Verhalten von Bäumen im Fernwärme-Leitungsbereich?



Versuche zum Wurzelwachstumsverhalten in Wärmefeldern

- » Ziel: Untersuchung des Einflusses von Wärme auf Richtung und Ausbreitung des Wurzelwachstums
- » Alle Versuche im Freien bei Umgebungstemperatur
- » Hoher Temperaturgradient durch Heizpatrone ca. 36° Celsius (roter Punkt) und Trinkwasserleitung (blauer Punkt) in Versuchskiste, um eventuelle Wurzelwachstumseffekte deutlich zu erkennen



Versuchsaufbau



Einfluss Fernwärme auf Wurzel



Ergebnisse



Quelle: IKT

- » Wurzeln erreichen innerhalb von 2 Wachstumsperioden die Kistensohle
- » Allgemein kein Wachstum nur zu Heiß- oder Kalt erkennbar
- » Hier beispielhaft: Horizontales Wurzelwachstum von **Warm zu Kalt** und **Kalt zu Warm** in einer Versuchsreihe

Kein Einfluss auf das Wurzelwachstum durch Heizpatrone mit ca. 36° Celsius erkennbar!

In-situ-Abgleich - Wurzelwachstum

- » 2013 wurde eine innerstädtische KMR Leitung in einem Grünstreifen mit sehr nahem Bestandsbäumen verlegt. Starkwurzel wurde 2013 gekappt (links) und ist wieder ausgetrieben (rechts, Bild aus 2020).



Quelle: Zorn

In-situ-Abgleich – Austrocknung der Fernwärme-Bettung

- » In-situ-Messungen zeigen, dass Bettungen vergleichsweise mit anstehenden Boden geringeren Wassergehalt aufweist. Warum?
- » Vereinzelt wurden trotzdem Wurzeln in „trockener“ Bettung festgestellt.



Frage 2:

Hat der Wärmeeintrag von Fernwärmeleitungen einen Einfluss auf das Wachstumsverhalten oder die Vitalität von Bäumen und Wurzeln?

1. Beeinflusst der Wärmeeintrag von Fernwärme-Leitungen ins Erdreich das Wurzelwachstum?
2. **Ändert sich das (Wachstums-) Verhalten von Bäumen im Fernwärme-Leitungsbereich?**



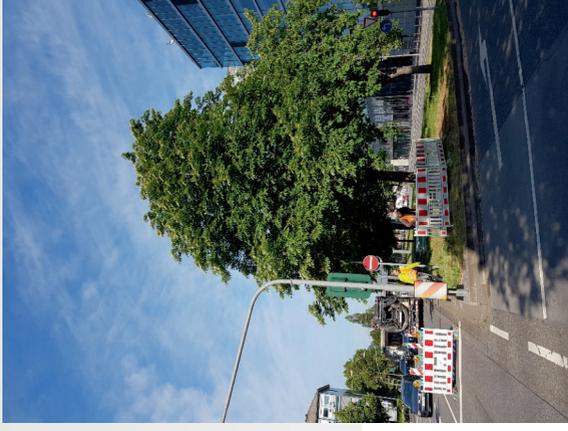
Baumwachstum im Leitungsbereich

- » Insgesamt wurden elf Bäume während In-situ-Aufgrabungen beobachtet. In keinem Fall konnte eine Beeinträchtigung der Vitalität des Baumes festgestellt werden. Jedoch sind es in den meisten Fällen Momentaufnahmen.

Praxisbeispiel mit Langzeitbetrachtung:

- » 2013 wurde eine innerstädtische KMR Leitung in einem Grünstreifen mit sehr nahem Bestandsbäumen verlegt. Über der Sandbettung wurde großvolumig Baumsubstrat eingesetzt.
- » Bis 2020 wurden die Bäume unregelmäßig gesichtet und mit denen in der Nähe befindlichen verglichen.

Es konnten keine Auffälligkeiten aufgrund von Fernwärme festgestellt werden.



Quelle: IKT

Wesentliche Fragestellungen

1. Können (Baum-) Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen oder negativ beeinflussen?
2. Hat der Wärmeeintrag von Fernwärmeleitungen einen Einfluss auf das Wachstumsverhalten oder die Vitalität von Bäumen und Wurzeln?
- 3. Welchen Einfluss hat das Verfüllmaterial auf das Wurzelwachstum?**
4. Welche Besonderheiten sind bei der Planung von Fernwärmetrassen an Baumstandorten zu berücksichtigen?

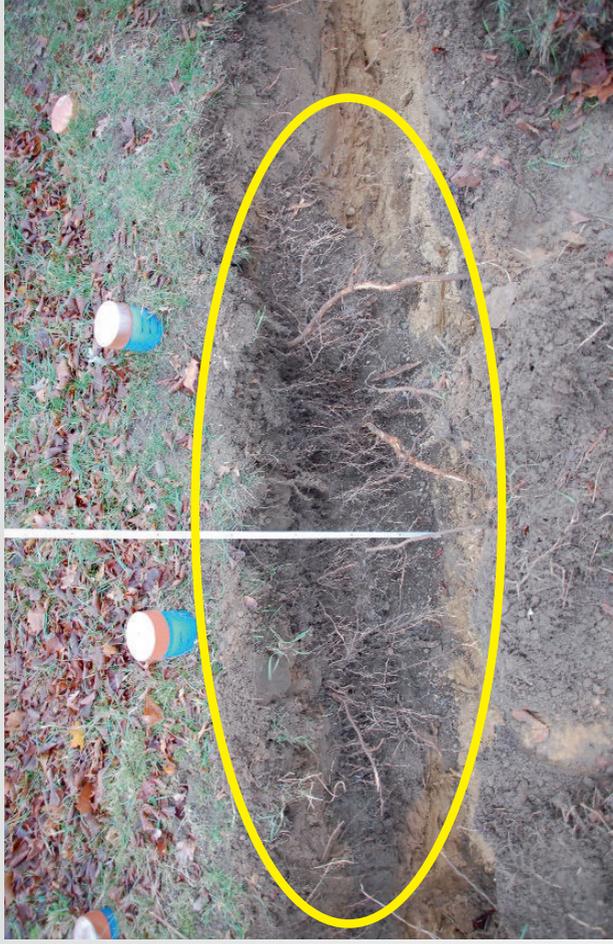


Versuchsfeld Dodeshaus – Feldversuche zu Schutzmaßnahmen nach DWA-M 162

- Einbau von Baumsubstrat und Belüftungsrohren 2010
- Einbau von ZFSV 2018



**Baumsubstrate und Belüftungsröhre als Schutzmaßnahme des Baumes –
Gute Bedingungen für Wurzelwachstum**



**Ausgeprägtes Wurzelwachstum in
Baumsubstrat nach ca. 10 Jahren festgestellt.**

Baumsubstrat – Vergleich mit In-situ-Aufgrabung



Ausgeprägtes
Wurzelwachstum in
Baumsubstrat nach ca. 7
Jahren festgestellt.



Nur vereinzelt
Feinwurzeln in Bettung.
Dichtenfallenmodell!

ZFSV als Schutzmaßnahme vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsgraben



ZFSV

Kein Wurzeleinwuchs
feststellbar.

Teilweise wurden Wurzeln an
der Leitungsgrabenwand von
ZFSV umschlossen.



Quelle: IKT

ZFSV als Schutzmaßnahme vor Wurzeleinwuchs in den Leitungsgraben



Quelle: Stützel

Im ZFSV umschlossene
Wurzeln sterben ab. Wurzeln
treiben im Baumsubstrat neu
aus.



Baumseite

Quelle: IKT

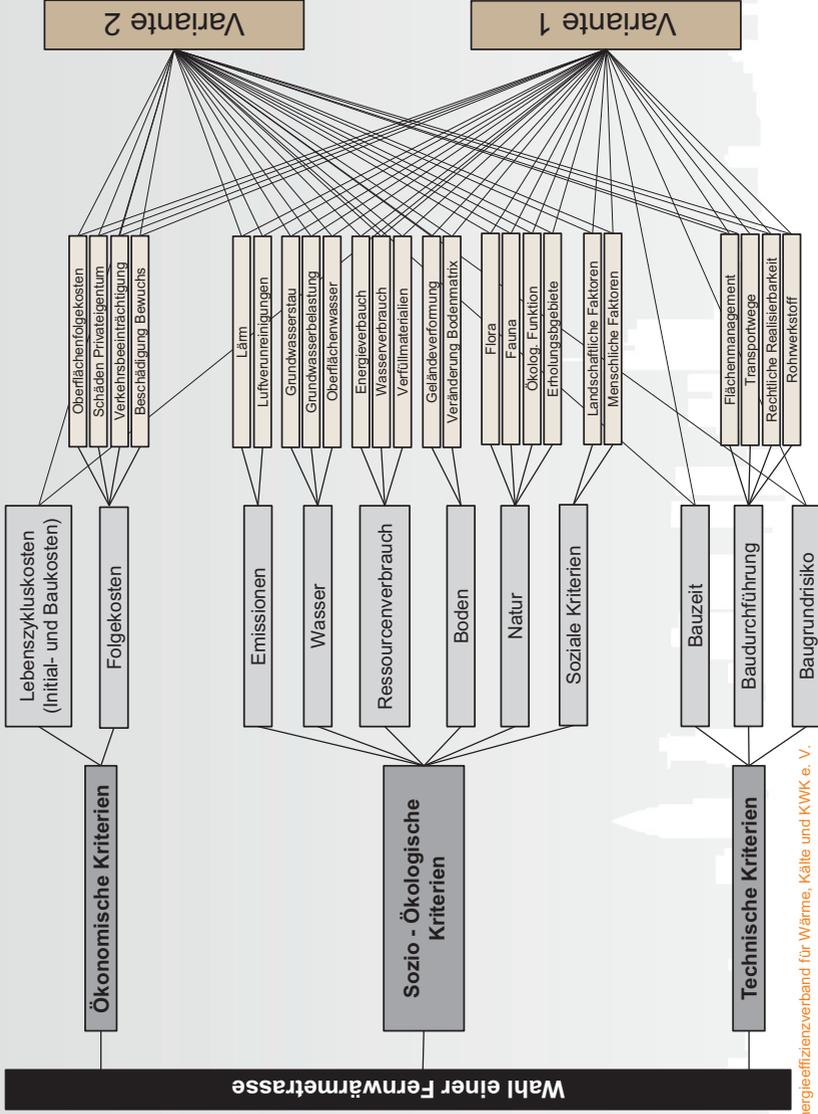
Wesentliche Fragestellungen

1. Können (Baum-) Wurzeln Fernwärmeleitungen beschädigen oder negativ beeinflussen?
2. Hat der Wärmeeintrag von Fernwärmeleitungen einen Einfluss auf das Wachstumsverhalten oder die Vitalität von Bäumen und Wurzeln?
3. Welchen Einfluss hat das Verfüllmaterial auf das Wurzelwachstum?
4. **Welche Besonderheiten sind bei der Planung von Fernwärmetrassen an Baumstandorten zu berücksichtigen?**



- Die Verlegung von Leitungen in der Nähe von Bäumen soll nicht als Standard empfohlen werden, es kann allerdings eine hilfreiche Lösungsmöglichkeit bei der Auswahl der bestmöglichen Trassenführung sein.
 - Szenarienanalyse
- Sollte die Errichtung einer FW-Trasse in Gebieten mit Vegetation gewählt werden, ist dies in der Planung und beim Bau zu berücksichtigen:
 - Bei Baumbestand – Ist ein Wurzelschutz (inkl. Befeuchtung) während der Bauphase nötig?
 - Wer kann entscheiden welche Wurzeln bleiben müssen (Standfestigkeit und Vitalität)?
 - Wie wird vorgefahren, wenn ein Baum einer Aufgrabung (z.B im Schadensfall oder bei Neuanschluss) im Weg steht?
 - Etc.
- Kann man auf dieser Grundlage auch nachträgliche Bepflanzungen von Trassen zulassen?
 - Weitere Fragestellungen für Folgeprojekt möglich

Szenarienanalyse – Kriterien aus Projekt-Workshop in Osnabrück



darum fernwärme ...

denn sie ist stubenrein und hilft,
CO₂ zu vermeiden.

www.fernwaerme-info.eu


fernwärme
rein ins haus.



**DELFIN – Decentralized
Feed-In „Prognose der
Auswirkungen dezentraler
Einbindung von Wärme aus
erneuerbaren Energien und
anderen Wärmeerzeugern
in Fernwärmenetze“**

Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

www.agfw.de



**Bestellen Sie online
unter shop.agfw.de!**

Wurzelwachstum Wärm

Szenarienanalyse Wu

Wurzelwachstum Wärm

Szenarienanalyse Wu

Wurzelwachstum Wärm

Szenarienanalyse Wu

Wurzelwachstum Wärm

Szenarienanalyse Wu

Wurzelwachstum Wärm

Szenarienanalyse Wu