Forschung & Entwicklung | Heft 65

AGFW

Praxisvalidierung langfristiger Schutzmaßnahmen von Bäumen/Baumwurzeln in Versuchsstrecken unterirdischer Fernwärmeleitungen in Frankfurt a. M. und Chemnitz

Abschlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben FW-Vegetation 2

www.agfw.de

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: 37838/01-23

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 3-89999-095-1

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.

Juli 2023

© AGFW, Frankfurt am Main

WÄRME | KÄLTE | KWK

AGFW

fernwärme VEGETATION

FW-Vegetation 2022-2023

„Praxisvalidierung langfristiger Schutzmaßnahmen von Bäumen/ Baumwurzeln in Versuchsstrecken unterirdischer Fernwärmeleitungen in Frankfurt a. M. und Chemnitz“

Abschlussbericht

DBU Aktenzeichen: 37838/01-23

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 2
1 Zielstellung des Forschungsvorhabens 4
2 Langzeit-Temperaturmessungen 6
2.1 Ausgangslage FW-Vegetation 1 6
2.2 Anpassung und Detaillierung des Modells in Phase 2 6
2.3 Annahmen zur Simulation der Vegetation 7
2.4 Variantenanalysen 10
2.5 Rammsondierung 21
3 Bonitur von Vegetation 23
3.1 Motivation Hintergrund Ausgangslage 23
3.2 Wichtige Stationen und Zeitpunkte der Bonitur 24
4 Visuelle Untersuchung Frankfurt Riedberg 28
4.1 Der Stadtbezirk Frankfurt Riedberg 28
4.2 Auswahl geeigneter Straßenzüge anhand der Planungsunterlagen 29
4.3 Vor Ort Begehung zur Auswahl konkreter Standorte auf Basis biologische Gesichtspunkte 30
4.4 Ergebnisse der Bonitur 30
4.5 Schlussfolgerung 31
5 Feldversuch Chemnitz 32
5.1 Zielstellung/ Einleitung 32
5.2 Dokumentation Besuche vor Ort (Zwischen den Projekten) 32
5.3 Bonitur in Chemnitz 38
6 Eindrückversuche aus FW-Vegetation 1 40
7 Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit 46
7.1 Projektbegleitkreis 46
7.2 Fachgremien und Experten 46
7.3 Öffentlichkeit 46
8 Ergebnisse 47

8.1 Leitsatz 1 - „Szenarienanalyse zur Trassenauswahl“ 47
8.2 Leitsatz 2 – „Wärmefeld im Erdreich“ 48
8.3 Leitsatz 3 – „Muffenverbindungen an KMR“ 49
8.4 Leitsatz 4 – „Interaktion von Wurzeln und FW-Leitungen“ 49
8.5 Leitsatz 5 – „Zeitweise fließfähige selbstverdichtende Verfüllbaustoffe (ZFSV)“ 50
8.6 Leitsatz 6 „Substrate“ 50
9 Ausblick 51
9.1 Weitere Forschungsansätze 51
9.2 Ausblick Ergebnisverwertung FW-Vegetation 2 52
10 Literaturangaben 54

Anlage 1 Dokumentation "Wärmefelder im Erdreich 56

1 Zielstellung des Forschungsvorhabens

In nahezu allen aktuellen Langfristszenarien wird Fernwärme als ein zentraler Schlüssel der Energie- bzw. Wärmewende gesehen, der ein entscheidendes Puzzleteil zum Erreichen der nationalen Klimaziele darstellt. Neben Umstellungen in der Erzeugung auf erneuerbare und klimaneutrale Energieträger spielen hierbei auch der Ausbau und die Verdichtung von Wärmenetzen eine entscheidende Rolle.

Durch ihren Systemcharakter sind Wärmenetzsysteme besonders zukunftsrelevant und bieten eine maximale Flexibilität und Diversität hinsichtlich der einzusetzenden Energieträger (Gas, erneuerbare Energien, Abwärme, Wasserstoff usw.) und Technologien (KWK, PtH, Wärmespeicher, Geothermie, Solarthermie usw.). Auch das BMWK und Vizekanzler und Bundeswirtschafts- und Klimaschutzminister Habeck unterstreichen die Bedeutung von Wärmenetzen für den Klimaneutrale Umbau der Wärmeversorgung und die Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Energieträgern. In Städten aber auch im ländlichen Raum in dem die Siedlungsdichte einen wirtschaftlichen Betrieb zulässt, wird den Anschluss an Wärmenetze als beste Alternative beim Austausch von Öl- und Gasheizungen gesehen. [1]

Dies bedeutet, dass der Ausbau und die Verdichtung von Fernwärmeleitungen verstärkt in dicht besiedelten, urbanen Bereichen erfolgen muss. Gerade hier führt allerdings die Nutzung des Untergrundes für entsprechende Fernwärme-Trassen unweigerlich zu Nutzungskonflikten, denn der unterirdische Straßenraum hat in den letzten Jahren vielfältige Veränderungen erfahren: Straßenzüge werden schmaler und die Bedeutung von Grün zur Steigerung der Lebensqualität der Anwohner und zur Verbesserung des Stadtklimas nimmt zu. So weist beispielsweise der Deutsche Städtetag darauf hin (vgl. [2]), dass die Bedeutung von Grünflächen und städtischer Vegetation, insbesondere Großbäumen, zur Reduzierung des städtische Wärmeinseleffektes zunimmt. In einer umfangreichen Literaturstudie von Moser et al. [3] werden die Leistungen von Stadtbäumen herausgestellt, welche für zukünftige Stadtplanung – insbesondere im Hinblick auf den Klimawandel – von Bedeutung sein werden, wie Kohlenstoffbindung, Kühlung und Beschattung, Lärmminderung und Abflussminderung.

Nicht zuletzt aufgrund hoher Investitionskosten für Energieinfrastrukturmaßnahmen wie erdverlegten Fernwärmeleitungen werden diese auf mindestens 30 Jahre technische Nutzungsdauer ausgelegt [4] und lassen sich in Abhängigkeit diverser Randbedingungen teilweise deutlich länger betreiben. Auch städtische Vegetation hat in der Regel eine Lebenserwartung von mehreren Jahrzehnten, sodass die Koexistenz von Fernwärmeleitungen und Vegetation / Wurzeln auch langfristig relevant sind. Dabei stellt sich auch die Frage, ob und inwieweit mit Gefahren durch Wurzeleinwuchs oder lastabtragende Wurzeln für Fernwärmeleitungen auf der einen und für die Vegetation durch den Bau und Betrieb von

Fernwärmeleitungen zu rechnen ist. Dies ist sowohl für eine entsprechend vorausschauende Planung der städtischen Energieversorgung und Baumstandorte in Neubaugebieten relevant als auch bei Maßnahmen im Bestand.

Diese Wechselwirkungen gilt es zu erforschen und basierend auf den Erkenntnissen neue Lösungsansätze zu entwickeln, um den Nutzungskonflikt zwischen nachhaltiger Energieversorgung mittels Fernwärmeleitungen und Wurzelraum für Bäume und Stadtgrün im Straßenraum zu entschärfen.

Im Laufe des hier dargestellten Forschungsvorhabens verstärkt sich aufgrund der aktuellen globalen Entwicklungen (insb. Klimawandel, Ukrainekrieg) mehr denn je der Konflikt „Unterirdische Infrastruktur – mehr Bäume in den Städten“. In Zukunft muss diskutiert werden, wie mit dem Spannungsfeld „**Energiekrise trifft Klimakrise!“** umgegangen wird und welche Lösungsmöglichkeiten es gibt. Hier setzt das Forschungsvorhaben an.

Im Jahr 2017 starteten AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V in Kooperation mit dem IKT – Institut für Unterirdische Infrastruktur und mit Fördermitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) das Forschungsvorhaben „Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen“ - FW-Vegetation 1 (AZ 33759/01) [5]. Darin zeigte sich bisher, dass die Beeinflussung von Fernwärmeleitungen auf Wurzeln, im Labormaßstab und bei In-situ-Beobachtungen, bei nach Stand der Technik betriebenen Fernwärmeleitungen keinen nachweisbaren Einfluss auf das Wurzelwachstum haben und auch bei nach dem Stand der Technik hergestellten Fernwärmeverbindungen keine Gefahr durch einwachsende Wurzeln für Fernwärmeleitungen besteht [5, 6].

Ziel des diesem Bericht zugrunde liegenden Forschungsvorhabens „Praxisvalidierung langfristiger Schutzmaßnahmen von Bäumen/ Baumwurzeln in Versuchsstrecken unterirdischer Fernwärmeleitungen in Frankfurt a. M. und Chemnitz“ – FW-Vegetation 2 (AZ 37838/01-23) war es primär die im Forschungsvorhaben „FW-Vegetation 1“ errichteten Versuche und Testfelder weiter zu betreuen und die gewonnen Erkenntnisse zu vertiefen und zu validieren. Denn Wurzeln wachsen sehr langsam und die Wechselwirkungen zwischen Wurzeln, Leitungen und Boden sind vielfältig. Daher sind Langzeituntersuchungen im Maßstab 1:1 an echten Bäumen maßgeblich für praxisnahe Aussagen, um grüne und nachhaltige Städte der Zukunft bestmöglich gestalten und mit Energie versorgen zu können.

2 Langzeit-Temperaturmessungen

Im Rahmen der hier durchgeführten Forschungsreihe werden Langzeit-Temperaturmessungen an Fernwärmeleitungen in der Nähe von Baumstandorten in einem Versuchsfeld in der Stadt Frankfurt am Main durchgeführt. Dabei werden über mehrere Jahre Wärme- und Feuchtemessungen durchgeführt und diese Messergebnisse für weitergehende Simulationen und Variantenanalysen genutzt. Die aktuellen Ergebnisse werden folgend dargestellt.

2.1 Ausgangslage FW-Vegetation 1

Im Rahmen des Forschungsvorhabens FW-Vegetation 1 [5] wurden bereits umfassende Modellierungen von Wärmefeldern im Erdreich durchgeführt und Einflussparameter auf Wärmefelder identifiziert. Aufgrund unzureichender Datengrundlagen aus den Messstellen des Versuchsfeldes mussten teilweise Ersatzwerte einer anderen AGFW Messstelle an einer Fernwärmeleitung hinzugezogen werden. Die Ergebnisse aus dieser anderen Messstelle wurden für einen anderen Untersuchungsschwerpunkt konzipiert, weshalb dort beispielsweise keine Feuchtesensoren eingebracht wurden. Im hier vorgestellten Forschungsvorhaben konnte nicht nur die ursprünglich für diesen Einsatz konzipierte Messstelle in Frankfurt zur Kalibrierung der Simulation herangezogen, sondern auch weitere Detailinformationen, sowie Erfahrungen aus dem vorherigen Modell berücksichtig werden.

Der Versuchsaufbau inkl. Messstellen, Baumstandort etc. ist in [5] dargestellt.

2.2 Anpassung und Detaillierung des Modells in Phase 2

Aufgrund der Möglichkeit die Baumaßnahme der Fernwärmeleitung komplett zu begleiten konnten für das Simulationsmodell relativ genaue Geometriedaten des Erdaufbaus und umfassende Planungsdaten berücksichtigt werden. Zusätzliche geotechnische Untersuchungen ermöglichten es relevante Eigenschaften des Erdreichs und der Verfüllmaterialien zum Wassertransport und Wärmeleitung zu berücksichtigen. Entsprechend dem Messkonzept sind auch außerhalb des Rohrleitungsgrabens (im Wurzelbereich eines Baumes nahe der Leitungstrasse) Messdaten zu Temperatur und Feuchte verfügbar, die ebenso für die Kalibrierung des Modells genutzt werden konnten. Insgesamt wurden 28 Temperatur- und 12 Feuchtesensoren in drei Messbereichen (in der FW-Trasse am Baumstandort und ohne Baumstandort, direkt am Baum) installiert. Durch die teilweise bewusst redundant ausgeführten Messungen an besonders relevanten Stellen (bspw. Temperatur an der Rohroberfläche) konnten auch immer wieder auftretende Messausfälle kompensiert werden, sodass seit 2019 eine umfassende Datenbasis für die Simulation vorlag.

Im neuen Simulationsmodell wurden im besonderen auch Wassertransporteigenschaften im Erdreich berücksichtigt, sodass hygrothermische Berechnungen möglich sind, die Rückschlüsse auf die Wasserverfügbarkeit für Vegetation zulassen. Eine notwendige Vereinfachung des Modells stellt allerdings die Tatsache dar, dass der schwerkraftbedingte Wassertransport nicht berücksichtigt wird, da das notwendige Grundwassermodell nicht im Projektumfang entwickelt werden konnte. Durch den Abgleich mit den Messwerten der Feuchtesensoren konnte das Modell kalibriert werden und bildet die reale Situation hinreichend genau ab. Aufbauend auf dem kalibrierten Modell konnten anschließend Szenarien berechnet werden, welche die Auswirkungen einzelner veränderter Parameter, wie veränderte Betriebstemperaturen, andere Dämmstärken der Rohrleitung oder unterschiedliche Abstände zwischen Fernwärmetrasse und Vegetation abbilden. Die Detaillierte Dokumentation der Simulationen ist in Anlage 1 Präsentation TU Dresden zu finden. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse vorgestellt.

2.3 Annahmen zur Simulation der Vegetation

Für das Modell wird die Vegetation vereinfacht als „Feuchtesenke“ implementiert. Die Grundannahme ist, dass die von der Vegetation verdunstete Wassermenge als Wasserüberschuss im Boden verfügbar sein muss. Eine Simulation mit 100 % Regenbeaufschlagung eines Bodens ohne Vegetation sollte einen Wasserüberschuss generieren. Dieser „Überschuss“ kann von der Vegetation „verbraucht“ werden. Mit Vegetation sollte sich ein quasistationäres Gleichgewicht aus Regen und Verdunstung einstellen, welches dem beobachteten Feuchtegehalt entspricht. Im Simulationsmodell wird für den Baum eine mittlere Verdunstungsrate von 150 l/d (bzw. 6 Monate Wachstumsphase mit 300 l/d) angenommen, wofür ein großer Wurzelbereich von rund 80 m³ zur Verfügung steht (siehe Abbildung 1).

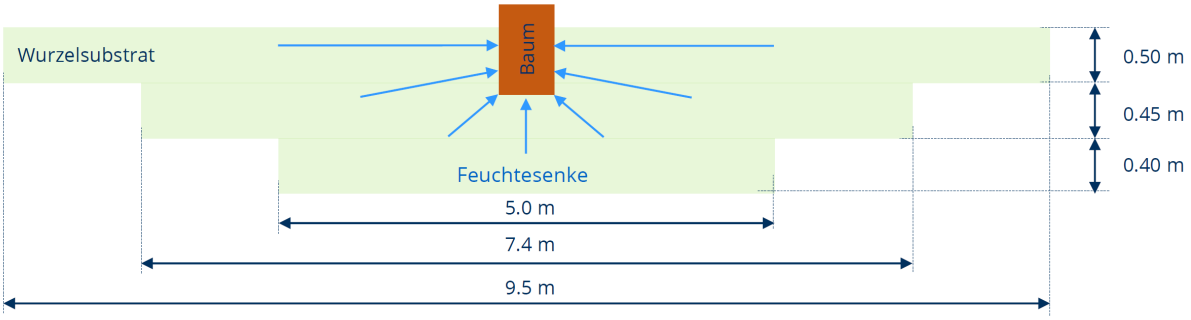


Abbildung 1: Wurzelbereich im Simulationsmodell

2.3.1 Temperaturen im Erdreich

Nachdem die Kalibrierung des Simulationsmodells mit den gemessenen Temperaturen am Mantel der Kunststoffmantelrohre erfolgreich war, konnte auch das Kunststoffmantelrohr

simuliert werden. Als Randbedingungen für die Temperaturen der Fernwärmeleitung konnte auf die Daten der gleitend konstanten Netzfahrweise (außentemperaturabhängige Netzvorlauftemperatur, die einen Mindestwert nicht unterschreitet, [7]) des realen Netzbetriebs zurückgegriffen werden, die im Bereich der Messungen eine Mediumtemperatur zwischen 80°C -120°C vorsehen. Wie schon in den Simulationsergebnissen aus FW-Vegetation 1 sind die daraus entstehenden die Temperaturen im Erdreich um die Fernwärmeleitungen unterhalb der in den Laborversuchen verwendeten 36°C. Die Temperaturfelder im Erdreich zeigen ihre deutlichste Ausprägung in der unmittelbaren Rohrleitungszone und unterscheiden sich deutlich im Vergleich zwischen Winter (siehe Abbildung 2) und Sommer (siehe Abbildung 3).

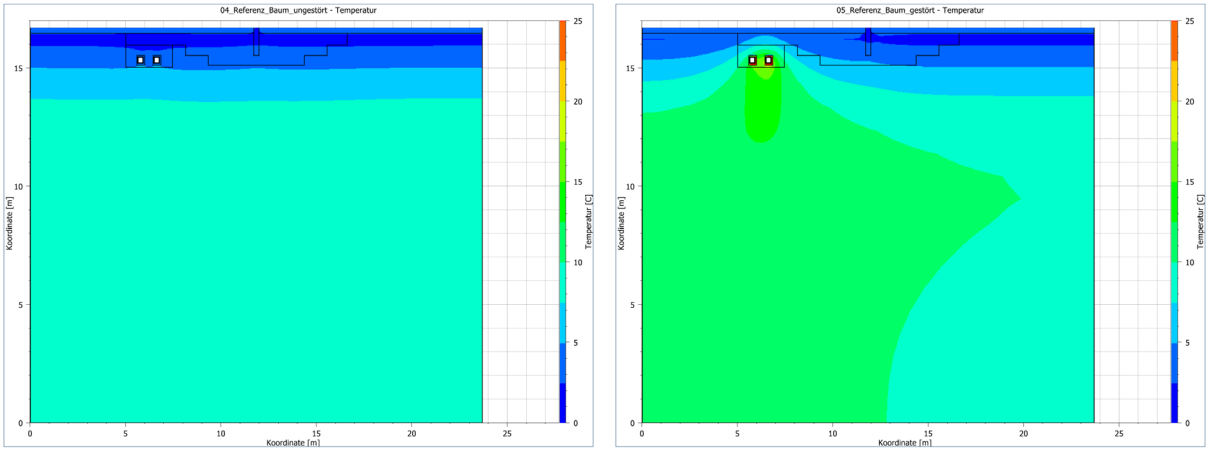


Abbildung 2: Temperaturfelder im Erdreich im Januar, rechts mit „eingeschalteter“ Fernwärme, links ohne

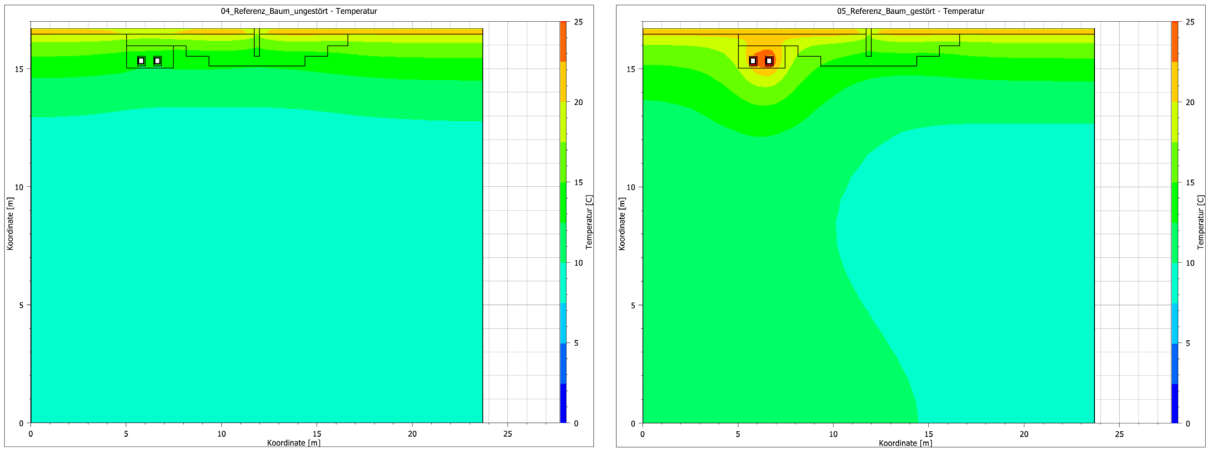


Abbildung 3: Temperaturfelder im Erdreich im August, rechts mit „eingeschalteter“ Fernwärme, links ohne

2.3.2 Feuchtegehalt im Erdreich

Die im Boden verfügbare Wassermenge wird in Abbildung 4 und Abbildung 5 ebenfalls im Vergleich, mit und ohne „aktive“ Fernwärmeleitung, dargestellt. Die Unterschiede sind im

Winter kaum zu erkennen. In der Vegetationsperiode im Sommer ist die Wärmesenke durch den Wasserverbrauch des Baums deutlich erkennbar, die Unterschiede zwischen „ein- oder ausgeschalteter“ Fernwärme sind hingegen relativ gering (siehe Abbildung 4 und Abbildung 5).

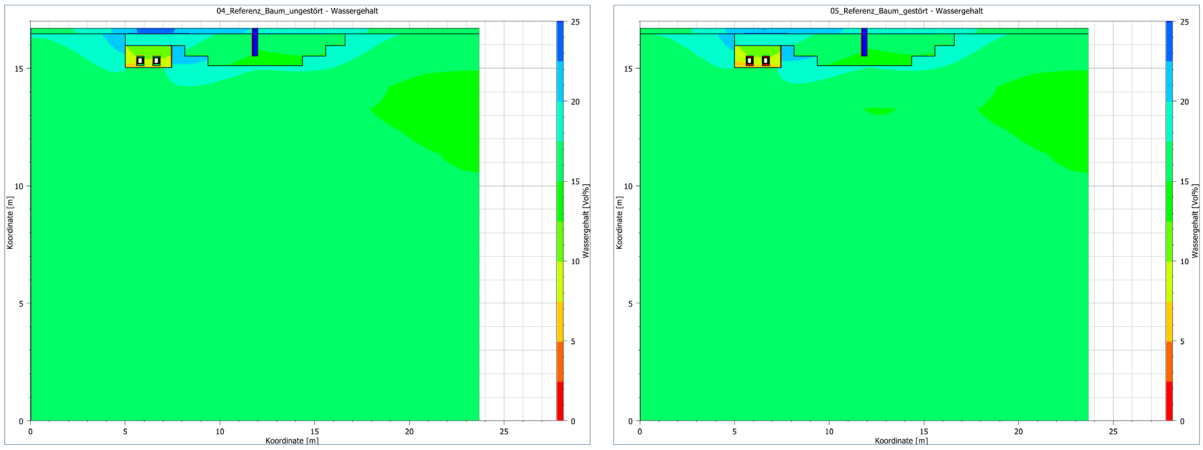


Abbildung 4: Wassergehalt (in Vol%) im Januar ohne Wärmeeinfluss (links) und mit (rechts)

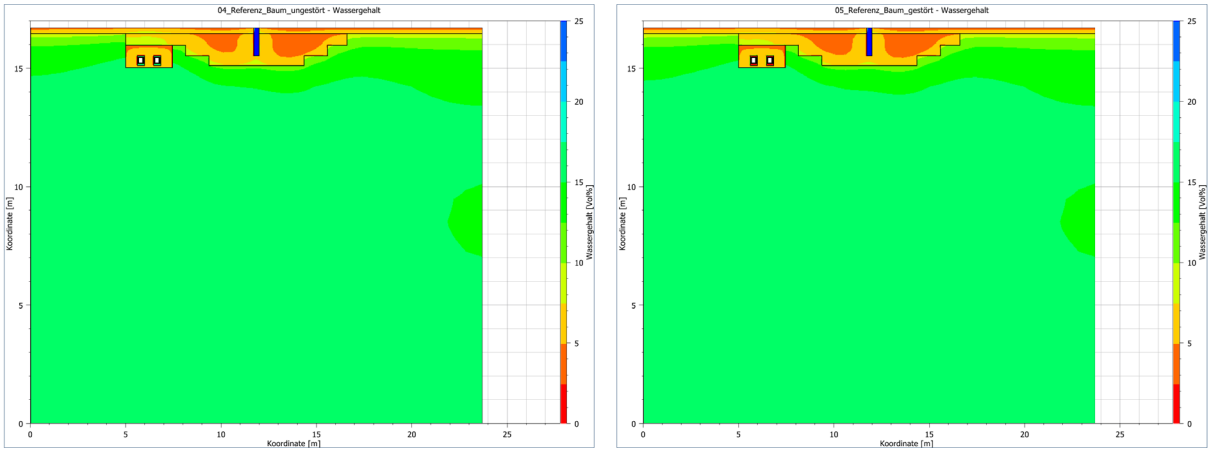


Abbildung 5: Wassergehalt (in Vol%) im August ohne Wärmeeinfluss (links) und mit (rechts)

In beiden Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass der Bereich direkt um die Rohrleitungen deutlich trockener ist als die Umgebung. Dies liegt unter anderem daran, dass das dort eingesetzte Bettungsmaterial ein EN 13941-2 [8] konformer „Sand“ ist, der eine deutlich niedrigere Wasserspeicherkapazität hat als das Wurzelsubstrat nahe der Baumachse oder das anstehende Erdreich. Aufgrund der nicht berücksichtigten Gravitation, sickert allerdings auch kein Wasser von oben nach unten durch die Leitungszone. Trotz dieser Einschränkungen des Simulationsmodells decken sich diese Simulationsergebnisse mit den Messungen des Wassergehaltes in Sandbettungen bei In-situ-Aufgraben in Projektphase 1. Dort wurde oftmals beobachtet, dass der Wassergehalt in der Sandbettung geringer war als in den darüber liegenden Bodenhorizonten [5]. Inwieweit die geringere Wasserspeicherkapazität des Sandes, die Abwärme der Fernwärmeleitung oder andere Einflussfaktoren maßgeblich für diesen

ermittelten geringeren Wassergehalt sind, kann durch die bisherigen Untersuchungen nicht beantwortet werden und sollte in Zukunft weitergehend untersucht werden.

Deutlich relevanter als die Extrembeispiele zu sehr feuchten oder trockenen Zeitpunkten im Jahresverlauf ist die Frage, ob sich der Feuchtegehalt langfristig verändert. Hierzu wurde das kalibrierte Modell für zehn Jahre simuliert, mit einem jährlich wiederholten Datensatz an Umgebungsparametern (Temperatur und Niederschlag). In Abbildung 6 ist der Wassergehalt (Y-Achse) über die Zeit (X-Achse) aufgetragen, in orange im Bereich der Wurzeln, in Schwarz bezogen auf das gesamte Simulationsgebiet. Der Einfluss aufgrund das Wärmeeintrags der Fernwärmeleitung ist minimal und führt zu einer leichten Verringerung des Wassergehalts im Wurzelsubstart (<1%). Eine langfristige Abnahme (fallende Kurven) im gesamten Gebiet sind nicht zu erkennen.

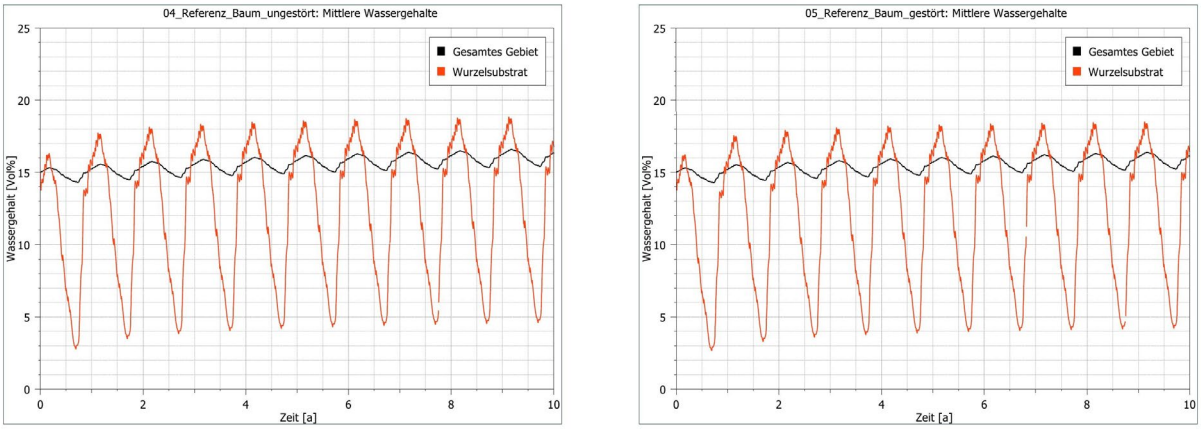


Abbildung 6: Simulation Wassergehalt über 10 Jahre, links ohne recht mit „eingeschalteter“ Fernwärmeleitung

2.4 Variantenanalysen

Nach der Kalibrierung des Modells und dem Vergleich zwischen „ungestörtem“ (Geometrie der Fernwärmetrasse berücksichtigt aber ohne Temperatureintrag) und „gestörtem“ (Wärmeeintrag durch Fernwärmebetrieb) Erdreich sollten die Auswirkungen weiterer Varianten untersucht werden. Erste Ideen aus dem Projektantrag, z.B. zu Auswirkungen von veränderten Temperaturfahrweisen der Fernwärmeleitung, klimatischen Randbedingungen oder anderer Abstände zwischen Baum und Fernwärmeleitung, wurden mit dem interdisziplinären Projektbegleitkreis diskutiert (siehe Kapitel 7.1). Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Kalibrierung und dem Vergleich zum „ungestörten“ Modell beschloss der Projektbegleitkreis den Fokus der Variantenanalysen auf geometrische und konkret beeinflussbare Parameter, wie zum Beispiel die Betriebstemperatur, zu setzen. Umwelteinflüsse wie beispielsweise bspw. Starkregen, längere Trockenperioden oder höhere Umgebungstemperaturen sind grundsätzlich relevant für zukünftige Untersuchungen, sind

aber kein spezifische Problematik von Fernwärmleitungen an Baumstandorten und wurden aufgrund des Projektbudgets zunächst hinten angestellt.

Weiterhin zeigte sich in den ersten Simulationen und der Kalibrierung deutlich, dass die Auswirkungen durch den Temperatureintrag der Fernwärme auf den Wassergehalt im Boden vergleichsweise gering sind. Sinkt der Wassergehalt im Boden unter eine kritische Grenze, so zeigen die Bäume Welkeerscheinungen, beginnend mit einer Verkahlung im inneren Kronenbereich. Da der durchwurzelte Raum aber bei fachgerechter Pflanzung wesentlich größer ist als der vom Wärmeeintrag betroffene Bereich und ein Ausgleich der Bodenfeuchte über Diffusion erfolgt, ist der Trockenstress weitgehend leitungsunabhängig. Wird der Trockenstress nicht durch Wässerung ausreichend bekämpft, hat dies eine mangelnde Ausreifung (Verkernung) des Holzes zur Folge. Neben einer verminderten statischen Leistungsfähigkeit erleichtert dies Pilzinfektionen. Beides führt zusammen zu irreversiblen Langzeitschäden, die häufig als Grünastbrüche auftreten und immer wieder fälschlicherweise als aktive Kronenreduktion zur Stressvermeidung beschrieben werden. Für solche Zusammenhänge gibt es aber praktisch ausschließlich korrelative Betrachtungen und keine Kausalanalysen.

Daher entschied der Projektkreis sich für folgende Varianten der Simulation:

- Variante 1: Abstand zwischen Fernwärmeleitung und Vegetation
- Variante 2: Größere Nennweite
- Variante 3: höhere Dämmserie
- Variante 4: Reduzierung der Vorlauftemperaturen

2.4.1 Variante 1: Abstand zwischen Fernwärmeleitung und Vegetation

Der geometrische Aufbau des Simulationsmodells entsprach bisher dem tatsächlichen Querschnitt des Versuchsfeldes. Dort beträgt der Abstand zwischen Fernwärmeleitung und Baum ca. 4,5 Meter. Für die Variantenanalyse wurde der Substratbereich, aus dem der Baum das Wasser bezieht, des Simulationsmodells vergrößert (siehe Abbildung 7). Andernfalls würde bei einer Verschiebung des sandigen Bettungsbereichs in den substratgefüllten Wurzelbereich zu einer unrealistischen Austrocknung führen, die nur auf die Reduzierung des Substrates zurückführen lässt. Für den Variantenvergleich im angepassten Simulationsmodell wurden Abstände zwischen Vegetation und Rohrleitung von 5 m, 3 m und 1 m gewählt. Durch den Modellaufbau kann der Vergleich direkt zwischen der Fernwärmtrasse zugewandten Seite (lila Kasten, als „gestört“ bezeichnet) und der abgewandten Seite (grüner Kasten, als „ungestört“ bezeichnet) erfolgen.

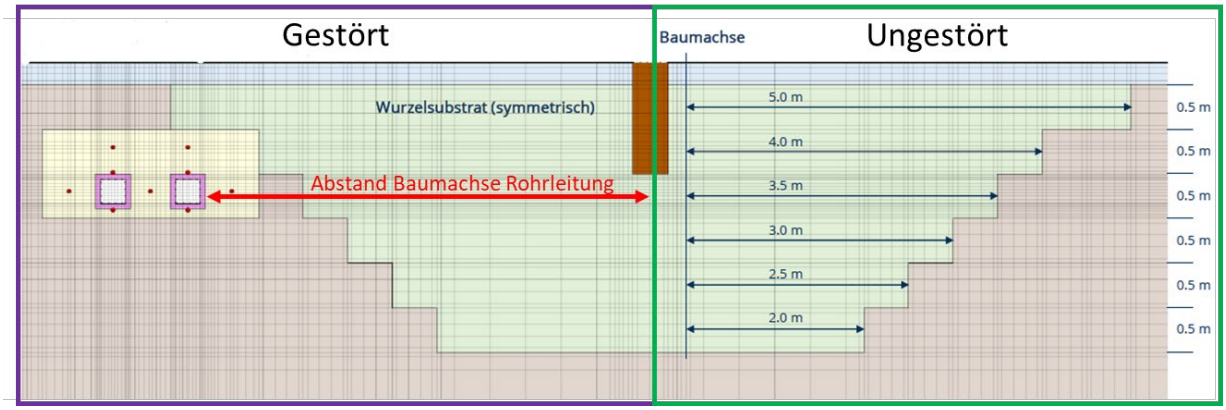


Abbildung 7: Simulationsmodell für die Variantenberechnungen

Aufgrund des nicht im numerischen Modell berücksichtigten Schwerkrafteinflusses und des damit einhergehenden „Wasserstaus“ über der Sandbettung (siehe Abbildung 9), treten im gestörten Bereich leicht höhere Feuchtigkeitswerte auf als auf der ungestörten Seite. Dies erweckt den Anschein, dass der Vegetation durch die Sandbettung mehr Wasser zur Verfügung steht als im Substrat, was aus unterschiedlichen Gründen unrealistisch ist. Um die Einschränkungen des Simulationsmodells berücksichtigen, wurde die Simulation zusätzlich on einem Modell komplett ohne Sandbettung durchgeführt. Das Verschieben der Rohrleitungen ohne entsprechende Sandbettung (entspricht einer modellierten Leitungsbettung direkt in Wurzelsubstrat) wird in den Ergebnissen als „kein Sandbett“ bezeichnet. Da sich in diesen Simulationen die „gestörte“ und „ungestörte" Seite nur noch durch die Fernwärmeleitungen und deren Wärmeeintrag unterscheiden, sind die Ergebnisse auch nicht von der Grabengeometire und der spezifischen Eigenschaften des Bettungsmaterials beeinflusst. Ausgewählte Simulationsergebnisse sind in den folgenden Abbildungen zu sehen, die jeweiligen Eigenschaften sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1: Übersicht zu Ausprägungen der Variante 1

Variante	Bettung	Abstand Rohr/ Vegetation	Zeitpunkt	Fern-wärme	Abbildung
1.1	Komplettes Sandbett	5 m	September (min Feuchte)	Inaktiv	Abbildung 8
1.2	Komplettes Sandbett	5 m	März (max. Feuchte)	Inaktiv	Abbildung 9
1.3	Komplettes Sandbett	5 m	September (min Feuchte)	Aktiv	Abbildung 10
1.4	Komplettes Sandbett	1 m	September (min Feuchte)	Aktiv	Abbildung 11
1.5	Kein Sandbett	1 m	September (min Feuchte)	Aktiv	Abbildung 12

In **V 1.1** (siehe Abbildung 8) ist zu sehen, dass allein durch den Leitungsgraben, leichte Unterschiede im Feuchtegehalt zwischen linker (gestörter) und rechter (ungestörter) Substratseite auftreten. Die leichte Überhöhung im feuchten Zeitraum ist dadurch zu erklären, dass sich die Feuchte im Modell oberhalb des Sandbereichs staut. Dies ist in der feuchteren Winterperiode deutliche in **V1.2** (siehe Abbildung 9) zu sehen. Die Unterschiede liegen dabei in einem Bereich kleiner ein Volumenprozent.

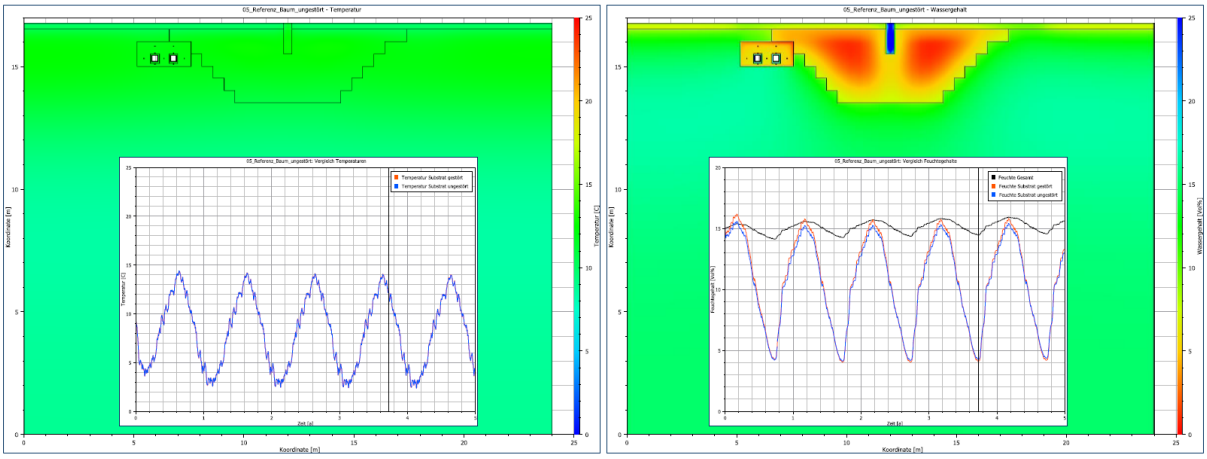


Abbildung 8: Simulationsergebnisse Variante 1.1, Temperatur (links), Feuchtegehalt (rechts)

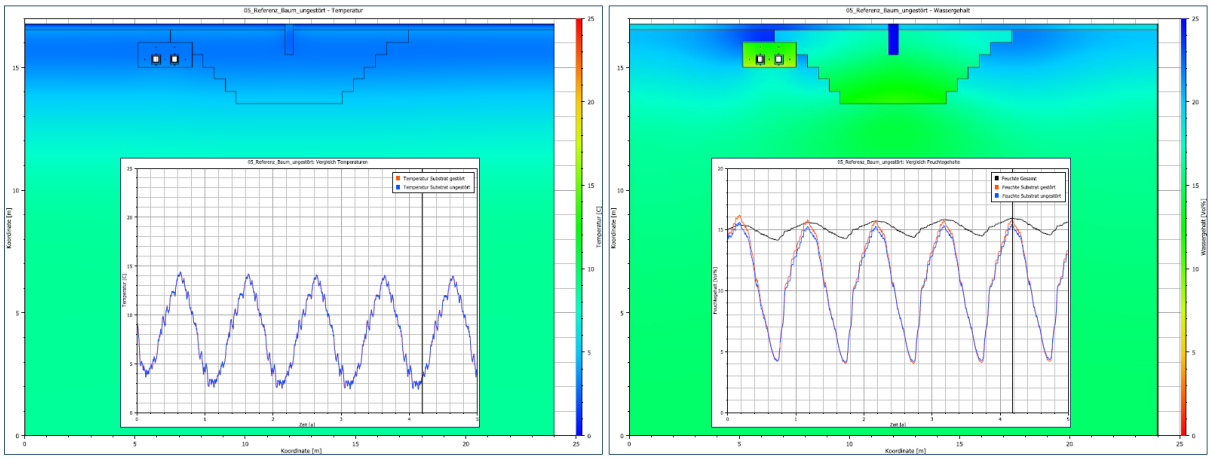


Abbildung 9: Simulationsergebnisse Variante 1.2, Temperatur (links), Feuchtegehalt (rechts)

Wird die Fernwärmeleitung nun aktiviert **V 1.3** (siehe Abbildung 10) erkennt man, dass die mittlere Temperatur im Substrat auf der Fernwärme zugewandten Seite bis zu 2 K höher liegt als auf der abgewandten. Im Vergleich zu V 1.1 ist in V 1.3 auch die abgewandte Seite rund 0,5 K höher. Der Feuchtegehalt ist im Minimum von V 1.3 auf der gestörten Seite rund 0,05 Vol% geringer als in V 1.1, der Peak im Maximum verschwindet hingegen. Der Vergleich des Feuchtegehalts auf der ungestörten Seite von V1.1 und V 1.3 zeigt hingegen keine nennenswerten Differenzen. Die Ergebnisse entsprechen den Erwartungen aufgrund des bisherigen Simulationsergebnisse und werden ebenfalls als entsprechend unkritisch gesehen, da weder die Bodenfeuchte noch die Temperaturen in kritische Bereiche kommen.

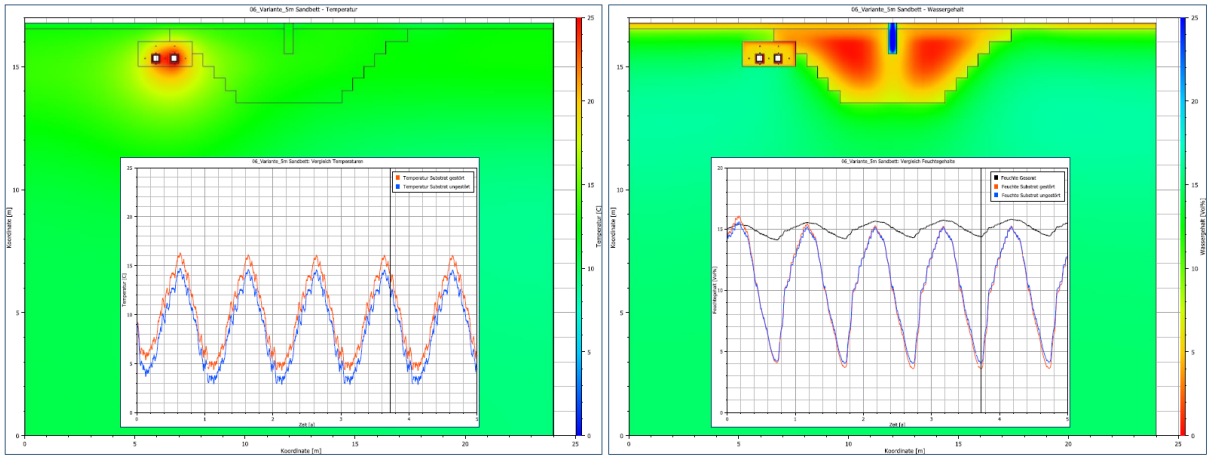


Abbildung 10: Simulationsergebnisse Variante 1.3, Temperatur (links), Feuchtegehalt (rechts)

In **V 1.4** (siehe Abbildung 11) beträgt der Abstand zwischen Vegetation und Fernwärmeleitung einen Meter und die Rohrleitungszone ersetzt teile des Wurzelsubstrates durch Sand. Im Vergleich zu V 1.1 sind die mittleren Temperaturen im gestörten Substrat durchgehend um

rund 5 K höher, erreichen aber außerhalb der Rohleitungszone nur nach unten Temperaturen knapp über 20°C. Der Feuchtegehalt ist entgegen der Erwartung im gestörten fall durchgängig höher als im ungestörten Fall, was allerdings erneut auf die Grenzen des Simulationsmodells zurückzuführen ist. Der Feuchtegehalt bezieht sich immer auf die Menge an Wasser pro Volumen des Erdreichs, wobei auch der Niederschlagseintrag auf das Volumen bezogen wird und dadurch eine unrealistische Verteilung der Wassermenge auf ein kleineres Volumen vermieden wird. Durch die Stauung über dem Sandbereich, der für die Auswertung des Wassergehalts im Wurzelsubstrat nicht berücksichtigt wird, ist das Substrat oberhalb des Rohrleitungsgrabens im Modell feuchter als in der Realität. Das Einbringen von Sand ist entsprechend kein Mittel, um dem Austrocknen des Erdreichs zu begegnen.

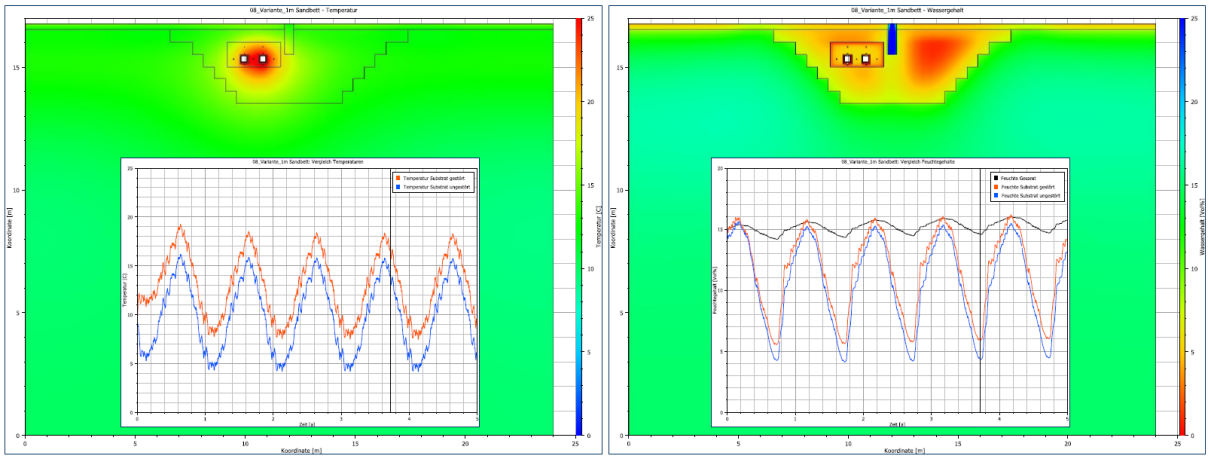


Abbildung 11: Simulationsergebnisse Variante 1.4, Temperatur (links), Feuchtegehalt (rechts)

Der Einfluss der Sandbettung wird in **V 1.5** (siehe Abbildung 12) ausgeblendet, sodass hier primär die Unterschiede durch den Wärmeeintrag abgebildet werden sollten. Im Vergleich des Feuchtegehalts auf gestörter und ungestörter Seite sind keine relevanten Unterschiede zu erkennen. Die mittleren Temperaturen hingegen sind auf der gestörten Seite um rund 2 Kelvin höher als in V1.4. Dies lässt sich allerdings durch den direkten Kontakt zwischen Fernwärmeleitung und Wurzelsubstrat zurückführen, welches auch aufgrund des potenziell höheren Feuchtegehaltes im Vergleich zum Sand eine entsprechend höhere Wärmeleitfähigkeit aufweist. Dies führt zu einem besseren Wärmetransport und im Erdreich in Abbildung 12 auch durch ein größeres Wärmefeld bemerkbar macht.

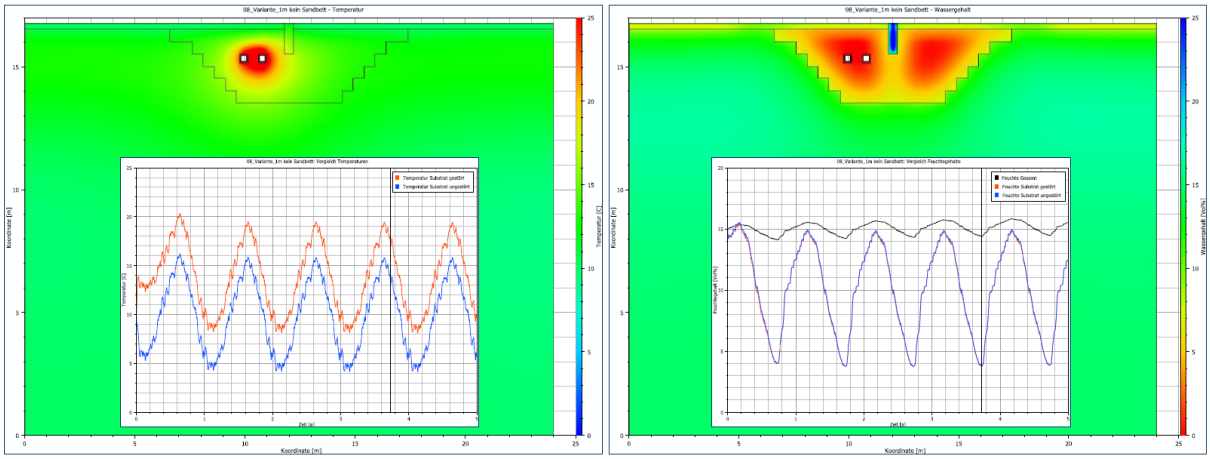


Abbildung 12: Simulationsergebnisse Variante 1.5, Temperatur (links), Feuchtegehalt (rechts)

Aus den Simulationsergebnissen geht hervor, dass sich der Abstand zwischen Vegetation und Fernwärmeleitung auf die durchschnittlichen Temperaturen im Wurzelbereich auswirken. Diese liegen aber in allen Konstellationen nicht in einem Bereich der bisher als kritisch für die Vegetation galt. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen der In-Situ Aufgrabungen in FW-Vegetation 1, bei denen auch keine Schäden an der Vegetation oder dem Wurzelwerk identifiziert werden konnten, die auf Wärmeeintrag zurückzuführen sind.

Wenn auch das exakte Wassertransportverhalten in Sand nicht direkt aus den Simulationsergebnissen abzuleiten ist, lässt sich doch erkennen, dass der Wärmeeintrag keinen massiven Unterschied zwischen gestörtem und ungestörtem Bereich verursacht, weder mit noch ohne Sandbettung. Ohnehin eignet sich Wurzelsubstrat besser für die Speicherung von Wasser und die Versorgung der Vegetation, weshalb der Bettungsbereich der Rohrzone (nach [8] mindestens ein Bereich von 0,1 m um die Ummantelung herum) hier nicht ausschlaggebend sein sollte.

2.4.2 Variante 2: Größere Nennweite und Variante 3: höhere Dämmserie

Zwei beinflussbare Faktoren von Fernwärmeleitungen, die sich auf den Wärmeeintrag von Fernwärmeleitungen in das Erdreich auswirken können, sind die Nennweite und die Dämmserie der Fernwärmeleitung (für geometrische Daten siehe auch [9]). Für die Simulation wurden vier Varianten, die Nennweiten DN 300 und DN 500 jeweils in Dämmserie 1 und Dämmserie 2, genutzt. Die rechnerischen Dämmstärken, die sich aus minimalen Wanddicken des PE Mantels und Außendurchmesser des Stahlmediumrohres nach [9] errechnen lassen sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2:Errechnete Dämmstärke nach min. Vorgaben aus [9]

Dämmstärke	Dämmserie 1	Dämmserie 2
DN 300	57,9 mm	82,9 mm
DN 500	93,8 mm	138,8 mm

Die Simulation wurde nur in der Dimension und Dämmserie angepasst und sonst mit den gleichen Betriebsparametern und Randbedingungen wie die Simulation im vorherigen Kapitel 2.4 durchgeführt. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Nennweiten und Dämmstärken auf die Temperatur am Außenmantel sind im Vergleich zur bisherigen Geometrie (DN 300 Dämmserie 1, schwarze Kurve DS1_DN300) in Abbildung 13 und Abbildung 14 dargestellt.

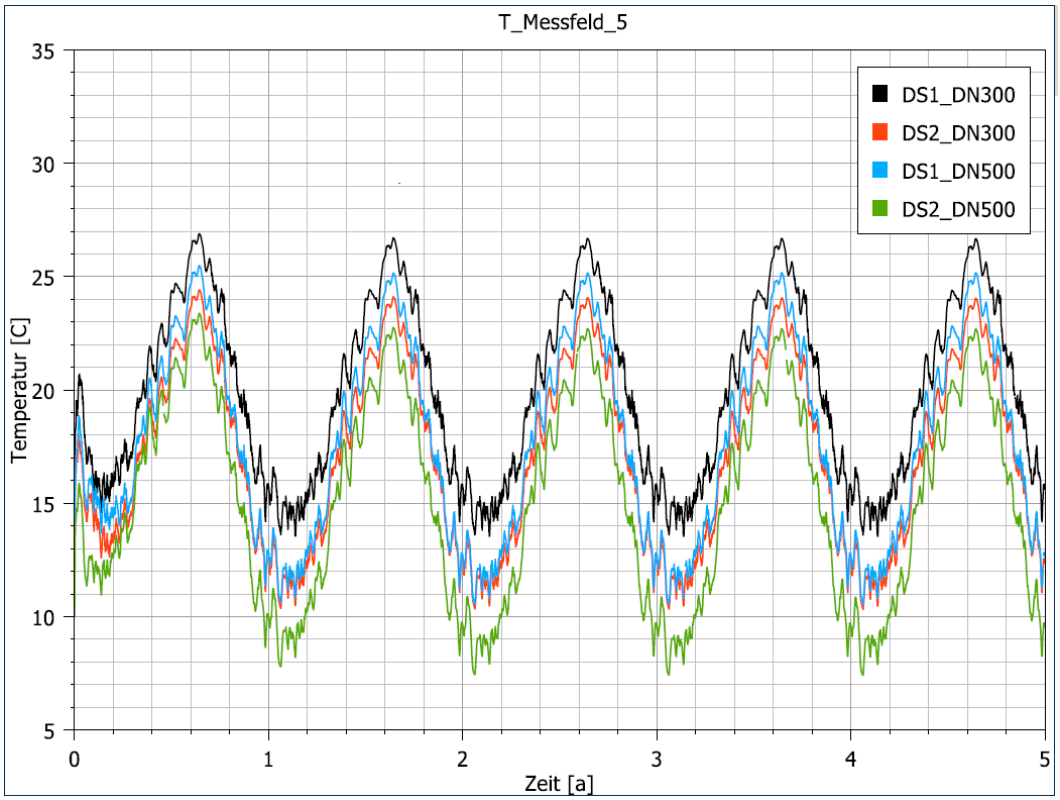


Abbildung 13: Ausgabe des Temperaturverlaufs des Sensors direkt auf dem PE-Mantel (12 Uhr)

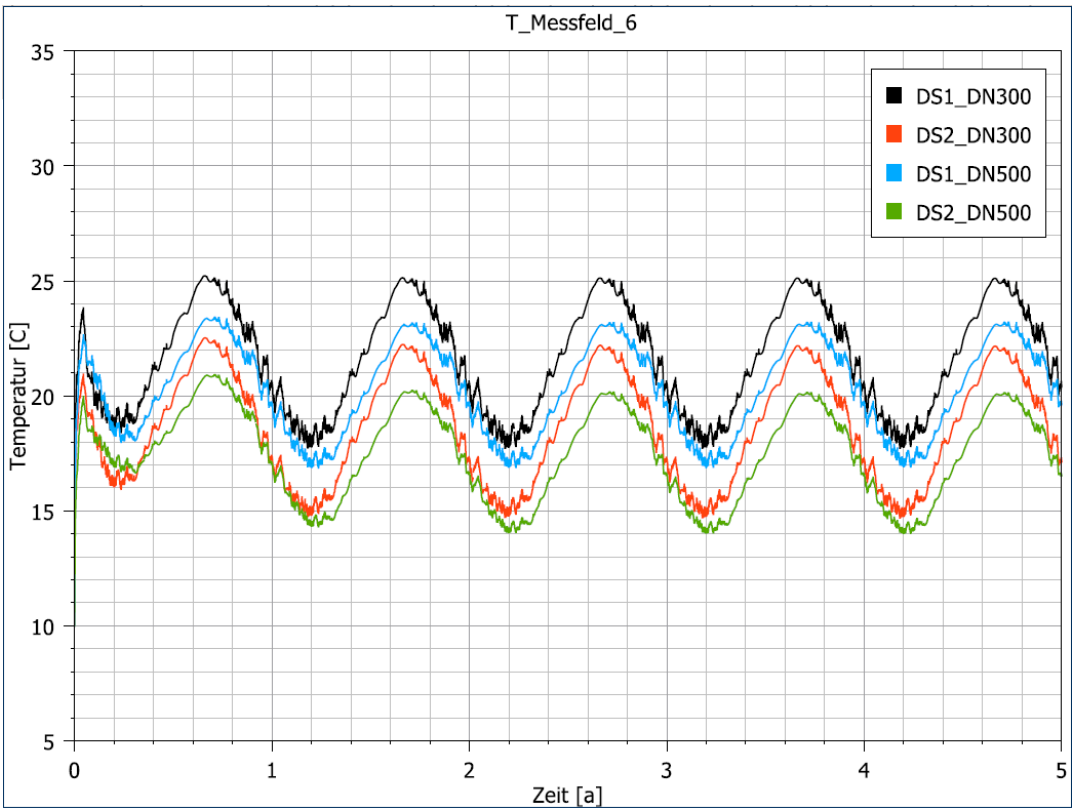


Abbildung 14: Ausgabe des Temperaturverlaufs des Sensors direkt unter dem PE-Mantel (6 Uhr)

Wie in Abbildung 13 und Abbildung 14 zu sehen ist, treten die höchsten Temperaturen bei der vorherigen Ausgangsvariante DN 300, Dämmserie 1 auf. Es erscheint so, als ob die bei diesem Nennweitensprung auftretende Vergrößerung der Rohroberfläche (aufgrund des größeren Durchmessers) von den nach [9] steigenden Dämmstärken kompensiert wird. Dieser Effekt verliert sich erst oberhalb der Nennweite DN 500, von wo an die Dämmstärke nicht mehr mit dem Durchmesser ansteigt [10]. Aus den bisherigen Ergebnissen der Forschungsreihe FW-Vegetation ist im untersuchten Nennweitenbereich die Notwendigkeit von höheren Dämmstärken zum Schutz des Baumes nicht erkennbar. Die maximalen Temperaturen der Simulationsergebnisse liegen deutlich unter 30°C und auch in den „Wärmeversuchen mit Pflanzen in „FW-Vegetation 1“ [5] wurde bei Temperaturen von 36°C keine Beeinträchtigung der Vegetation festgestellt. Im Temperaturverlauf zeigt sich auch, dass die Temperatur oberhalb (12 Uhr) stärker dem Verlauf der Umgebungstemperatur oberhalb des Erdreichs ähnelt als der Temperatursensor unterhalb der Rohrleitung (6 Uhr). Dennoch sind auch in Abbildung 13, nach einer Einschwingphase, in den Sommermonaten höhere Temperaturen ersichtlich (die Zeitspanne zwischen einem Zeitschritt bspw. von 0 – 1 entspricht einem Kalenderjahr von 01.01.-31.12.).

Die Verringerung der Temperaturen am Außenmantel zwischen Dämmserie 1 und Dämmserie 2 beträgt nach den Simulationsergebnissen maximal ca. 3 K. In der Praxis steigen

die Kosten bei den höheren Dämmstärken. Nach [10] liegen insgesamt die Mehrkosten für eine auf Dämmstärke 2 erhöhte Dämmdicke (inklusive Verlegung, Nachisolierung, Material, Oberfläche, Aushub, Verbau, Verfüllung) bei +11,6 %. Auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse ist eine solche höhere Investition zum Schutz des Baumes vor der Abwärme nicht zielführend. Des Weiteren ist auch zwingend zu berücksichtigen, dass eine größere Dämmstärke mit einer Vergrößerung des Rohrdurchmessers einhergeht, weshalb auch eine größere Grabenbreite für den Einbau notwendig ist. Dies bedeutet an Baumstandorten, dass ggf. die Bauarbeiten näher am Baum stattfinden müssen und der größere Platzbedarf für die Rohrleitungen dazu führt, dass weniger Wurzelraum mit entsprechenden Substraten zur Verfügung stehen könnte.

2.4.3 Variante 4: Reduzierung der Vorlauftemperaturen

Eine weitere mehr oder minder direkt beeinflussbare Größe sind die Medientemperaturen mit denen die Fernwärmesysteme betrieben werden. Kunststoffmantelrohre, die üblicherweise nach [4] ausgelegt und für Spitzentemperaturen von bis zu 140 °C (für höchstens 300 h/a) geeignet sind, werden heutzutage häufig mit niedrigeren Vorlauftemperaturen betrieben. Zum vereinfachten Einbinden von Erneuerbaren Wärmequellen und zur Reduzierung der Wärmeverluste, versuchen Fernwärmeversorgungsunternehmen die Vorlauftemperaturen möglichst gering zu halten bzw. diese perspektivisch zu reduzieren. Eine Möglichkeit ist die gleitend-konstante Netzfahrweise, bei der nach [7] die Netzvorlauftemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur eingestellt und zusätzlich ein Mindestwert nicht unterschritten wird. Die bisherigen Simulationen wurden nach realen Betriebsdaten, im Netzabschnitt der Messstelle berücksichtigt, welche im Vorlauf zwischen 80 – 120 °C liegen. Die Rücklauftemperatur wurde konstant mit 50 °C angenommen, was, entsprechend den technischen Anschlussbedingungen, die maximale Rücklauftemperatur bei den Kundenanlagen sein soll.

Als Variante des Modells wurde in der Simulation ein geringeres Temperaturband zwischen 70 – 100 °C, bei einer konstant angenommenen Rücklauftemperatur von 40 °C, gewählt. Wie in Abbildung 15 dargestellt unterscheiden sich die Temperaturen am PE-Außenmantel an der Rohroberkante (12 Uhr) minimal zwischen den Nennweiten DN 300 und DN 500. Im Vergleich mit den bisherigen Betriebstemperaturen der DN 300 Leitung (vgl. Abbildung 13 und Abbildung 14) reduziert sich die am virtuellen Temperatursensor auf dem KMR ausgegebenen Daten um ca. 1,5- 2 K und unterhalb (6 Uhr) um 1-2 K durch die Verringerung der Betriebstemperatur.

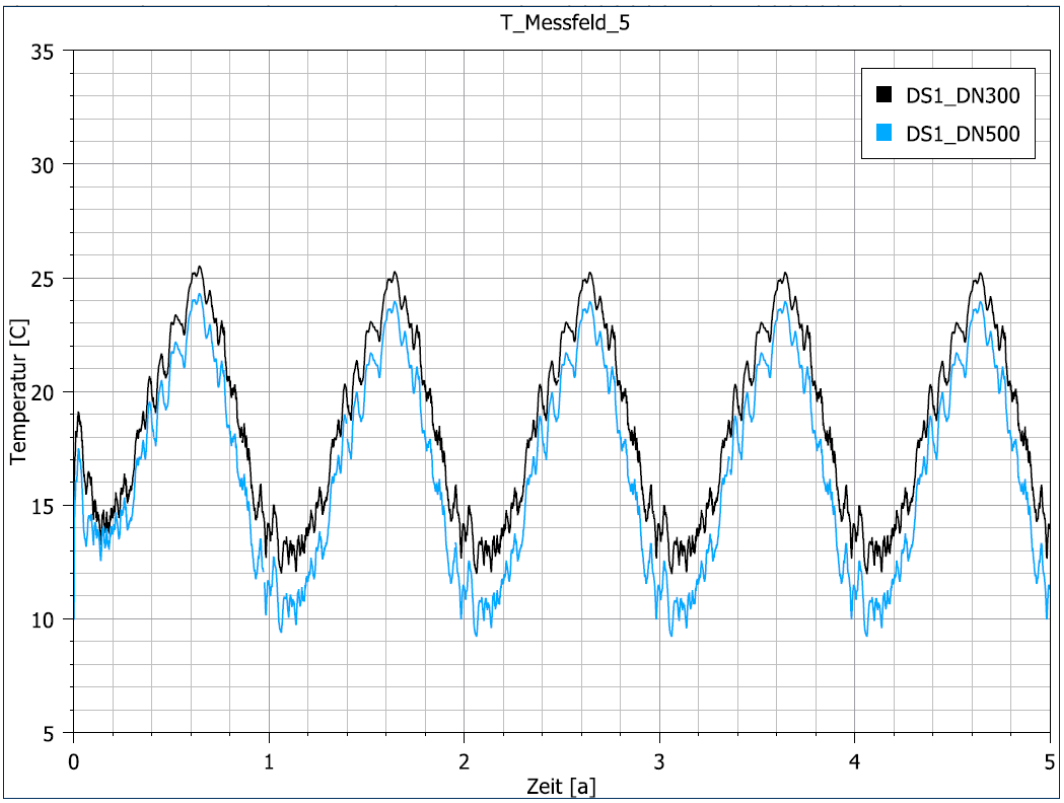


Abbildung 15: Ausgabe des Temperaturverlaufs des Sensors direkt auf dem PE-Mantel (12 Uhr) mit reduzierten Betriebstemperaturen

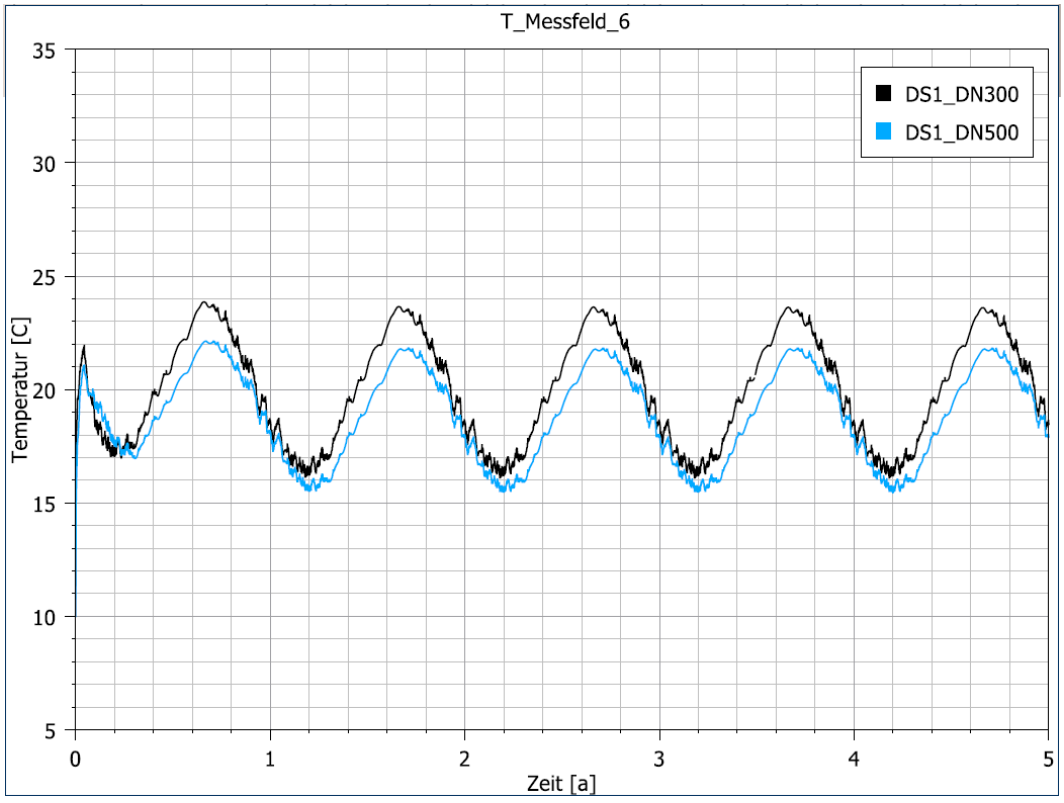


Abbildung 16: Ausgabe des Temperaturverlaufs des Sensors direkt auf dem PE-Mantel (06 Uhr) mit reduzierten Betriebstemperaturen

Die Auswirkungen der reduzierten Vorlauftemperaturen liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die Erhöhung der Dämmstärke und haben keinen massiven Einfluss auf die Außentemperatur der Fernwärmeleitung und scheinen für den Schutz des Baumes vor den Wärmeeintrag auch von untergeordneter Bedeutung zu sein. Die Motivation für die Tendenz Vorlauftemperaturen zukünftig zu reduzieren, wird eher durch andere Randbedingungen und Zielstellungen vorangetrieben, weshalb erwartet wird, dass sich zukünftig die Temperaturen in und dann auch außerhalb der Fernwärmeleitung eher reduzieren.

2.5 Rammsondierung

Im Rahmen der Forschungsreihe wurden in den Jahren 2019 und 2023 leichte Rammsondierungen, zur Bestimmung der Lagerungsdichte, im Versuchsfeld durchgeführt. Erstmalig geschah dies nach Abschluss der Baumaßnahme 2019. Im Ergebnis wurde durchweg eine sehr lockere bis lockere Lagerungsdichte festgestellt, was sich auch bei den Wiederholungsversuchen 2023 nicht verändert hat.

Die Schlagzahlen n10 der leichten Rammsondierung variieren innerhalb der Leitungszone zwischen 1 und 23 (2019 zwischen 2 und 23). In der Verfüllung oberhalb der Leitungszone schwanken die Schlagzahlen zwischen 3 und 16. An zwei Messpunkten aufgetretene erhöhte Schlagzahlen bis 34 können auf ein Hindernis in Form eines Steins zurückzuführen sein. Wobei eine dieser Messungen auf einen möglichen Messfehler hindeutet und seitens der Experten entsprechen aus der Bewertung genommen wurde.

Insgesamt stellen sich leichte Veränderungen im direkten Vergleich der Rammsondierungen 2019 und 2023 dar. In der Verfüllung oberhalb der Leitungszone lagen die Schlagzahlen im Durchschnitt zwei bis drei Schläge unter den ermittelten Schlagzahlen im Jahr 2019. In der Leitungszone waren die Schlagzahlen um durchschnittlich zwei Schläge höher. Diese Tendenz spricht dafür, dass sich der mit Wurzelsubstrat verfüllte Bereich oberhalb der Leitungszone nicht verdichtet hat (beispielsweise durch Setzungen) und weiterhin als lockerer (porenreicher) Wurzelraum geeignet ist. Die leicht höheren Schlagzahlen in der Leitungszone deuten darauf hin, dass dieser Bereich weiterhin eine höhere Lagerungsdichte als oberhalb besitzt, was das Wurzelwachstum gegebenenfalls aus diesem Bereich heraushält, was ein weiterer Grund für die weitestgehend nicht durchwurzelten Leitungszone der Aufgrabungen in FW-Vegetation 1 sein kann. Beispielhaft sind in Abbildung 17 die ausgezählten Schläge für einen Eindringtiefe von 10 cm zu sehen.

Wenn auch der direkte Vergleich der Rammsondierungen 2019 und 2023 Abweichungen aufweist, zeigen die Ergebnisse aber in beiden Fällen eine sehr lockere bis lockere Lagerungsdichte im Untergrund. Dies deute nicht auf größere Setzungen hin, auf die auch an der Oberfläche keine Anzeichen hindeuten.

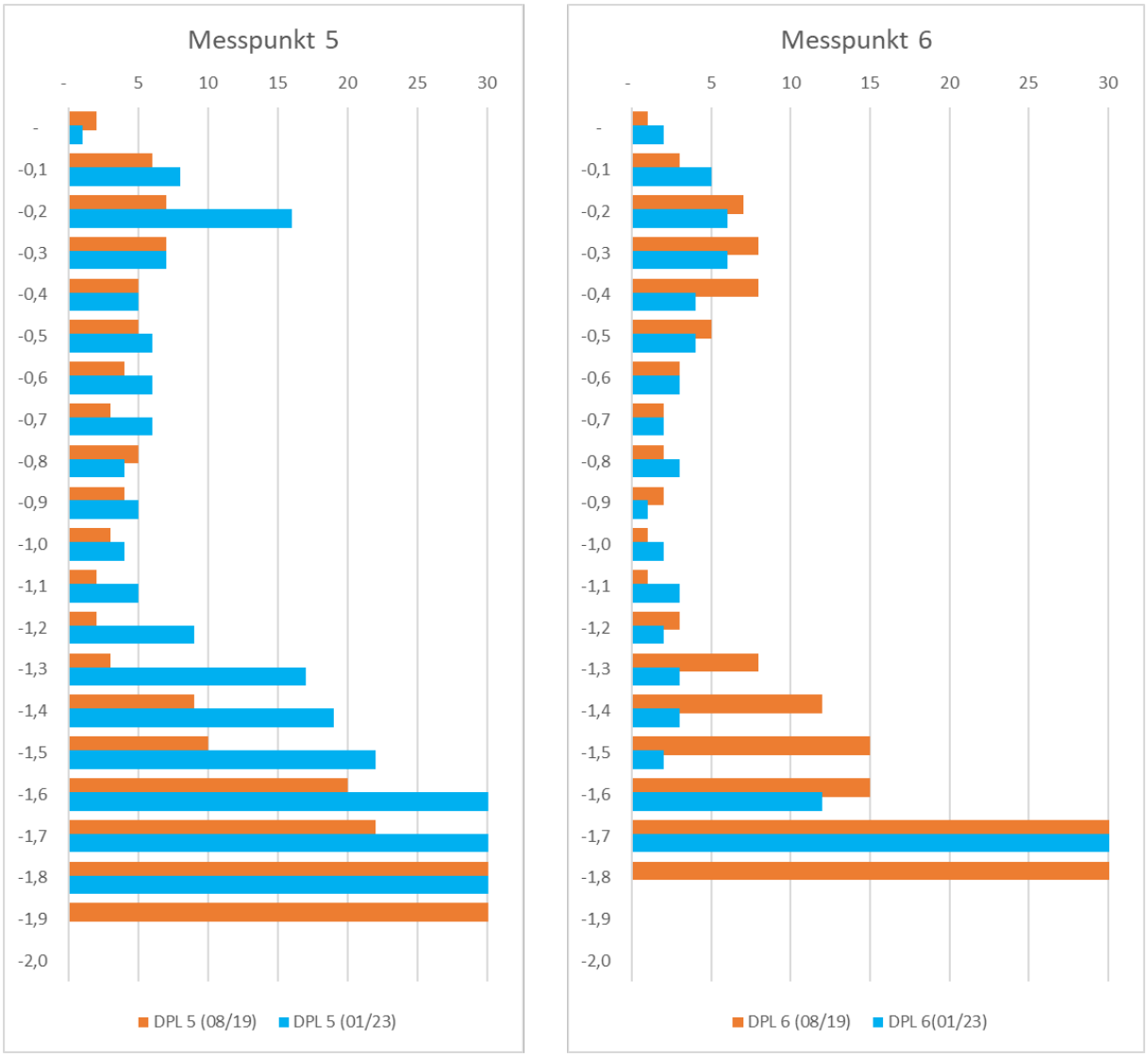


Abbildung 17: Anzahl Schläge der leichte Rammsondierung für 10 cm Tiefe (2019 orange, 2023 blau), Werte >30 Schläge sind in der Darstellung abgeschnitten

3 Bonitur von Vegetation

Unter Bonitur (Bonitierung) wird die fachgerechte, qualitative Beurteilung landwirtschaftlicher oder gartenbaulicher Betrachtungsobjekte verstanden (siehe auch Kapitel 3.2). Die Bonitur erfolgt immer im Vergleich, entweder zu einem vorher festgelegten Standard oder im direkten Vergleich zu einer Vergleichspflanzung. Am Standort Frankfurt Riedberg sind die Vergleichsbasis die Bäume der leitungsfernen Straßenseite, die mit denen der leitungsnahen Seite verglichen wurden (siehe Kapitel 4). Das gewählte Setup soll mögliche Unterschiede in der Entwicklung der Bäume möglichst genau erfassen. Am Standort Chemnitz steht Vegetation (auch aus Bestand) unmittelbar auf und an der Fernwärmetrasse (siehe Kapitel 5). Die individuellen Randbedingungen von Vegetationsstandorten erlauben es allerdings nicht, die ermittelten Daten mit denen von ganz anderen Standorten unmittelbar zu vergleichen.

3.1 Motivation Hintergrund Ausgangslage

Wie in Wärmeversuchen mit Pflanzen (siehe [5] Kapitel 4.1 Wurzelwachstumsverhalten – Einfluss Fernwärme auf Wurzel) in 2020 im botanischen Garten der Ruhr Universität ergaben keine Anhaltspunkte für einen Einfluss von Fernwärmeleitungen auf das Wachstum von Bäumen. Allerdings wurden die Experimente in optimalem Substrat und mit schnell wachsenden Weiden durchgeführt. Das ermöglichte Ergebnisse in vergleichsweise kurzer Untersuchungszeit (2 Vegetationsperioden) und eine detaillierte Analyse des Wurzelverlaufs. Ein Einfluss von Temperaturgradienten im Boden auf das Wurzelwachstum oder die Vitalität der Pflanzen konnte dabei nicht festgestellt werden. Allerdings kann gegen diese Versuche ins Feld geführt werden, dass die Versuchsdauer relativ kurz war und dass Weiden nicht die Arten sind, die als Stadtbäume gepflanzt werden.

An den bisherigen (im Forschungsvorhaben FW-Vegetation 1 durchgeführten) Untersuchungen und Aufgrabungen, an Interaktionsstellen zwischen Fernwärmeleitungen und Bäumen, konnten keine durch Wärme induzierten Einflüsse auf die Vitalität der Vegetation festgestellt werden. Die Vitalität des Baumes kann allerdings von zahlreichen Parametern (bspw. Baumart, Bodenverhältnisse, Verschattung, Wurzelraum, etc.) beeinflusst werden und für den direkten Vergleich standen bisher meist nur wenige Vergleichsbäume zur Verfügung, die sich zusätzlich noch in Alter, Art und Standortverhältnissen unterschieden. Um generell den Einfluss eines einzelnen Parameters zu untersuchen, bedarf es einer Referenz, die ansonsten weitestgehend ähnlichen Randbedingungen unterworfen ist. Randbedingungen, die nicht direkt zu beeinflussen oder zu bestimmen sind, können in manchen Fällen durch eine hohe Stichprobenanazahl kompensiert werden.

Für die Fragestellung, ob und wie Stadtbäume auf Wärmeeintrag durch Fernwärmeleitungen reagieren, konnte im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsvorhabens das Stadtgebiet

Frankfurt – Riedberg (siehe Kapitel 4) untersucht werden. Außerdem wurde der in FW-Vegetation 1 errichtet Feldversuch in Chemnitz (siehe Kapitel 5) weiter betreut und ebenfalls bonitiert. Nachfolgend sind die Grundlagen einer Bonitur kurz dargestellt.

3.2 Wichtige Stationen und Zeitpunkte der Bonitur

3.2.1 Laubaustrieb

Bei Baumarten mit tendenziell frühem Austrieb sollten sich eventuell vorhandene Temperaturunterschiede im Boden besonders stark auswirken. Dabei ist es unbedeutend, ob der Austrieb mit den Blüten (Spitzahorn) oder mit dem Laub (Bergahorn) beginnt.

Tritt ein eher gleichmäßiger Austrieb in kurzer Zeit auf ist dieser rascher, auffallender und deswegen leichter zu dokumentieren. Viele Arten beginnen mit dem Austrieb unten und innen in der Krone und schreiten dann nach oben und Außen fort. Unter Umständen kann es deswegen wichtig sein, sich auf gleiche Höhe für die Dokumentation zu beziehen. Der Höheneffekt ist i.A. kleiner bei insgesamt raschem Austrieb und außerhalb geschlossener Bestände (also im Straßenraum). Bei Gehölzen, z.B. Säulen- oder Kugelformen ist der Kronenraum geringer und Positionseffekte deswegen meist ebenfalls geringer. Sie können in die Analyse mit einbezogen werden, dürfen aber nicht mit anderen Sorten oder der Wildart verglichen werden.

Der beginnende Austrieb ist relativ gut zu erkennen, wenn die Knospe aus vielen Knospenschuppen aufgebaut ist und sich die Knospenschuppen an der Basis strecken (Carpinus, Quercus). Der neu gebildete Teil ist dann hellgrün oder gelblich. Bei Arten, bei denen die Knospe nur aus ein bis zwei Schuppen gebildet wird (Linde, Weide) findet oft keine Streckung der Schuppen statt und sie werden nur auseinandergedrückt und fallen dann ohne nennenswerte Vergrößerung ab. Die vor dem Anschwellen der Knospen verdeckten Bereiche sind aber meist an ihrer glatteren und auch etwas helleren Oberfläche zu erkennen (Bereich zwischen den Pfeilen in Abbildung 18 b).

Abbildung 18: Die beginnende Knospenöffnung ist bei der Hainbuche (links) und der Linde (rechts) an den hellen Bereichen zu erkennen, die in der geschlossenen Winterknospe von darüber liegenden Knospenschuppen verdeckt waren.

Es ist unwichtig, ob genau ein bestimmtes Stadium erwischt wird oder nicht. Relevant ist nur, ob das Entwicklungsstadium auf (oder nahe) der Leitung dem leitungsfernen im selben Straßenzug entspricht oder nicht. Die verglichenen Äste und Knospen sollten etwa gleich stark und in vergleichbarer Position im Baum sein, da der Austrieb häufig von innen in der Krone zur Peripherie der Krone erfolgt.

Abbildung 19: "Mausohrstadium und beginnende Knospenöffnung bei Birke

Viele Arten bilden ein charakteristisches „Mausohrstadium“. Die sich gerade öffnende Knospe rechts in Abbildung 19 ist aber zum selben Zeitpunkt am selben Zweig wie die am Triebende stehende Knospe im Mausohrstadium aufgenommen worden. Das zeigt, dass nur entsprechende Positionen verglichen werden dürfen. In der Praxis ist das aber einfacher, als es zunächst scheint, da die zu vergleichenden Bäume ja nur auf verschiedenen Straßenseiten stehen und Unterschiede im Austrieb dem geschulten Auge leicht auffallen. Das Beispiel zeigt aber auch, dass eine Fotodokumentation nicht besonders aussagekräftig sein muss, da der Datumsstempel und die Koordinaten nicht ausreichen, um die inhaltliche Vergleichbarkeit zu garantieren.

3.2.2 Abschluss der Laubentfaltung

Die Entfaltung des Neutriebes ist abgeschlossen, wenn die Blätter aus der Winterknospe entfaltet und glatt sind. Bei gut wachsenden Bäumen werden den Sommer über weitere Blätter gebildet und die Triebe damit verlängert. Diese Phase ist aber besser in der nicht belaubten durch Vergleich der Trieblängen des Neuzuwachses zu ermitteln. Außer in Fällen extremer Schädigung (Bruchgefahr durch Totäste) kann eine Boniterung im Sommer daher keine zusätzlichen Erkenntnisse liefern.

3.2.3 Öffnung der Blütenknospen bis zur vollen Blüte

Vor allem bei Arten, bei denen die Blüte der Laubentfaltung vorauseilt, ist der Blütenaustrieb ein gut zu ermittelndes Boniturkriterium. Der Austrieb der Blüten und Blütenstände erfolgt oft deutlich rascher als der nachfolgende Laubaustrieb. Da das Zeitfenster für die Bonitur deswegen deutlich kleiner ist, ist es wichtig, durch stichprobenartige Kontrollen den richtigen Zeitpunkt der Bonitur genau zu erwischen. Das kann nur durch eine Person leisten, die zur Bonitur mehr oder weniger permanent vor Ort ist und über viel Erfahrung verfügt.

3.2.4 Laubfall

Verfrühter oder verspäteter Laubfall ist leichter zu erfassen als bei Arten, die ihr Laub teilweise über den Winter behalten (z.B. Stiel- oder Trauben-Eiche, nicht aber Rot-Eiche)

Weisen Baumarten eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Trockenheit auf sollten sich etwaige Wasserverluste, in Folge von Bodenerwärmung durch die Fernwärmeleitung, dann stärker bemerkbar machen. Dabei ist zu beachten, der durch Trockenheit verursachte Laubfall häufig nach Ende der Trockenperiode verstärkt einsetzt, denn in der Phase des Wassermangels selbst kann oft das Abszissionsgewebe (Trennungsgewebe) für den Laubfall nicht mehr vollständig ausgebildet werden, so dass der Laubfall verspätet eintritt. Sollte ein sehr trockener Sommer auftreten, könnte insgesamt ein trockenheitsbedingter, teilweiser früher Laubfall einsetzen. Dieser beginnt mit den proximalen Blättern der Triebe und setzt bei manchen Arten erst ein, wenn die Trockenheit durch die ersten Regenfälle unterbrochen oder beendet wird. Die Schäden werden dann erst erkennbar, wenn das Problem schon vorbei zu sein scheint.

Bei Arten, die vor dem Laubaustrieb blühen (z.B. Acer platanoides) bringt es nichts, den Laubaustrieb zusätzlich zu protokollieren. Kommt die Blüte mehr (Tilia) oder weniger spät (Acer pseudoplatanus) nach dem Laubaustrieb, ist ein veränderter Blütezeitpunkt durch die Wärmeleitung theoretisch denkbar. Es ist aber wenig wahrscheinlich und auch schlechter erfassbar, da die Sicht auf die Blüten durch das Laub mehr oder weniger stark eingeschränkt ist.

3.2.5 Weitere Merkmale / Infos zur Durchführung

In Blüte- und Laubfallzeiten sollen wöchentliche Begutachtungen durchgeführt werden hinsichtlich der Vitalität und Periodizität der Bäume. Etwaige Beeinflussungen, wie z.B. verspäteter Laubfall oder verfrühtes Blühen, werden detailliert dokumentiert. Diese Begutachtungen müssen keine vollständigen Bonitierungen sein. Sie dienen eher dazu, zu ermitteln, ob eine zusätzliche Bonitierung sinnvoll ist und welches Merkmal bonitiert werden soll. Im Zusammenhang mit der Erfassung der Spät- oder Sommerblüher (Ahorn bzw. Linde) wird auch die Kronendichte erfasst, da sie ein gutes Merkmal für den allgemeinen Zustand eines Baumes darstellt.

4 Visuelle Untersuchung Frankfurt Riedberg

4.1 Der Stadtbezirk Frankfurt Riedberg

Die Stadt Frankfurt am Main beschloss 1996 den Entwicklungsbereichs „Am Riedberg“, der entsprechende Bebauungsplan wurde am 29.08.2000 rechtsverbindlich genehmigt und 2017 endete die städtebauliche Entwicklungsmaßnahme [11]. In den letzten Jahren sind hier zahlreiche Neubauten entstanden, die zum größten Teil mit Fernwärme versorgt werden. Weitestgehend wurden die Straßen mit alleenartigen Baumreihen entlang der Bebauung versehen. Die Fernwärmetrassen wurden frühzeitig verlegt und befinden sich heute weitestgehend auf einer Straßenseite unter Gehwegen oder dem Straßenrand. Dies führt dazu, dass die Leitungen teilweise sehr nahe an Baumstandorten verlaufen, in der Regel aber nur auf einer Straßenseite (siehe Abbildung 20).

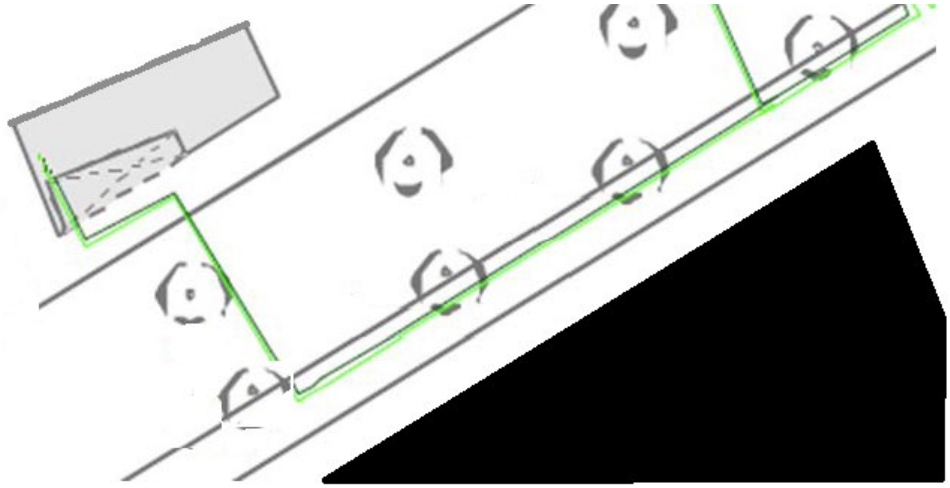


Abbildung 20: Skizze nach Planungsunterlagen Mainova AG

Im Rahmen einer Begehung des Stadtbezirks im Oktober 2020 konnte festgestellt werden, dass nahezu in jeder Straße eine andere Baumart eingepflanzt wurde, innerhalb einer Straße beidseitig aber immer die gleiche Baumart vorzufinden ist. Letzte Baumaßnahmen wurden 2020 noch durchgeführt. Der Leitungsbetrieb und die Bepflanzung der Straßen interagieren, nach Auskunft des regionalen Versorgers schon einige Jahre parallel. Die besondere Bepflanzung des Stadtgebietes kann im Baumkataster der Stadt Frankfurt (siehe Abbildung 21) eingesehen werden. Innerhalb eines Straßenzuges ist überwiegend eine einzige Baumart gepflanzt, nahe beieinander liegende Straßenzüge sind jeweils mit verschiedenen Arten bepflanzt, so dass sich eine gleichartige Bepflanzung i.d.R. erst einige Straßenzüge weiter wiederholt.

Für eine systematische Analyse im Rahmend des Forschungsvorhaben wurden in einem ersten Schritt die verschiedenen Rahmenbedingungen (Baumalter, Baumart, Leitungsgröße,

Betriebsweise der Leitungen, Abstand Baum/ Leitung, etc.) erfasst und strukturiert. Hierfür standen, neben den Planungs- und Ausführungsunterlagen, auch Ansprechpartner des städtischen Grünflächenamtes und des Fernwärmeversorgungsunternehmens (Mainova AG) vor Ort zur Verfügung, wodurch auch zusätzliche Informationen (Besonderheiten von Standorten, Rückschnitte der Baumkrone, Einfluss durch Bauarbeiten etc.) berücksichtigt werden konnten.

Abbildung 21: Ausschnitt aus dem Baumkataster der Stadt Frankfurt, Bereich Riedberg [12]

4.2 Auswahl geeigneter Straßenzüge anhand der Planungsunterlagen

In einem ersten Schritt wurden der Trassenplan und das Baumkataster übereinandergelegt und alle alleenartig bepflanzten Straßenzüge ermittelt, bei denen einseitig eine Fernwärmetrasse (> DN 50) verlegt wurde. In den rund 30 ermittelten Straßenzügen wurden weitere Details zur Vegetation (Gattung, Anzahl, Pflanzjahr) und Fernwärmetrasse (Nennweite, Baujahr) ermittelt und die Abstände zwischen Leitung und Vegetation anhand der Planungsdaten abgeschätzt. Die zusammengestellten Planungsdaten wurden anschließend in drei Kategorien bewertet:

- Vegetation: Geeignete Gattung → visuelle Merkmale sichtbar, relevant als Stadtbaum
- Quantität: Mehr als 25 Bäume in einem Abschnitt mit einseitiger Fernwärmtrasse
- Geometrie:
  - Fernwärmeleitungen in großer Nennweite (>DN 250)
  - Geringe Abstände zwischen Leitung und Vegetation (<2,5m)

Seitens der Projektpartner konnten elf Abschnitte identifiziert werden, die „auf dem Papier“ als besonders geeignet für die geplanten Untersuchungen in Frage kamen. Für die finale Festlegung erfolgte eine vor Ort Begehung, zusammen mit dem zuständigen Experten des Grünflächenamtes und einer lokalen Baumsachverständigen.

4.3 Vor Ort Begehung zur Auswahl konkreter Standorte auf Basis biologische Gesichtspunkte

Bei einer gemeinsamen Begehung wurden geeignet erscheinende Straßenzüge ausgewählt. Ausgewählt wurden nur Straßen, die keine anderen erkennbaren verschiedenen Einflussfaktoren (unterschiedliche Bebauungsart, verschiedene Lichtverhältnisse etc.) auf beiden Straßenseiten aufwiesen und bei denen die Bäume in vergleichbar gutem Zustand auf beiden Straßenseiten zu sein schienen. Es wurde erwartet, dass ggf. auftretende Unterschiede sich besonders im Zeitpunkt des Austriebs, der Blütenöffnung (soweit die Blüte nicht der Laubentfaltung vorauseilt wie bei Spitzahorn) und dann wieder bei der beginnenden Herbstfärbung und dem Blattfall deutlich werden würde. Deswegen wurde in diesen Zeiten engmaschig Bonituren an den ausgewählten Baumabschnitten durchgeführt.

Final wurden fünf Abschnitte für eine umfassende Bonitur ausgewählt.

4.4 Ergebnisse der Bonitur

Bereits bei der Frühjahrsbonitur zeigten sich keine Unterschiede zwischen den beiden Straßenseiten. Im Gegenteil, die Unterschiede waren innerhalb einer Reihe (die eigentlich einheitlich sein sollte!) größer als zwischen der Reihe mit und ohne Fernwärmeleitung. So gab es vereinzelt in Reihen Bäume die gar nicht zur Blüte gelangten oder bei denen der Gipfelbereich keinen Austrieb zeigte.

Im Sommer 2022 gab es eine lang andauernde Trockenperiode, die vielen Gehölzen stark zu schaffen machte. Während der Trockenperiode gab es in geringem Umfang Verlichtungen und Laubfall vor allem im Inneren der Kronen. In dieser Phase war der Laubfall meist von einer Blattverfärbung begleitet, die schwächer ausgeprägt war als die typische Herbstfärbung. Als nach der Trockenphase wieder Regefälle einsetzten, hatte dies einen verstärkten Fall von grünem Laub zur Folge. Ähnliches war auch in den vorausgegangenen Jahren nach längeren Trockenphasen beobachtet worden. Es wird vermutet, dass die einsetzende extreme Trockenheit verhindert, dass das für den Laubfall verantwortliche Trennungsgewebe mangels der erforderlichen Assimilate ausgebildet werden konnte. Bei Einsetzen der Niederschläge wurde das Trennungsgewebe dann verspätet ausgebildet und führte zu Laubfall in einer Phase, in der der Höhepunkt des Trockenstresses bereits vorbei war. Die auf erhebliche

Schädigung hinweisende Abszission grüner Blätter ließ aber keinen Bezug zur Entfernung von Fernwärmeleitungen erkennen.

Auch in der Herbstbonitur waren die Unterschiede innerhalb der Baumreihen deutlich größer als zwischen fernwärmeleitungsnahen und -fernen Bäumen.

4.5 Schlussfolgerung

Man könnte zunächst aus den Ergebnissen schlussfolgern, Fernwärmeleitungen hätten generell keinen Einfluss auf das Wachstum von Bäumen. Dieser Schluss ist aber nicht zulässig. Das berühmte „Liebigsche Fass“ zur Erläuterung des Minimumfaktors verdeutlicht, dass derjenige Faktor, der sich im Minimum befindet, für die Limitierung des Wachstums verantwortlich ist. Die Untersuchungen belegen ganz klar, dass in den untersuchten Straßenzügen die Wasserversorgung der limitierende Minimum-Faktor ist. Ob dieser Mangel alleine durch mangelnde Bodenfeuchte zustande kommt, oder ob er eine sekundäre Folge von zu kleinen Pflanzgruben oder schlechtem Pflanzsubstrat ist, lässt sich ohne Aufgrabung nicht entscheiden. Klar ist hingegen, dass die Bodentemperatur nicht der limitierende Faktor für das Baumwachstum war. Ob die Bodentemperatur limitierender Faktor werden kann, lässt sich nur zeigen, wenn es gelingt alle anderen Faktoren im Optimum zu halten.

Abbildung 22: Nur die Wirkung des Minimumfaktors (kürzeste Daube) ist direkt beobachtbar. (Bildquelle: [13])

Im Gebiet Riedberg sind Bodengüte und Bodenfeuchte an vielen Stellen ganz offensichtlich sehr weit vom Optimum entfernt. Man kann deswegen ohne den Einsatz von Sensoren festhalten, dass es vor allem ergebnisrelevant ist, sich auf diese Faktoren zu konzentrieren, um eine qualitativ hochwertige Baumpflanzung zu bekommen, die auch ihre ökologischen Aufgaben erfüllen kann. Der Fernwärmeleitung kommt insoweit, wenn überhaupt nur eine sehr untergeordnete Bedeutung zu. Klar ist hingegen, dass die Bodentemperatur nicht der limitierende Faktor für das Baumwachstum war, **denn sonst hätten sich zwischen leitungsnahen und leitungsfernen Baumreihen Unterschiede zeigen müssen.**

5 Feldversuch Chemnitz

5.1 Zielstellung/ Einleitung

Im Rahmen des Projektes FW-Vegetation 1 konnte in Chemnitz ein Versuchsfeld für Langzeituntersuchungen zu Wurzelinteraktionen an Fernwärmeleitungen im Betrieb errichtet werden. Der wesentliche Blick der Untersuchungen lag darauf das Verhalten unterschiedlicher Baumarten zu untersuchen, die teilweise direkt auf die Fernwärmetrasse gepflanzt wurden. Dieses Vorgehen wurde aus experimentellen Gründen gewählt und die Abweichung von geltendem Regelwerk erfolgte deswegen absichtlich (keine Empfehlung!). Zur Untermauerung der bisherigen Beobachtungen und Ergebnisse und, um eine möglichst umfassende Bandbreite unterschiedlicher Randbedingungen erfassen zu können, wurden in den Feldversuchen in Chemnitz weitere Langzeit-Untersuchungen hinsichtlich des Wachstumsverhaltens von Bäumen in der Nähe von Fernwärmetrassen durchgeführt.

Für die Erschließung neuer urbaner Räume ist es auch von Interesse praktische Erkenntnisse über das Interaktionsverhalten von zeitgleich neugepflanzten Bäumen und neugebauten Fernwärmetrassen zu erlangen. Bei den im abgeschlossenen Projekt untersuchten In-situ-Aufgrabungen sind Leitung und Vegetation nicht zeitgleich entstanden bzw. waren die Daten und Verhältnisse zum Errichtungszeitpunkt nicht vollständig bekannt. Der Feldversuch in Chemnitz wurde in Projektphase I errichtet und auch über das Projektende hinaus beobachtet. In Chemnitz wurde eine Fernwärmetrasse mit Versorgungsaufgabe nach dem Stand der Technik errichtet, mit Ausnahme der Abstände zur Vegetation, ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen für eine Interaktion zwischen Fernwärmeleitungen und Wurzeln einzusetzen.

5.2 Dokumentation Besuche vor Ort (Zwischen den Projekten)

5.2.1 Bau/ Ausgangslage November 2019

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „FW-Vegetation 1“ konnte im November 2019 eine Baumaßnahme begleitet werden, die in Abstimmung mit dem Grünflächenamt und den ausführenden Firmen die Bäume unterhalb des empfohlenen Mindestabstandes zum Schutz des Baumes von 2,5 m von der Leitung pflanzten (siehe Abbildung 23). Anschließend konnten als Testaufbau, mit Unterstützung des lokalen Grünflächenamtes, neue Bäume direkt auf die Fernwärmetrasse gepflanzt werden (siehe Abbildung 24).

Weitere Information sind im Abschlussbericht FW-Vegetation 1 [5] im Kapitel 2.5 zu finden.

Abbildung 23: Trassengraben mit naher Vegetation

Abbildung 24: Wiederbepflanzung auf der Leitungstrasse

5.2.2 Stand August 2020

Im August 2020 wurde, mit Unterstützung durch das lokale Fernwärmeversorgungsunternehmen (inetz GmbH), der damalige Status dokumentiert. Es ist auf den ersten Blick ersichtlich, dass die neu gepflanzten Bäume, die unmittelbar auf der Leitung stehen, merklich gewachsen sind. Dies gilt auch für weitere Vegetation, die sich in diesem Bereich angesiedelt hat (Sträucher, Gräser, etc.). Auch die großen Bestands-Bäume, die direkt an der Trasse belassen wurden, scheinen weiterhin in guter Vitalität zu sein. In Abbildung 25 - Abbildung 29 (Quelle: inetz GmbH) ist die Situation vor Ort dokumentiert:

Abbildung 25: Übersicht Trassenbereich

Abbildung 26: Jungbaum unmittelbar über der FW-Leitung

Abbildung 27: Jungbaum in Mitten weitere Vegetation

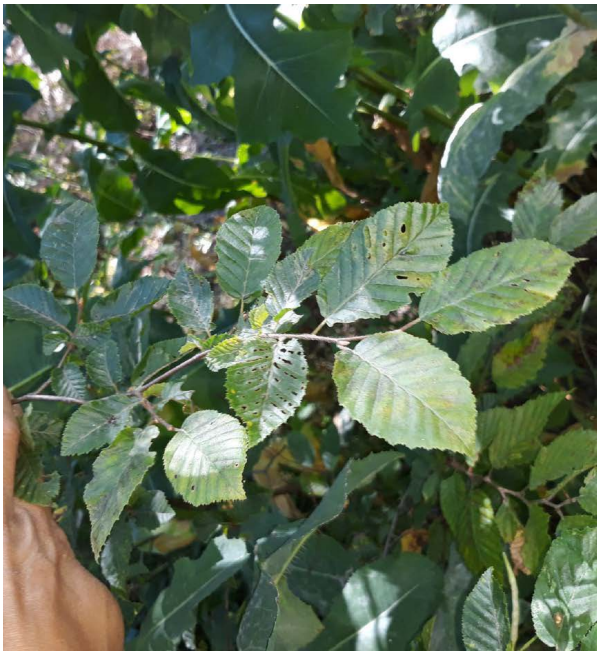


Abbildung 28: Nachaufnahme Jungbaum auf Trasse

Abbildung 29: Bestandsbaum am Trassenrand (links) und Jungbäume auf der Trasse (rechts)

5.2.3 Begehung Juli 2021

Auch im Rahmen einer weiteren Begehung im Juli 2021 durch einen AGFW Mitarbeiter (siehe Abbildung 30 - Abbildung 32), sind die Setzlinge ohne erkennbaren Einfluss der FW-Leitung gewachsen. Die Bäume an der Grenze zum Rohrgraben, die nicht entfernt wurden, zeigen keine optisch erkennbaren Einwirkungen der FW-Leitung. Sie gliedern sich ins Bild der umliegenden Vegetation ein und zeigen im Hinblick auf ihre Wachstumsphasen keine offensichtlichen Unterschiede oder Auffälligkeiten.

Abbildung 30: Blick auf den Trassenbereich (Fokus Jungbäume)

Abbildung 31: Blick auf den Trassenbereich (Fokus Baumbestand)

Abbildung 32: Bäume direkt auf der Rohrleitung

5.2.4 17.03.2022 vor Ort Termin März 2022

Für die Abstimmung der notwendigen Bonitur-Schritte, fand im März 2022 ein Vor-Ort Termin des Projektkonsortiums und Herrn Schäfer (Botanischer Garten Chemnitz) statt. Auch zu diesem Termin konnten keine erkennbaren Unterschiede und Auffälligkeiten der Vegetation auf/ nahe der Leitung und im weiteren Abstand festgestellt werden. In Abbildung 33 - Abbildung 36 ist die Situation vor Ort dargestellt.

Abbildung 33: Blick in Flucht des Trassenverlaufs

Abbildung 34: Details im Trassenbereich

Abbildung 35: Jungbäume auf der Trasse 1

Abbildung 36: Jungbäume auf der Trasse 2

5.3 Bonitur in Chemnitz

In Chemnitz führt, wie im vorangehenden Kapitel beschrieben, eine Fernwärmeleitung durch ein Feldrand-Gehölz. Es wurden sogar Jungbäume direkt auf die Fernwärme-Leitung gepflanzt. Bonitiert wurde nach denselben Kriterien wie in Frankfurt Riedberg (vgl. Kapitel 4.4). Dabei war allerdings zu beachten, dass die Bäume um die Leitung herum unterschiedlich alt und hoch waren. In solchen Gehölzstreifen erfolgt der Austrieb von innen nach außen und von unten nach oben. Der einfache Grund dafür ist, dass die Peripherie stärker windexponiert ist und dort infolge der stärkeren Lichtexposition in der Vegetationszeit auch die Knospen kompakter und härter sind und sich damit später öffnen als im geschützten Bereich im inneren des Gehölzstreifens. Es ist daher wichtig, beim Vergleich auf vergleichbare Position der Triebe in Bezug auf die einzelne Pflanze als auch in Bezug auf den Bestand zu achten.

Die Bonitierung wurde von Herrn Schäfer vom Botanischen Garten Chemnitz vorgenommen. Er ist nicht nur technischer Leiter des Gartens, sondern auch ein ausgewiesener Dendrologe. Seine Begehungen ergaben keine Unterschiede zwischen dem leitungsnahen Bereich und der Umgebung. Im Unterschied zu Frankfurt Riedberg waren die Wachstumsbedingungen günstig, Schäden und Ausfälle durch Trockenheit kamen nicht vor. Allerdings mussten einzelne Bäume wegen Verbiss- oder Fegeschäden durch Rehwild aus dem Vergleich ausgeschlossen werden.

Zum jetzigen Zeitpunkt war eine Auswirkung der Wärmeleitung auf die Gehölze weder in positiver noch in negativer Hinsicht feststellbar.

Der Versuchsstandort in Chemnitz kann grob als „Waldrand“ eingestuft werden. Das bedeutet, dass neben Jungwuchs von Gehölzen auch die typische Gemeinschaft von Kräutern und Stauden dort auftritt. Neben Taub- und Brennnesseln sind das Ehrenpreisarten, Stadtnelkenwurz und andere. Herr Schäfer hat sich auch diese Begleitvegetation angesehen. Ein über der Leitung oder in Leitungsnähe verändertes Austriebsverhalten der Krautschicht konnte dabei nicht festgestellt werden. Die Möglichkeit, eine naturnahe Krautschicht in die Analyse einbeziehen zu können unterscheidet den Standort Chemnitz vom Standort Frankfurt-Riedberg. Dass auch hier kein Einfluss der Wärmeleitung festgestellt werden konnte, lässt derartige Einflüsse insgesamt unwahrscheinlich erscheinen.

Auf die Entnahme und Analyse einzelner Bäume wurde im Untersuchungszeitraum verzichtet. Die Jungbäume waren noch so jung, dass sie die Leitung noch kaum erreicht haben konnten. Beprobung mit Zurückpflanzung ist kaum sinnvoll möglich und eine Zeitreihe durch Ausgraben derselben Baumart an benachbarten Stellen in aufeinander folgenden Jahren erscheint angesichts untersuchungsfremder Einflüsse (Wildverbiss) nicht zielführend. Erfolgversprechend könnte hier wohl nur eine Ausgrabung gut entwickelter mehrjähriger Jungbäume mittels Saugbagger sein. Entsprechende Erfahrungen dazu sammelte das IKT auch in weiteren aktuellen Forschungsvorhaben in denen beispielsweise der Einfluss verschiedener Substrate auf das Wurzelwachstum untersucht wird [14].

6 Eindrückversuche aus FW-Vegetation 1

Innerhalb von FW-Vegetation1 wurden im Botanischen Garten der RUB zwei von fünf 2019 errichteten Versuchskisten der Eindrückversuche (siehe [5] Kapitel 4.3 Eindrückversuche – Einfluss Wurzel auf FW-Leitung) nicht geöffnet und ausgewertet. Es wurde erwartet, dass nach einer längeren Standzeit (weiterer Wurzelwachstum) die Ergebnisse noch wesentlich deutlicher ausfallen würden. Die Öffnung erfolgte schließlich im Mai 2022.

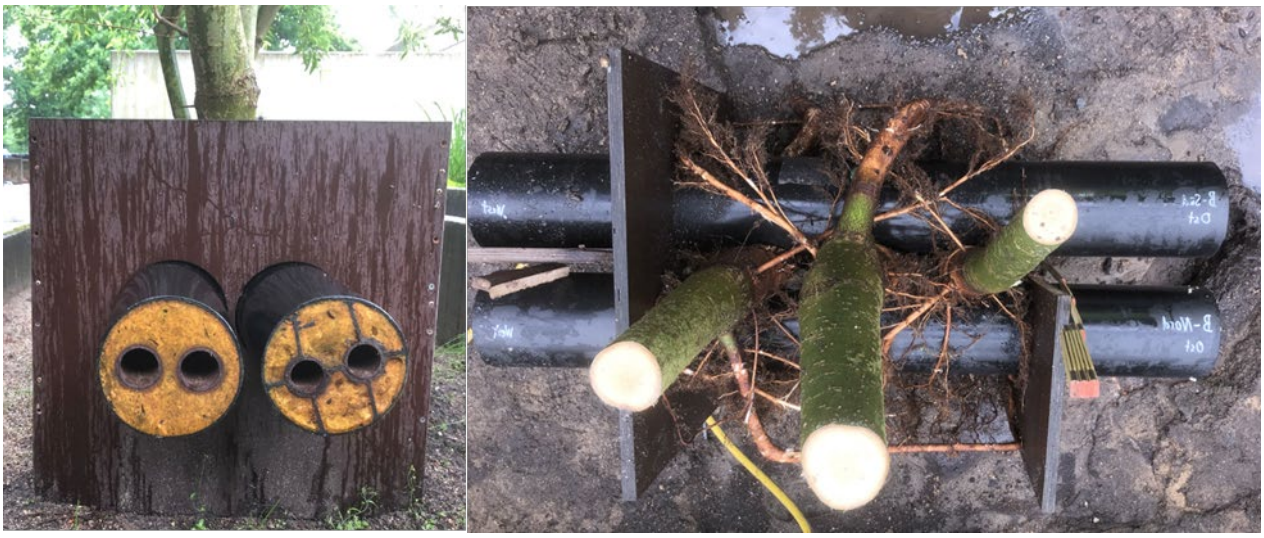


Abbildung 37: Links geschlossene Versuchskiste, darüber Stamm der Weide; rechts geöffnete Kiste mit 3 Weiden von oben

Der Querschnitt der Weidenstämme hatte sich gegenüber dem Zustand aus Phase 1 mehr als verdoppelt, da die Weiden jetzt in den Boden unterhalb der Versuchskiste eingewachsen waren und somit ein großer und gut versorgter Wurzelraum zur Verfügung stand. Abbildung 37 zeigt links das Versuchskonzept. Zwei Rohre werden mit einem Abstand von knapp 2 cm in der Kiste fixiert und danach über dem Spalt Weidenstecklinge gepflanzt. Erwartet wurde, dass die Rohre das Dickenwachstum der Wurzel verhindern und sie sich im verfügbaren Raum flach entwickelt und darüber und darunter das normale sekundäre Dickenwachstum mit kreisförmigem Zuwachs zeigt.

Abbildung 38: Bereich der Wurzel zwischen den Rohren, links Seitenansicht, rechts Frontale.

Wie in Abbildung 38 zu erkennende wurde diese Erwartung bestätigt, denn diekreisförmige Querschnittsfläche direkt über den Rohren entsprach nahezu der rechteckigen Querschnittsfläche an der engsten Stelle zwischen den Rohren. Dies deutet darauf hin, dass die Rohre die Wurzel deformiert haben und nicht etwa umgekehrt. Die genaue Analyse ergab jedoch, dass sich in einem Fall auf der Fläche die eigentlich dem Rohr anliegen sollte, eine etwa 2 mm dicke, runde Seitenwurzel gebildet hatte (Abbildung 39). Das bedeutet, dass zum Zeitpunkt der Bildung dieser Wurzel zwischen Rohr und abgeplatteter Wurzel ein entsprechend breiter Spalt bestanden haben muss. Weiterhin zeigte sich eine ca. 2 mm tiefe Eindellung des Rohrmantels an der Stelle, an der das Rohr der Kiste anlag. Das Rohr muss also zumindest zeitweise von der Wurzel gegen die Wand der Kiste gedrückt worden sein, was aber nicht zum Vorhandensein eines Spaltes zwischen Rohr Wurzel passt. Diese Verhältnisse sind in Abbildung 40 skizziert.

Abbildung 39: Die weiße, runde Seitenwurzel zeigt, dass zum Zeitpunkt ihrer anlegung hier ein Spalt bestanden haben muss, der mindestens der dicke der Seitenwurzel entspricht.

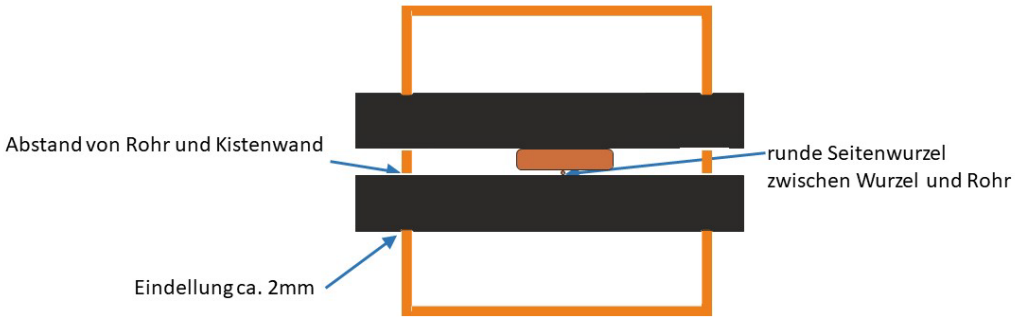


Abbildung 40: Skizze des vorgefundenen Sachverhaltes (nicht maßstäblich!)

Weiter war festzustellen, dass an der PE-Ummantelung im direkten Bereich der Wurzel und am Austritt aus der Versuchskiste eine geringe Entwicklung von Dellen auftrat (Abbildung 41 und Abbildung 42). Bei Anlegen einer Richtlatte konnte eine Delle von max. 0,7 cm am Austritt aus der Versuchskiste gemessen werden. Diese waren nur gering ausgeprägt und geben nach aktueller botanischer Einschätzung keinen Grund für einen Handlungsbedarf. Weitere Untersuchungen sind notwendig.

Abbildung 41: Vermessung der Delle an der PE-Ummantelung am Austritt aus Versuchskiste (Draufsicht)

Abbildung 42: Dellenentwicklung an PE-Ummantelung im Wurzelumfeld (Draufsicht)

An den Stellen, an denen direkter Wurzelkontakt bestand, konnten Dellen von bis zu 0,5 cm festgestellt werden.

Für den vorgefundenen Sachverhalt kommen im Wesentlichen drei Erklärungen (oder Kombinationen davon) in Frage. Zum einen kann sich durch Wärmeausdehnung (die Kiste war sonnenexponiert aufgestellt) die Kiste und damit der Lochabstand für die Rohre vergrößert haben. Die Wurzel müsste dann bei fehlendem Widerlager das Rohr durch Dickenwachstum zu Seite geschoben haben. Bei erneuter Abkühlung kann die Wurzel nicht zurückweichen und die Kiste drückt sich in den Rohrmantel ein. Zum anderen kann die Erwärmung des Rohres selbst durch die Sonneneinstrahlung dazu führen, dass es sich ausdehnt, an der Fläche der Wurzel abstützt und in die von der Fläche her viel kleinere Kontaktzone zur Kiste hineingedrückt wird. Schließlich ist es denkbar, dass der Durchmesser der Wurzel selbst mit schwankendem Wassergehalt variiert. In Trockenphasen würde die Wurzel dann dünner. Bei erneutem Wachstum werden dann zuerst die peripheren Gewebe versorgt, das sekundäre Dickenwachstum setzt wieder ein und es können auch Seitenwurzeln gebildet werden. Erst später tritt eine vollständige und passive Quellung des inneren, bereits toten Gewebes ein.

Bisher liegen keine Daten zu den Temperaturunterschieden von Holzkiste und Rohr im Jahresverlauf vor. Da das Substrat in der Kiste aber aufgrund der auch in Trockenperioden durch Gießen hoch gehaltenen Feuchte ein recht guter Wärmeleiter ist, ist es eher unwahrscheinlich, dass die erreichbaren Temperaturunterschiede bei den Ausdehnungskoeffizienten von Kiste (Siebdruckplatte) und Rohr die für die vorgefundenen Sachverhalte erforderlichen Veränderungen in den Abmessungen verursachen können. Thermische Effekte auf den Versuchsbehälter durch Sonneneinstrahlung sind somit von untergeordneter Bedeutung.

Auf der anderen Seite ist bekannt, dass bei nicht verkernenden Hölzern das Volumen mit der Wassersättigung auch des lebenden Baumes stark schwanken kann. Für die Stämme verschiedener Baumarten aus Savannen sind wasserspeichernde Stämme mit saisonal stark schwankenden Umfängen bekannt. Dieses Wasserdefizit setzt sich natürlich im Wurzelbereich fort und wenn diese Erklärung zutrifft, gilt sie auch in größeren tiefen und ist damit für die Horizonte relevant, in denen die Leitungen liegen. Vor diesem Hintergrund erscheint es ungünstig, dass wir für unsere Experimente ein sog. Reifholz ohne ausgeprägte Kernholzbildung verwendet haben. Allerdings wachsen Gehölze mit ausgeprägter Verkernung wegen der damit verbundenen Bindung von Assimilaten viel langsamer, so dass für die vorliegenden Beobachtungen Versuchsdauern von deutlich über 10 Jahren erforderlich gewesen wären.

In der Praxis dürfte die geringfügige Verformung des Rohrmantels in unseren Experimenten keine Rolle spielen. Es fehlt ein kleinflächiges Widerlager im Substrat wie es in Form der

Kistenwand vorlag. Auch wird der Abstand zwischen den Rohren nie so gering gewählt werden und die üblicherweise gepflanzten Bäume weisen Holz mit höherer Dichte und starker Verkernung auf, so dass Volumenschwankungen durch unterschiedliche Wassergehalte wesentlich geringer sind oder ganz fehlen.

Die Erklärungsversuche bewegen sich bisher trotz logisch erscheinender Begründungen eher im spekulativen. Durch geeignete Versuche sollte hier versucht werden, zu belastbaren Aussagen zu gelangen.

7 Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit

7.1 Projektbegleitkreis

Der bereits unter „FW-Vegetation 1“ zusammengekommene interdisziplinäre Projektbegleitkreis, in den Expertinnen und Experten von Fernwärmeversorgungsunternehmen, Grünflächenämtern, Planungs- und Ingenieurbüros, sowie der Wissenschaft vertreten waren, unterstützte dankenswerterweise auch die zweite Projektphase. Neben einer gemeinsamen Präsenzsitzung, unterstützten einzelne Expertinnen und Experten die laufenden Forschungsaktivitäten auch während der Bearbeitung mit ihrem Fachwissen.

Im Rahmen der Präsenzsitzung konnten zahlreiche Aspekte diskutiert und beleuchtet werden, woraus sich auch konkrete Entscheidungen (beispielsweise die umzusetzenden Simulationsvarianten in Kapitel 2.4) ergaben. Außerdem konnten weiterführende Fragen aus der Praxis genutzt werden, um die Ergebnisaufbereitung zu optimieren. Hieraus ergaben sich auch Diskussionsmöglichkeiten mit Fernwärmeversorgungsunternehmen und Grünflächenämtern.

7.2 Fachgremien und Experten

Parallel zur Projektbearbeitung spiegelte AGFW die Forschungsaktivitäten auch in Expertenkreise des AGFW und wird die Ergebnisse dort ebenfalls vorstellen können.

Aufgrund der Einladung für einen Fachvortrag im Rahmen der „Schweizer Baumtage“ im November 2022, konnte AGFW die Forschungsergebnisse auch Experten außerhalb der Fernwärmebranche vorstellen und weitere Kooperationen im Bereich der Wissenschaft anstoßen. Bestehende wissenschaftliche Kooperationen mit dem DBU geförderten Partnerprojekt „SanurBaum“ wurden ebenfalls im Rahmen von „FW-Vegetation 2“ fortgesetzt.

7.3 Öffentlichkeit

Die Kommunikationskanäle und Aktivitäten, über Websites und Newsletter der Projektpartner und der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) ermöglichten die Sichtbarkeit der Forschungsaktivitäten in der Öffentlichkeit. Im Besonderen ist hier die Teilnahme an der IFAT 2022 hervorzuheben, bei der das Forschungsvorhaben am DBU-Messestand einem breiten Publikum präsentiert werden konnte.

8 Ergebnisse

Ein zentrales Ziel des Forschungsvorhabens war es die im Forschungsvorhaben „FW-Vegetation“ errichteten Versuche und Testfelder weiter zu betreuen. Sowohl in Chemnitz als auch in Frankfurt war dies erfolgreich möglich und die Testfelder stehen zur weiteren Untersuchung zur Verfügung. Auch die im FW-Vegetation 1 errichteten Versuchsaufbauten, die für weitere Wachstumsphasen im botanischen Garten der RUB verblieben, konnten erfolgreich ausgewertet werden.

Weiterhin konnte die Arbeit im Projektbegleitkreis fortgesetzt werden, wodurch auch der wichtige Dialog zwischen den interdisziplinären Teilnehmern (Vertretern von Energieversorgungsunternehmen, Grünflächenämtern, Biologen, etc.) fortgesetzt werden konnte. Hier konnten auch weitere Teilnehmende gewonnen werden, was die Sichtbarkeit des Forschungsvorhabens und den schnellen Transfer der Forschungsergebnisse in die Praxis verbessert.

Im Forschungsvorhaben FW-Vegetation 1 wurden Empfehlungen für Planung und Bau mithilfe von sechs Leitsätzen konzipiert. Diese basieren auf den Untersuchungsergebnissen des Forschungsvorhabens und der Praxisbetrachtung durch den interdisziplinären Projektbegleitkreis „FW-Vegetation“. Durch die in diesem Forschungsvorhaben gewonnen Ergebnisse konnten diese Leitsätze teilweise überprüft, validiert und ergänzt werden. Im Forschungsvorhaben FW-Vegetation 1 wurden die Ergebnisse zusammenfassend zu „Leitsätzen“ aufbereitet (Kapitel 7 in [5]). Folgend werden die Ergebnisse aus der Projektphase FW-Vegetation 2 den Leitsätzen zugeordnet.

8.1 Leitsatz 1 - „Szenarienanalyse zur Trassenauswahl“

„Durch eine strukturierte Szenarienanalyse können die Vor- und Nachteile verschiedener Trassenalternativen transparent und nachvollziehbar bewertet werden.“ [5]

Bereits im Forschungsvorhaben FW-Vegetation 1 wurde darauf verwiesen, dass eine funktionierende Kommunikation zwischen allen Beteiligten eine zentrale Rolle bei der Bewertung von Trassenalternativen einnimmt. Mit der Entscheidung ist der Prozess allerdings nicht beendet. Die Koexistenz von Fernwärmeleitungen und Bäumen ist ein über viele Jahrzehnte fortbestehender Prozess. In dieser Zeit können immer wieder geplante, aber auch ungeplante Ereignisse auftreten (z.B. eine Leitungsbeschädigung in der Nähe eines Baumes), deren Umgang möglichst vorab eindeutig geregelt sein muss. D.h. bspw., dass geregelt wird, ob ein Baum entfernt werden darf, wenn eine Leitung aufgrund eines Schadens repariert oder erneuert werden muss. Aus den AGFW-Gremien der Technik wurde zu diesem Thema, u.a. auf Basis der Projektphase I, eine Praxishilfe erstellt, mit dem Schwerpunkt auf den zu

vereinbarenden rechtlichen und organisatorischen Rahmenbedingungen bei gemeinsamer Nutzung des unterirdischen Raums durch Fernwärmeleitungen und Bäume (siehe [15]). Die dort beschriebenen Hinweise zu Rahmen-, Einzelvereinbarungen, Dienstbarkeit samt passender Checklisten, kann auch als Diskussionsgrundlage und anschließend zur Dokumentation genutzt werden. Aufgrund der jahrzehntelangen Lebensdauer von Fernwärmeleitungen und Stadtbäumen sind (vertragliche) Regelungen und deren Dokumentation besonders wichtig, da Personen und Zuständigkeiten in diesem Zeitraum wechseln können.

8.2 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.“ [5]

Dieser Leitsatz hat sich auf Grundlage der weitergehenden Untersuchungen bekräftigt. Sowohl in Chemnitz als auf in Frankfurt Riedberg konnten keine signifikanten Auswirkungen der Fernwärmeleitungen auf das Wurzelwachstum festgestellt werden. Auch die Beobachtung der Vegetation nahe der Messstrecke in Frankfurt weist keine Auffälligkeiten an der leitungsnahen Vegetation auf. Das erweiterte und kalibrierte Simulationsmodell zeigt ebenfalls keine als kritisch bewerteten Wärmefelder für Wurzeln und Bäume. Eine Empfehlung zu größeren Dämmstärken der FW-Rohrleitungen lässt sich entsprechend nicht ableiten. Zumal auch zu berücksichtigen ist, dass höhere Dämmstärken auch mit größeren Außendurchmessern einhergehen, die entsprechend größere Leitungsgräben benötigen. Die Variantenanalysen der Wärmefeldsimulationen zeigen, dass auch der Nennweitensprung von DN 300 auf DN 500 keine höheren Temperaturen im Erdreich erzeugt, sodass auch bei größeren Nennweiten keine Notwendigkeit einer höheren Dämmserie besteht.

Neue Erkenntnisse konnten vor allem aus dem hygrothermischen Simulationsmodell gezogen werden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass warmgehende Fernwärmeleitungen die Bodenfeuchte und damit das direkt für die Vegetation verfügbare Wasser in geringem Umfang beeinflussen. Im gesamten Berechnungsgebiet sind diese Effekte allerdings nicht mehr zu erkennen, da sich die Bodenfeuchte im Gesamtgebiet ausgleicht. Umgebungseinflüsse wie Niederschlagsmenge, Sonneneinstrahlung oder Umgebungstemperatur beeinflussen den Feuchtegehalt stärker, was auch zu den Beobachtungen in Frankfurt Riedberg passt.

8.3 Leitsatz 3 – „Muffenverbindungen an KMR“

„Nur bei fachgerecht (nach den Vorgaben der gültigen Technischen Regeln AGFW FW 401-14 [16] und DIN EN 13941 Teil 2 [8]) 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.“ [5]

In den unterschiedlichen Versuchsfeldern können weiterhin keine Beeinträchtigungen bzw. Problemstellen an KMR-Muffenverbindungen festgestellt werden. Somit kann auch für diese vergleichsweise kurze Versuchsdauer Leitsatz 3 bekräftigt werden.

8.4 Leitsatz 4 – „Interaktion von Wurzeln und FW-Leitungen“

„Eine Interaktion zwischen Wurzeln und Fernwärmeleitung ist weitestgehend schadens-frei möglich.“ [5]

Die aktuellen Ergebnisse der Bonituren zeigen, dass keine Unterschiede in der Entwicklung und Periodizität der Bäume zwischen fernwärmeleitungsnahen und -fernen Bäumen festzustellen waren. Aus der Baupraxis sind im Projektzeitraum keine gegenteiligen Erkenntnisse bekannt geworden. Weder im Gespräch mit FWVU noch mit Grünflächenämtern waren schädliche Interaktion von Wurzeln und KMR-Leitungen bekannt. Die Auswertung der Eindrückversuche zeigte, dass unter den richtigen „Zwangsbedingungen“ eine Deformation der Rohrleitungen möglich ist. Da der Versuchsaufbau allerdings darauf abzielte diese Zwangspunkte zu erzeugen und die Festpunkte, die zur Verspannung notwendig sind, keiner realen Einbausituation entsprechen (thermische Effekte auf Versuchskiste, zu geringe Mindestabstände zwischen den Leitungen, Festpunkte welche die Leitung abstützen, kleiner Versuchsraum in der Kiste), wird eine schädliche Interaktion in der Praxis weiterhin als unwahrscheinlich angesehen. Dieser Aspekt bietet allerdings weiteres Untersuchungspotenzial für Folgevorhaben.

Der Betrieb der Leitungen in den Versuchsfeldern ist nach Kenntnis des Projektteams jedoch schadensfrei möglich. Entsprechend kann auch Leitsatz 4 ebenfalls bekräftigt werden.

8.5 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.“ [5]

In der Projektphase FW-Vegetation 2 wurden keine eigenen Untersuchungen an zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV) durchgeführt. Jedoch wurden durch das IKT weitergehende Untersuchungen im Partnerprojekt „Vergleichende Untersuchung von zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV) [17] durchgeführt und analysiert sowie in der Dissertation „Untersuchung von bautechnischen Schutzmaßnahmen gegen Wurzel-Rohr-Interaktionen“ [6] weitergehend ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass alle eingesetzten ZFSV einen Beitrag zum Schutz vor Wurzeleinwuchs leisten können. Weiter konnten Erkenntnisse im internationalen Partnerprojekt mit einem Versuchsfeld in Almere gewonnen werden. Hierbei konnte festgestellt werden, dass nach einem Zeitraum von 42 Monaten keine Wurzeln in eine unterirdische Leitung einwuchsen und diese durch den Einsatz von porenraumarmen Verfüllstoffen vor Wurzeleinwuchs geschützt werden konnten [18, 19]. In der Folge kann der Leitsatz 5 bekräftigt werden.

8.6 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. Bettungsbereich Leitungszone) verringert wird.“ [5]

Für die Vegetation ist eine ausreichende Wasserverfügbarkeit im Erdreich von entscheidender Bedeutung. Wie aus den hygrothermischen Simulationen ersichtlich beeinflusst die Wärmeabgabe die Wasserverfügbarkeit nur in geringem Maße. Mit Blick auf die Substrate ist allerdings festzuhalten, dass diese unterschiedliche Wasserspeicherkapazitäten aufweisen und auch die vom Baum nutzbare Wassermenge unterschiedlich ist. Die zur Bettung von KMR vorgesehenen Bettungsmaterialien sind nach [8] eher sandig und unterscheiden sich von Baumsubstraten. Bei der Planung von Baumaßnahmen mit Fernwärmetrassen in Vegetationsnähe sollte deshalb auf einen ausreichenden Wurzelraum außerhalb der Rohrleitungszone geachtet werden. Lösungen mit Wurzelsubstrat angrenzend und oberhalb der Rohrleitungszone erscheinen hier als praktische Lösung, was auch den Erfahrungen aus FW-Vegetation 1 entspricht [18, 19]. Eine praxisnahe Untersuchung von idealtypischen Alternativen zur Anordnung von Leitungsgraben und Wurzelraum bietet Potenzial für weitere Forschungsansätze.

9 Ausblick

Bisher wurde in den Projekten einerseits untersucht, ob Bäume die Fernwärmeleitungen beschädigen können. Hier war das Ergebnis negativ. Zum anderen wurde analysiert, ob der von den Fernwärmeleitungen ausgehende Wärmeeintrag das Wachstum der Bäume beeinträchtigen kann. Hier konnte nichts festgestellt werden, was aber unter wiss. Gesichtspunkten nicht beweist, dass es keine Einflüsse gibt. Bessere Einsichten sollten hier Experimente bringen, bei denen der Wärmeeintrag im Wurzelbereich bis zu einer nachweisbaren Schädigung gesteigert wird. Ist dieser Temperaturbereich deutlich oberhalb der Werte, die in der Praxis vorkommen können, kann dies als Nachweis der Unbedenklichkeit des Wärmeeintrags gewertet werden.

Aus physiologischen Gründen kann man erwarten, dass der kritische Temperaturbereich für Wurzeln zwischen 35° und 50° liegt (Denaturierung von Proteinen und damit Abtötung der Wurzeln). Da gerade Sämlinge im Sommer die vergleichsweisen hohen Temperaturen durch Sonneneinstrahlung an der Bodenoberflache scheinbar gut überstehen, ist zu berücksichtigen, inwieweit Sekundäreffekte der Temperatur z.B. auf die Bodenfeuchte eine wesentliche Rolle spielen können. Bisherige Untersuchungen im Rahmen der Forschungsvorhaben zeigten auch bei 36°C keine Einflüsse auf die im Versuch verwendeten Weidenstecklinge.

Die abgeschlossenen Versuche legen jedenfalls nahe, dass über ein reines Schadensmonitoring kaum zusätzlich Erkenntnisse gewonnen werden können. Falls es überhaupt Schäden gibt, liegen sie wohl unter der Erfassungsschwelle von Monitoring-Ansätzen.

9.1 Weitere Forschungsansätze

Im Laufe der Projektbearbeitung konnten weitere wichtige Details zum Verständnis der Interaktion von Bäumen/ Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen gesammelt werden. Auf Grundlage dieser Erfahrungen und Erkenntnisse lassen sich potenzielle Bauquerschnitte (Anordnung von Leitungszone und Wurzelbereich) verglichen. Neben einer theoretischen Bewertung sind vor allem Erfahrungen praktischer Umsetzungen von vielversprechenden Lösungsvarianten in praxisnahen Baumaßnahmen wichtige Ergänzungen.

Zum Erreichen der Klimaziele ist in vielen Kommunen der Wärmenetzausbau ein wichtiges Ziel der nächsten Jahre. Entsprechend sollten bei der Planung passender Bauausführungen auch das Bauen im Baumbestand berücksichtigt werden. Im Rahmen der Ergebnisdiskussionen im Projektbegleitkreis kam dabei auch die Frage auf, ob in Einzelfällen (beispielsweise Leitungsverlegung nahe eines existierenden Wurzelbereichs) Leitungen auch

in Wurzelsubstrat verlegt werden können. Auf Grundlage der bisherigen Ergebnisse ließen sich Abweichungen zwischen den Normvorgaben zur Verlegung von KMR [8] und einzelnen „Baumsubstraten“ identifizieren. Es ist nicht auszuschließen, dass es dennoch Substrate gibt, die gut als Wurzelsubstrat geeignet sind und dennoch einen Großteil der Normvorgaben einhalten können. Neben fachspezifischen Materialuntersuchungen (bspw. der Reibungskoeffizienten, welcher wichtig für die Fernwärmestatik ist, für Wurzelsubstrate aber in der Regel unerheblich und entsprechend oftmals unbekannt ist) sind auch mögliche Auswirkungen von Abweichungen gegenüber der Normvorgaben, sowie etwaige Lösungsansätze zu prüfen.

Die Auswertung der Eindrückversuche zeigten Auswirkungen, die auf das Versuchsdesign zurückgeführt und nicht als reale Problematik eingestuft werden. Der weiteren Betreuung, Untersuchung und Auswertung (inklusive Aufgraben) der Versuchsstrecke in Chemnitz kommt deshalb eine besonders wichtige Rolle zu, da hier Auswirkungen und Gefahrenpotenziale realer Leitungs-/ Wurzelinteraktion überprüft werden können. Zusätzlich sind durch die verschiedenen Baumarten an der Versuchsstrecke eventuell Unterschiede zwischen verschieden ausgeprägter Kernholzbildung zu untersuchen.

Eine weitere Fragestellung, die im Rahmen von FW-Vegetation 2 nicht bearbeitet werden konnte, ist die Langzeitwirksamkeit von ZFSV als Schutz vor Wurzeleinwuchs. Dies könnte durch erneute Aufgrabungen am Versuchsfeld Dodesheide untersucht werden, an dem im Rahmen von FW-Vegetation 1 einzelne Bäume im Wurzelbereich mit ZFSV verfüllt wurden. Das Versuchsfeld Dodesheide in Osnabrück wurde in vergangenen Projekten zur Großbaumverpflanzung u.a. durch die DBU – Deutsche Bundesstiftung Umwelt finanziert und konnte im Rahmen von FW-Vegetation 1 weiteres Wissen generieren. Die Fortsetzung der Untersuchungen zur Auswertung nach, langjährigem Wurzelwachstum, verspricht mit vergleichsweise geringem Aufwand einen großen Mehrwert durch praxisnahe Erfahrungen im Maßstab 1:1.

9.2 Ausblick Ergebnisverwertung FW-Vegetation 2

9.2.1 Ausblick Info an Normungsgremien IKT

Die gewonnen Ergebnisse werden in die dafür relevanten Fachausschüsse sowie Arbeitsgremien übermittelt. Durch den Sprecher der Arbeitsgruppe ES-3.6 “Baumstandorte, Kanäle und Leitungen” werden die DWA-Fachausschüsse ES-2 “Systembezogenen Planung” und ES-3 “Anlagenbezogene Planung” grundsätzlich über das Forschungsvorhaben und die Ergebnisse sowie die dazugehörige Regelwerksarbeit des AGFW informiert. Falls zielführend, werden sich die Regelwerksgremien in Zukunft zu diesem Thema austauschen.

9.2.2 Einbindung der technischen Gremien des AGFW

Das Forschungsvorhaben wurde durch den AGFW Expertenkreis Forschung und Entwicklung begleitet. Zusätzlich wurden während der Projektbearbeitung auch die Fachreferenten der technischen Expertenkreise „Netzplanung und -bau“ sowie „Netzbetrieb“ über die Forschungsaktivitäten und Zwischenergebnisse informiert. Nachdem die Projektergebnisse final aufbereitet sind, werden diese den Gremienmitgliedern zur Verfügung gestellt. Der Abschlussbericht wird allen ordentlichen Mitgliedern (Versorgungsunternehmen) des AGFW zur Verfügung gestellt.

9.2.3 Weitere Aufbereitung der Forschungsergebnisse

Über die Plattform Grüne Fernwärme unterstützt AGFW, durch eigene Netzwerke, regionale Ansprechpartner und Publikationen, die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung in Städten und Gemeinden. Die Ergebnisse der Forschungsvorhaben „FW-Vegetation 1 und 2“ werden zukünftig auch für den Werkezugkasten „Kommunale Wärmeplanung“ aufbereitet, der dem Netzwerk „Grüne Fernwärme“ (Kommunen, Versorger, etc.) zur Verfügung stehen wird. Weitere Informationen unter www.gruene-fernwaerme.de.

Erste Vorstellungen der vorläufigen Forschungsergebnisse konnten, initiiert über die AGFW Gremien und Mitglieder des Projektbegleitkreises, bereits kurz nach Projektabschluss genutzt werden, um Abstimmungen zwischen Grünflächenämtern und Versorgungsunternehmen inhaltlich zu unterstützen.

Aufgrund der zunehmenden Bedeutung von Fernwärme als nachhaltige Wärmeversorgungsalternative und steigenden Ausbauzielen ist zu erwarten, dass die Forschungsergebnisse besonders beim Ausbau von Fernwärme in Bestandsgebieten von Relevanz sind. Zur Information von Experten ist geplant, die Forschungsergebnisse in die Schulungen des AGFW und des IKT aufzunehmen und damit die Schulungsveranstaltungen aus FW-Vegetation 1 zu ergänzen und fortzuführen.

Da sich die Konkurrenz im unterirdischen Straßenraum nicht nur auf Fernwärme und Vegetation begrenzt, kann das im Projekt entwickelte Simulationsmodell der Fernwärmetrasse auch für weitere Fragestellungen eingesetzt werden. Erste konkrete Anfragen aus der Praxis sehen hier vor allem einen Bedarf bei Trinkwasserleitungen und Stromtrassen.

10 Literaturangaben

[1] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz: Grünes Licht für grüne Fernwärme: Europäische Kommission genehmigt Förderprogramm zur Dekarbonisierung von Wärmenetzen, 2022

[2] Deutscher Städtetag: Anpassung an den Klimawandel in Städten. Forderungen, Hinweise und Anregungen, 2019. https://www.staedtetag.de/files/dst/docs/Publikationen/Weitere-Publikationen/2019/klimafolgenanpassung-staedte-handreichung-2019.pdf, abgerufen am: 02.03.2023

[3] Moser, M., Rötzer, T. u. Pretzsch, H.: Stadtbäume: Wachstum, Funktionen und Leistungen – Risiken und Forschungsperspektiven. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 188 (2017) 5/6, S. 94–111

[4] DIN EN 13941-1:2019. *Fernwärmerohre – Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr- Verbundsystemen für direkt erdverlegte Heißwasser-Fernwärmenetze –*

[5] Salomon, M., Grimm, S. u. Stützel, T.: Untersuchung der Interaktion zwischen Bäumen/ Baumwurzeln und unterirdischen Fernwärmeleitungen. Abschlussbericht zum Verbundforschungsvorhaben. Forschung & Entwicklung, Bd. 58, ISBN: 3-89999-086-2, Frankfurt am Main

[6] Salomon, M.: Untersuchung von bautechnischen Schutzmaßnahmen gegen Wurzel-Rohr-Interaktion, Ruhr-Universität Bochum Dissertation. Bochum 2022

[7] DIN 4747; 2022-08. *Fernwärmeanlagen - Sicherheitstechnische Ausrüstung von Unterstationen, Hausstationen und Hausanlagen zum Anschluss an Heizwasser-Fernwärmenetze*

[8] DIN EN 13941-2:2019. *Fernwärmerohre - Auslegung und Installation von gedämmten Einzel- und Doppelrohr- Verbundsystemen für direkt erdverlegte Fernwärmenetze*

[9] DIN EN 253; März 2020. *Fernwärmerohre – Einzelrohr-Verbundsysteme für direkt erdverlegte Fernwärmenetze – Werkmäßig gefertigte Verbundrohrsysteme, bestehend aus Stahl-Mediumrohr, einer Wärmedämmung aus Polyurethan und einer Ummantelung aus Polyethylen;*, abgerufen am: 12.03.2020

[10] Klöpsch, M., Besier, R. u. Wagner, A.: Reicht für Kunststoffmantelrohre die Standarddämmung? Wirtschaftliche Dämmung von KMR. EuroHeat&Power 38 (2009) 12, S. 46–54

[11] Stadt Frankfurt am Main: Städtebauliche Entwicklungsmaßnahme RIEDBERG. Baustein 1/09, 2009. https://stadtplanungsamt-

frankfurt.de/show.php?ID=10708&psid=p2ah76kll63pd69gmaal9d8se6, abgerufen am: 30.01.2023

[12] Stadt Frankfurt am Main: Geoportal Frankfurt. https://geoportal.frankfurt.de/karte/?layerIds=55037,55033,55035,118,28&visibility=true,true,true,true,true&transparency=0,0,0,0,0&center=477500,5551000&zoomLevel=4, abgerufen am: 10.01.2023

[13] Mauritz, S.: Minimumfaktor, 2021. https://www.resilienz-akademie.com/minimumfaktor/

[14] IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH: IKT Forschung. Aktuelle Projekte. https://www.ikt.de/category/forschung/

[15] AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e.V.: Praxishilfe Fernwärmeleitungen und Bäume. www.agfw.de, abgerufen am: 25.04.2023

[16] Arbeitsblatt. *Kunststoffmantelrohre (KMR) als Verlegesystem der Fernwärme*

[17] IKT-Warentest „Flüssigböden (ZFSV) im Kanalbau“. Im Rahmen des Forschungsprojektes „Vergleichende Untersuchung von zeitweise fließfähigen selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen (ZFSV), IKT - Institut für Unterirdische Infrastruktur gGmbH, Gelsenkirchen 2020

[18] Möllers, K., Salomon, M., Bossler, B., Stützel, T., Rus, M. u. Groeneveld, K.: Langfristiger Kanalschutz – Wirksamkeit von Wurzelbarrieren. wwt - wasserwirtschaft wassertechnik (2023) 3, S. 25–29

[19] Salomon, M., Bresser, J. u. Bloedjes, L.: Leitungen schützen und Bäume erhalten. B_I galabau (2018) 10, S. 60–62

Prof. Dr.-Ing. John Grunewald
Institut für Bauklimatik, TU Dresden
GWT Innovationszentrum Bauklimatik und Bauphysik

Bewertung des Einflusses von Fernwärmetrassen auf die **hygrothermischen Verhältnisse im** Wurzelbereich von Bäumen

13.02.2023

Ziele

- 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.

- Es wird auf Basis der bislang erfolgten Vorarbeiten ein Simulationsmodell erstellt und anhand der bislang gesammelten Messwerte verifiziert, welches zeitabhängige Temperatur- und Feuchteverteilungen im Bodenbereich der Fernwärmetrasse und im Wurzelbereich der angrenzenden Vegetation berechnet.

- Das Simulationsmodell soll Aussagen darüber liefern, welchen Einfluss die Fernwärmetrasse auf die Bodentemperaturen und Bodenfeuchte im Wurzelbereich der angrenzenden Vegetation hat. Gegebenenfalls sind Maßnahmen zum Schutz der Vegetation zu bewerten.

Methodik

- In Abstimmung mit dem Projektkonsortium, Experten des AGFW und Vertretern des Fernwärmeversorgers wurde ein Messkonzept mit drei unterschiedlichen Messets entwickelt und umgesetzt. Für jeden der drei Teile wurde ein eigenes Konzept entwickelt und ein individuelles Set an Messtechnik aufgebaut.

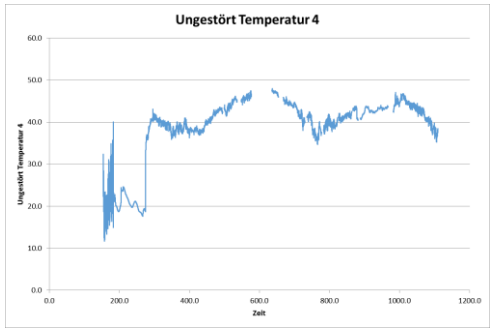
- Das Simulationsmodell stellt die drei Messets nach und kalibriert entsprechende Parameter, um Mess- und Simulationsergebnisse in hinreichende Übereinstimmung zu bringen. Darüber hinaus liefert die Simulation Werte in viel höherer zeitlicher und räumlicher Dichte und erlaubt Variantenanalysen.

- Um belastbare Aussagen zu treffen, muss eine „ungestörte“ Vegetation als Referenzfall definiert werden. Die „Störung“ durch die Fernwärmetrasse soll bei Einhaltung von Mindestabständen im vertretbaren Rahmen liegen.

Methodik

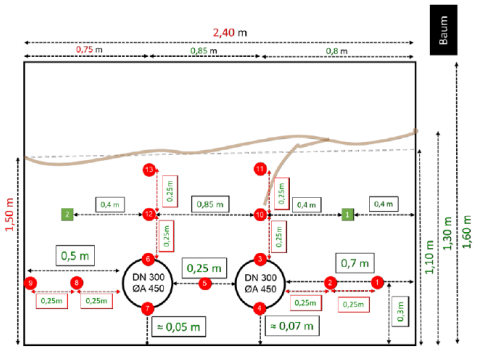
Schritt 1

Die Messwerte der drei Messets werden fehlerbereinigt und ausgewertet. Dazu werden alle Messdaten für den gesamten Simulationszeitraum auf ein einheitliches Stundenraster gebracht. Dies ist notwendig, weil die Messwerte der Sensoren an den Rohren als Randbedingungen in die Simulation eingehen.



Schritt 2

Der Einfluss der Bäume auf die Erdreichtemperatur der Trasse ist vernachlässigbar. Deshalb können die Messets „Ungestört“ und „Graben“ zu einem Messet zusammen gefasst werden.
Dieses Messet wird mit dem Messet „Baum“ kombiniert und dient als Kalibrierungs-vorlage für die Simulations-Variante „Kalibrierung“.

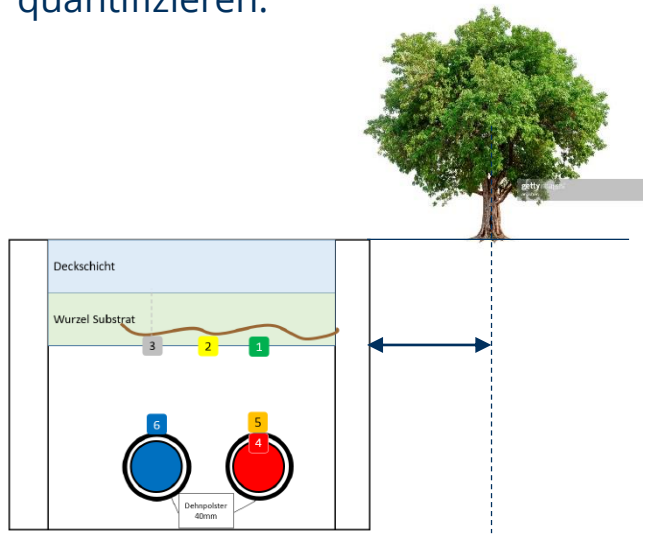


Schritt 3

Es wird eine Simulations-Variante „Vegetation ungestört“ entwickelt. In dieser Variante sollen sich die Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Boden so verhalten, dass normale Wachstums-bedingungen für die Vegetation vorherrschen. Einflüsse des Klimawandels werden nicht berücksichtigt.

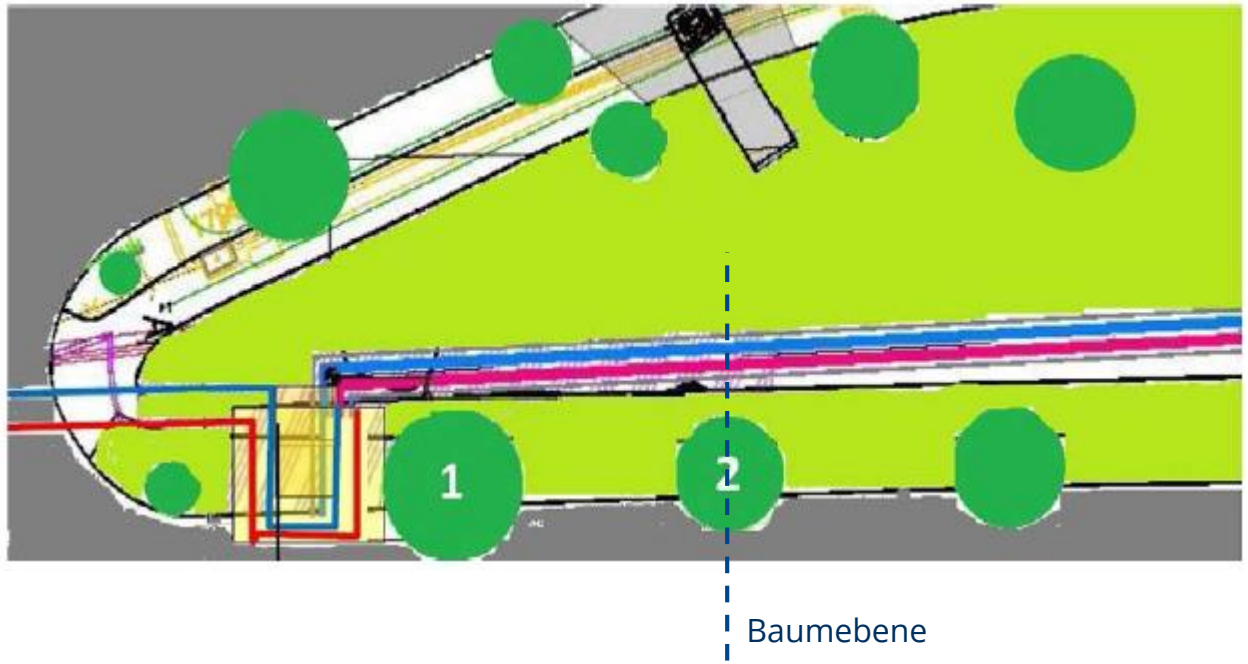
Schritt 4

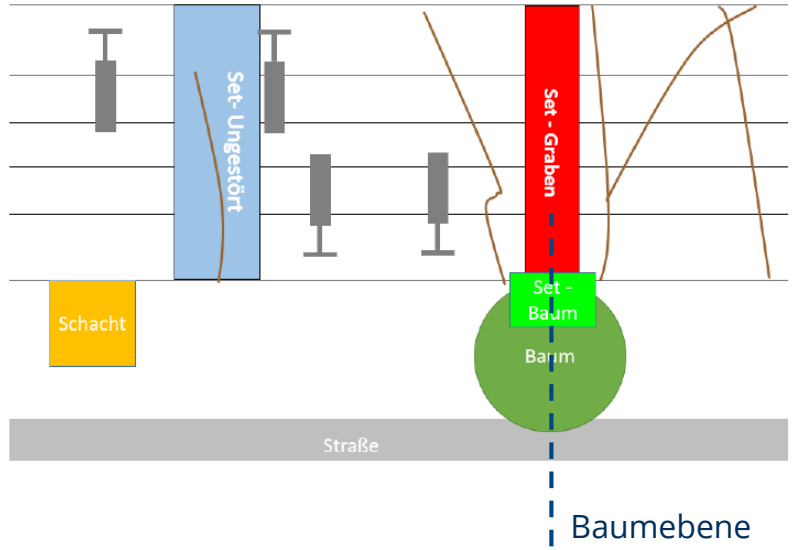
Die Variante „Vegetation ungestört“ ist unter Nutzung der kalibrierten Parameter aus Variante „Kalibrierung“ in mehrere Varianten „Vegetation gestört“ zu überführen. Dabei sind z.B. Abstände zu variieren und in jedem Fall die Störung im Wurzelsubstratbereich zu quantifizieren.



Methodik

Der AGFW-Dokumentation „Konzept und Dokumentation zur Langzeitmessung an einer Fernwärmetrasse im Wurzelbereich von Bäumen“ ist zu entnehmen, dass drei Messets ausgeführt wurden. Die Messets „Baum“ und „Graben“ befinden sich unmittelbar in der Baumebene. Das Messet „Ungestört“ hat einen Versatz von einigen Metern.





Für das 2D-Simulationssetup werden alle Messwerte in die Baumebene projiziert. Es ist davon auszugehen, dass keine wesentlichen Unterschiede in den Messets „Ungestört“ und „Graben“ durch den Baum zu erwarten sind. Durch diese Vorgehensweise lassen sich Fehlstellen in den Messwerten sinnvoll ergänzen.

Schritt 1
Aufarbeitung der Messwerte

Schritt 1: Simulationszeitraum / Festlegung Stundenraster

Der Simulationszeitraum wird folgendermaßen festgelegt:

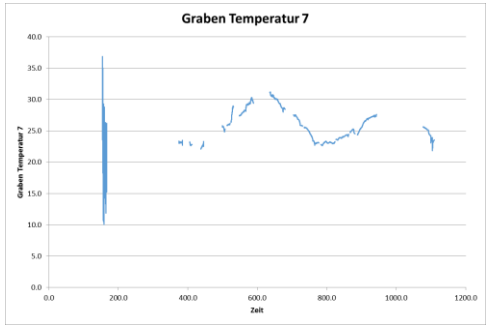
	Datum	Uhrzeit	Zeit in Excel	Zeit in DELPHIN
Berechnungsstart:	01.01.2019	00:00:00	43 466.00 d	0 d
Berechnungsende:	15.01.2022	00:00:00	44 576.00 d	1109.00 d

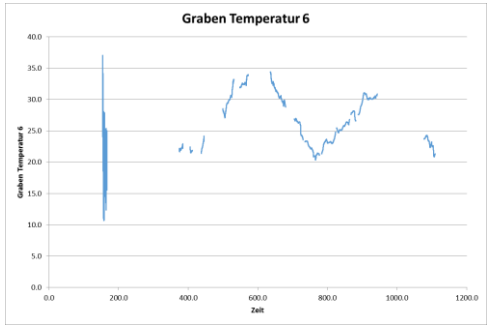
Für den Simulationszeitraum wird ein Stundenraster generiert, auf dem die Messwerte und Simulationsergebnisse dargestellt werden. Die Darstellung aller zeitabhängigen Größen erfolgt in DELPHIN-Zeit, d.h. beginnend mit t = 0 d. Die Umrechnung in eine Datumsachse kann anschließend im Postprozessing erfolgen.

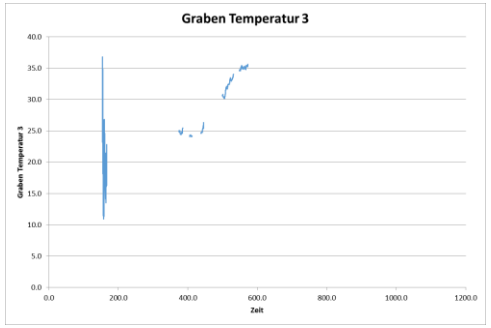
Die Temperaturen werden in °C, die Feuchtewerte in m^3/m^3 bzw. Vol% angegeben. Die Einheit der Zeitachse ist in Tagen (d) oder Jahren (a).

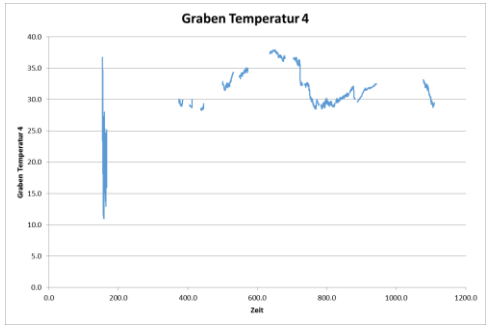
Die Messdaten werden fehlerbereinigt. Temperaturen müssen im Intervall 1°C < T < 60°C und Feuchtegehalte im Intervall 1 Vol% < W < 99 Vol% liegen. Ausreißer werden eliminiert.

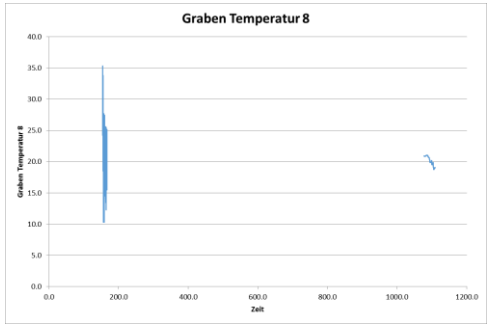
Schritt 1: Fehlerbereinigung / Stundenraster Messwerte – Messet Graben

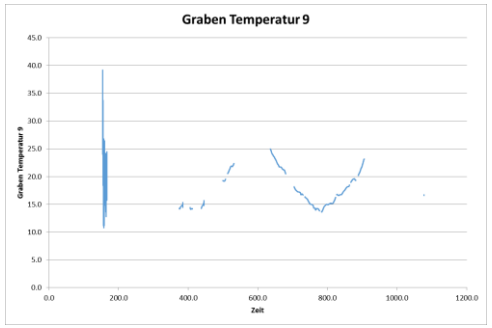


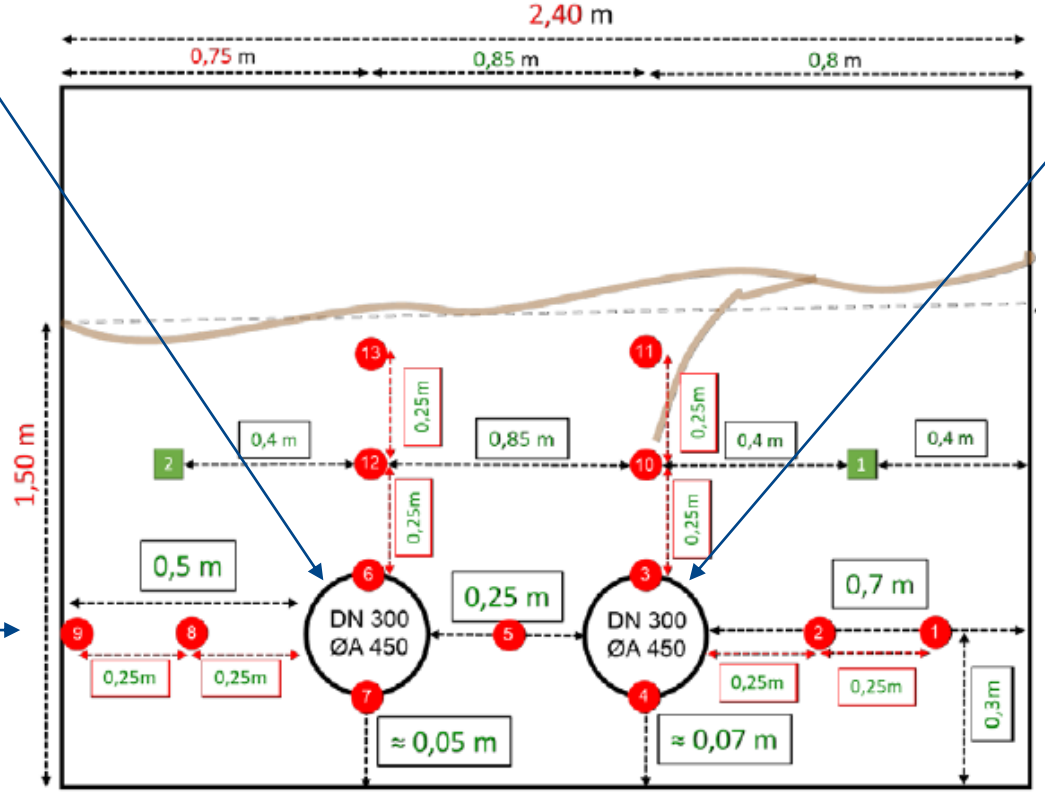


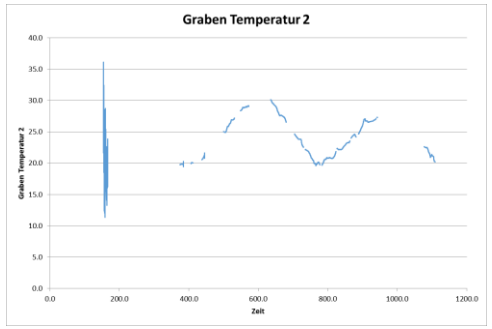


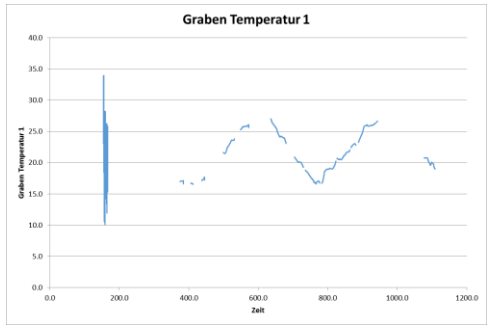




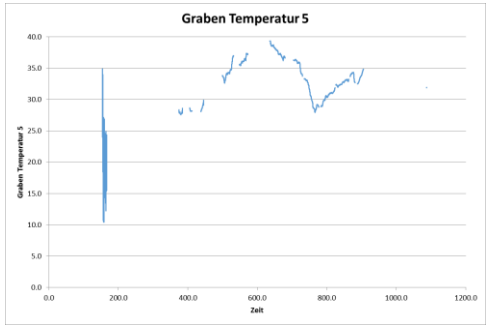


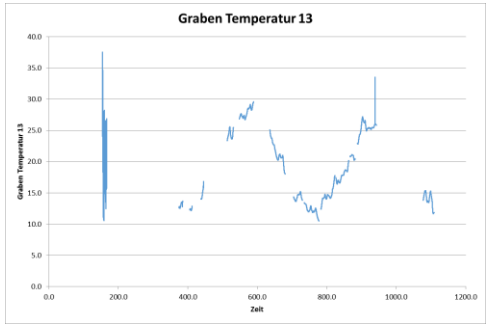


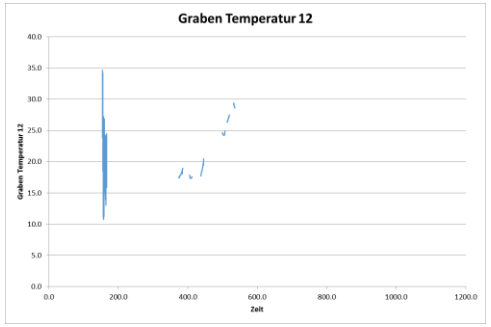


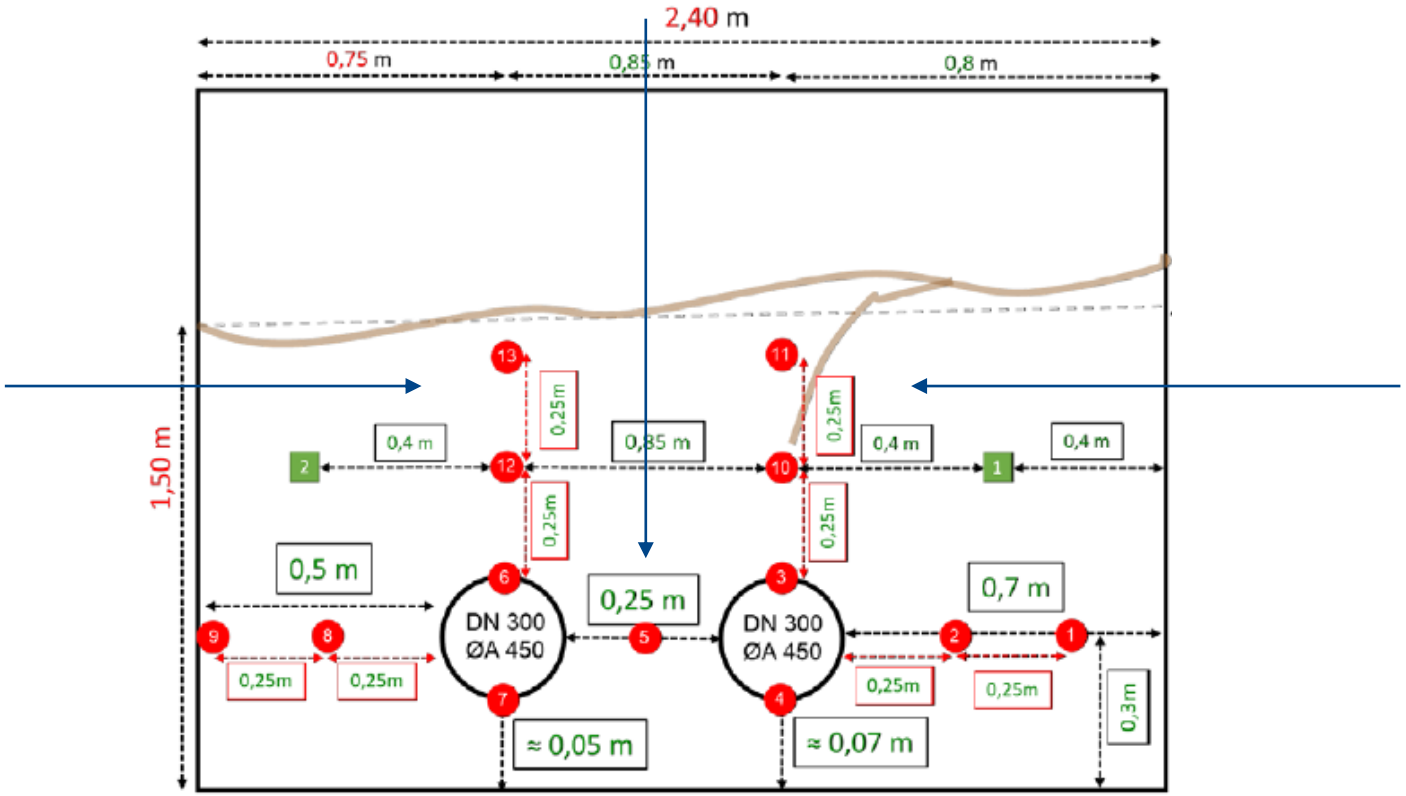


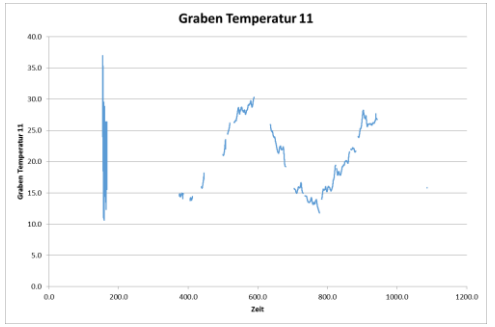
Schritt 1: Fehlerbereinigung / Stundenraster Messwerte – Messet Graben

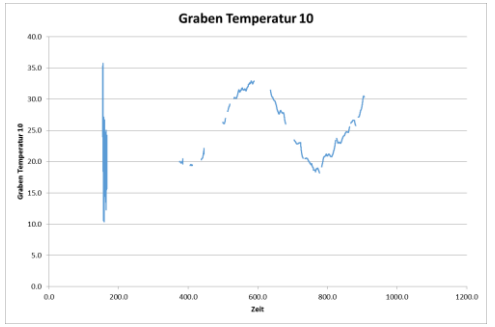




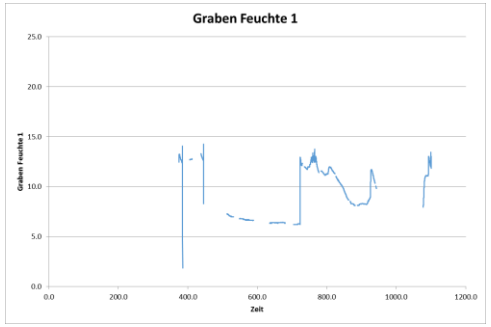


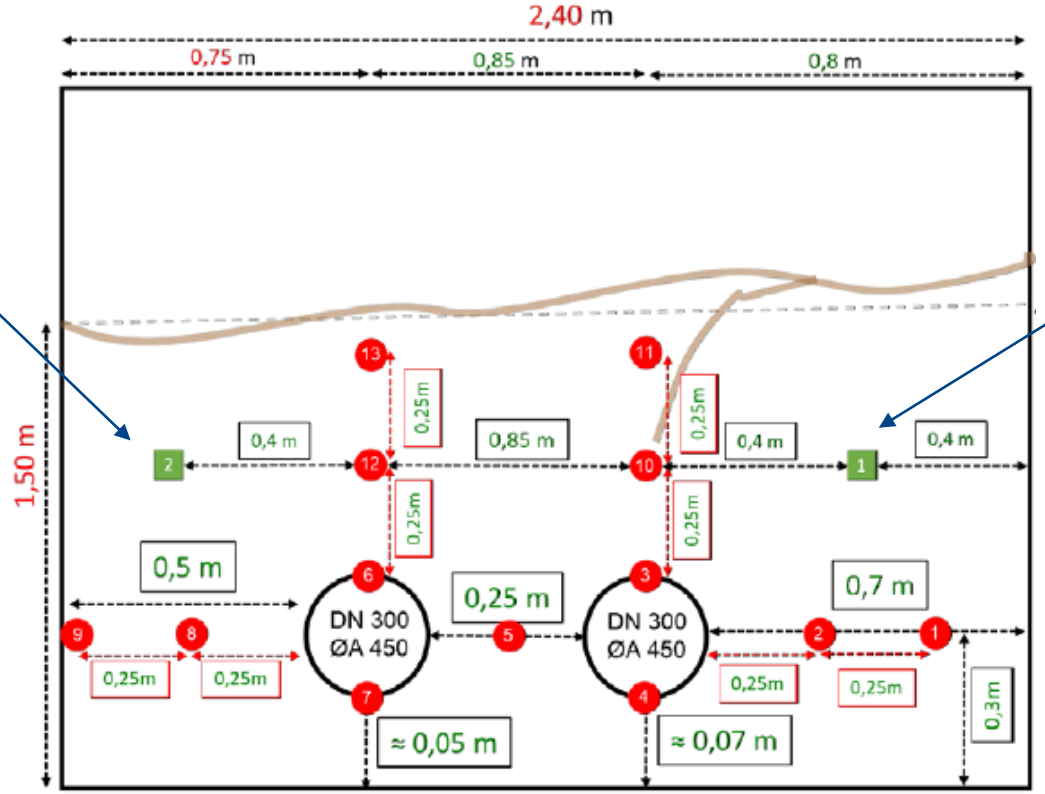


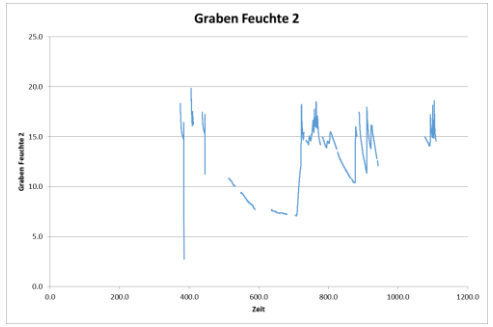




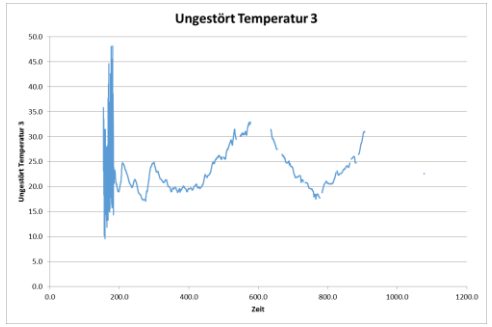
Schritt 1: Fehlerbereinigung / Stundenraster Messwerte – Messet Graben

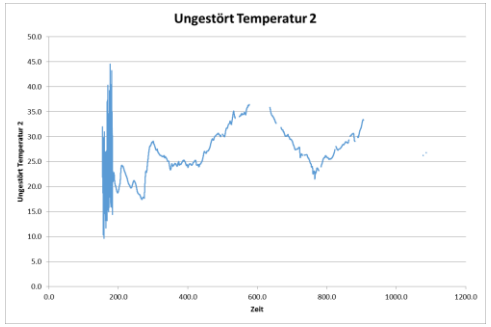


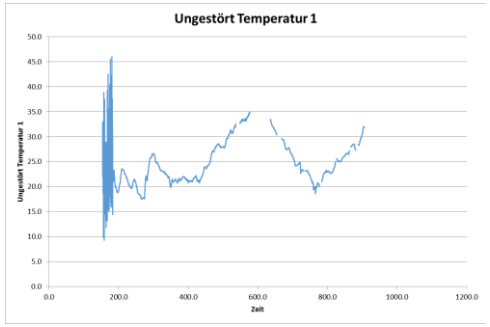


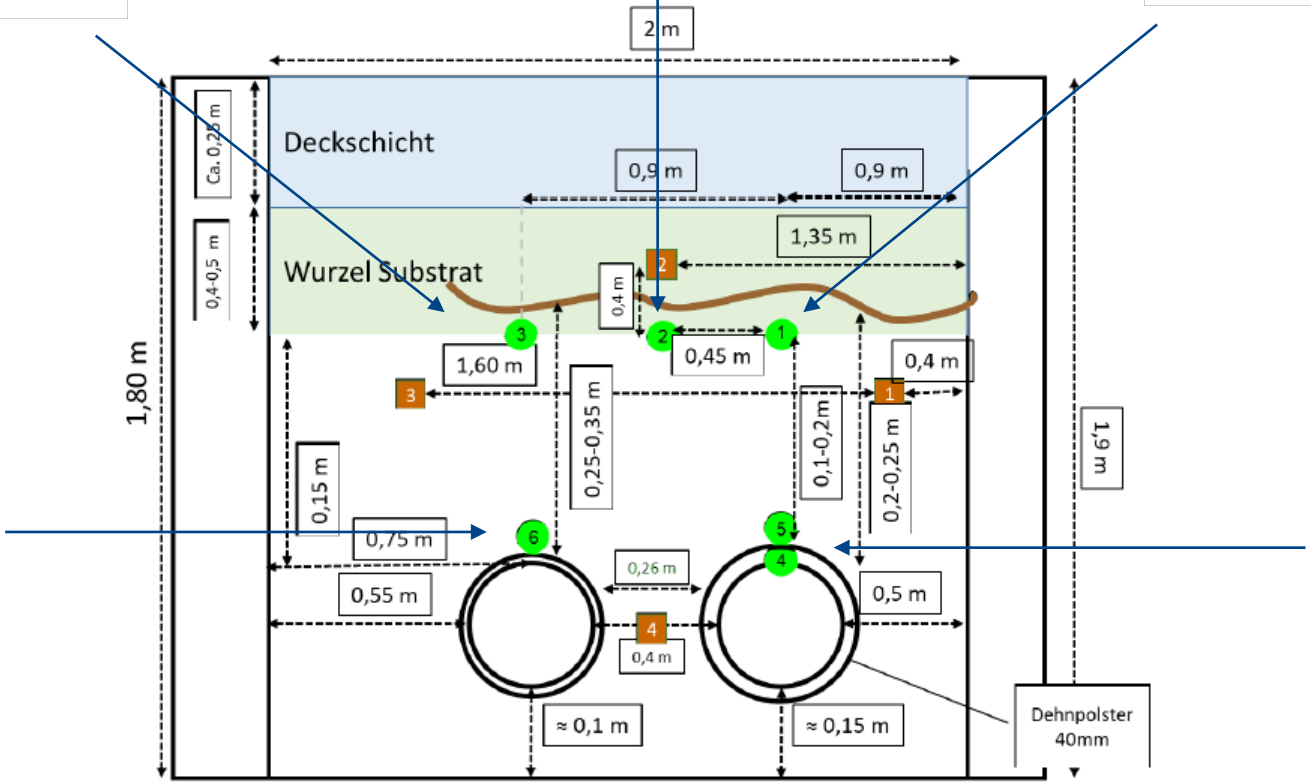


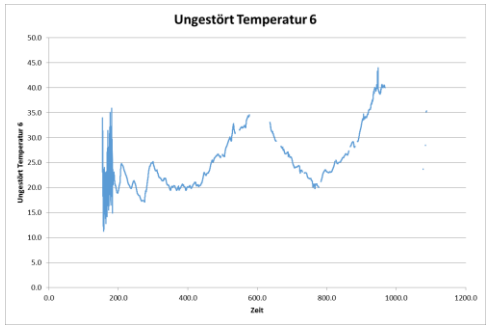
Schritt 1: Fehlerbereinigung / Stundenraster Messwerte – Messet Ungestört

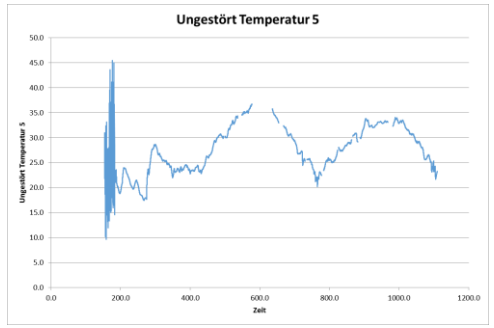


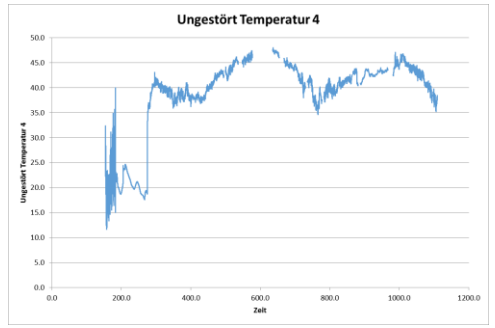




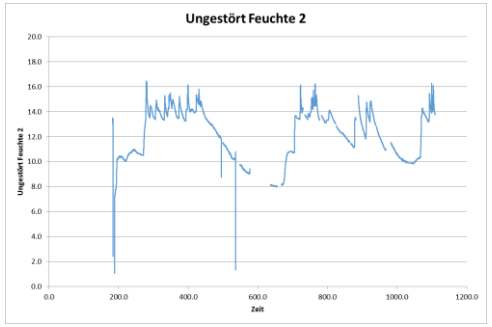


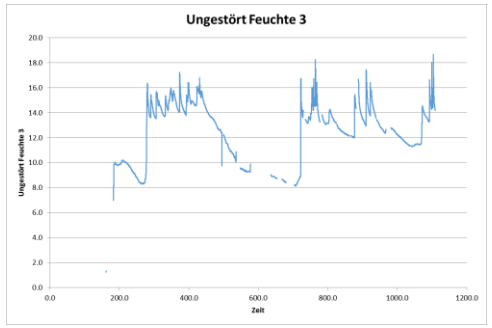


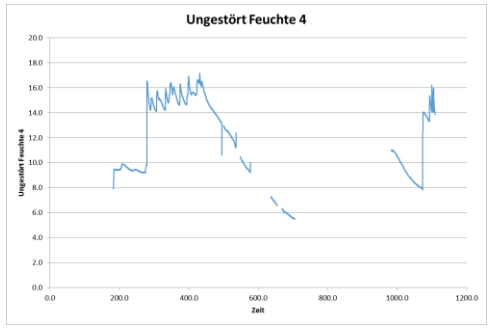


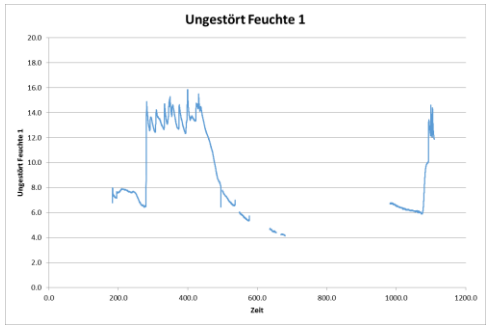


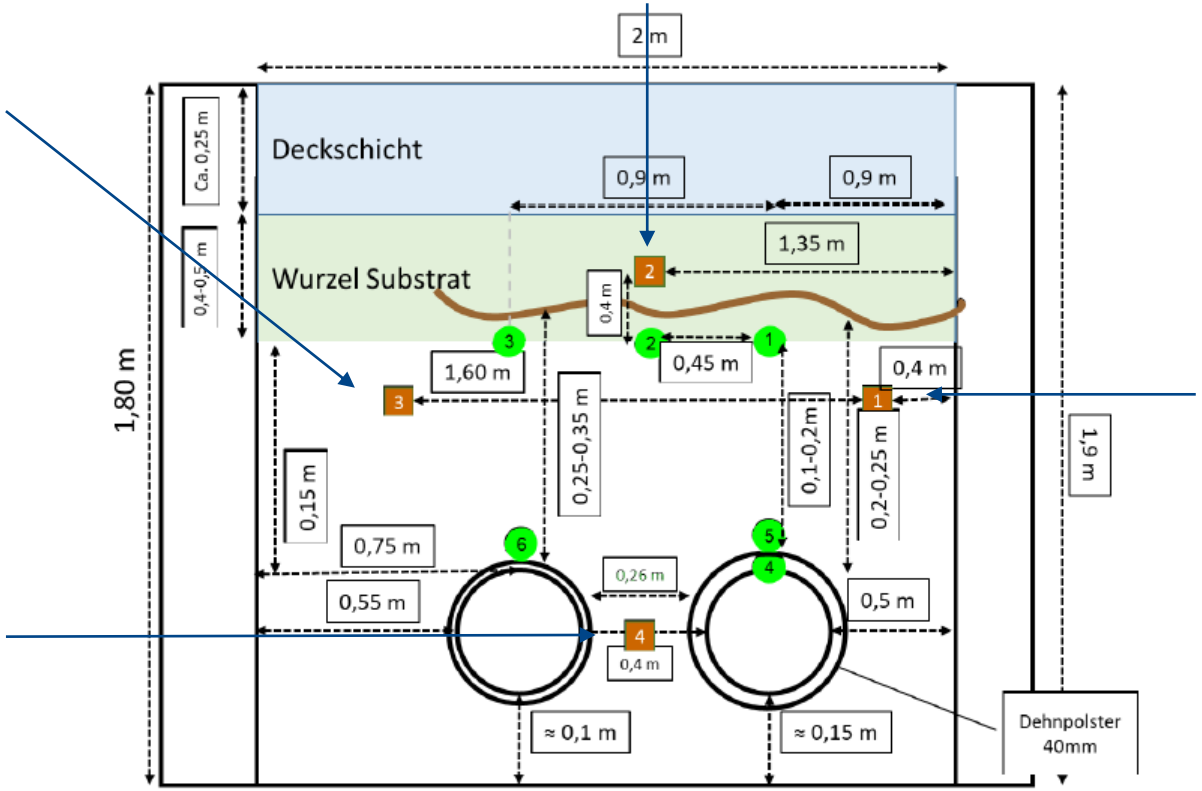
Schritt 1: Fehlerbereinigung / Stundenraster Messwerte – Messet Ungestört



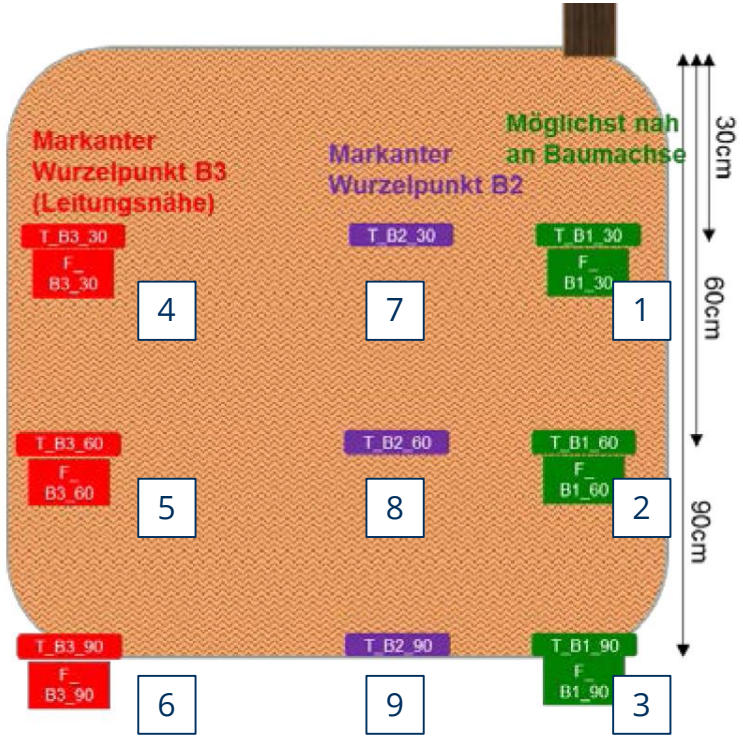


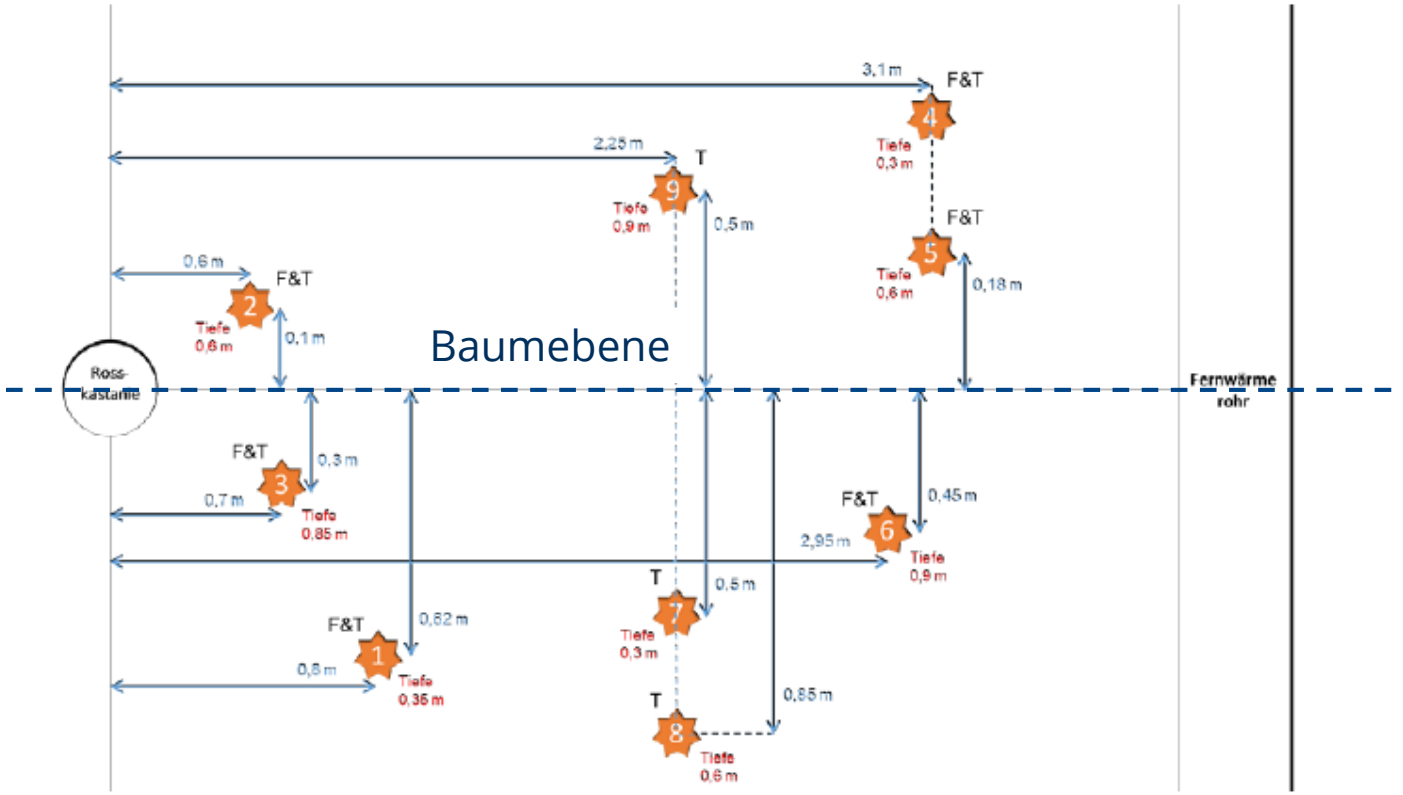






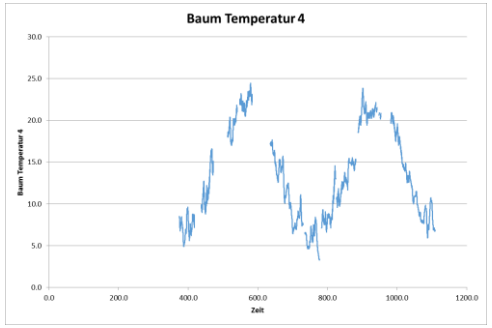
Zuordnung der Sensornummern

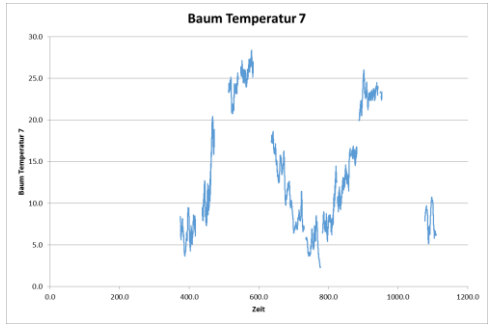


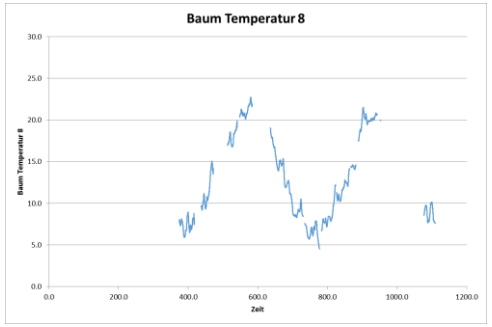


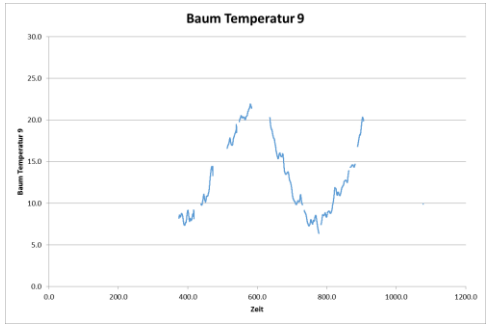
2D: Alle Sensoren werden in die Baumebene projiziert.

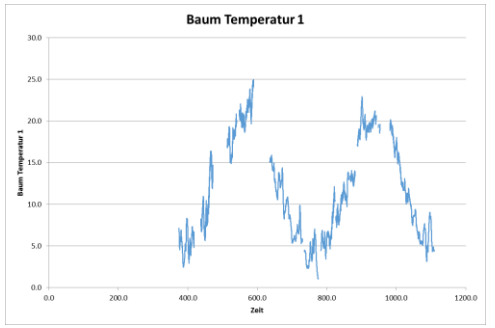
Schritt 1: Fehlerbereinigung / Stundenraster Messwerte – Messet Baum

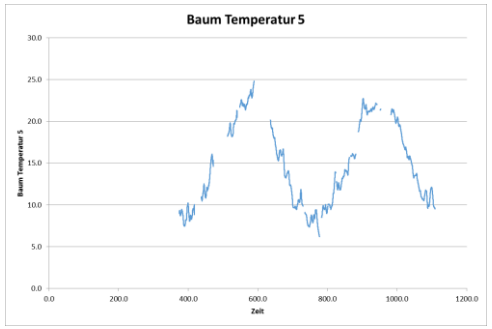


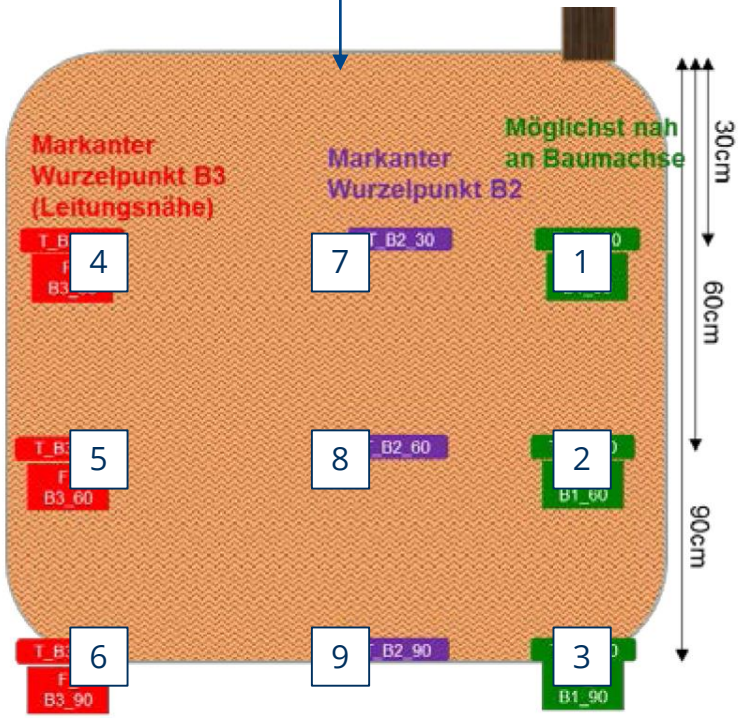


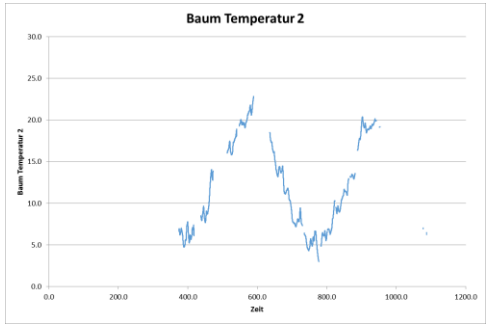


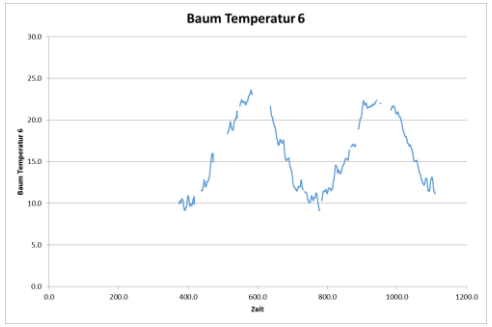


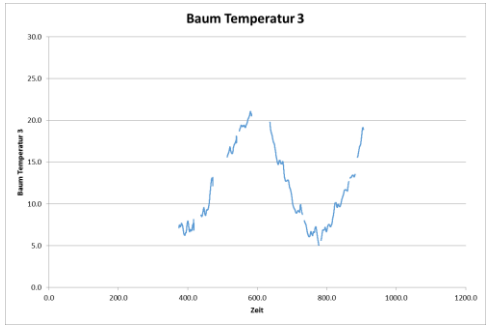




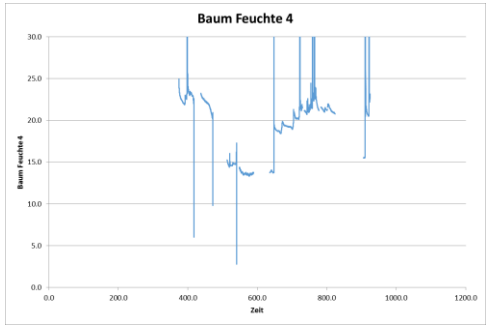


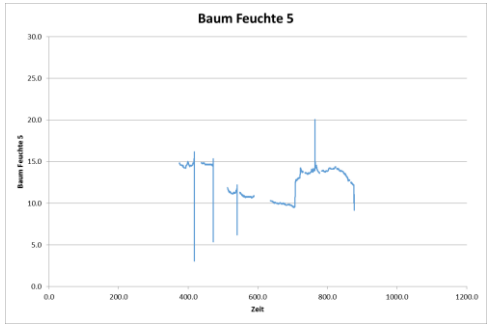


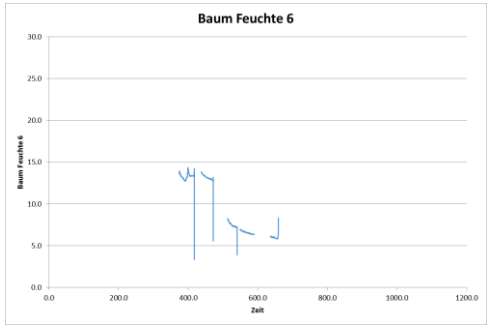


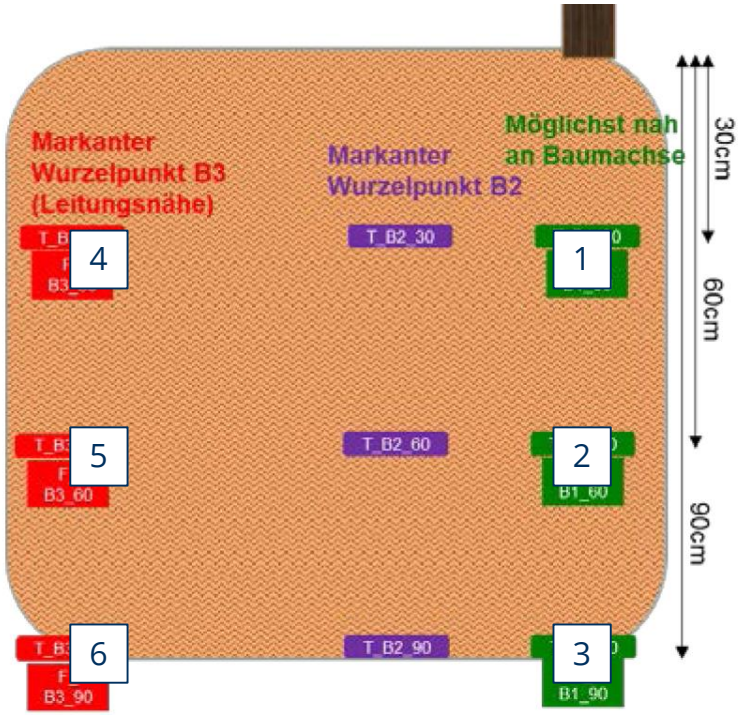


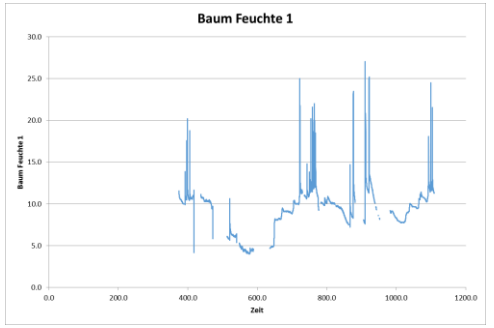
Schritt 1: Fehlerbereinigung / Stundenraster Messwerte – Messet Baum

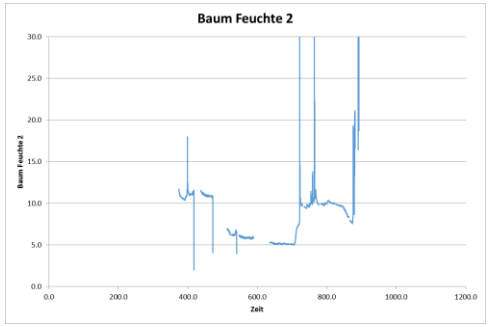


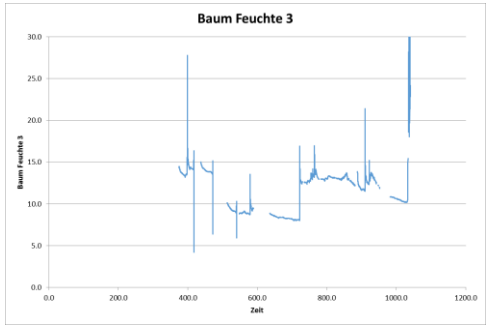






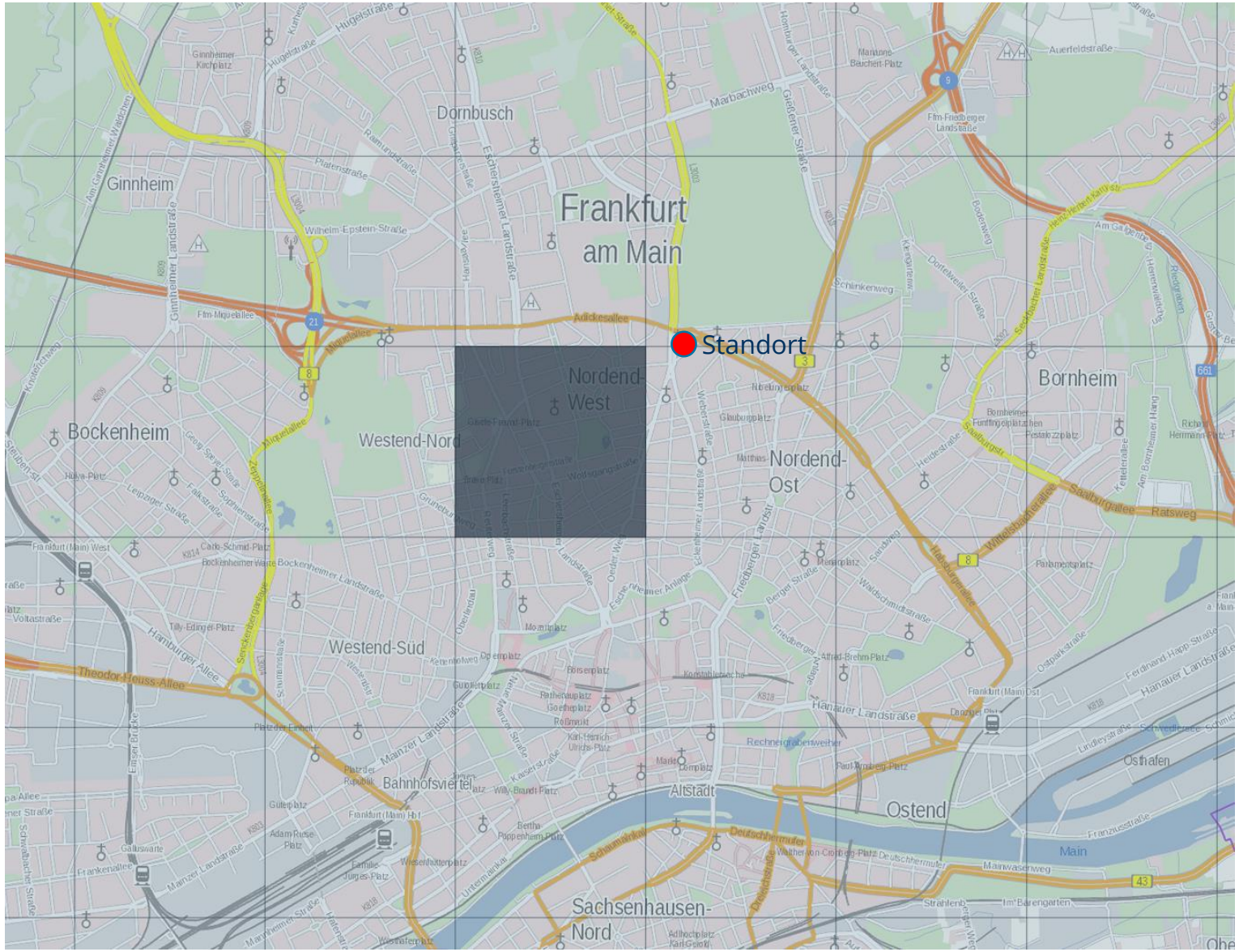






Schritt 2
Simulations-Setup
„Kalibrierung“

Schritt 2: Simulations-Setup für Kalibrierung: Klimadaten



Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand

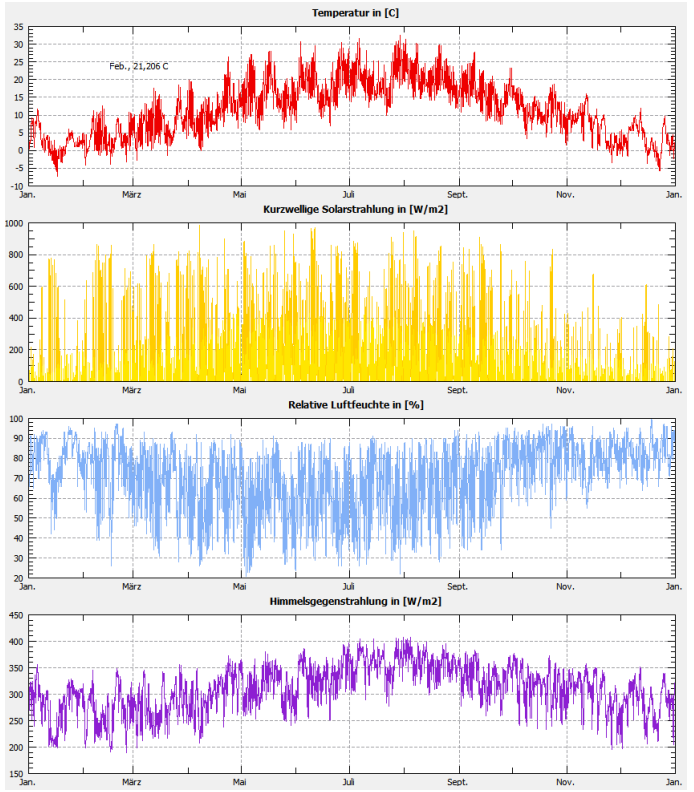
Klimaberatungsmodul

Auswahlübersicht

Bitte überprüfen Sie die eingegebenen Daten, bevor Sie mit "Produkt herunterladen" den Bestellvorgang aktivieren.

Bezugskoordinaten (WGS84)

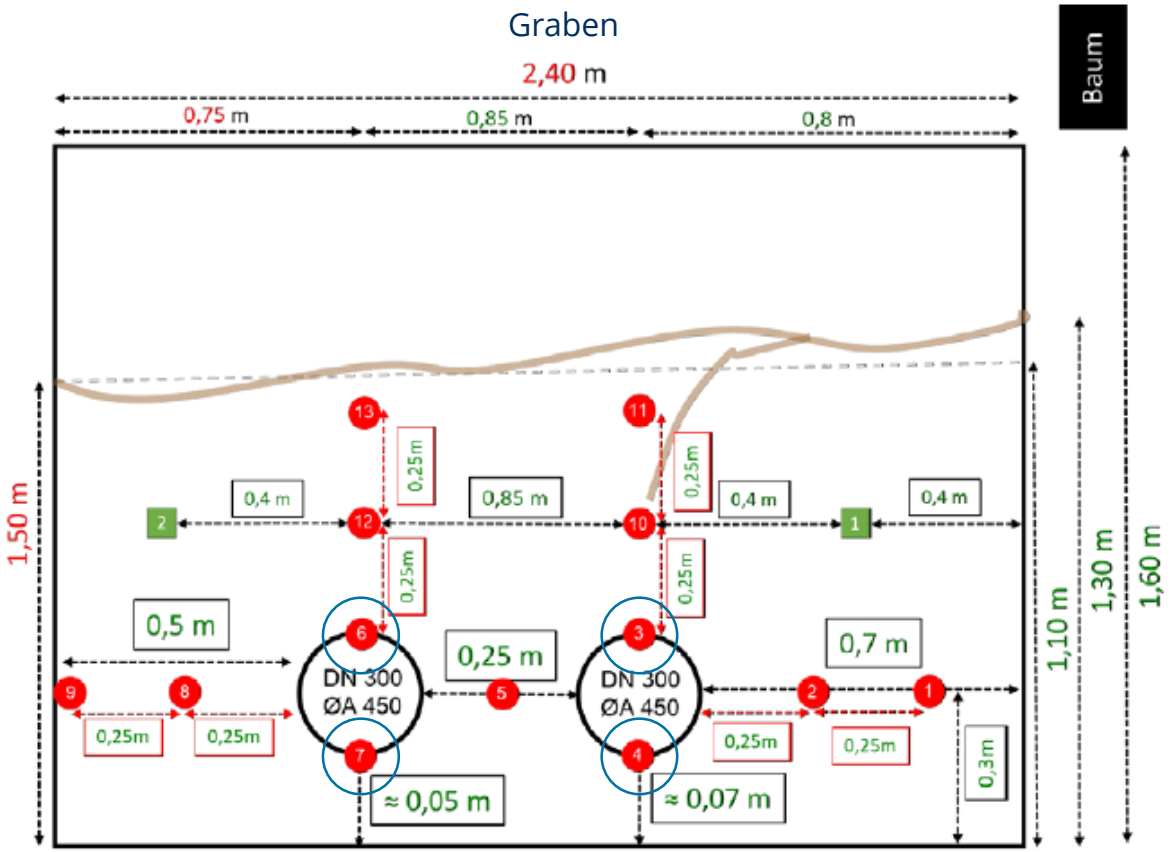
50,1260° N 8,6749° O



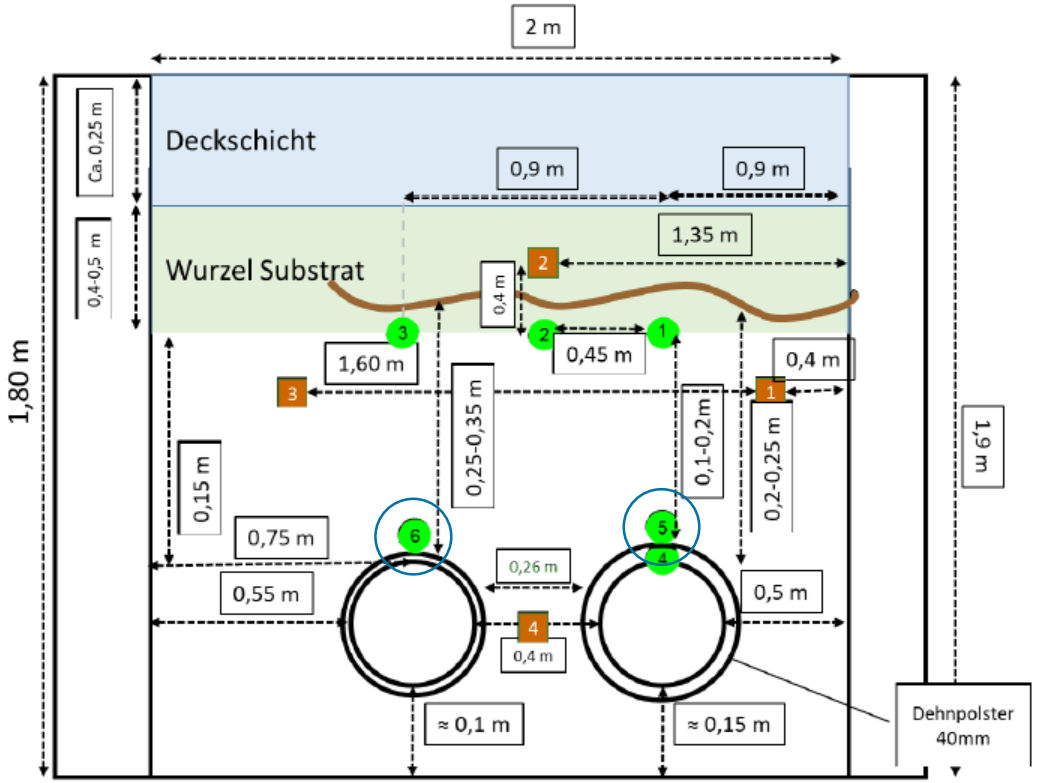
Schritt 2: Simulations-Setup für Kalibrierung: Vorlauf, Rücklauf

Die Sensoren unmittelbar an den Rohren dienen als Randbedingung in der Simulation. Diese müssen für den gesamten Simulationszeitraum gegeben sein. Aus den Messstellen 3+4 (Graben) + 5 (Ungestört) sowie 6+7 (Graben) + 6 (Ungestört) werden Mittelwerte gebildet, wo mehrere Werte gegeben sind. Sonst wird nur der jeweils verfügbare Wert genommen. Fehlen zeitliche Zwischenwerte ganz, wird linear interpoliert.

Graben

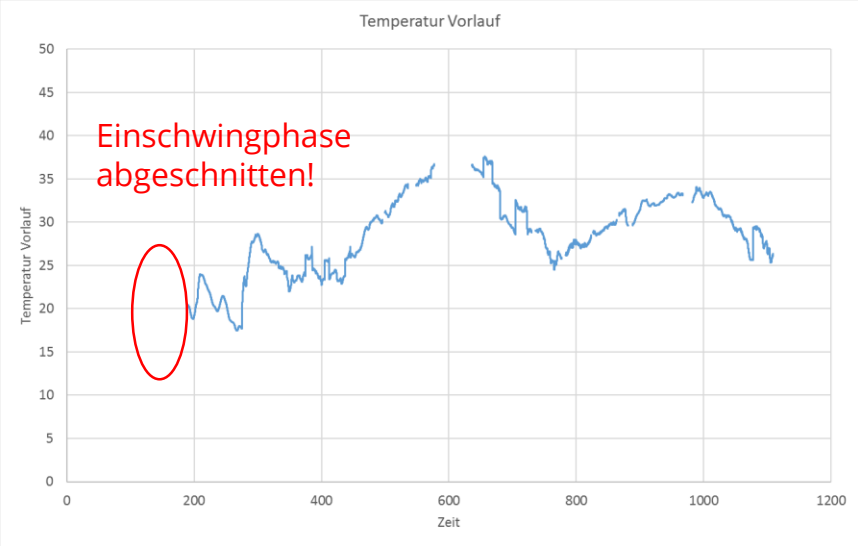


Ungestört

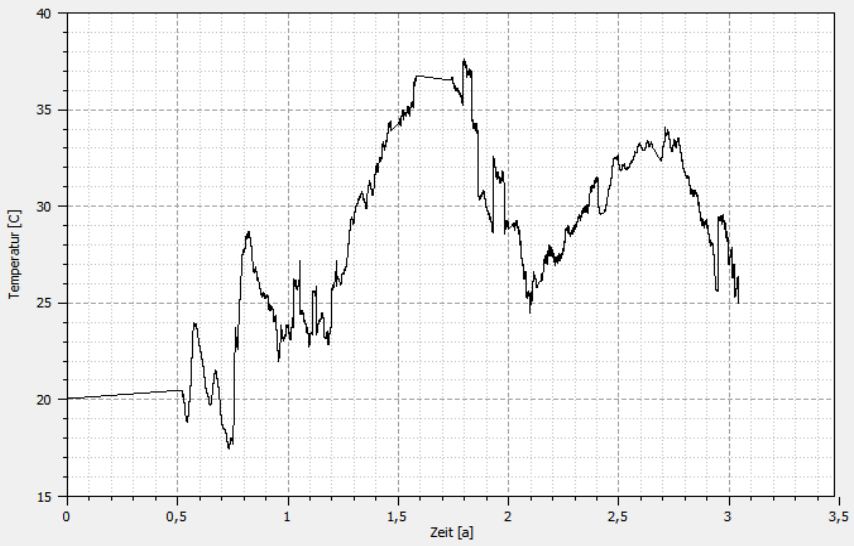


Schritt 2: Simulations-Setup für Kalibrierung : Randbedingungen Vorlauf-, Rücklauftemperaturen

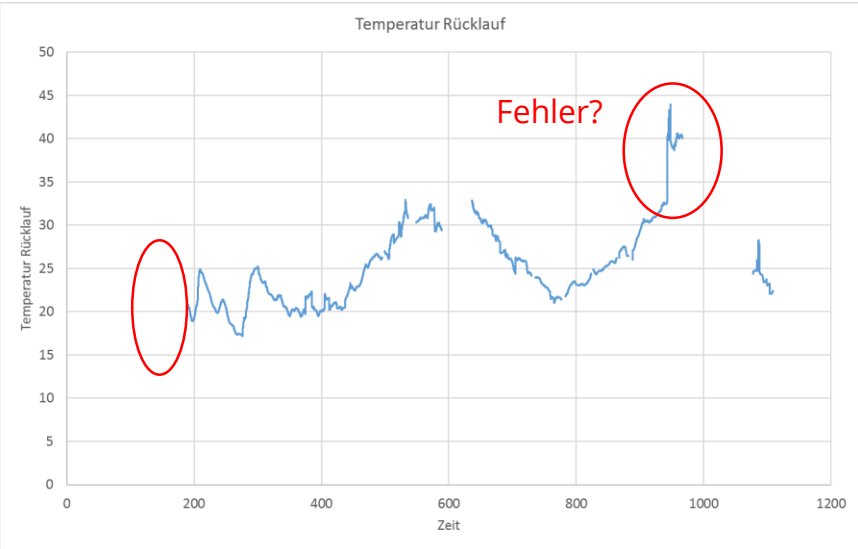
Vorlauftemperatur = Mittelwert aus
- Graben Temperatur 3
- Graben Temperatur 4
- Ungestört Temperatur 5

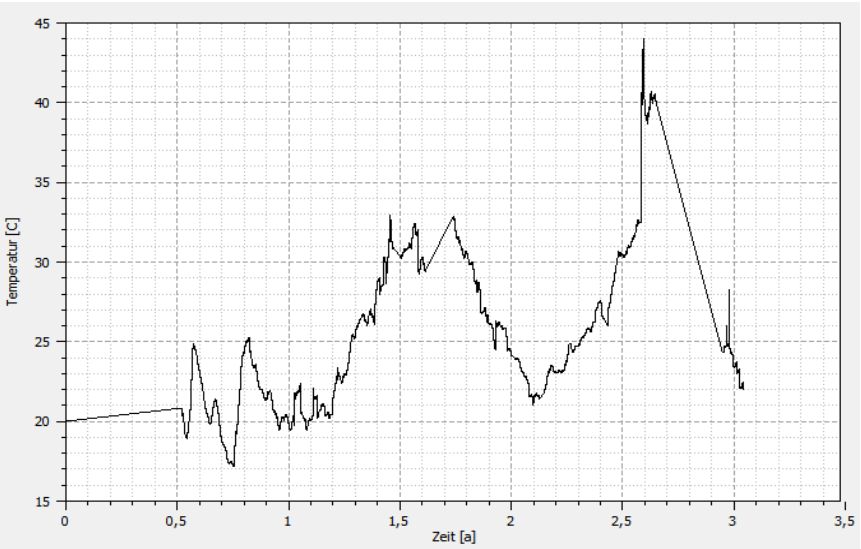


Lineare Interpolation in DELPHIN6



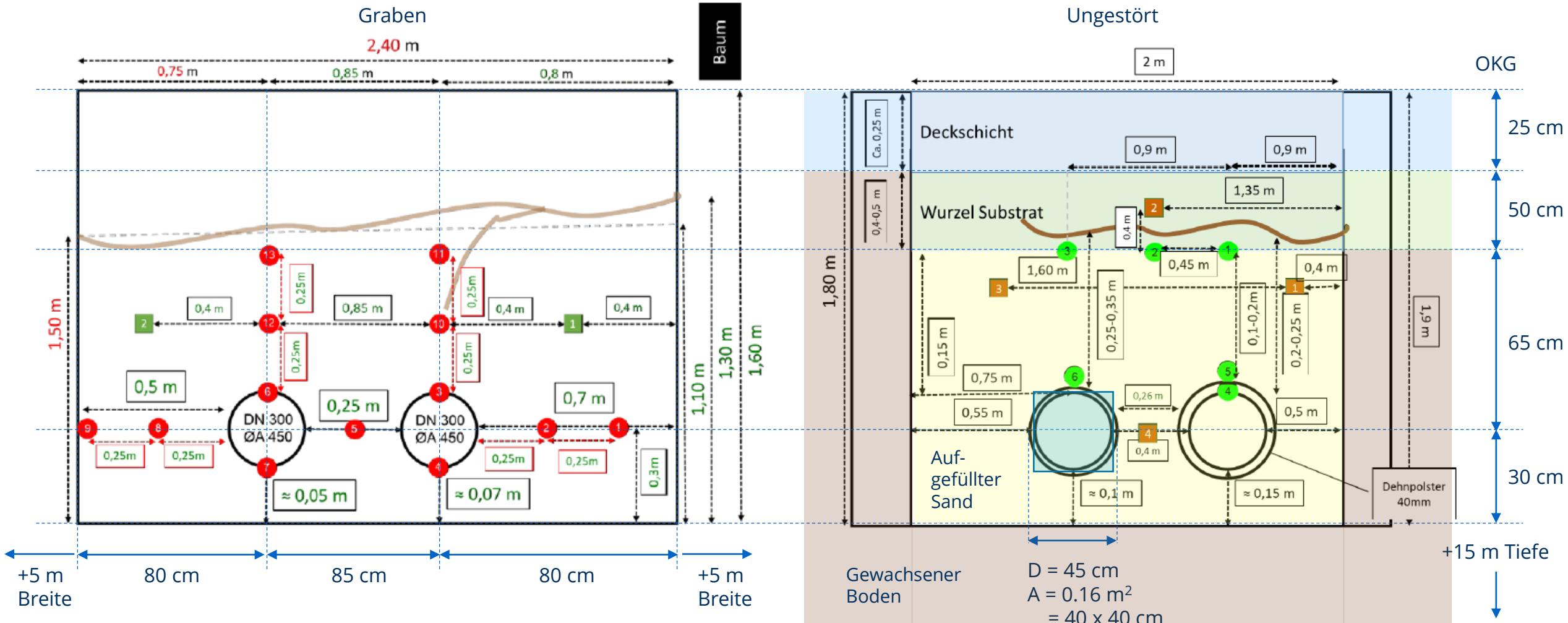
Rücklauftemperatur = Mittelwert aus
- Graben Temperatur 6
- Graben Temperatur 7
- Ungestört Temperatur 6





Schritt 2: Simulations-Setup für Kalibrierung: Festlegung Geometrie

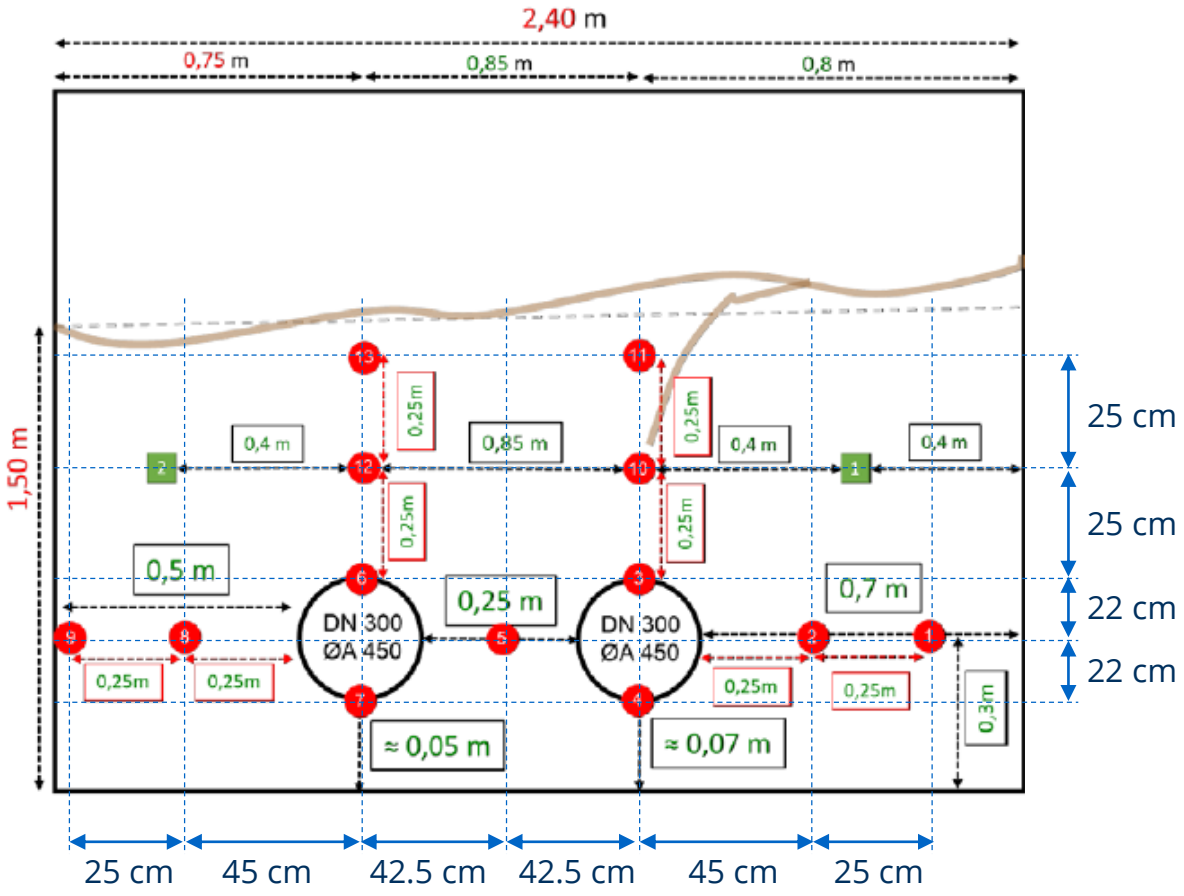
Das geometrische Setup wird vereinfacht. Einige Maßangaben sind schwer zu interpretieren. Es werden Mittelwerte aus den beiden Messets „Graben“ und „Ungestört“ angenommen.



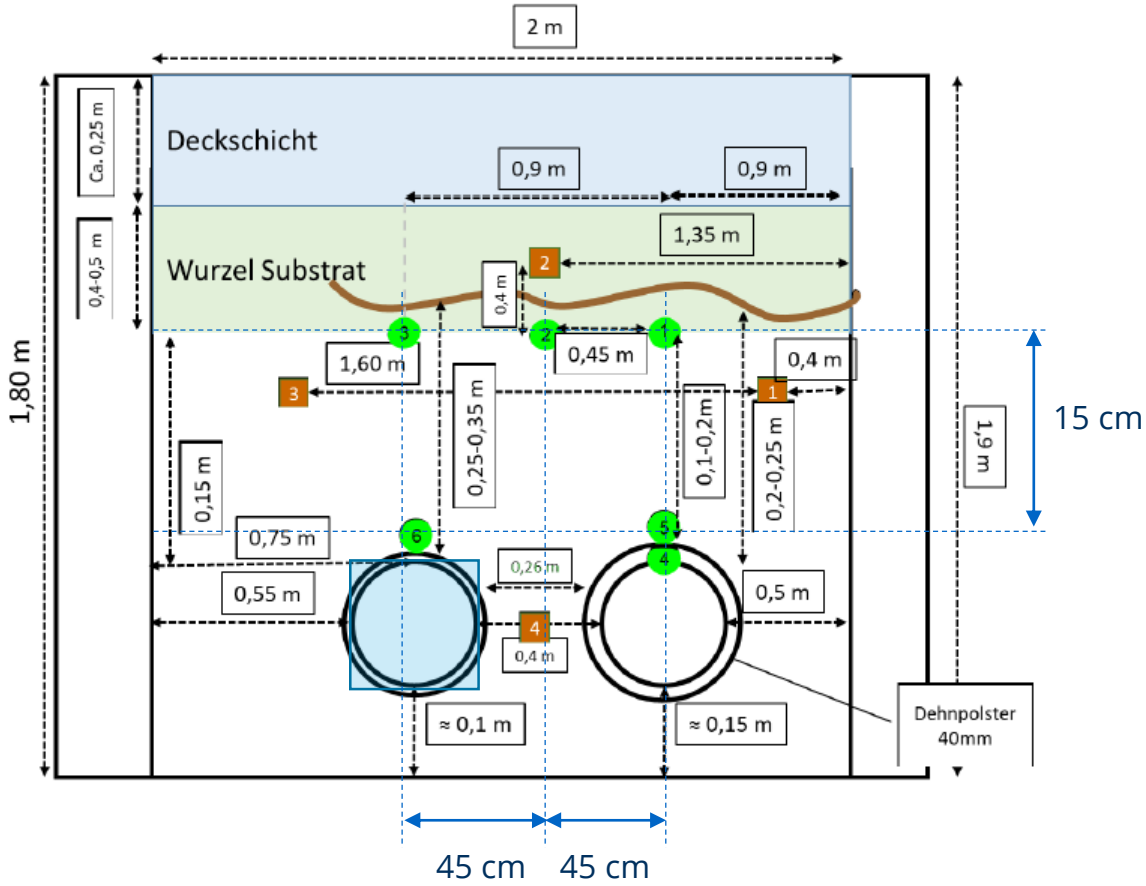
Schritt 2: Simulations-Setup für Kalibrierung: Festlegung Sensorpositionen

Die Temperatur-Sensorpositionen aus beiden Messets werden übernommen. Die Maßketten werden von den Rohren ausgehend definiert.

Graben



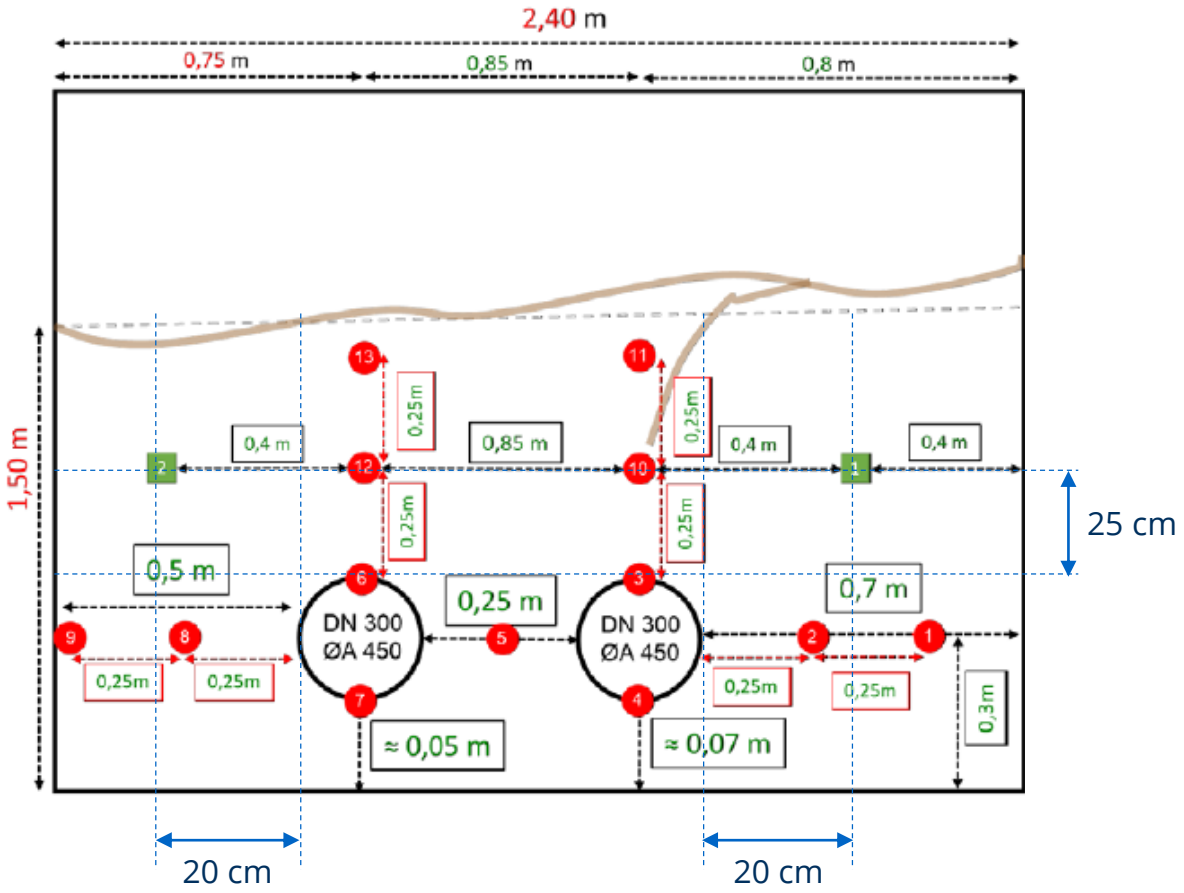
Ungestört



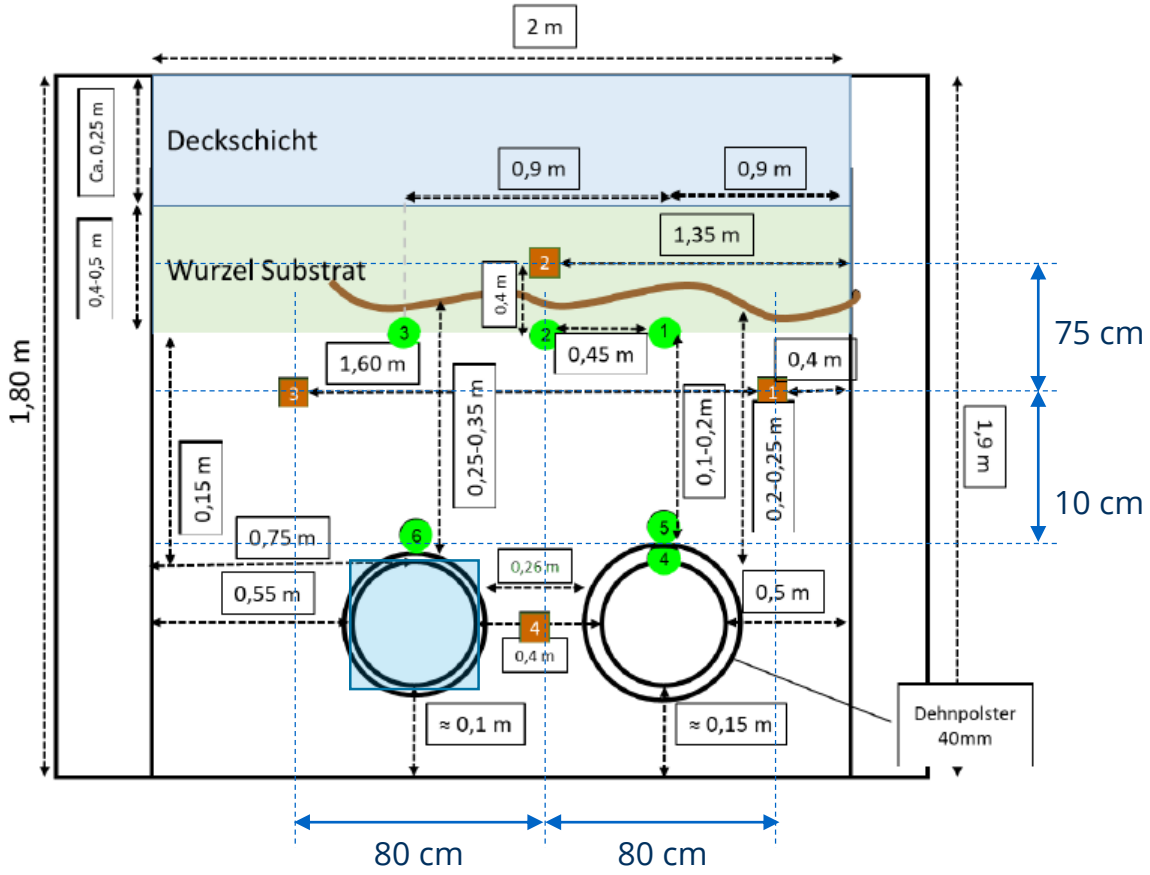
Schritt 2: Simulations-Setup für Kalibrierung: Festlegung Sensorpositionen

Die Feuchte-Sensorpositionen aus beiden Messets werden übernommen. Die Maßketten werden von den Rohren ausgehend definiert.

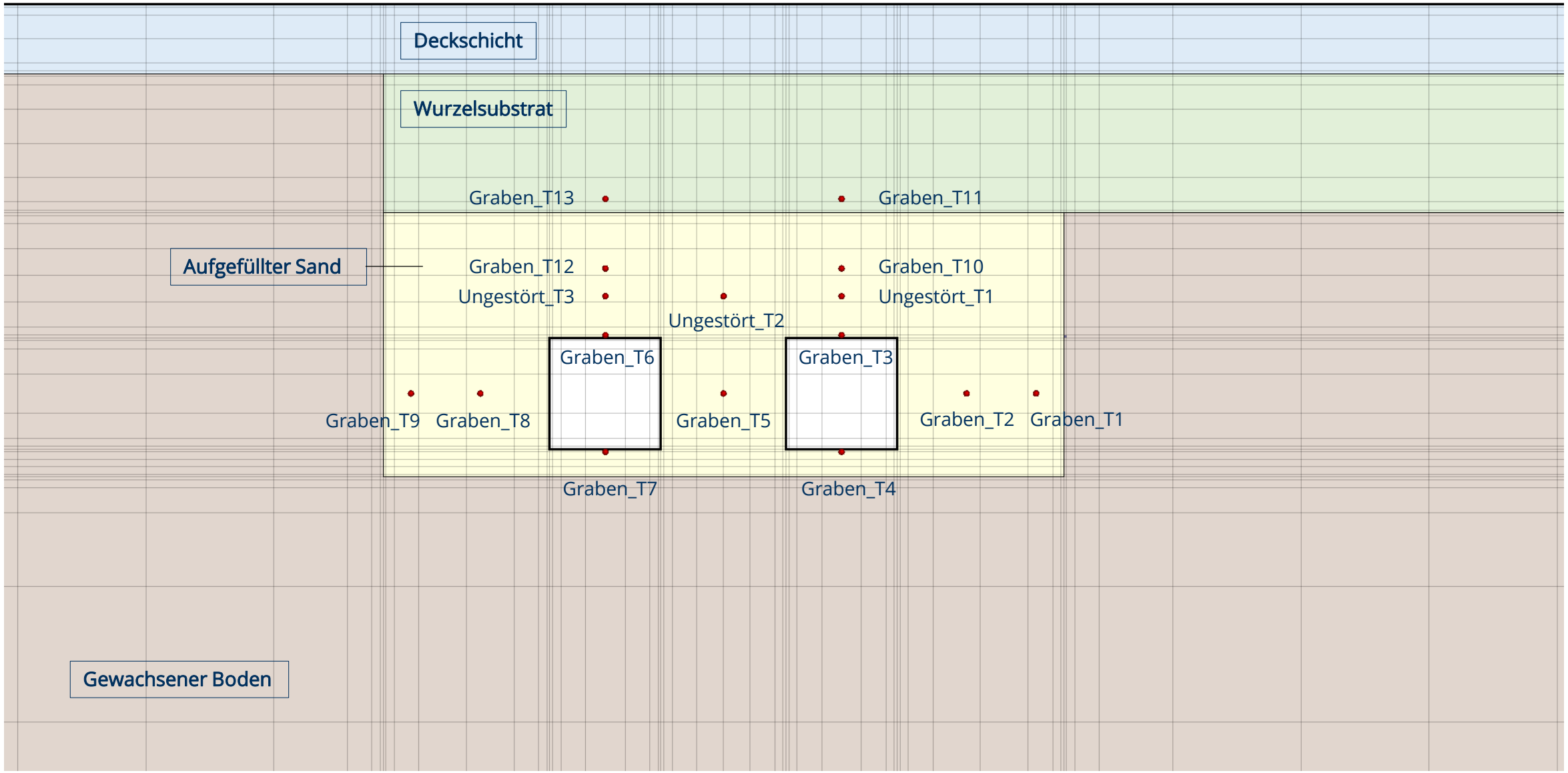
Graben



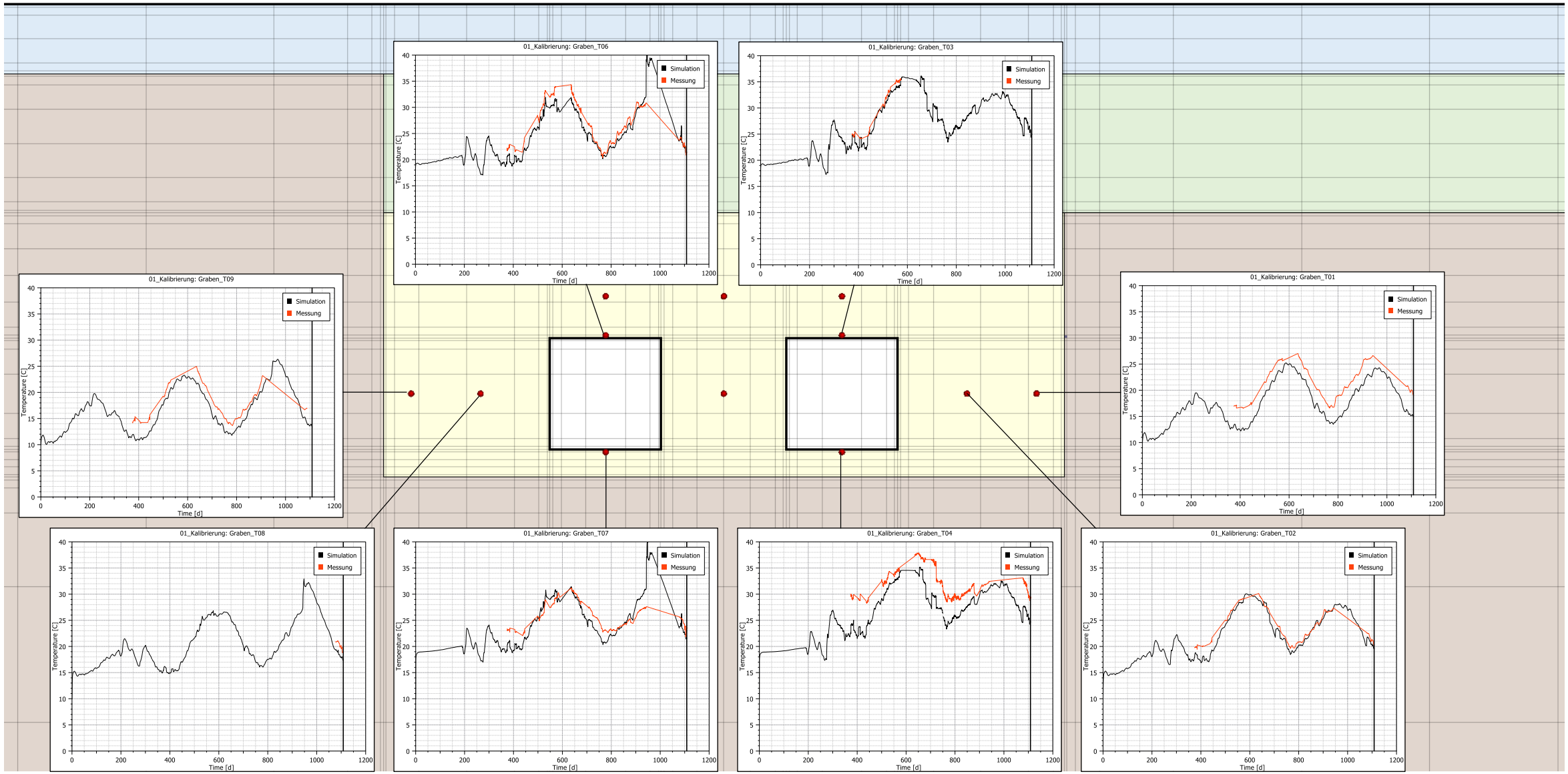
Ungestört



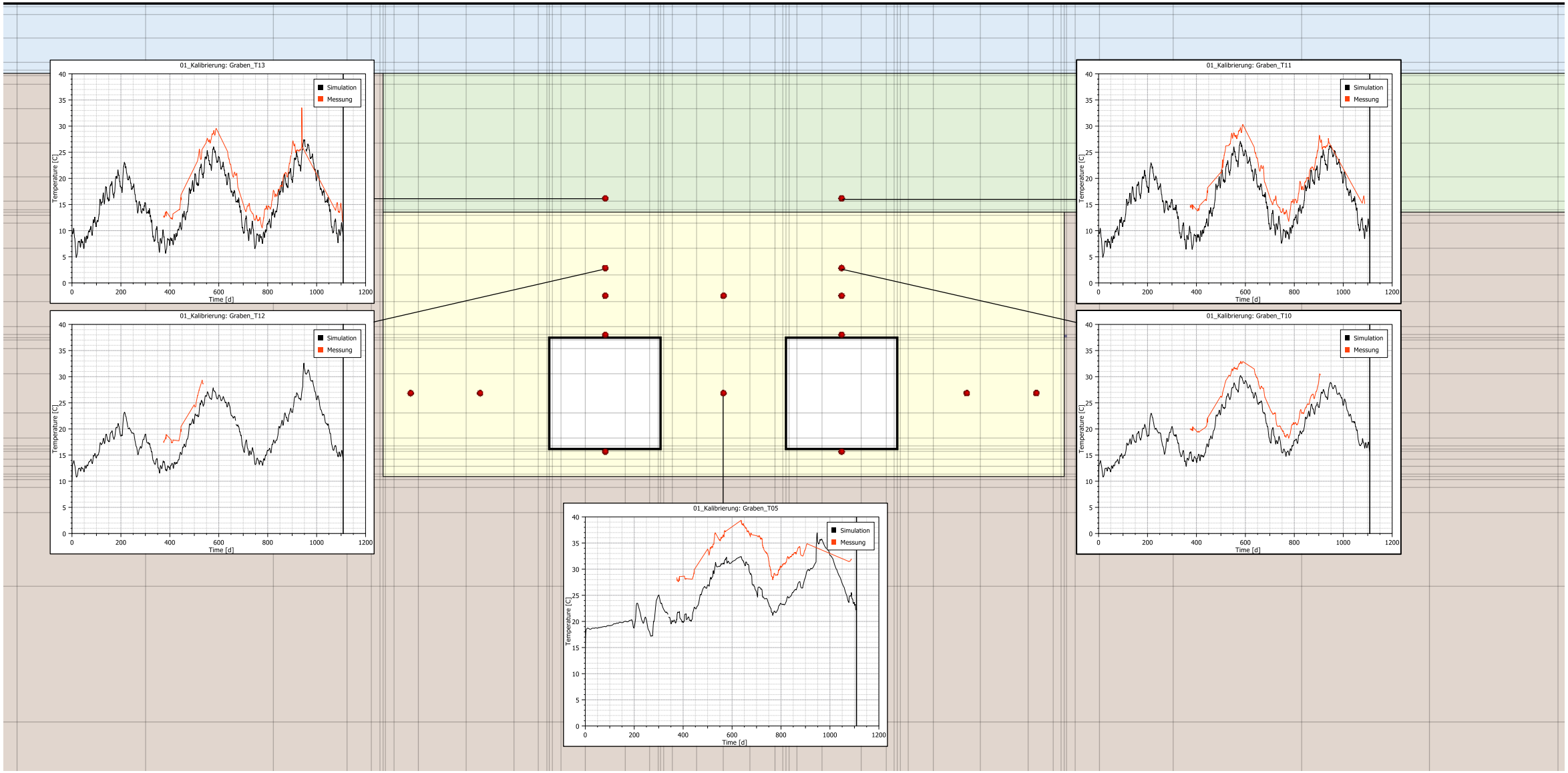
Schritt 2: Simulations-Setup für Kalibrierung: Geometrisches Modell + T-Sensoren



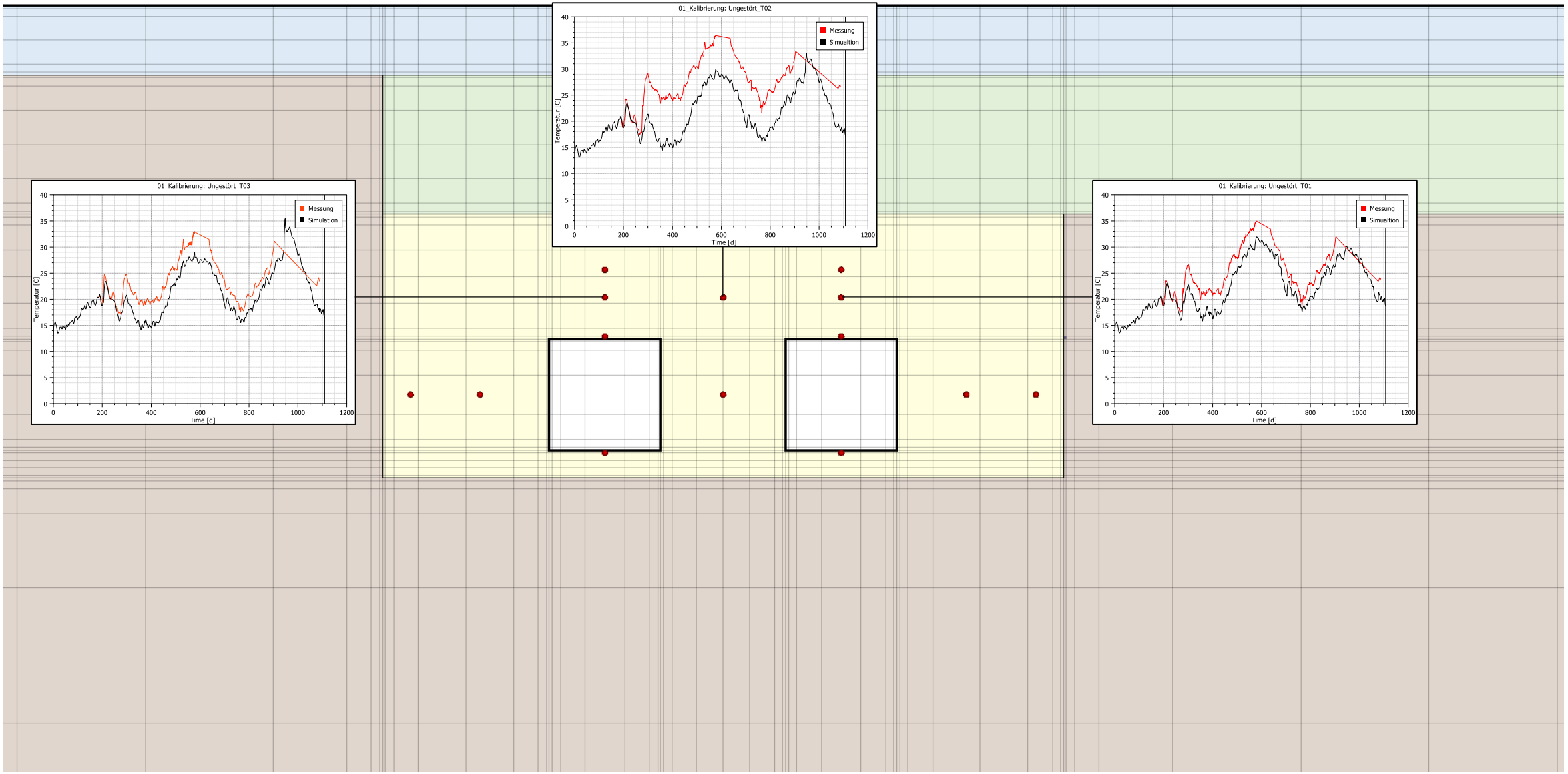
Schritt 2: Ergebnisse unkalibriert



Schritt 2: Ergebnisse unkalibriert

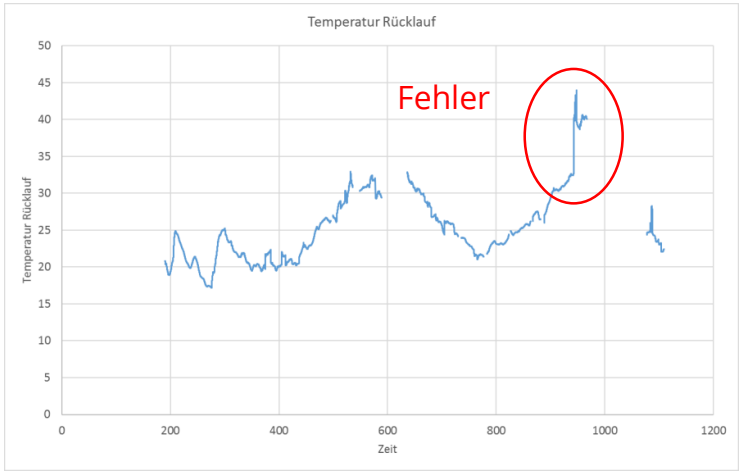


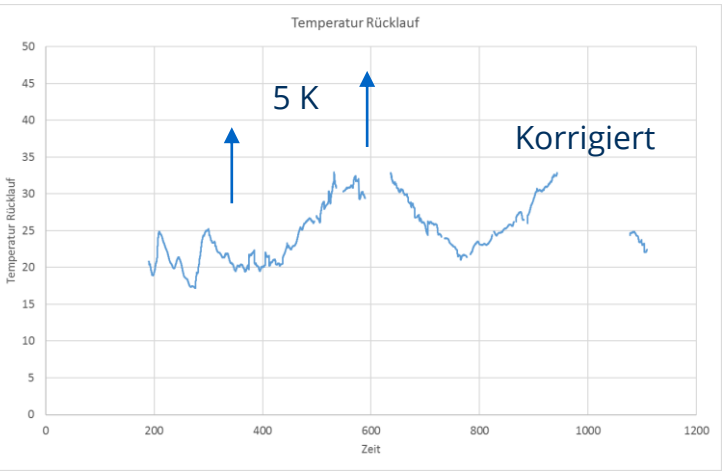
Schritt 2: Ergebnisse unkalibriert



Schritt 2: Kalibrierungsschritte

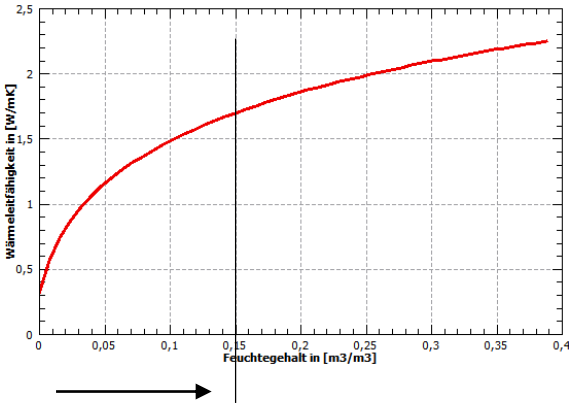
1. Fehler Rücklauftemperatur korrigieren
2. Rücklauf + Vorlauf um 5 K erhöhen

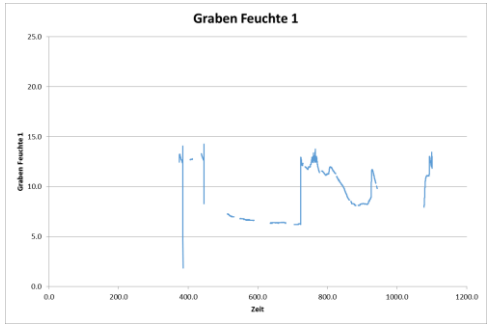


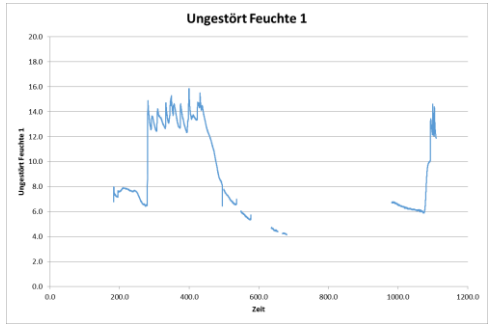


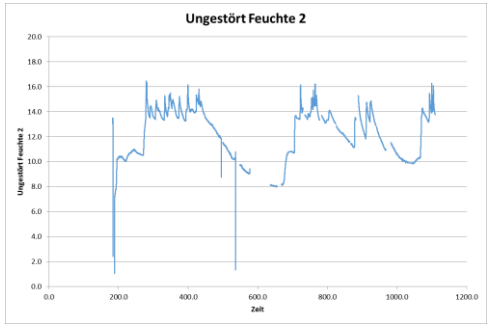
3. Erhöhte Wärmeleitfähigkeit durch Bodenfeuchte berücksichtigen

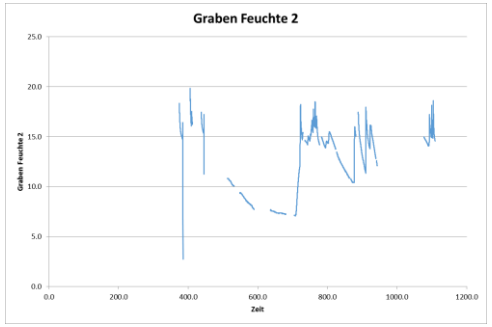
   Es wird ein Anfangsfeuchtegehalt von 0.15 m^3/m^3 eingelesen.

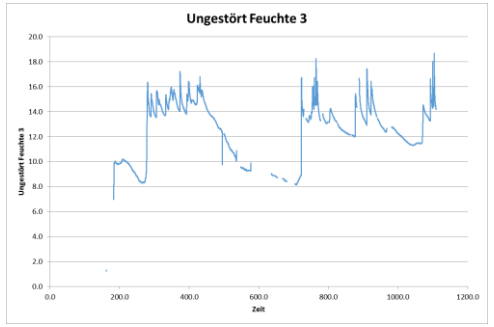


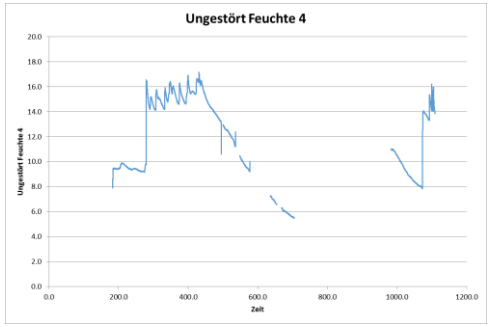




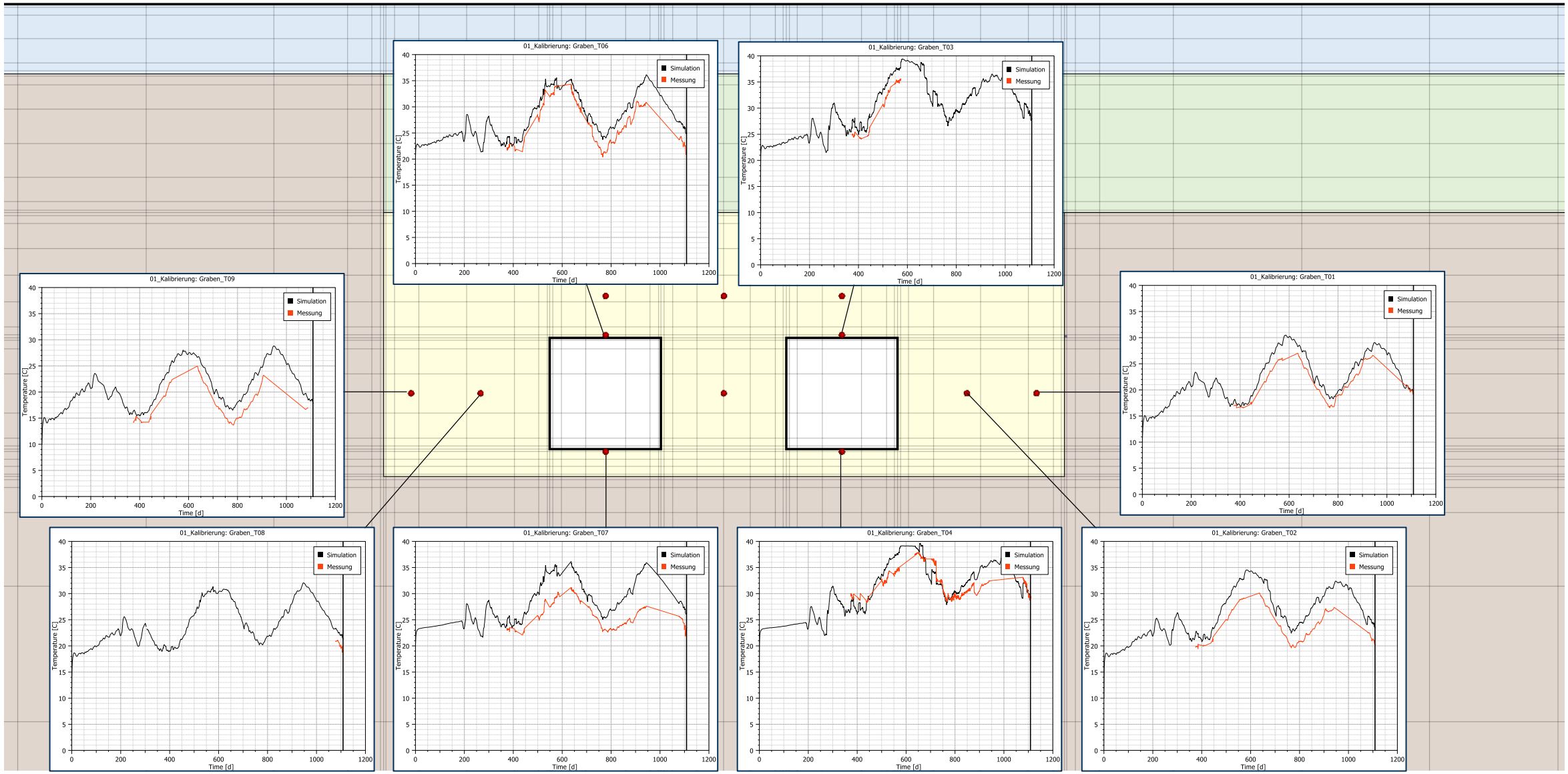




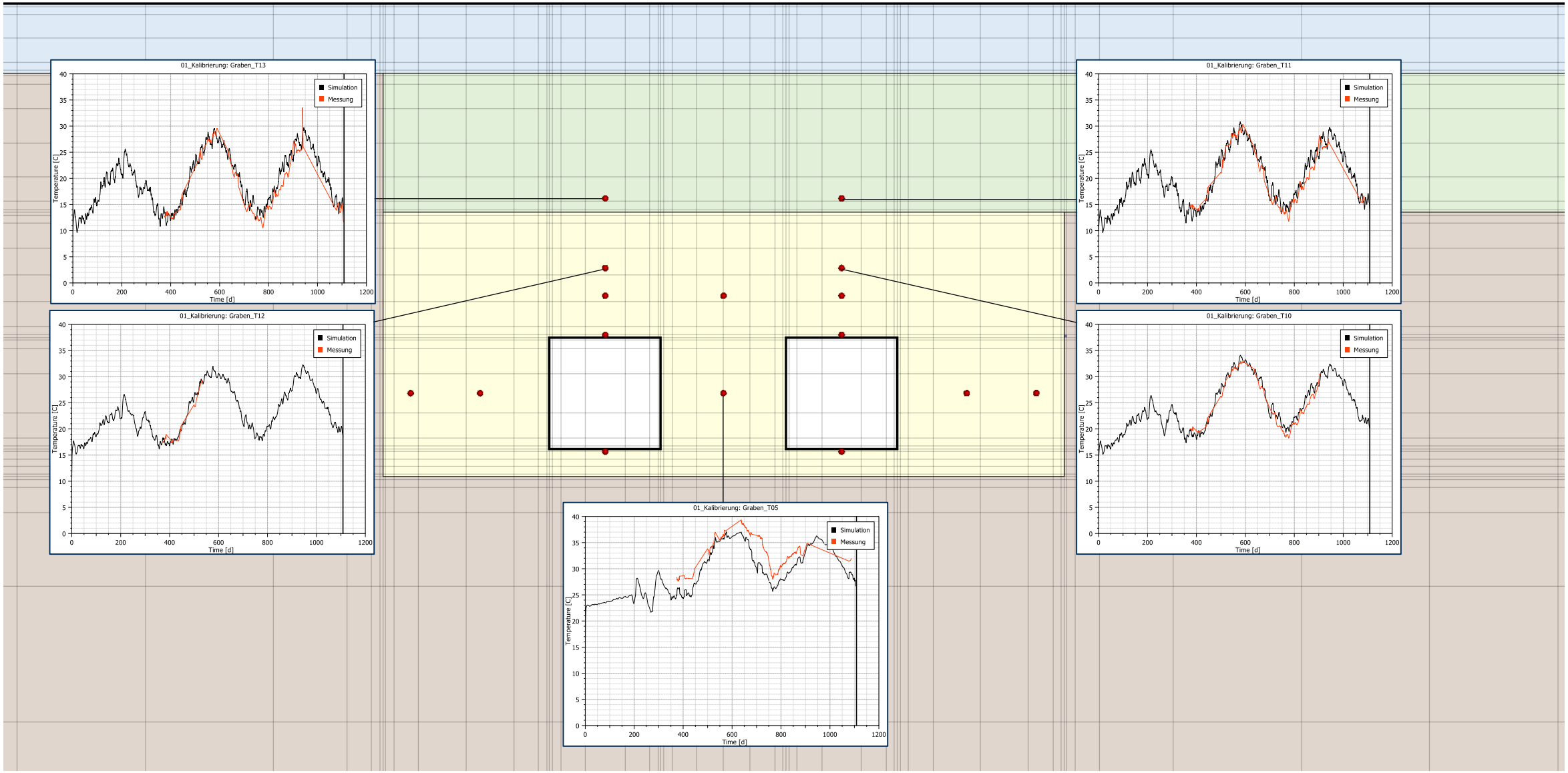




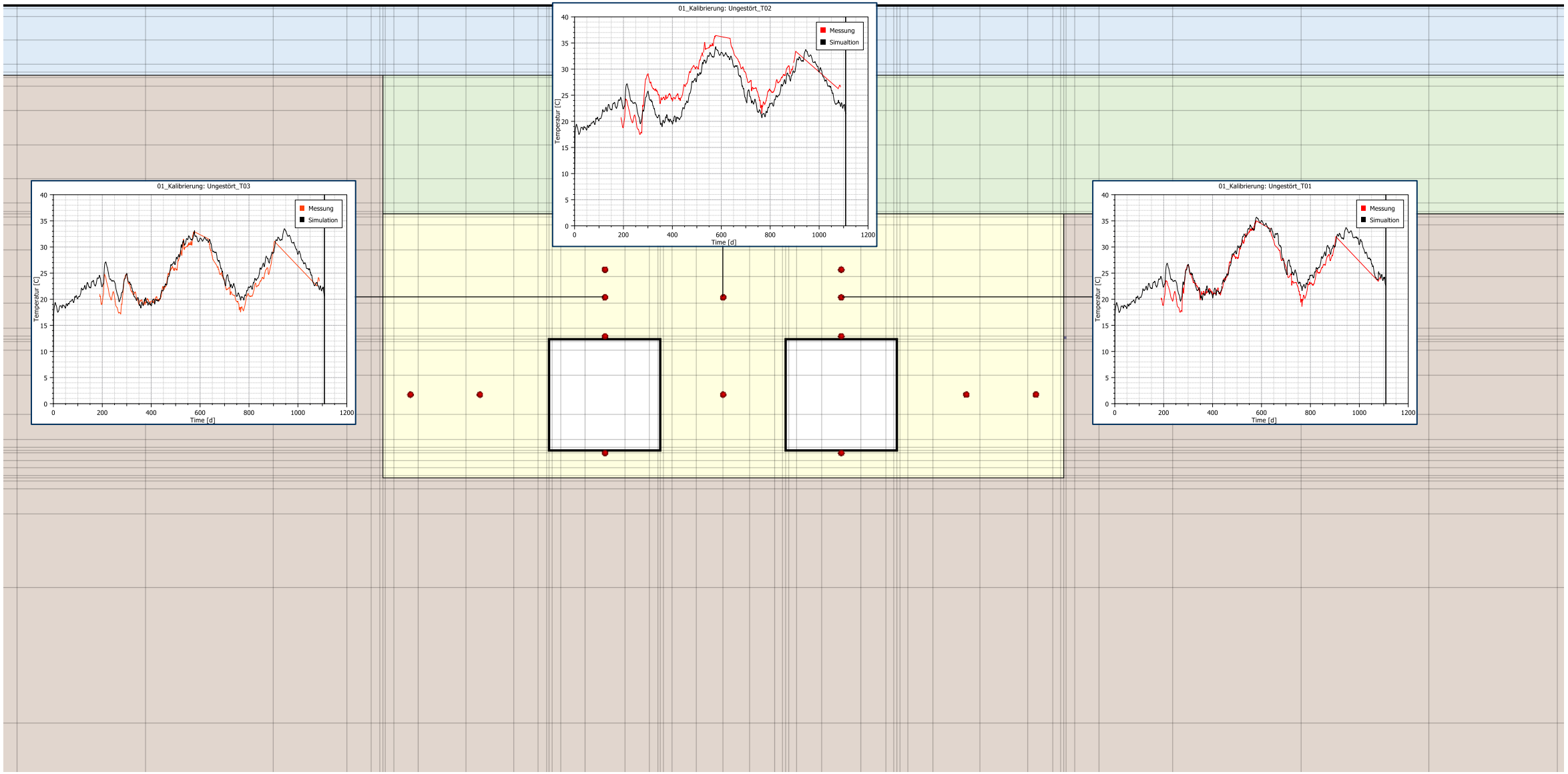
Schritt 2: Ergebnisse kalibriert



Schritt 2: Ergebnisse kalibriert

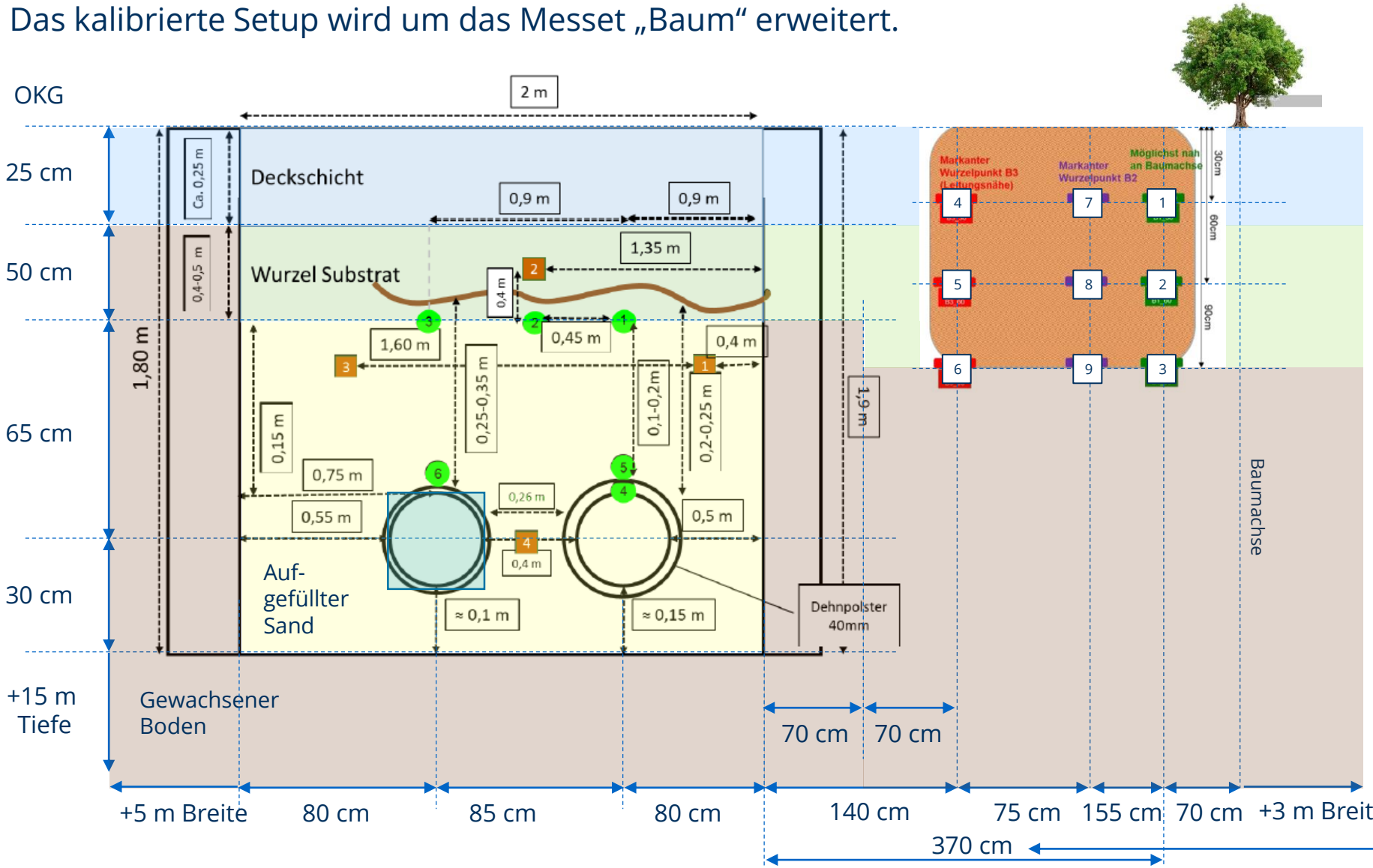


Schritt 2: Ergebnisse kalibriert

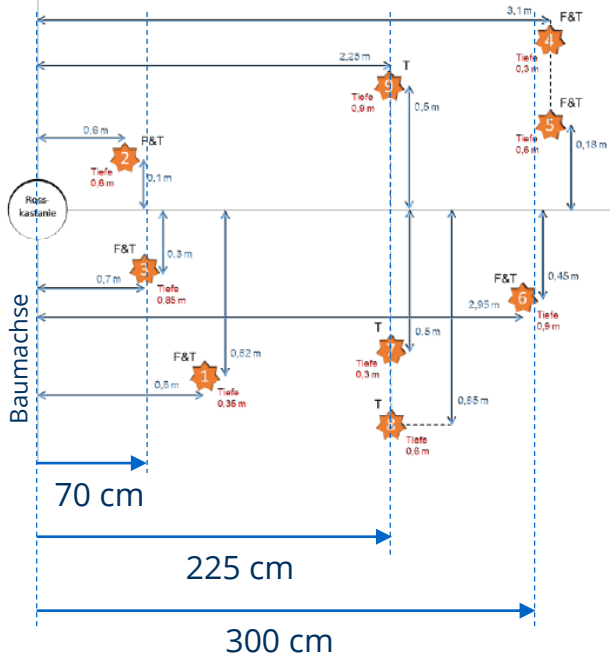


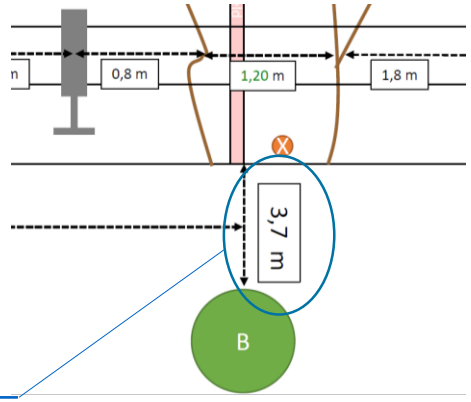
Schritt 2: Simulations-Setup für Kalibrierung: Festlegung Geometrie Baum

Das kalibrierte Setup wird um das Messet „Baum“ erweitert.

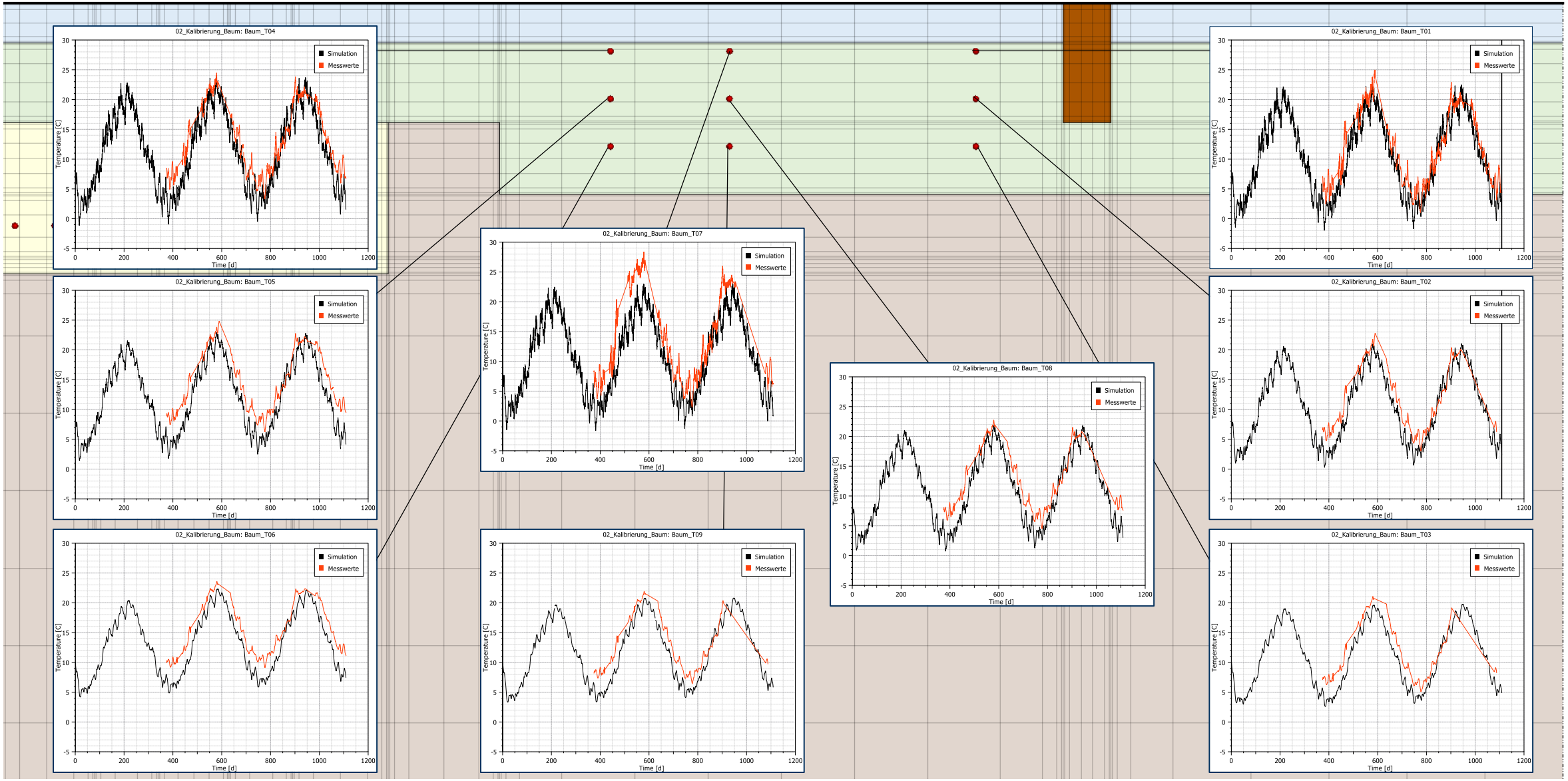


Mittlere Abstände zum Baum!





Schritt 2: Simulations-Setup für Kalibrierung: Ergebnisse Baum

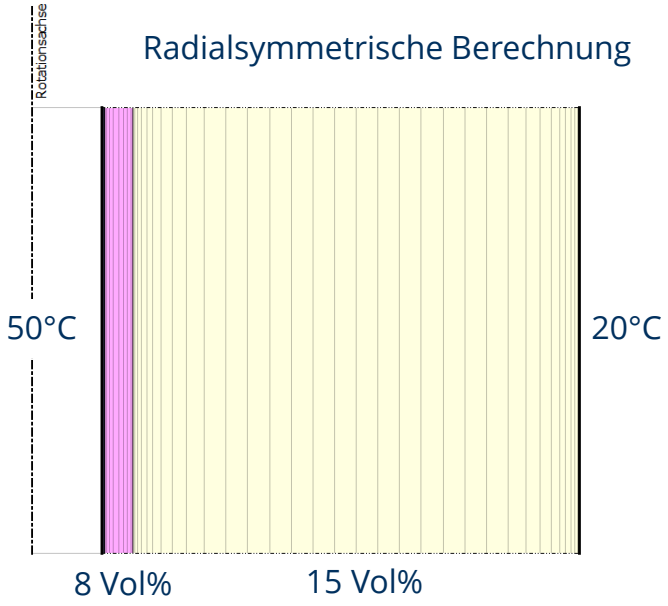


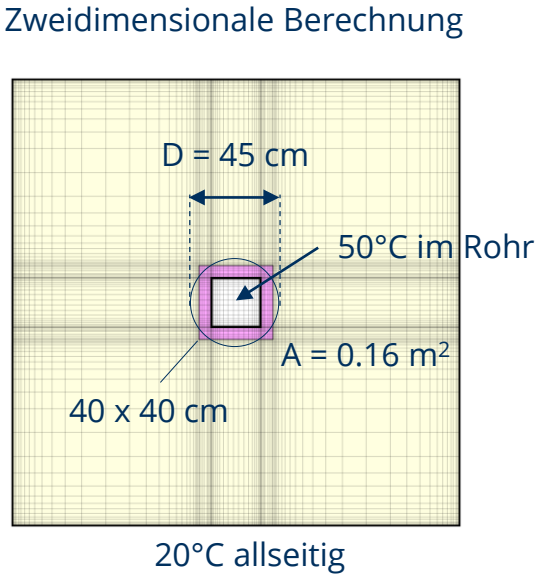
Nachkalibrierung
mit gedämmter Rohrvariante

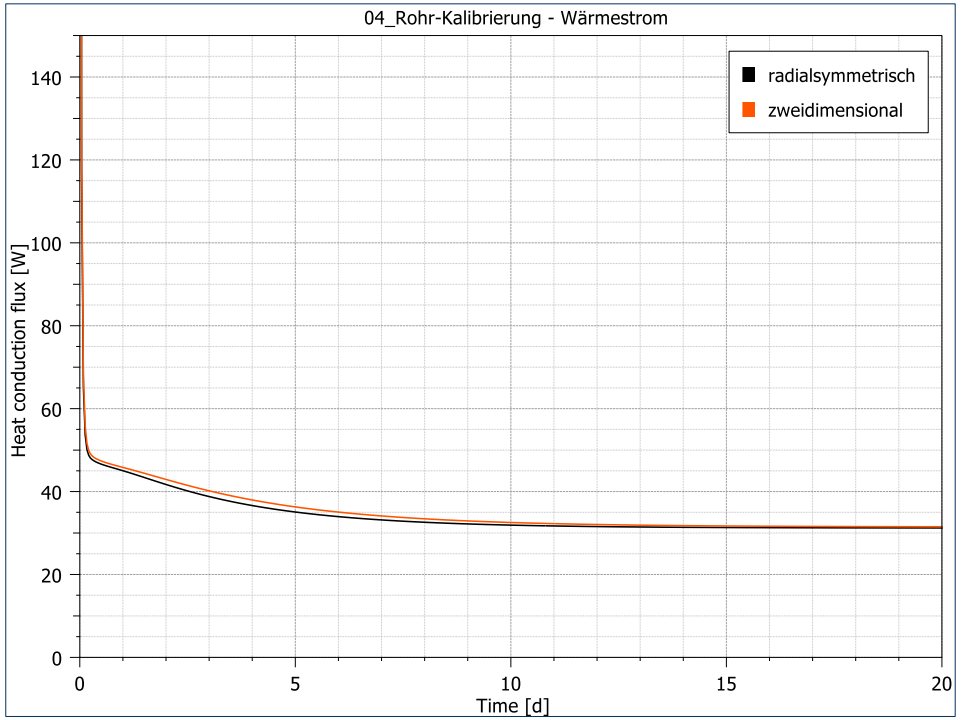
Schritt 2: Nachkalibrierung mit gedämmter Rohrvariante

Für die Variantenanalysen ist es vorteilhaft, direkt die Vor- und Rücklauftemperaturen als Randbedingung in den Rohren ansetzen zu können. Dazu ist die zusätzliche Erhöhung der Vor- und Rücklauftemperaturen zu ermitteln, die angesetzt werden muss, um die Kalibrierungsqualität mindestens beizubehalten.

Da das Rohr mit einem quadratischen Querschnitt idealisiert wird, ist zu überprüfen, ob mit der im Katalog vorgegeben Dämmstoffdicke gearbeitet werden kann oder ob die geometrische Idealisierung der Innen- und Außenquerschnitte auch zu einer veränderten Dämmstoffdicke führt. Dazu wird eine radialsymmetrische Berechnung mit einem quadratischen Querschnitt verglichen.



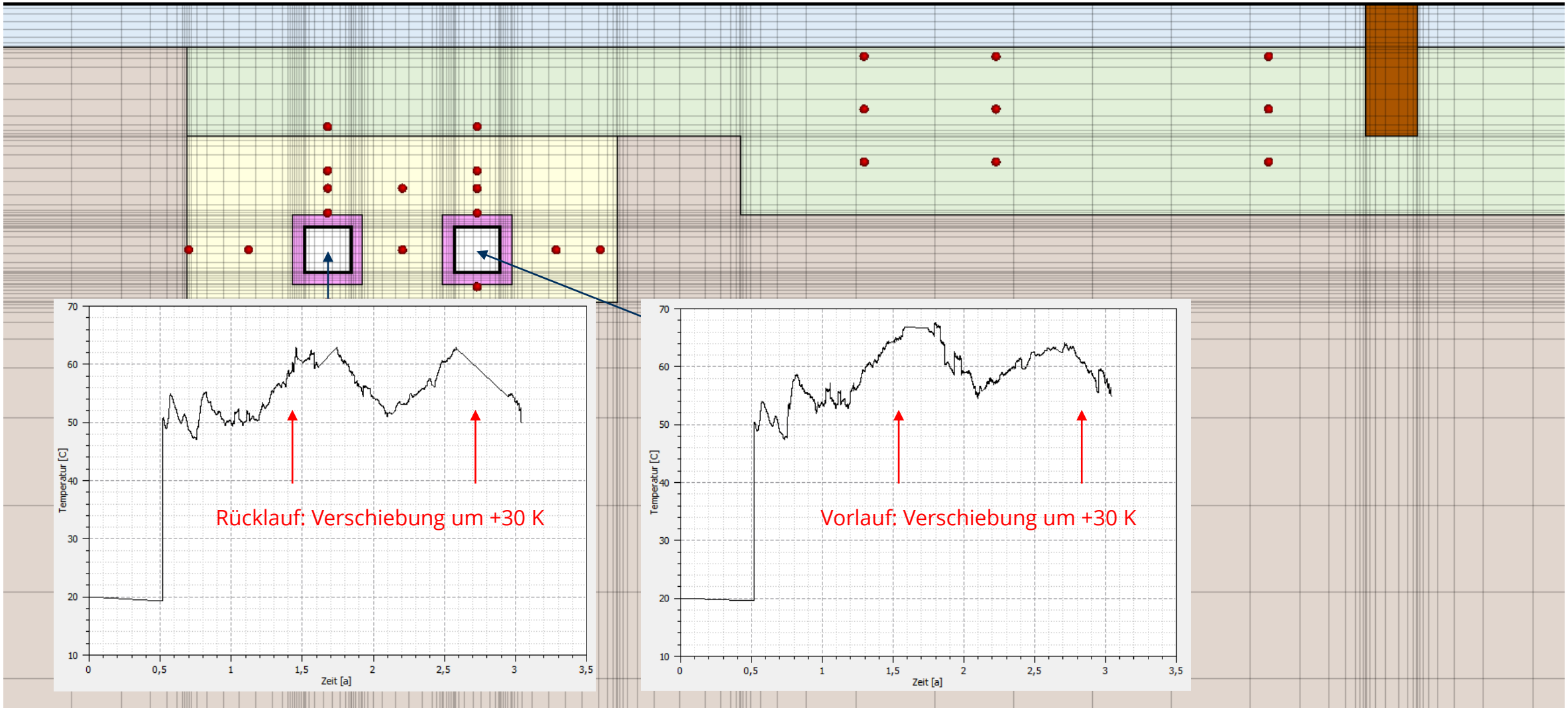




Der Vergleich der Wärmeströme beider Varianten zeigt, dass der (physikalisch korrekte) radialsymmetrische Fall sehr gut durch den 2D- idealisierten Fall approximiert wird, wenn der Flächeninhalt des Außendurchmessers des Rohres durch ein flächengleiches Quadrat repräsentiert wird. Die Dicke der Dämmung kann dann unverändert aus dem Katalog übernommen werden (hier 63 mm) .

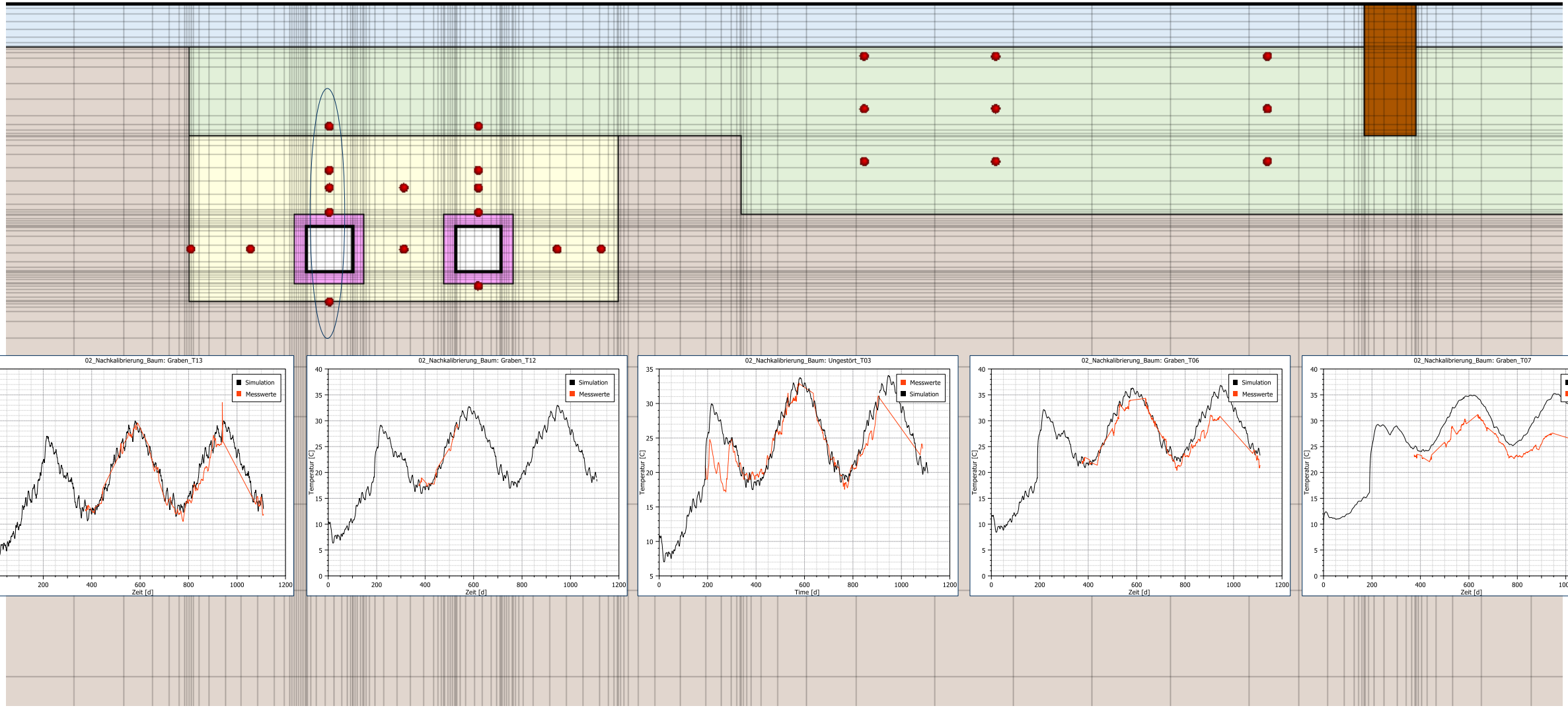
Schritt 2: Nachkalibrierung mit gedämmter Rohrvariante

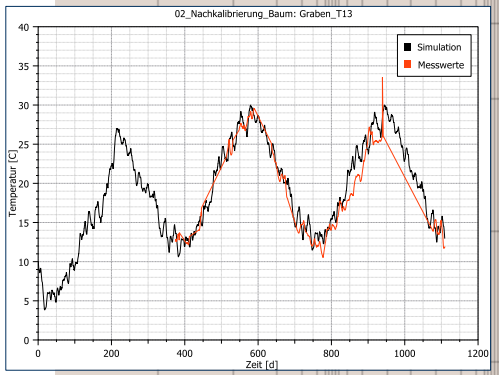
Ausgangsvariante ist das kalibrierte Setup mit dem Messet „Baum“. Diese wird um die Rohrdämmung erweitert.

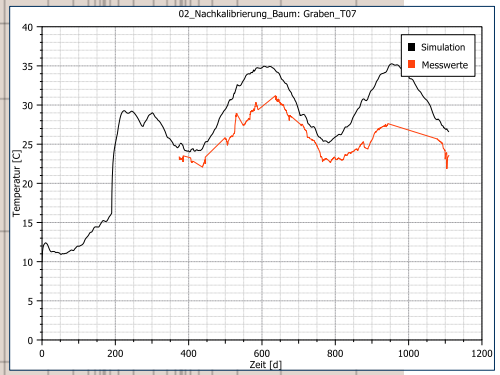


Schritt 2: Nachkalibrierung mit gedämmter Rohrvariante

Ergebnisse

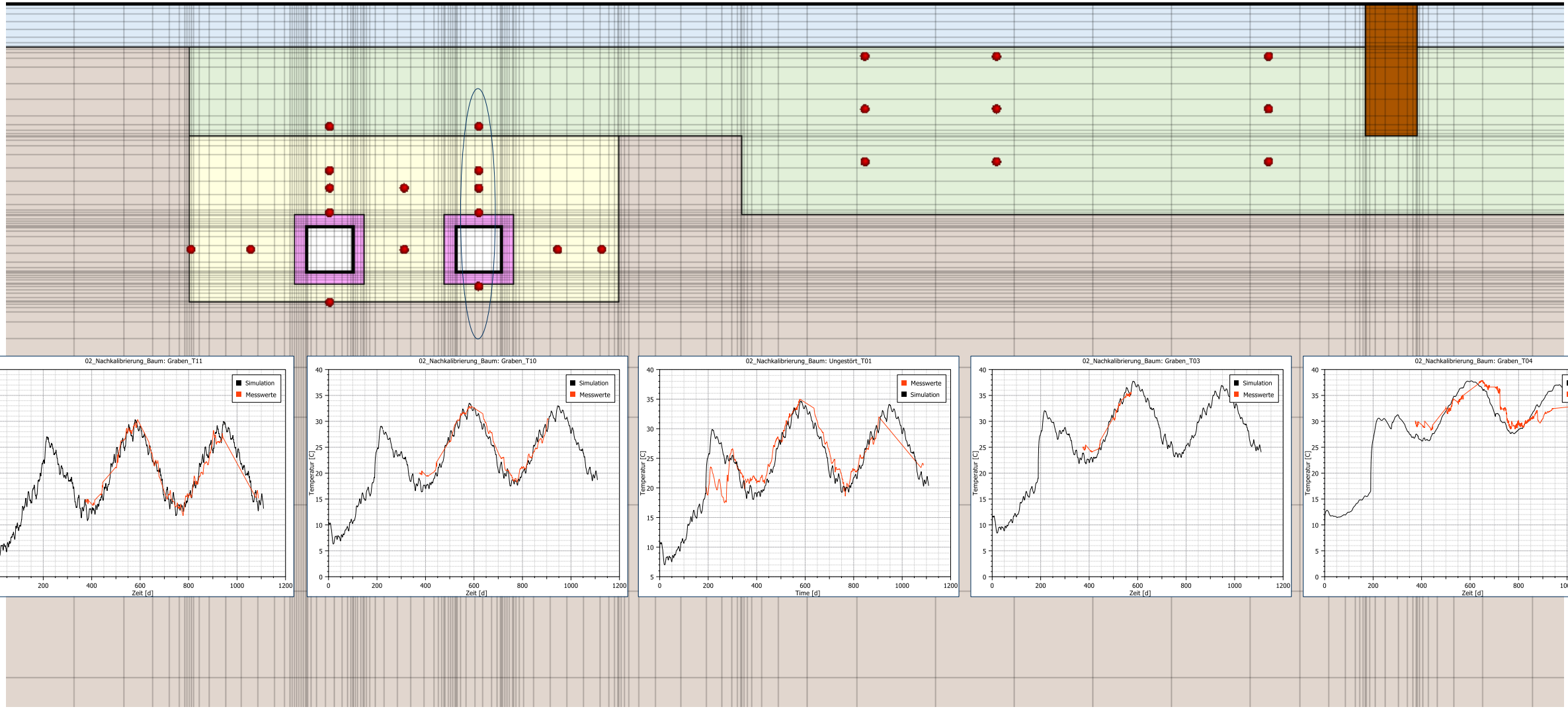


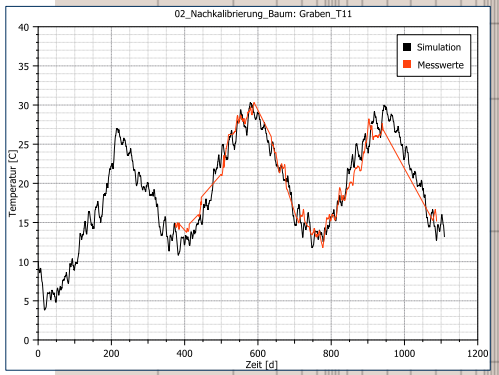


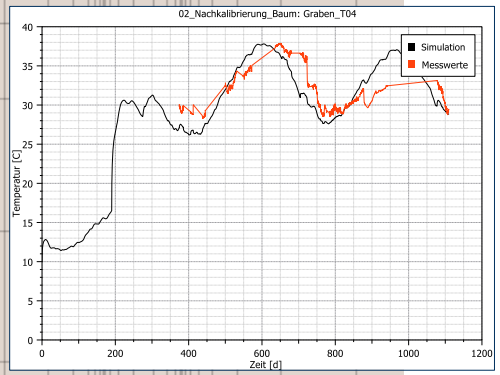


Schritt 2: Nachkalibrierung mit gedämmter Rohrvariante

Ergebnisse

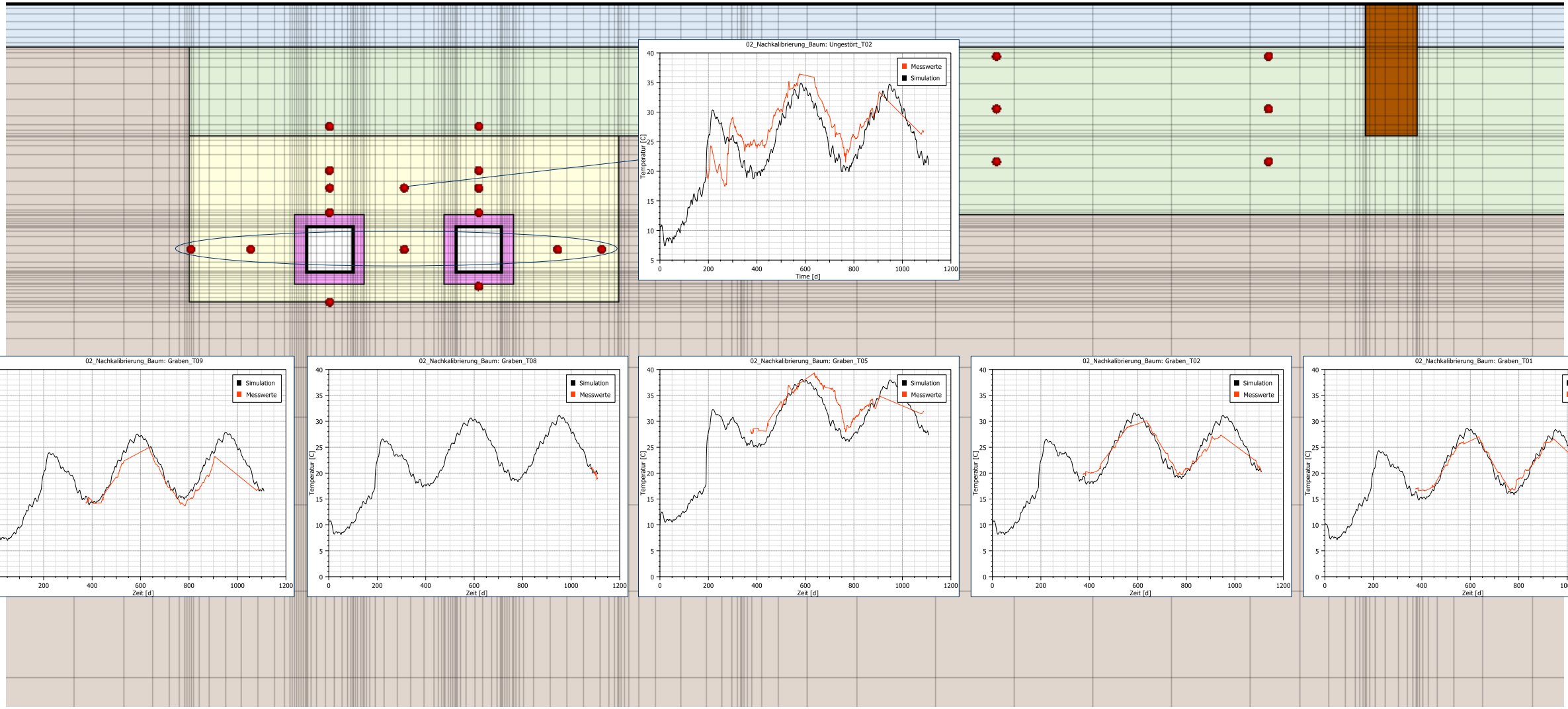


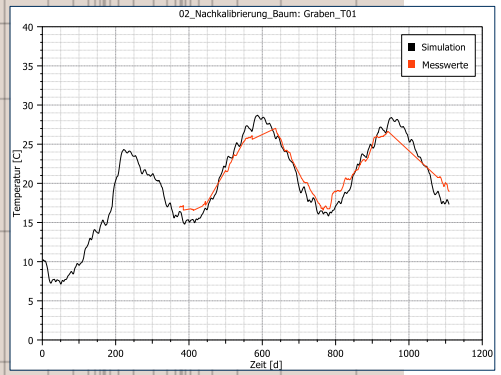




Schritt 2: Nachkalibrierung mit gedämmter Rohrvariante

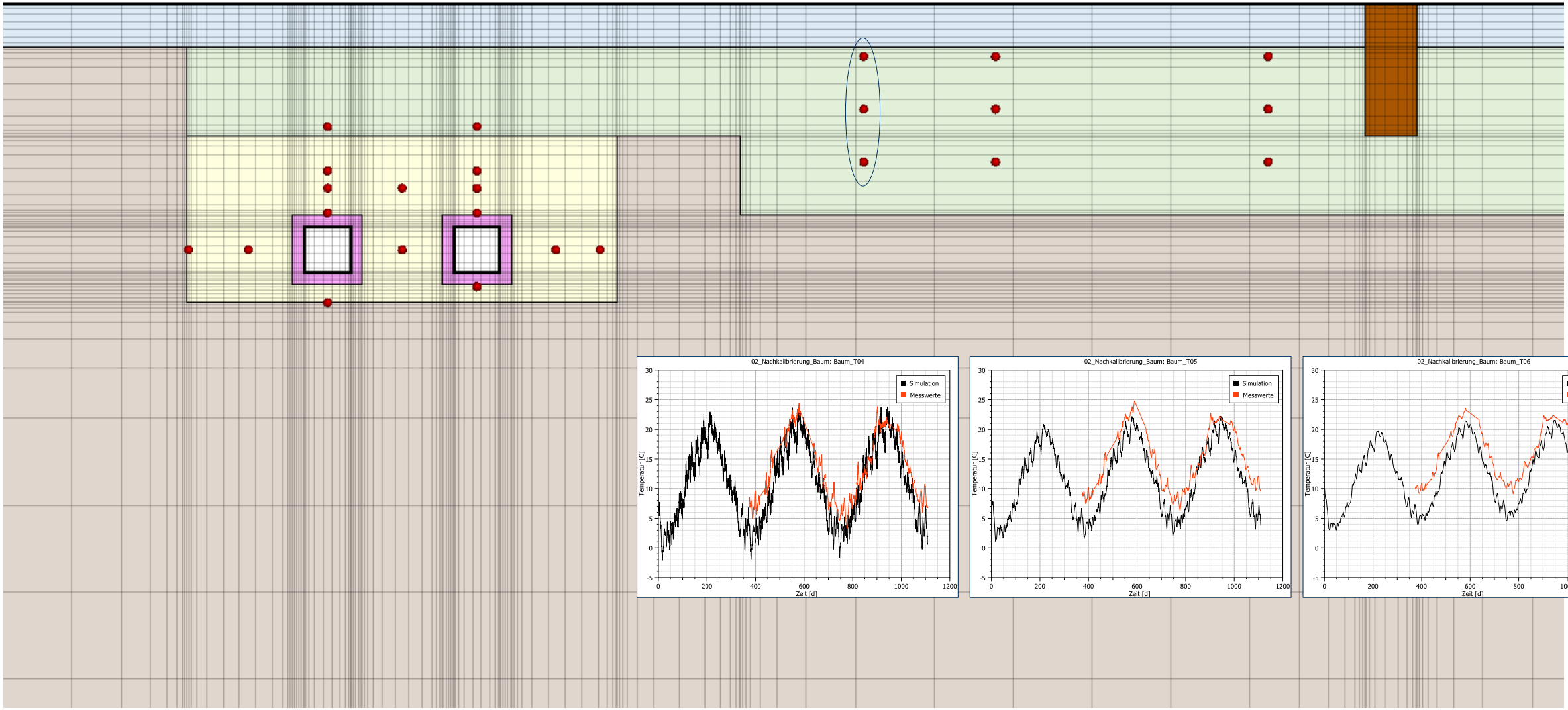
Ergebnisse

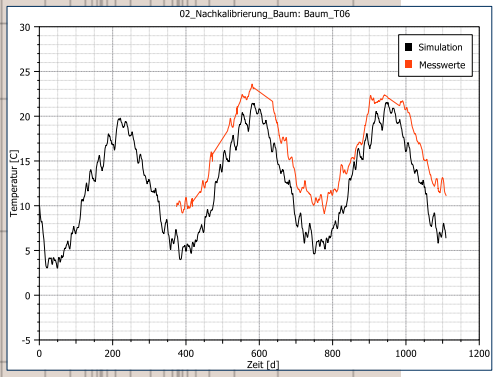




Schritt 2: Nachkalibrierung mit gedämmter Rohrvariante

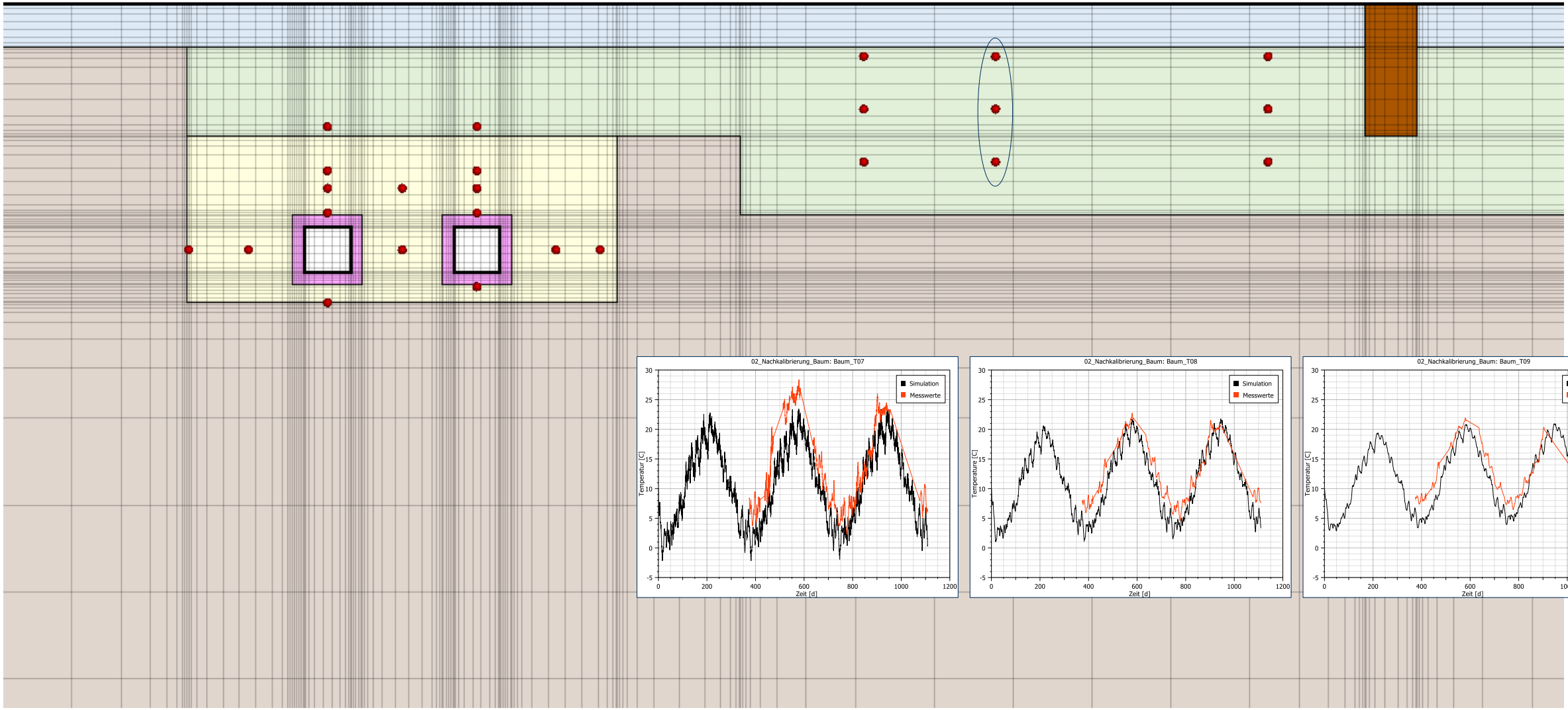
Ergebnisse

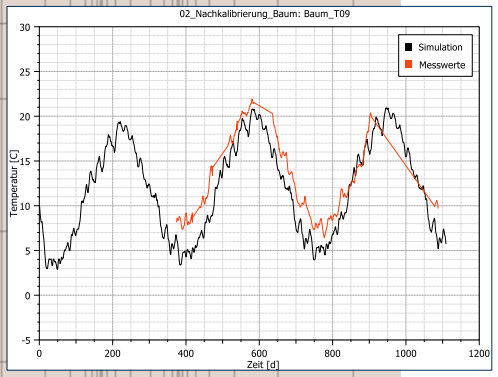




Schritt 2: Nachkalibrierung mit gedämmter Rohrvariante

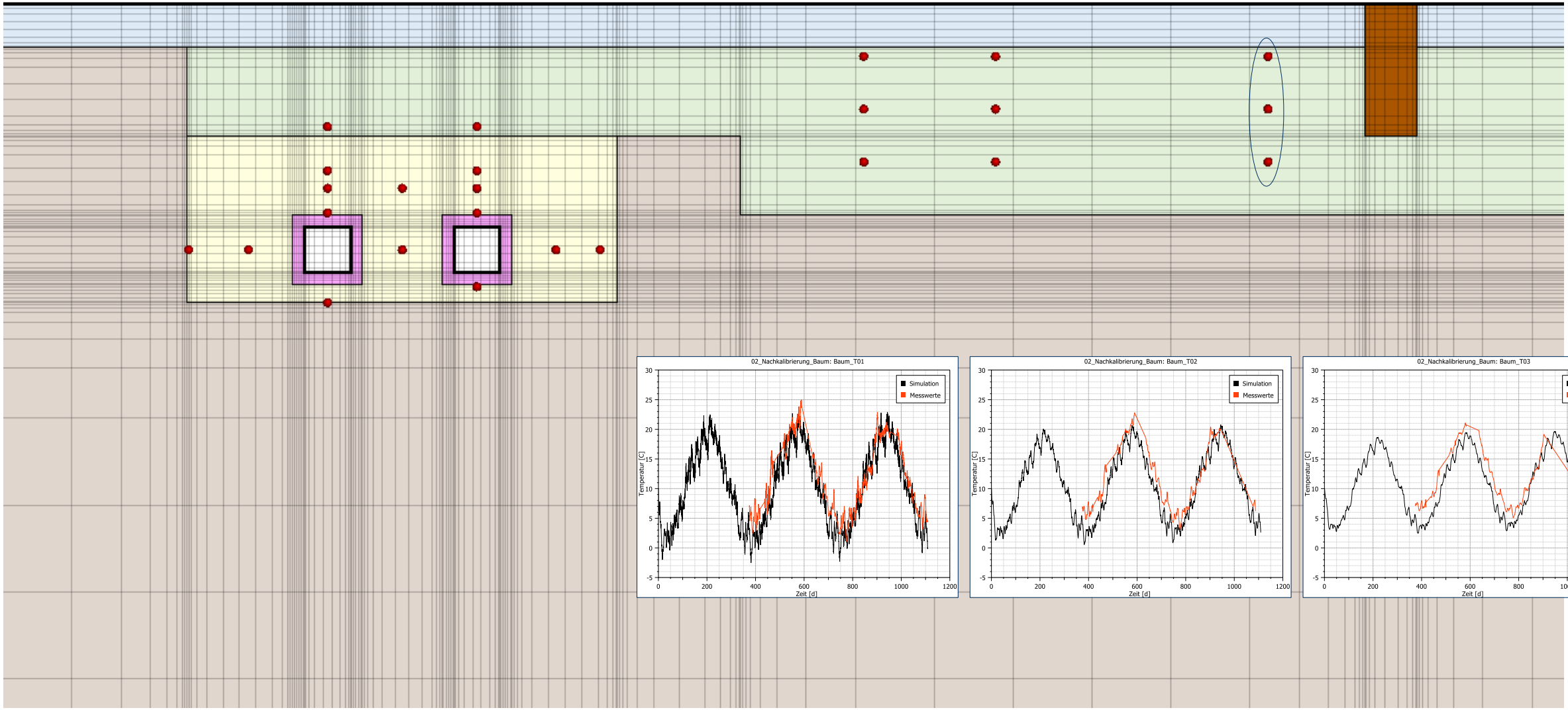
Ergebnisse

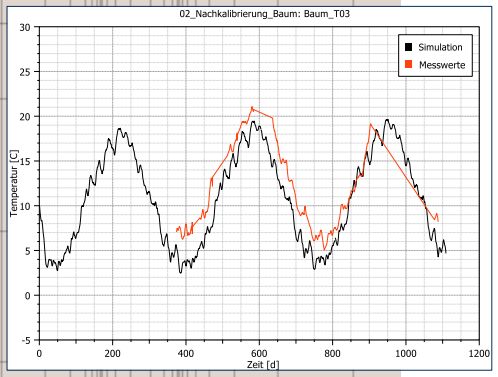




Schritt 2: Nachkalibrierung mit gedämmter Rohrvariante

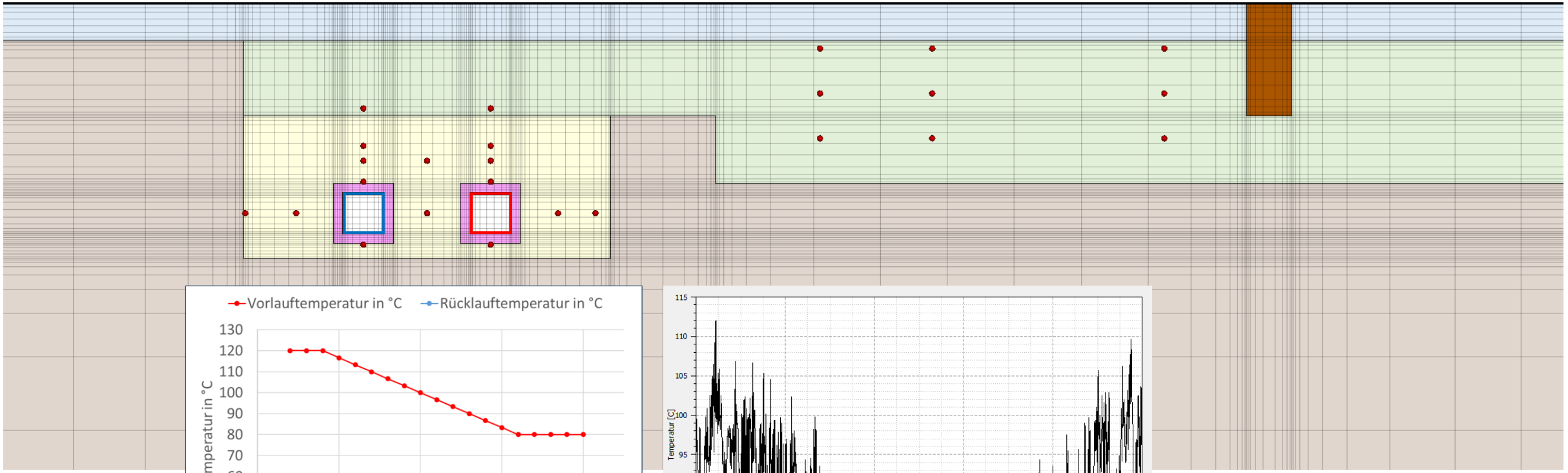
Ergebnisse

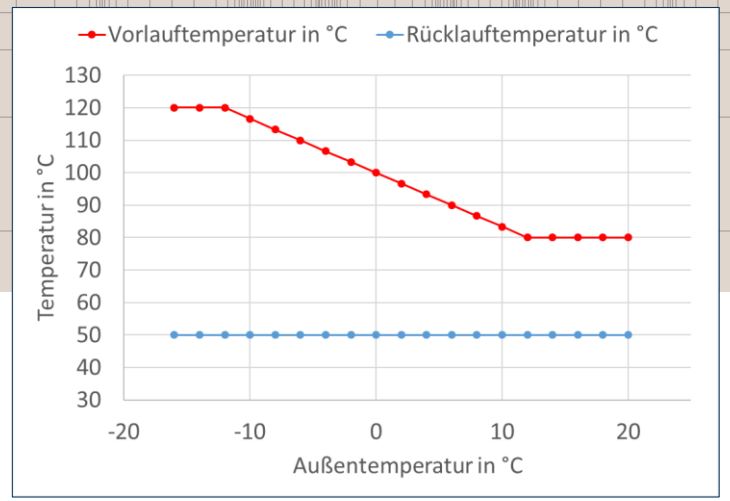


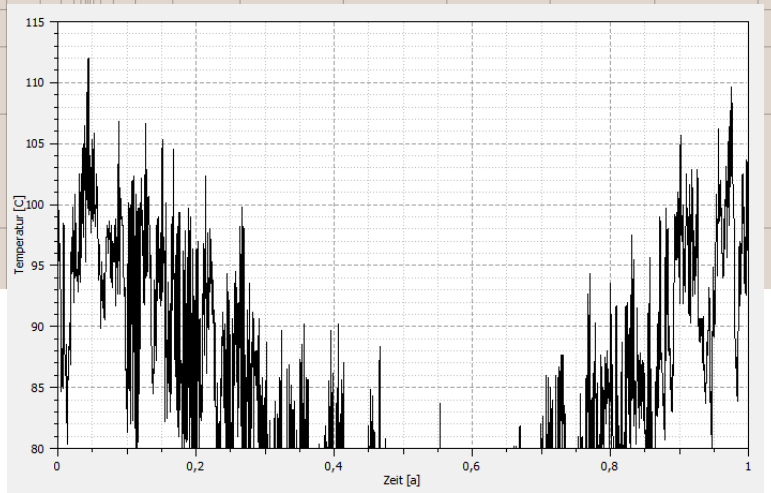


Schritt 2: Nachkalibrierung mit VL/RL-Temperatur nach Vorgabe

VL/RL-Temperaturen entsprechend der Vorgaben, Feuchtegehalt PUR = 8 Vol%

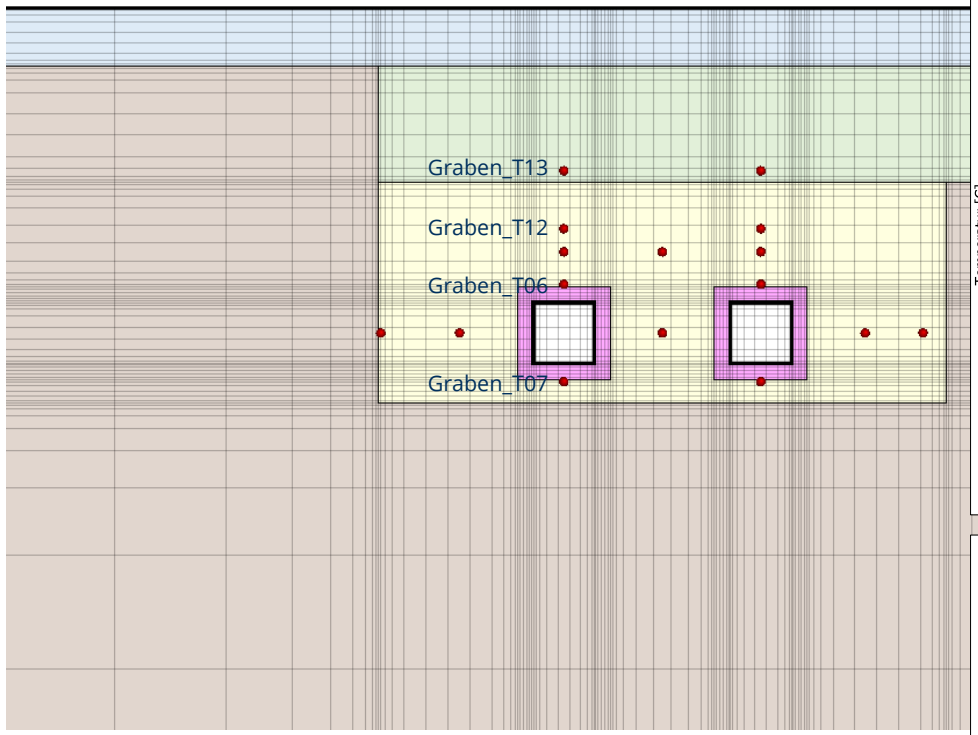


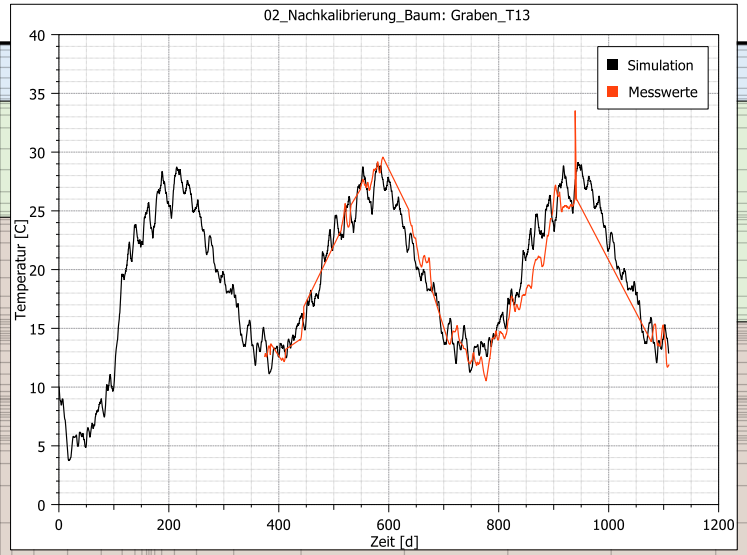


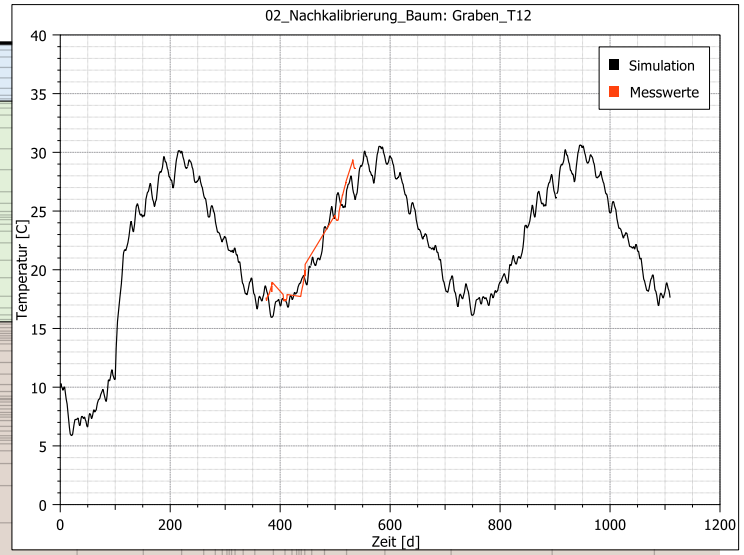


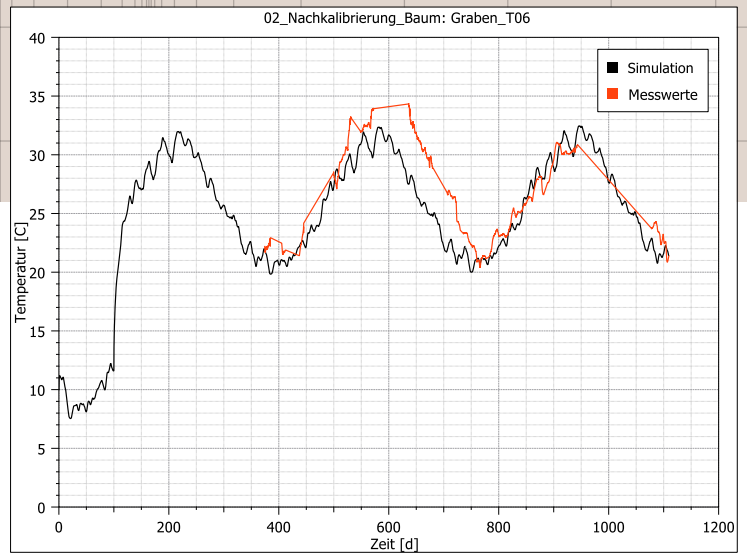
Schritt 2: Nachkalibrierung mit VL/RL-Temperatur nach Vorgabe

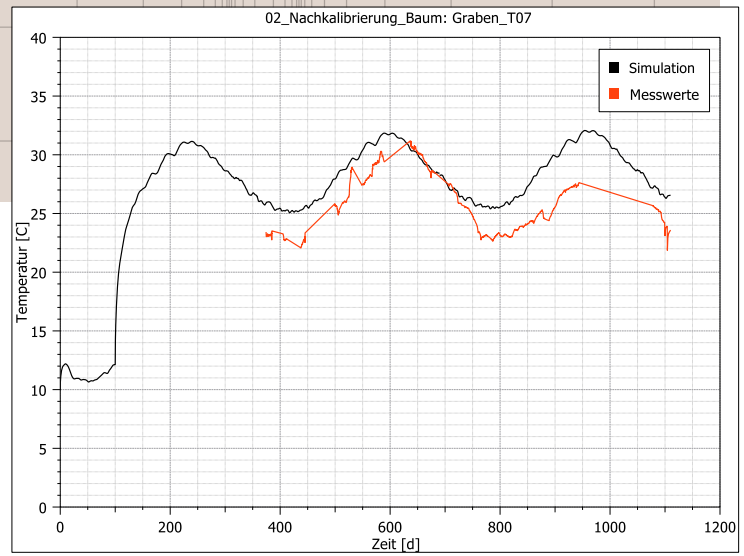
Ergebnisse





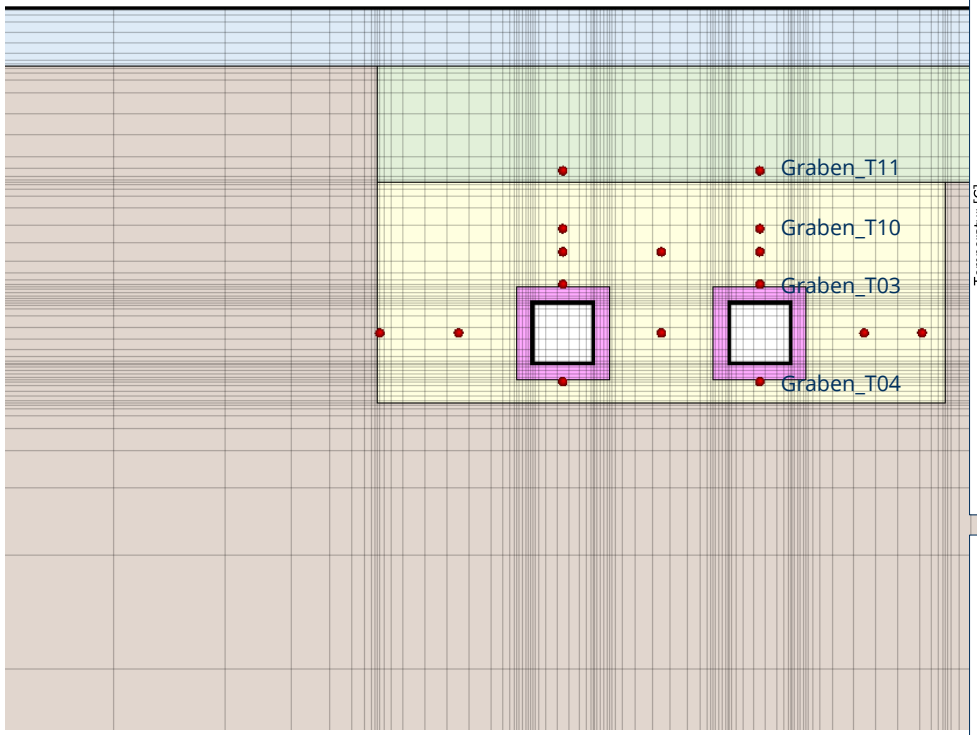


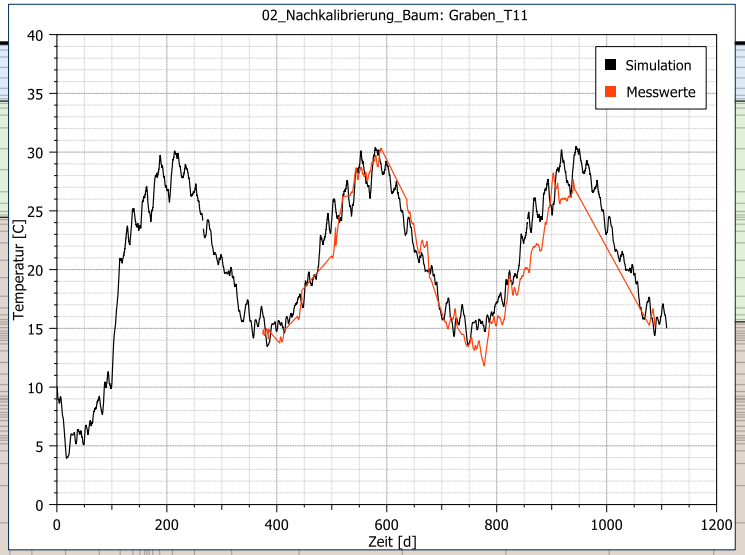


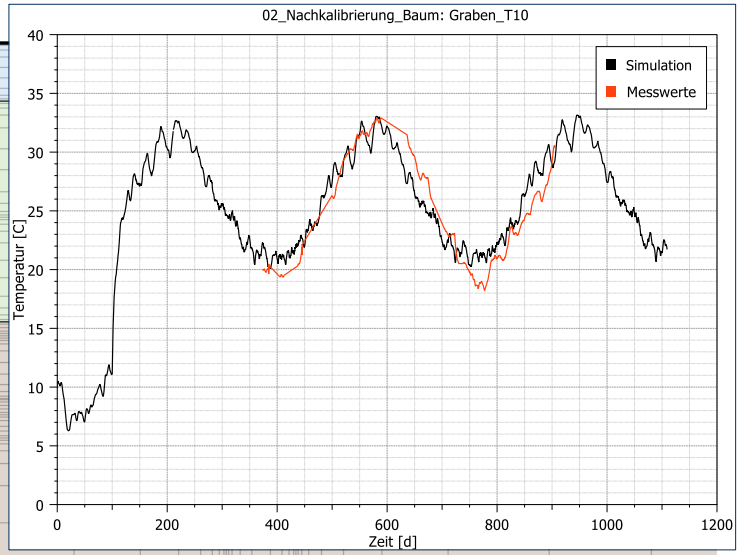


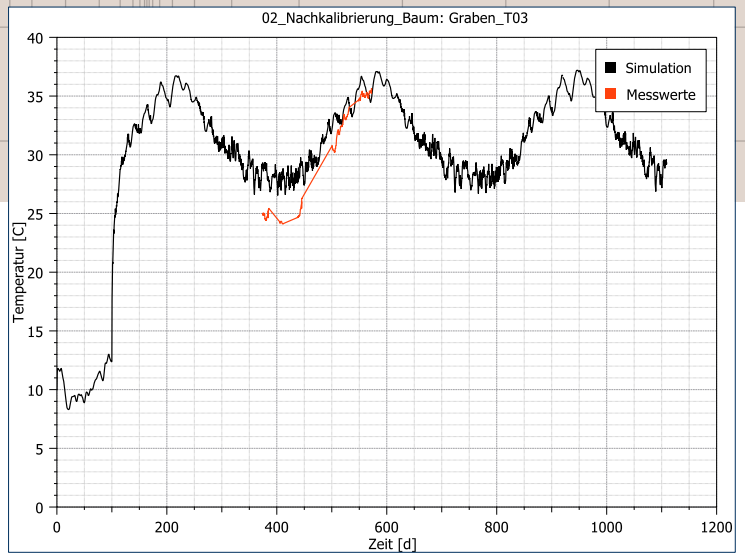
Schritt 2: Nachkalibrierung mit VL/RL-Temperatur nach Vorgabe

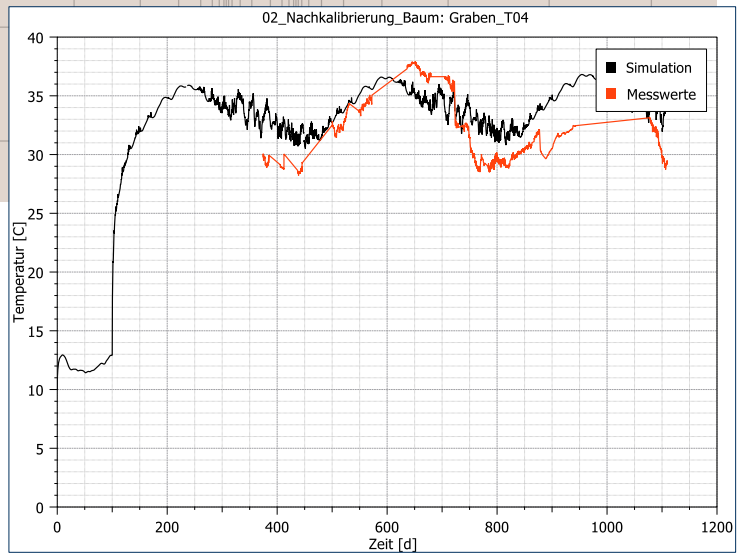
Ergebnisse





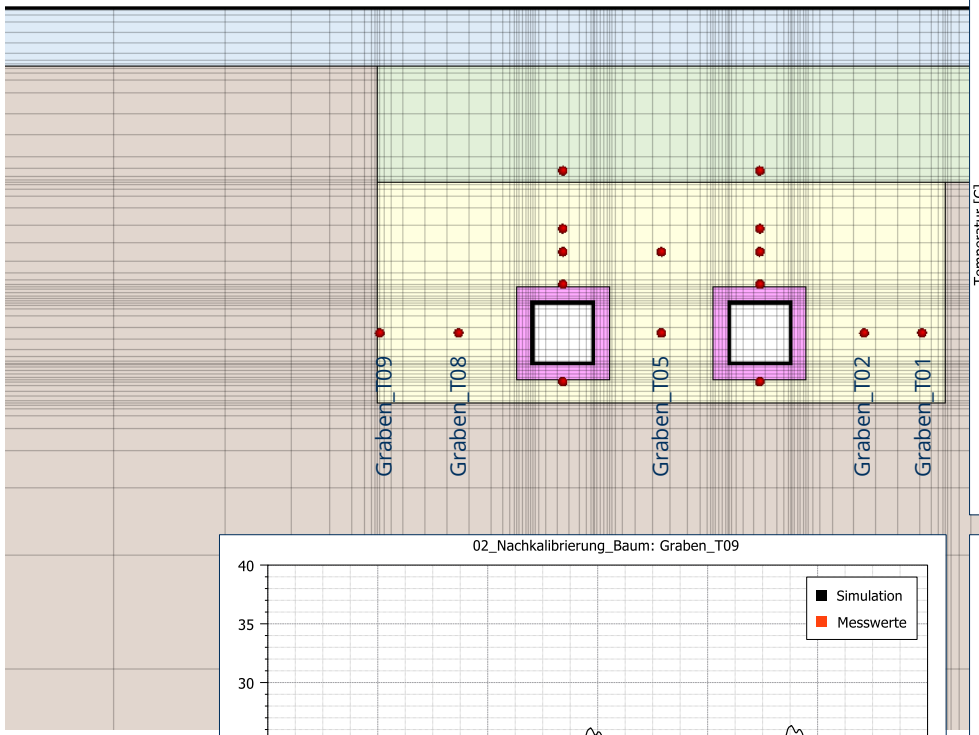


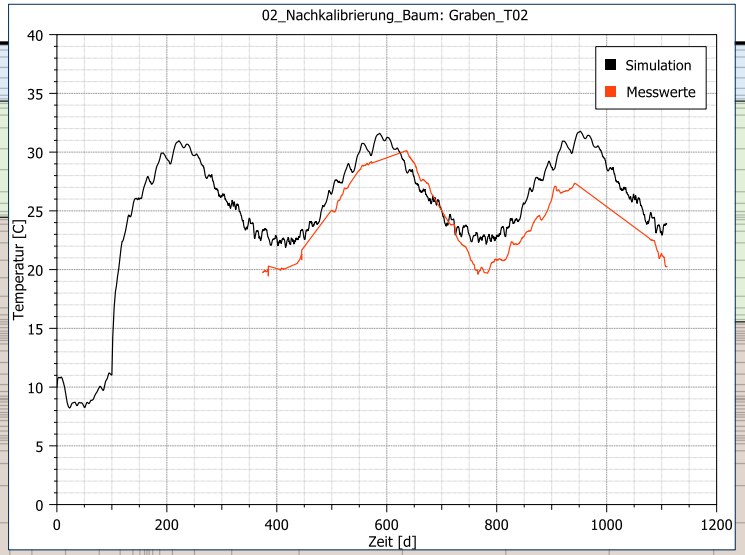


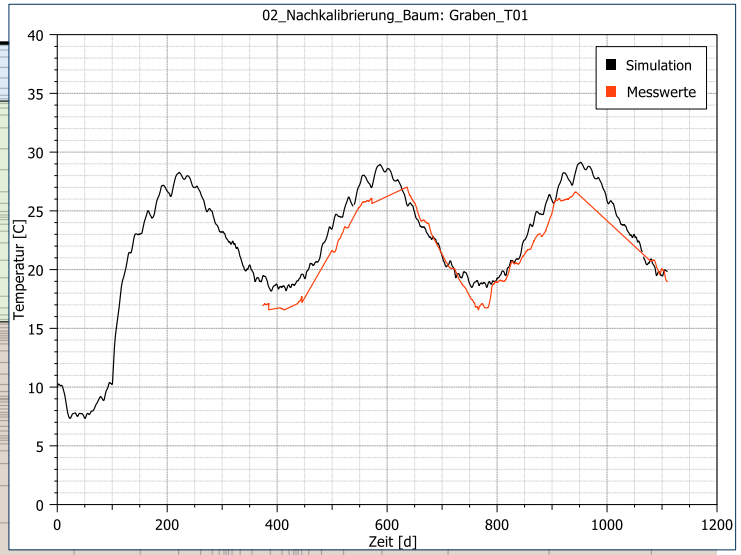


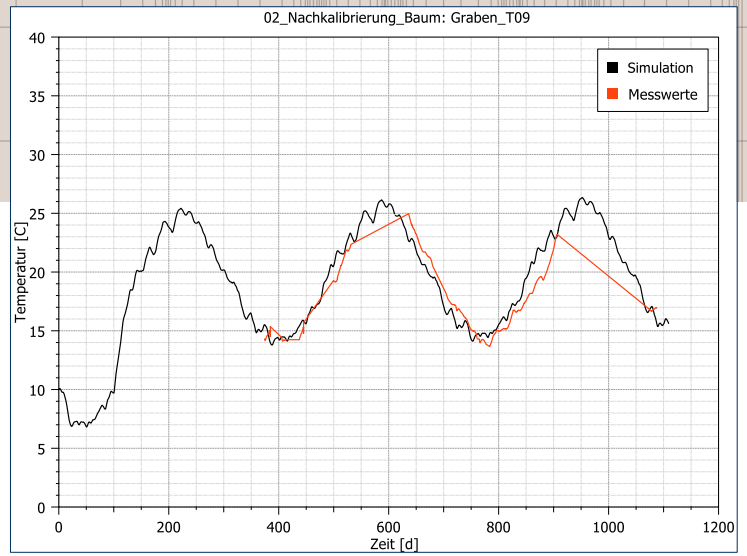
Schritt 2: Nachkalibrierung mit VL/RL-Temperatur nach Vorgabe

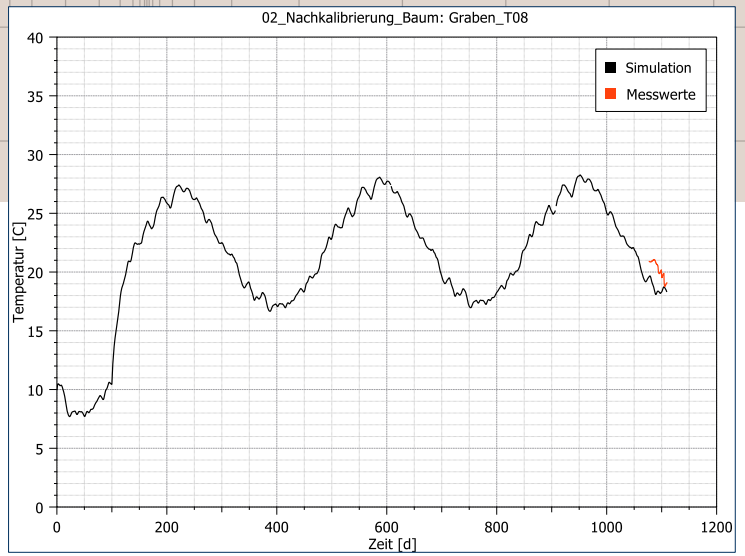
Ergebnisse

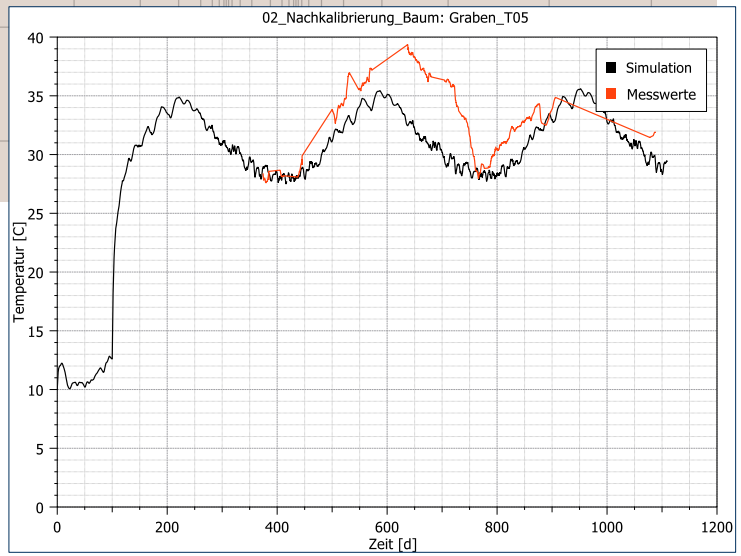






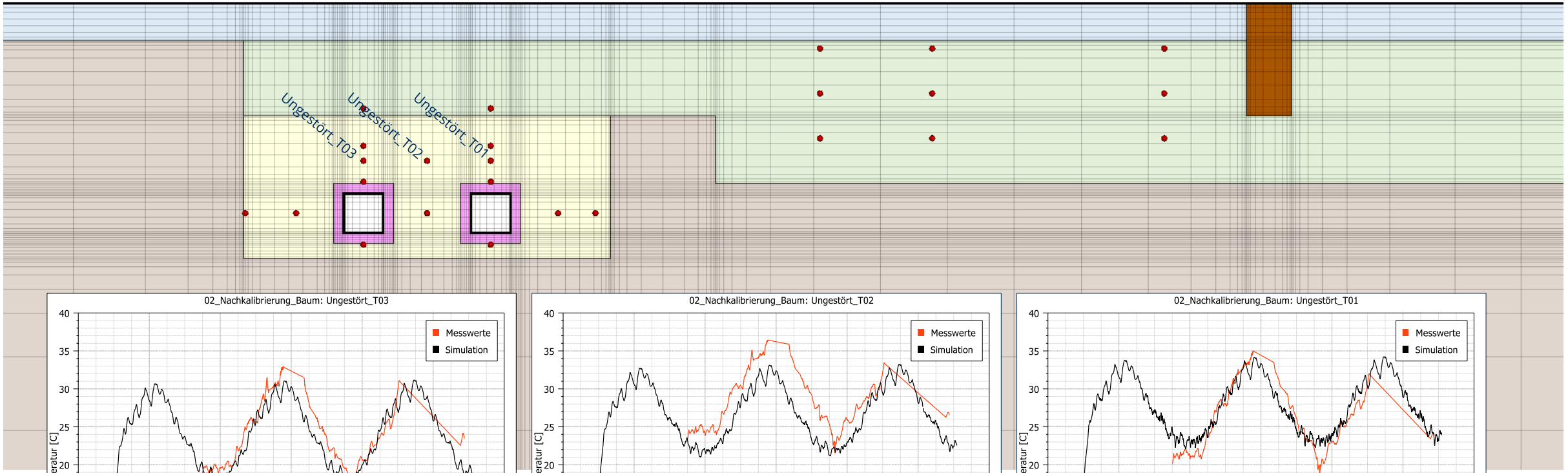


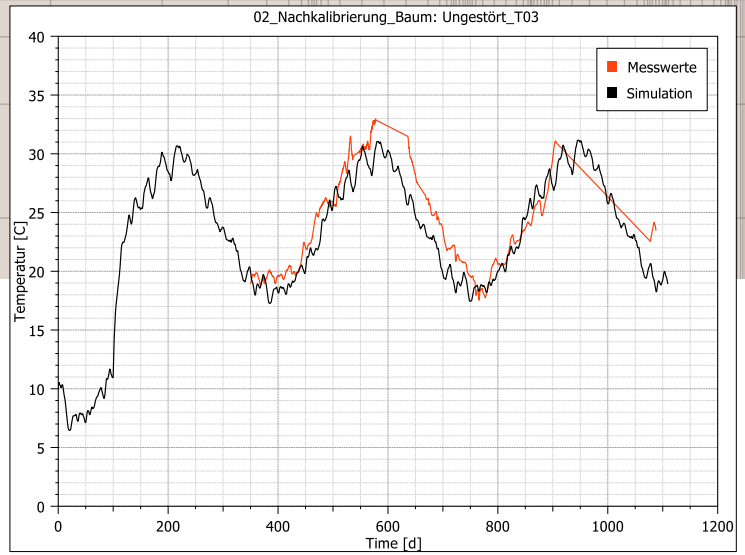


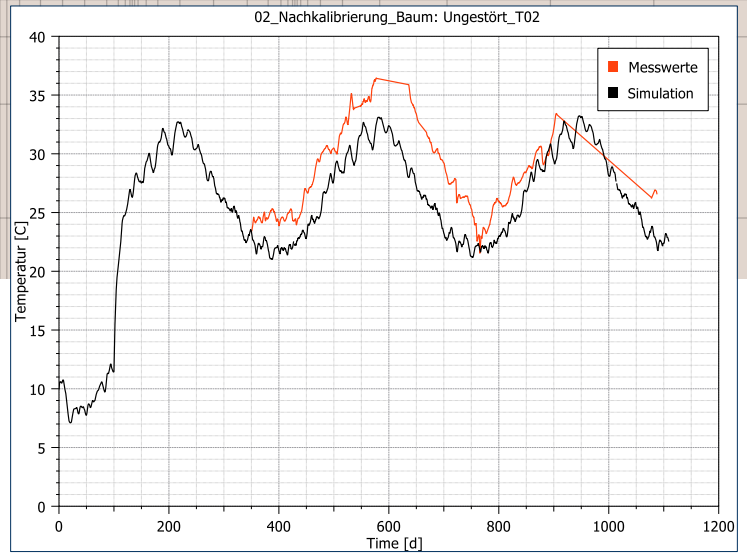


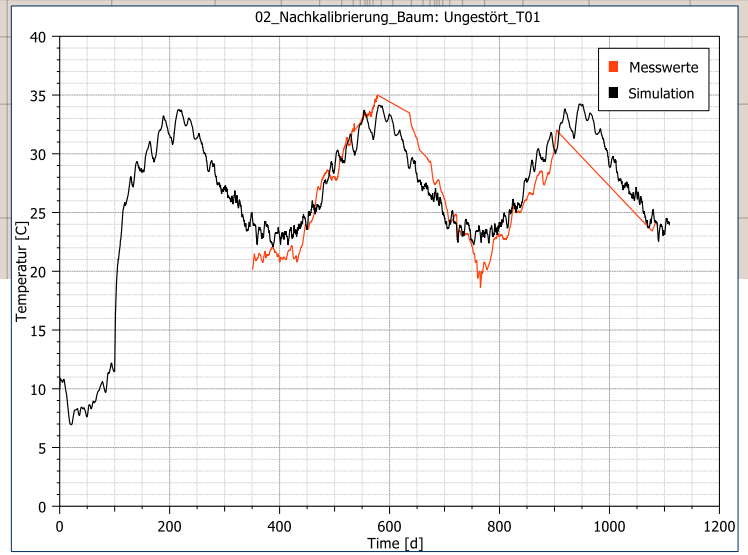
Schritt 2: Nachkalibrierung mit VL/RL-Temperatur nach Vorgabe

Ergebnisse



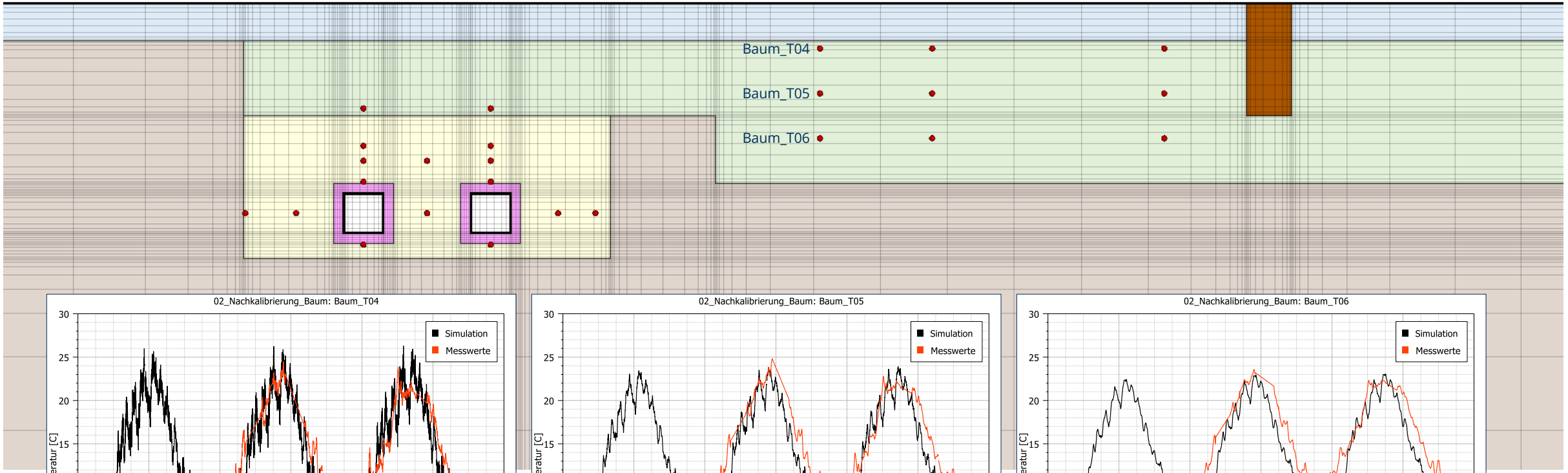


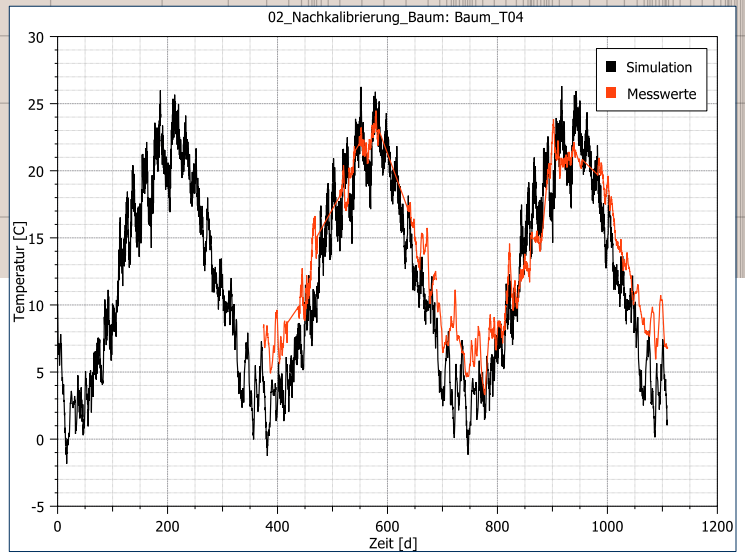


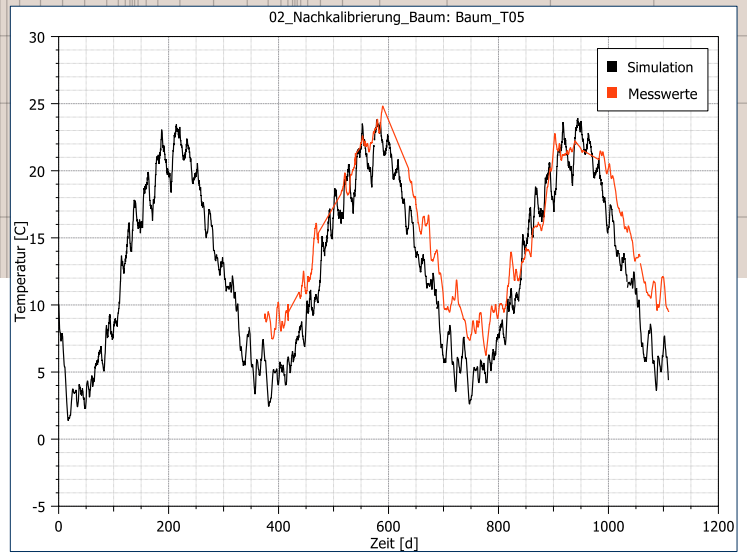


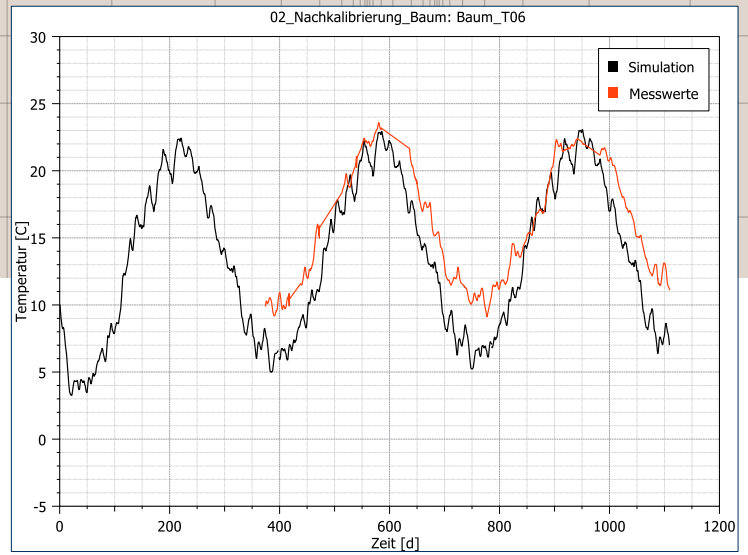
Schritt 2: Nachkalibrierung mit VL/RL-Temperatur nach Vorgabe

Ergebnisse



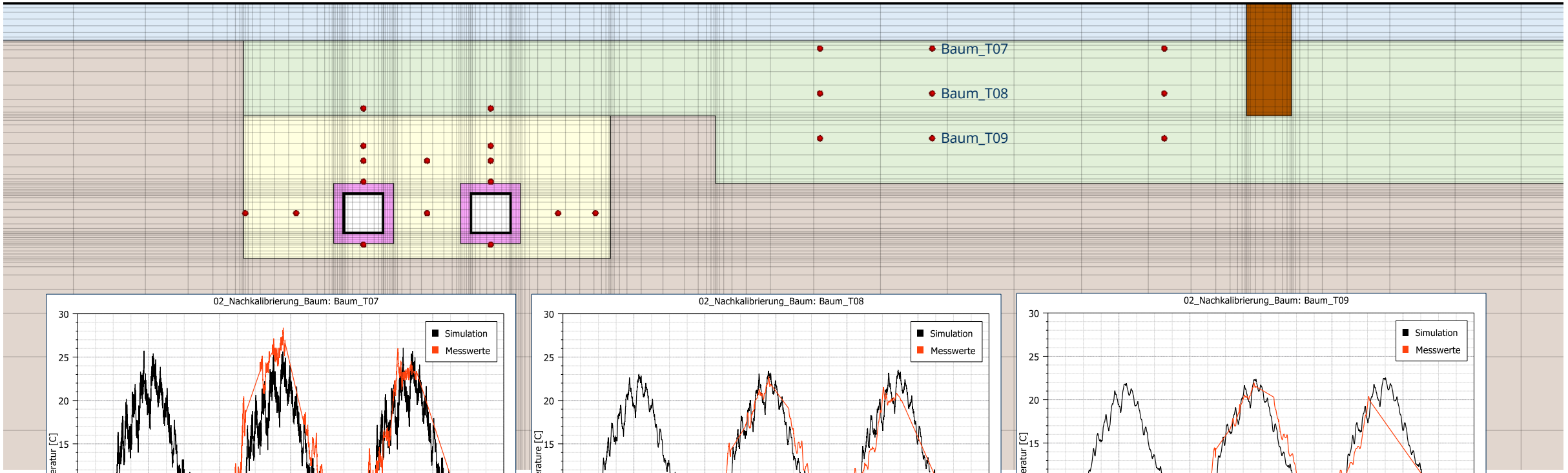


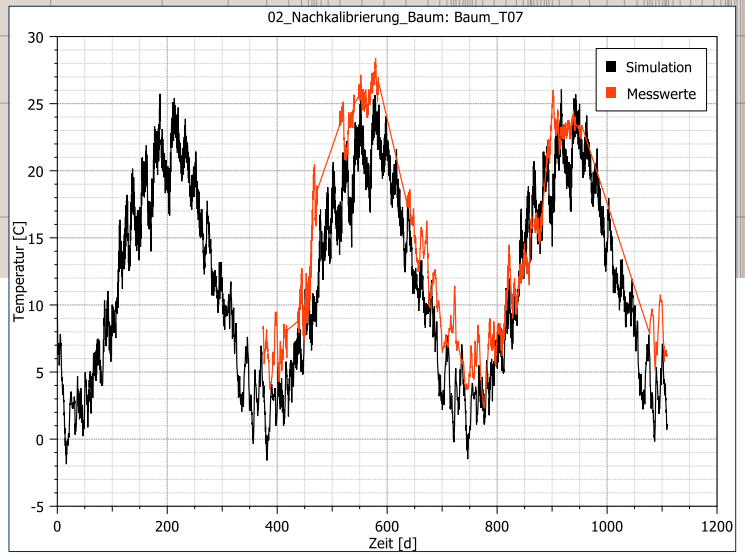


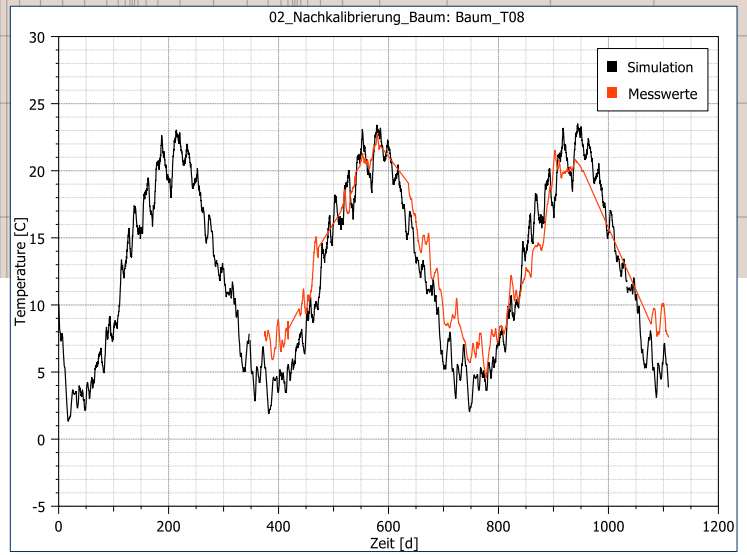


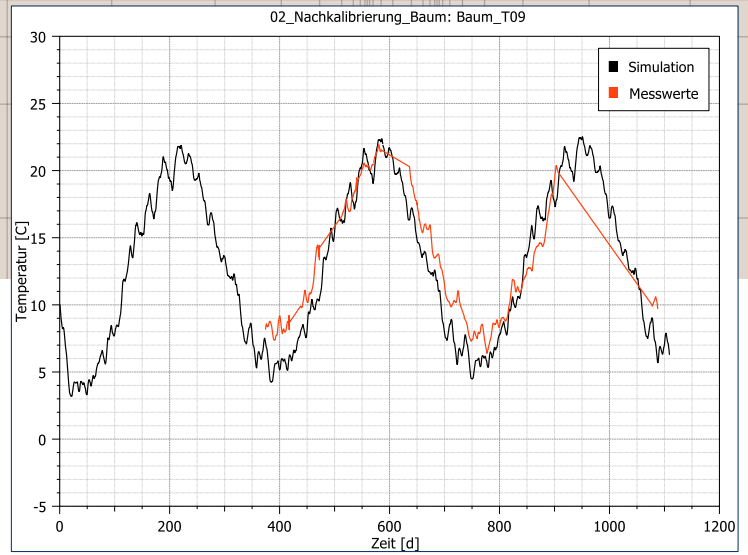
Schritt 2: Nachkalibrierung mit VL/RL-Temperatur nach Vorgabe

Ergebnisse



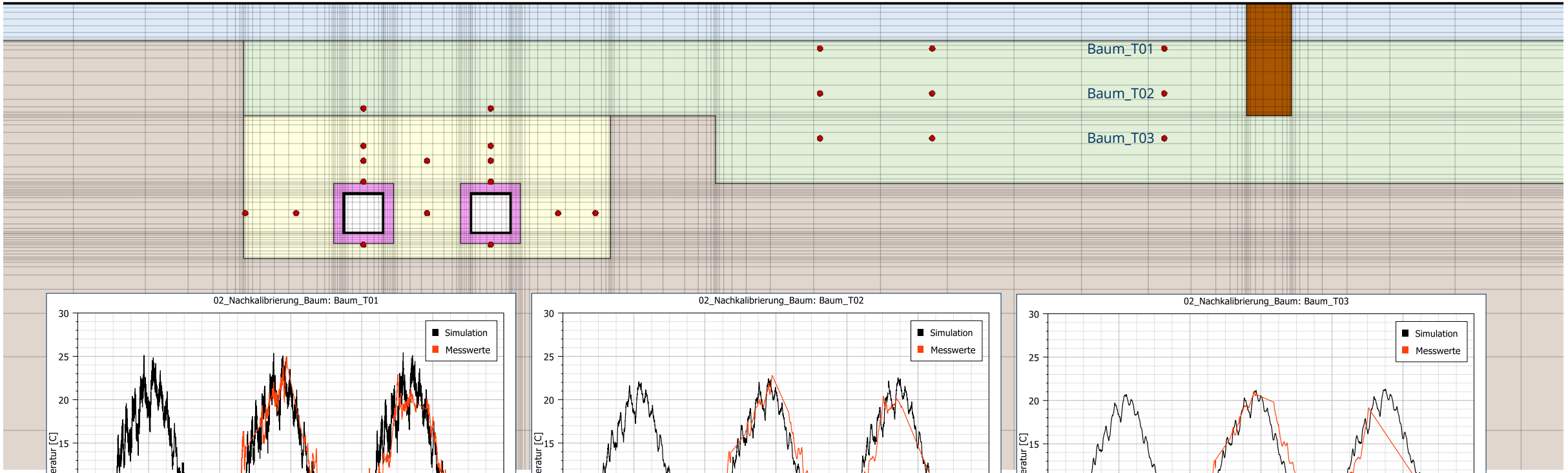


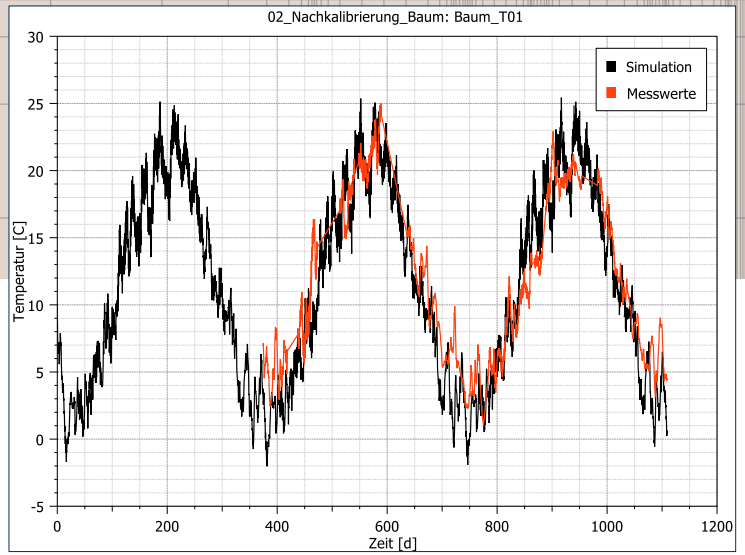


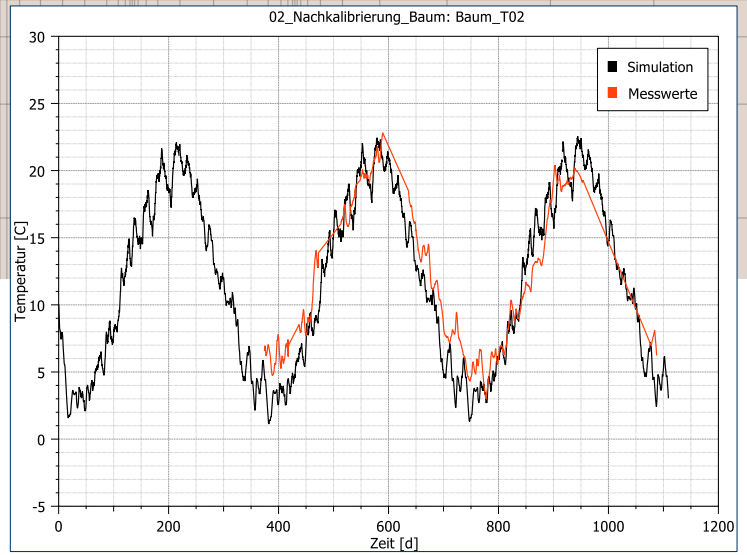


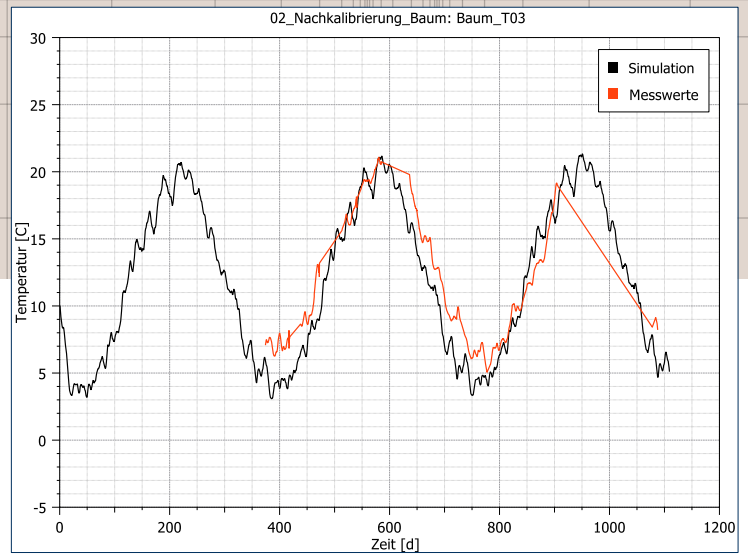
Schritt 2: Nachkalibrierung mit VL/RL-Temperatur nach Vorgabe

Ergebnisse



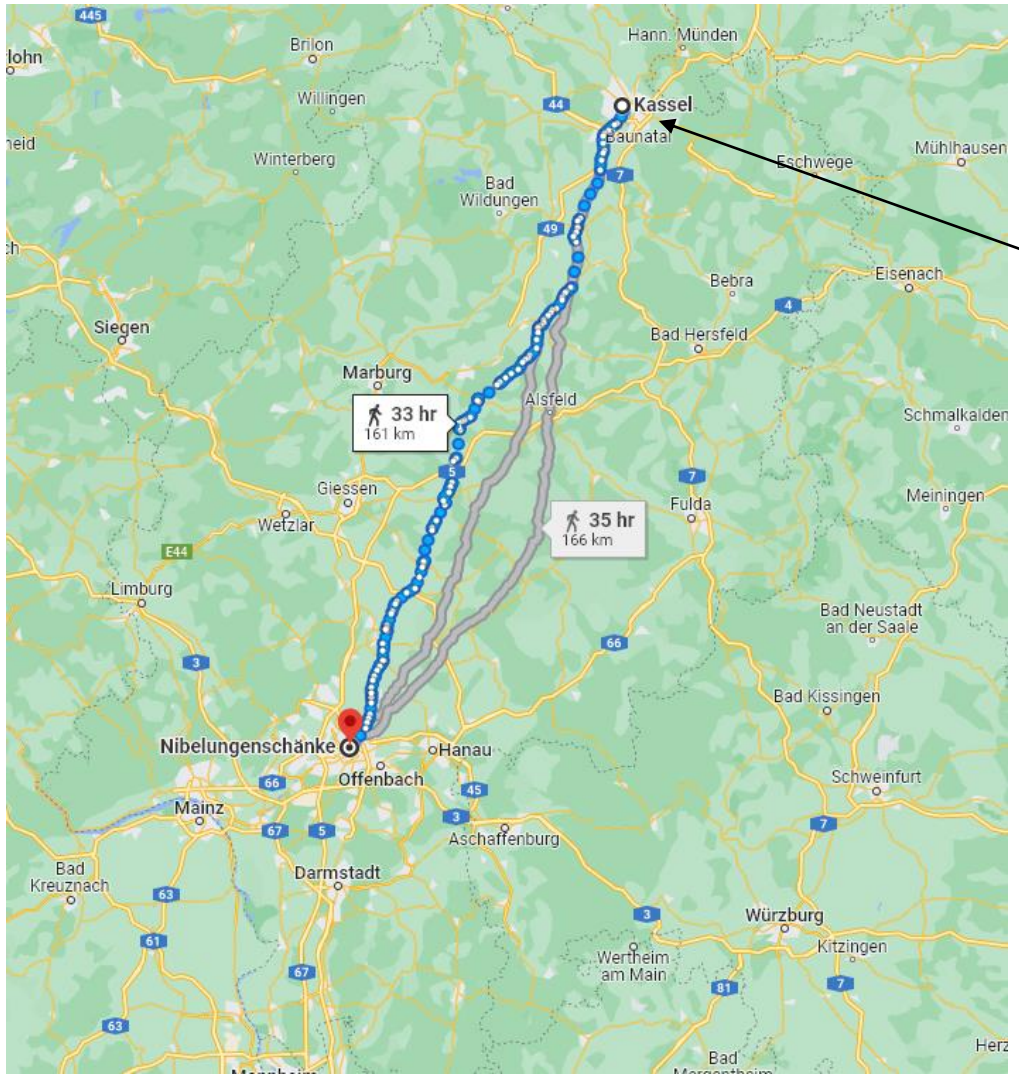




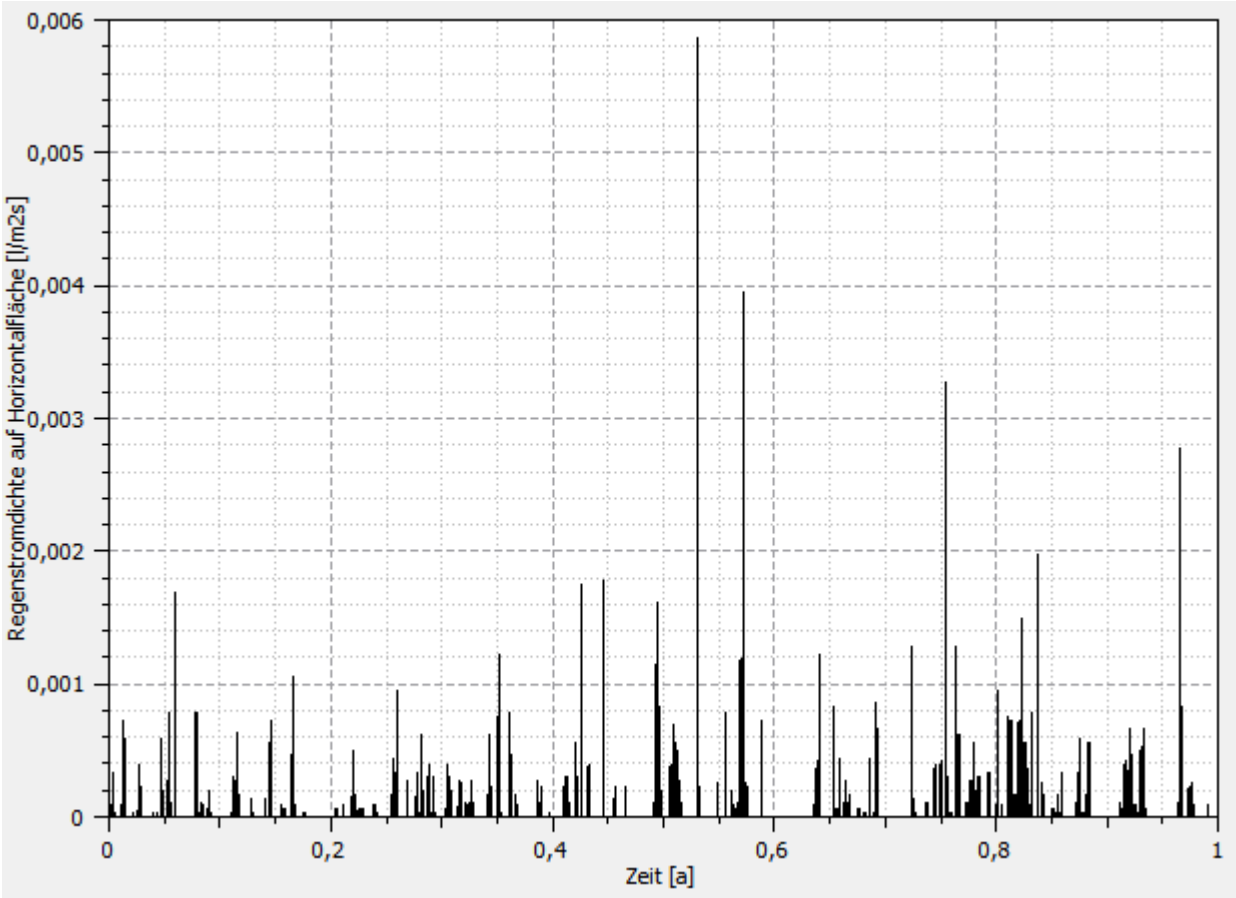


Schritt 3
Simulations-Setup
„Vegetation ungestört“

Schritt 3: Beschaffung Regendaten



Zur Feuchteberechnung im Boden muss die Regenmenge mit berücksichtigt werden. Die nächsten zur Verfügung stehenden Daten stammen vom Testreferenzjahr Kassel des DWD.



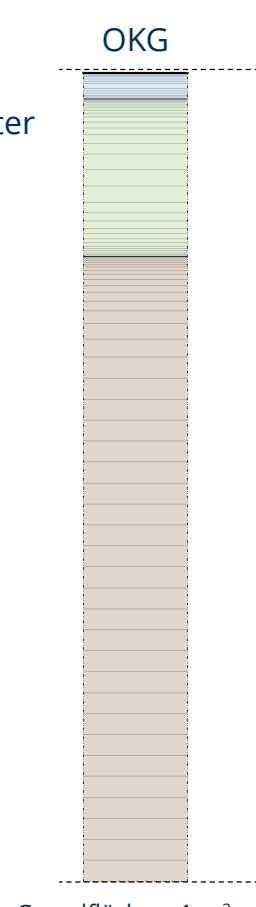
Schritt 3: Setup Variante Boden ungestört (ohne Vegetation)

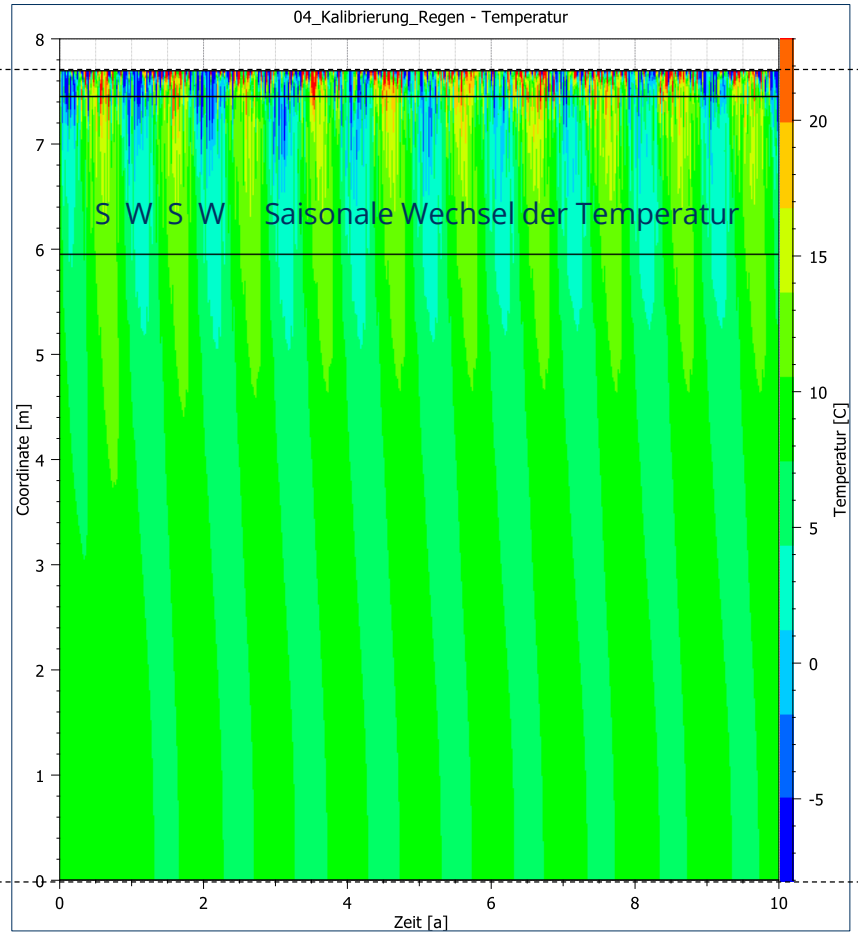
Grundannahme: Die von der Vegetation verdunstete Wassermenge muss als Wasserüberschuss im Boden verfügbar sein. Eine Simulation mit 100 % Regenbeaufschlagung eines Bodens ohne Vegetation sollte einen Wasserüberschuss generieren. Dieser „Überschuss“ kann von der Vegetation „verbraucht“ werden. Mit Vegetation sollte sich ein quasistationäres Gleichgewicht aus Regen und Verdunstung einstellen, welches dem beobachteten Feuchtegehalt entspricht.

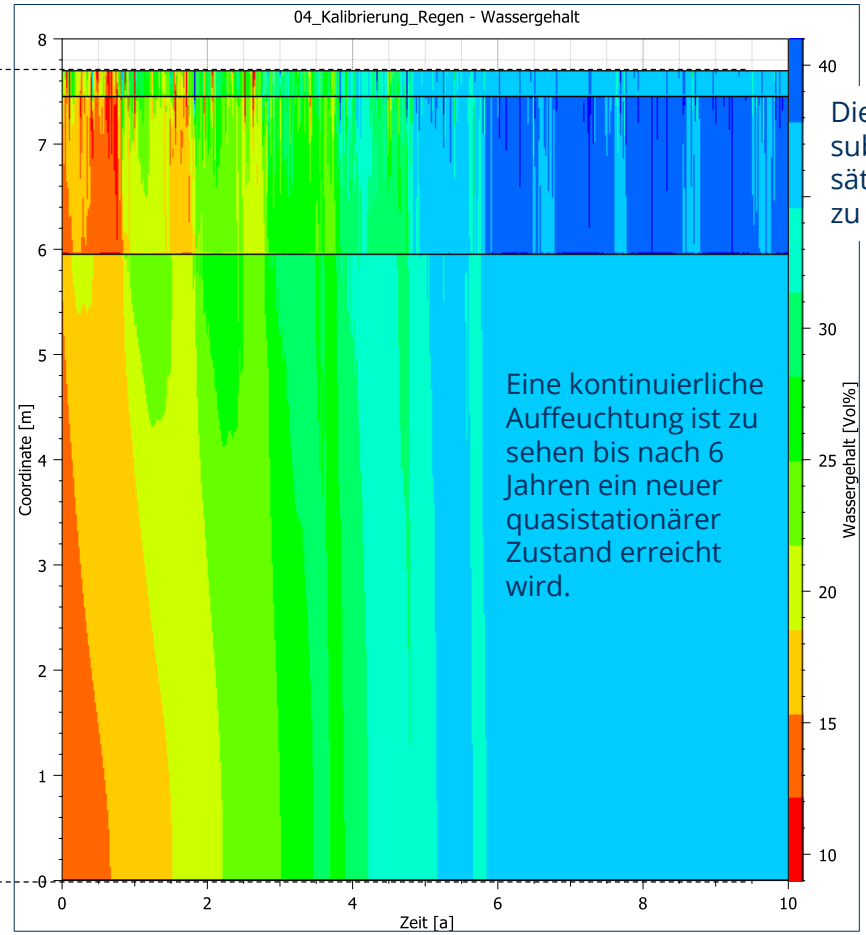
Aus https://www.derkleinegarten.de/nutzgarten-kleingarten/gartenarbeiten/kleine-baumschulung.html

200 bis 300 Liter Wasser am Tag werden von einem großen, belaubten Baum verdunstet. Das befeuchtet auch die Luft der Umgebung und kühlt sie zugleich.

1D-Simulations-Setup „Ungestörter Boden“ über 10 Jahre zur Kalibrierung der durch Bäume verdunsteten Regenmenge.





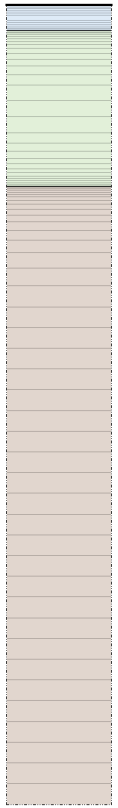


Die Wurzel-substratschicht sättigt sich bis zu 40 Vol% auf.

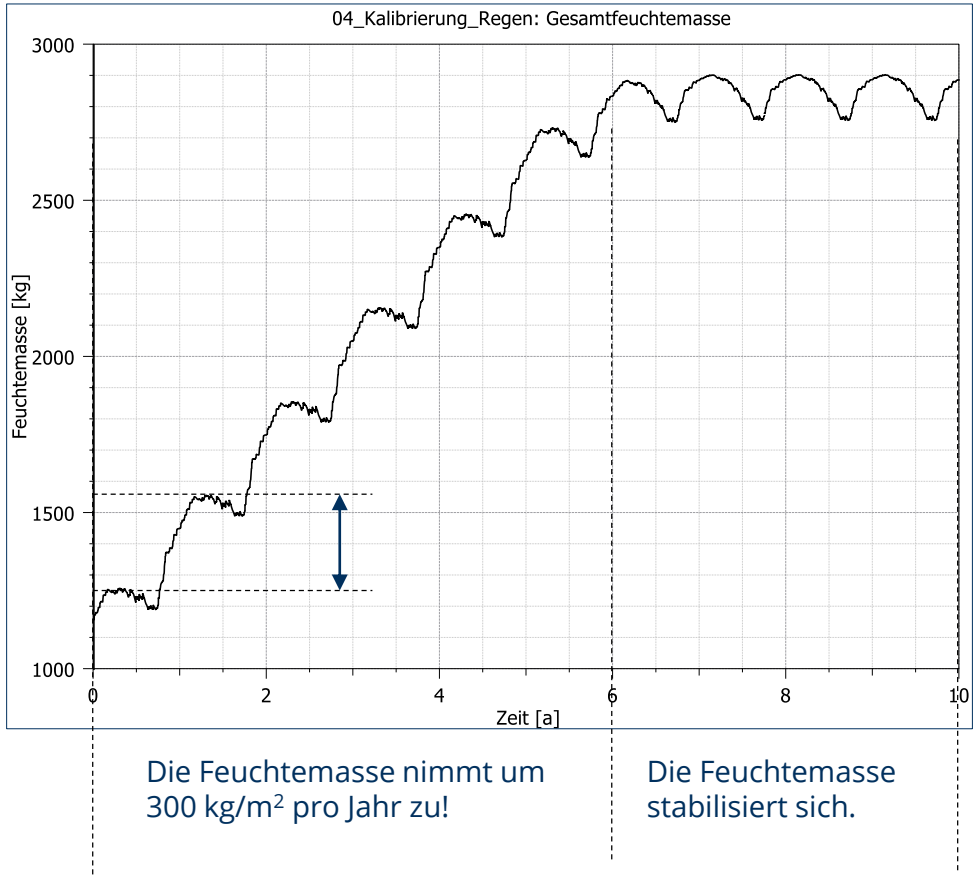
Schritt 3: Ergebnisse Boden ungestört (ohne Vegetation)

1D-Simulations-Setup „Ungestörter Boden“ über 10 Jahre zur Kalibrierung der durch Bäume verdunsteten Regenmenge.

Eine kontinuierliche Auffeuchtung ist zu sehen bis nach 6 Jahren ein neuer quasistationärer Zustand erreicht wird.

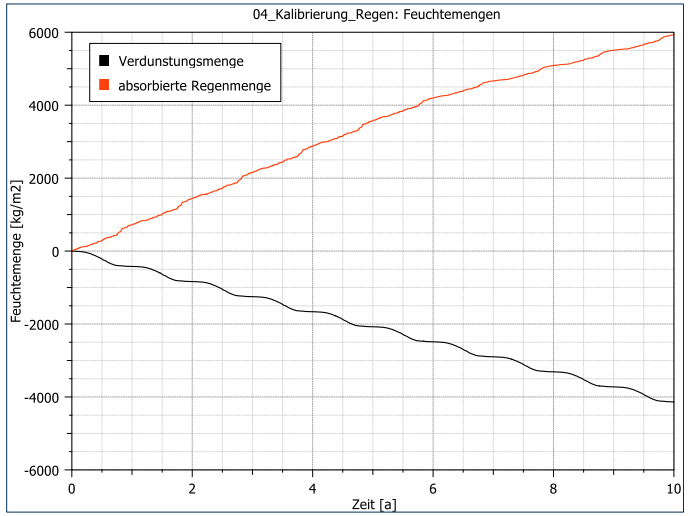


Grundfläche = 1 m²



Die Feuchtemasse nimmt um 300 kg/m² pro Jahr zu!

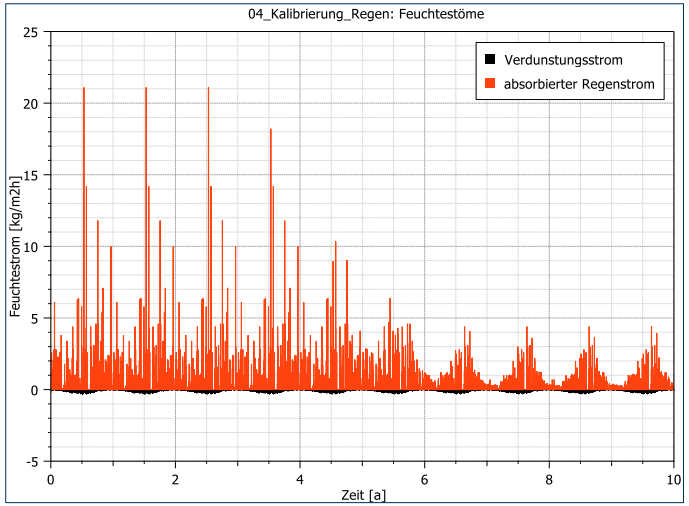
Die Feuchtemasse stabilisiert sich.



Die gesamte absorbierte Regenmenge beträgt 6000 kg/m².

Die gesamte Verdunstung beträgt 4200 kg/m².

Die Differenz entspricht der Zunahme der Feuchtemasse im Boden.

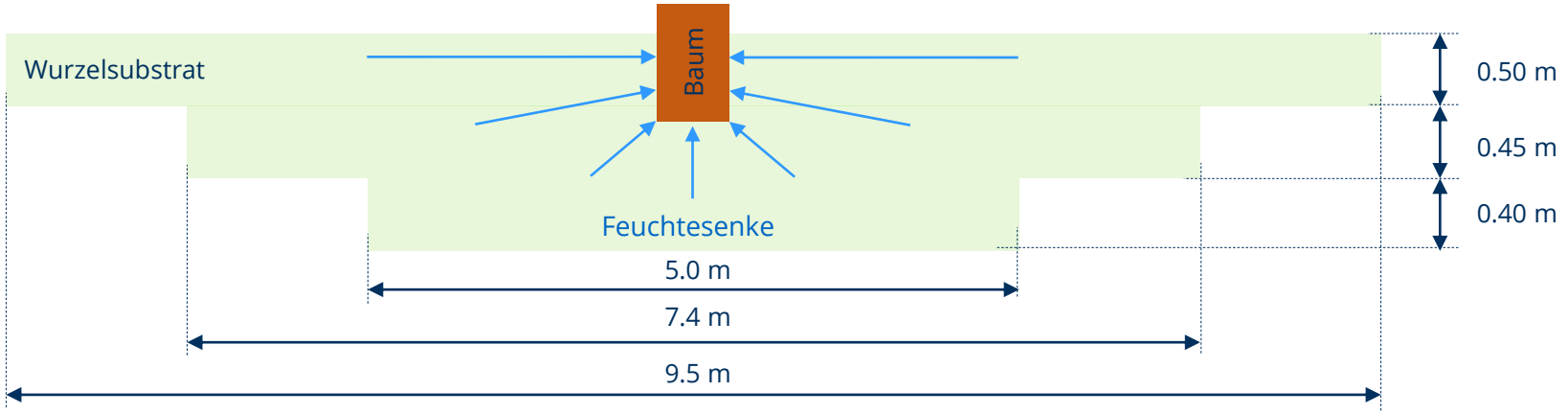


Der absorbierte Regenstrom nimmt nach 6 Jahren ab, weil sich der Boden aufsättigt.

Schlussfolgerung: Bei einer angenommenen mittleren Verdunstungsrate eines Baumes von 150 l/d und einer Wachstumsphase von 6 Monaten beträgt die jährliche Verdunstung 27000 l. Bei einem Wasserüberschuss des Bodens von 300 l/m² benötigt der Baum 90 m² zur Versorgung. Das entspricht einem Wurzelradius von 5.4 m oder einem Quadrat von 9.5 m Kantenlänge.

Schritt 3: Modellierung eines Baums als Feuchtesenke

Es wird für einen Baum eine jährliche Verdunstung von 27000 l angenommen. Die Wassermenge wird aus einer Grundfläche von 90 m² in der Umgebung des Baumes entzogen. Dazu wird eine Feuchtesenke in einem Bodenvolumen mit quadratischer Grundfläche modelliert.



$\Delta V_1 = 9.5\ m * 9.5\ m * 0.50\ m = 45.13\ m^3$

$\Delta V_2 = 7.4\ m * 7.4\ m * 0.45\ m = 24.64\ m^3$

$\Delta V_3 = 5.0\ m * 5.0\ m * 0.40\ m = 10.00\ m^3$

$V_{Feuchtesenke} = 79.77\ m^3$

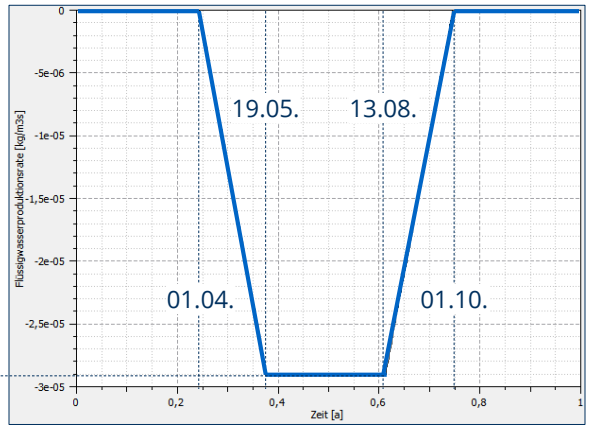
$M_{Feuchtesenke} = \frac{27000\ l/a}{79.77\ m^3} = 338.5\ l/m^3a$

Generieren einer Zeitreihe für Feuchtesenke, um die saisonale Abhängigkeit zu berücksichtigen.

Datum	Tag	Uhrzeit	Feuchtesenke in g/m3h	Feuchtesenke in l/m3d
01. Jan	0	00:00:00	0.000	0.000
31. Mrz	89	00:00:00	0.000	0.000
01. Apr	90	00:00:00	2.142	0.051
02. Apr	91	00:00:00	4.284	0.103
03. Apr	92	00:00:00	6.426	0.154
04. Apr	93	00:00:00	8.568	0.206
05. Apr	94	00:00:00	10.711	0.257
06. Apr	95	00:00:00	12.853	0.308
07. Apr	96	00:00:00	14.995	0.360
08. Apr	97	00:00:00	17.137	0.411
09. Apr	98	00:00:00	19.279	0.463
10. Apr	99	00:00:00	21.421	0.514
11. Apr	100	00:00:00	23.563	0.566
18. Sep	260	00:00:00	27.377	0.657
19. Sep	261	00:00:00	25.235	0.606
20. Sep	262	00:00:00	23.093	0.554
21. Sep	263	00:00:00	20.951	0.503
22. Sep	264	00:00:00	18.809	0.451
23. Sep	265	00:00:00	16.667	0.400
24. Sep	266	00:00:00	14.525	0.349
25. Sep	267	00:00:00	12.382	0.297
26. Sep	268	00:00:00	10.240	0.246
27. Sep	269	00:00:00	8.098	0.194
28. Sep	270	00:00:00	5.956	0.143
29. Sep	271	00:00:00	3.814	0.092
30. Sep	272	00:00:00	1.672	0.040
01. Okt	273	00:00:00	0.000	0.000
31. Dez	364	23:00:00	0.000	0.000

Volumen=			79.75	m3
Max. Verdunstung =	200	l/d	2.51	l/m3d
Anstieg=	4.1	l/d	0.05	l/m3d
Jahressumme=			338.6	l/m3a

entspricht 200 l/d

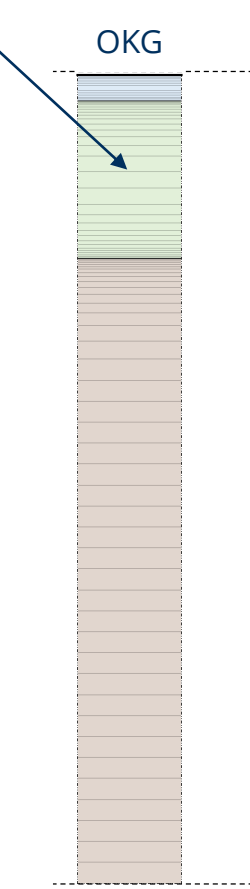


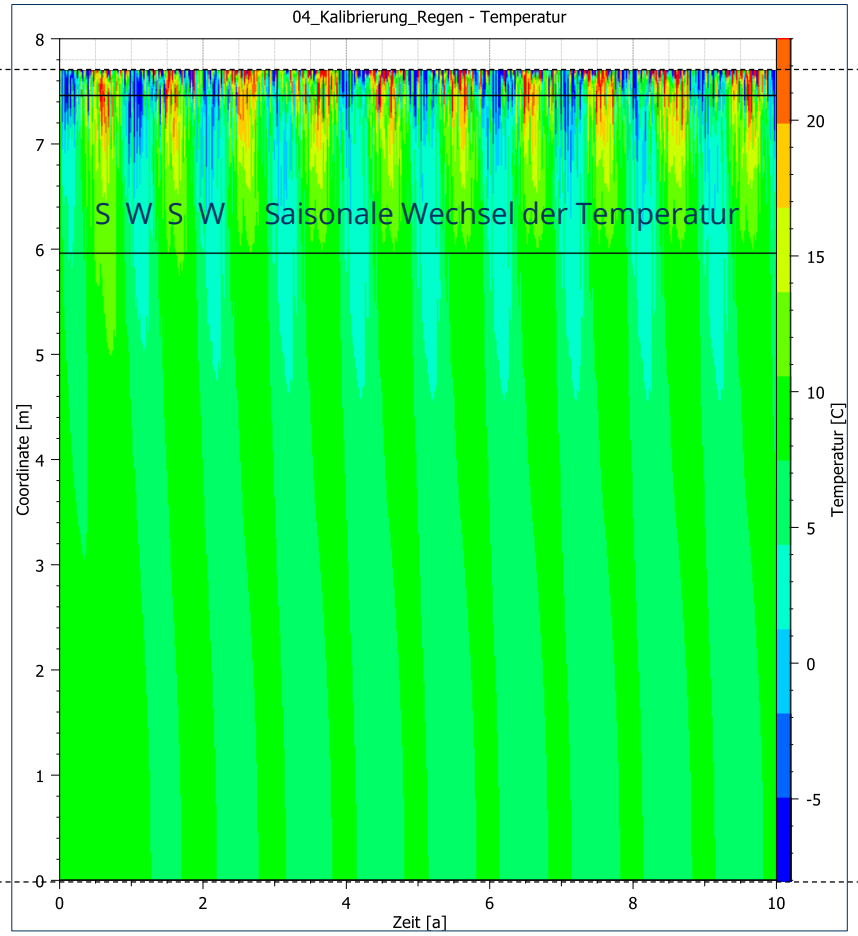
Schritt 3: Variante Boden gestört (mit Vegetation)

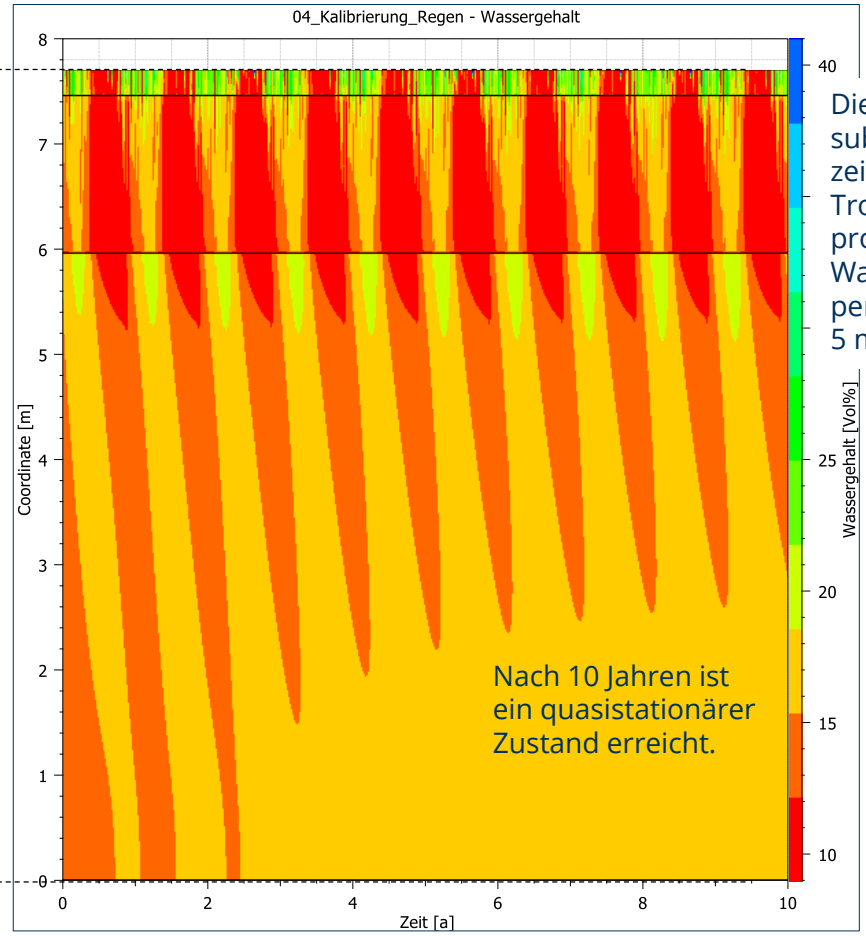
Ergebnis: Die von der Vegetation verdunstete Wassermenge wird dem Boden entzogen. Trotz 100 % Regenbeaufschlagung wird der „Überschuss“ von der Vegetation „verbraucht“. Mit Vegetation stellt sich ein quasistationäres Gleichgewicht aus Regen und Verdunstung ein, welches dem beobachteten Feuchtegehalt des Bodens entspricht.

Zuordnung der Zeitreihe für Feuchtesenke zur Wurzelsubstratschicht

1D-Simulations-Setup „Gestörter Boden“ über 10 Jahre zur Kalibrierung der durch Bäume verdunsteten Regenmenge.







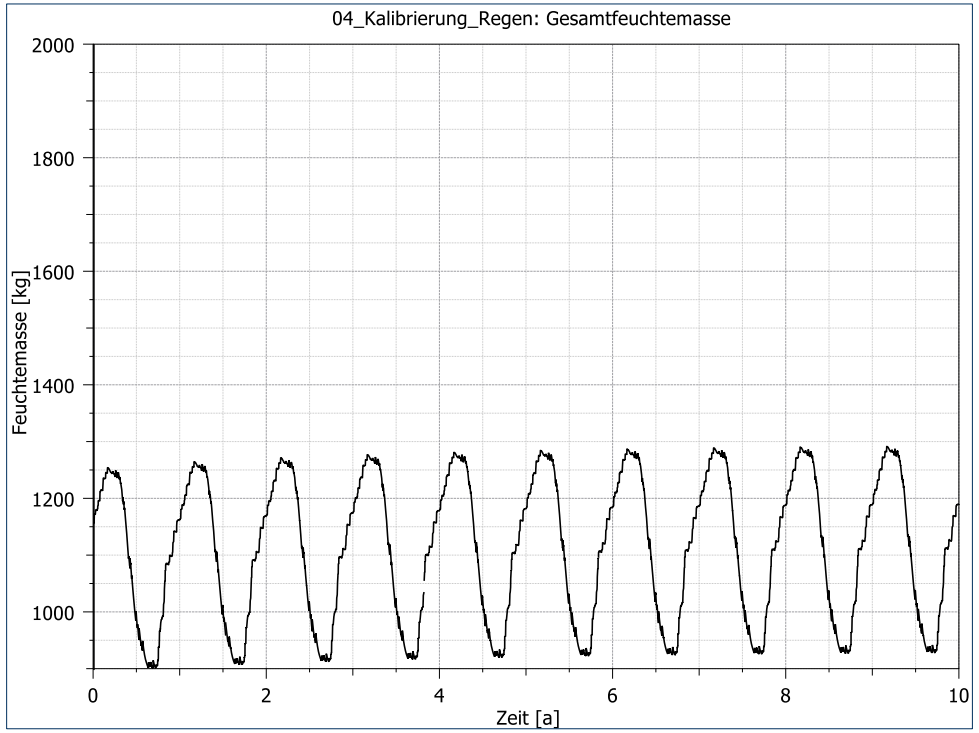
Die Wurzel-substratschicht zeigt deutliche Trocknungs-prozesse in der Wachstums-periode, die bis in 5 m Tiefe reichen.

Schritt 3: Variante Boden gestört (mit Vegetation)

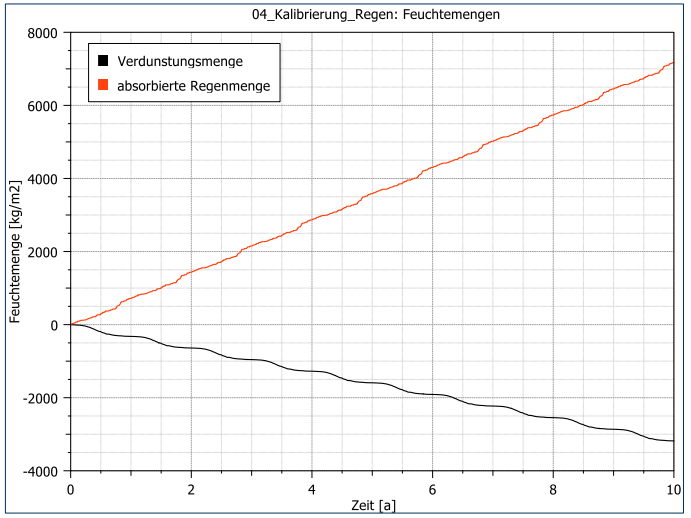
1D-Simulations-Setup „Gestörter Boden“ über 10 Jahre zur Kalibrierung der durch Bäume verdunsteten Regenmenge.

Zuordnung der Zeitreihe für Feuchtesenke zur Wurzelsubstratschicht

Grundfläche = 1 m²



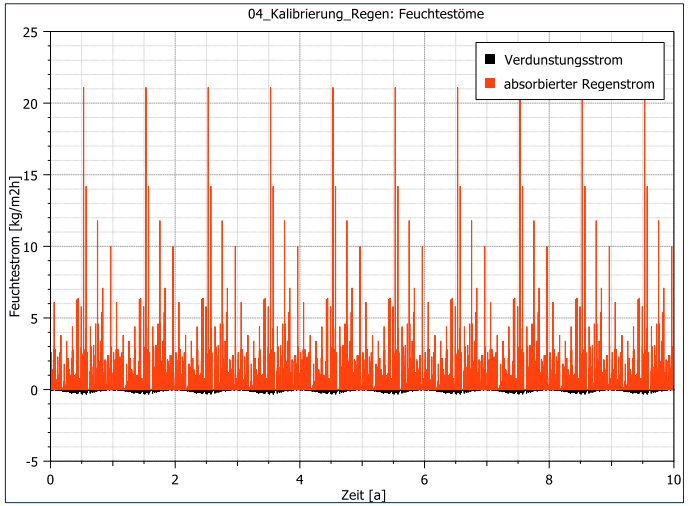
Die Feuchtemasse bleibt im Jahreszyklus konstant!



Die gesamte absorbierte Regenmenge beträgt 7200 kg/m².

Die gesamte Verdunstung beträgt 3200 kg/m².

Die Differenz wurde durch den Baum verdunstet.



Der absorbierte Regenstrom nimmt über die Jahre nicht ab, weil sich der Boden nicht aufsättigt.

Schlussfolgerung: Der im Boden errechnete Wasserüberschuss aus den Klimadaten des DWD reicht aus, um bei einer angenommenen mittleren Verdunstungsrate eines Baumes von 150 l/d und einer Wachstumsphase von 6 Monaten eine jährliche Verdunstung 27000 l zu generieren. Mit einer Entzugsfläche des Baumes von 90 m² (entspricht einem Wurzelradius von 5.4 m oder einem Quadrat von 9.5 m Kantenlänge) und einer Mächtigkeit der Wurzelsubstratschicht von 1.35 m lässt sich somit ein realistisches Verhalten des Bodens mit Vegetation abbilden.

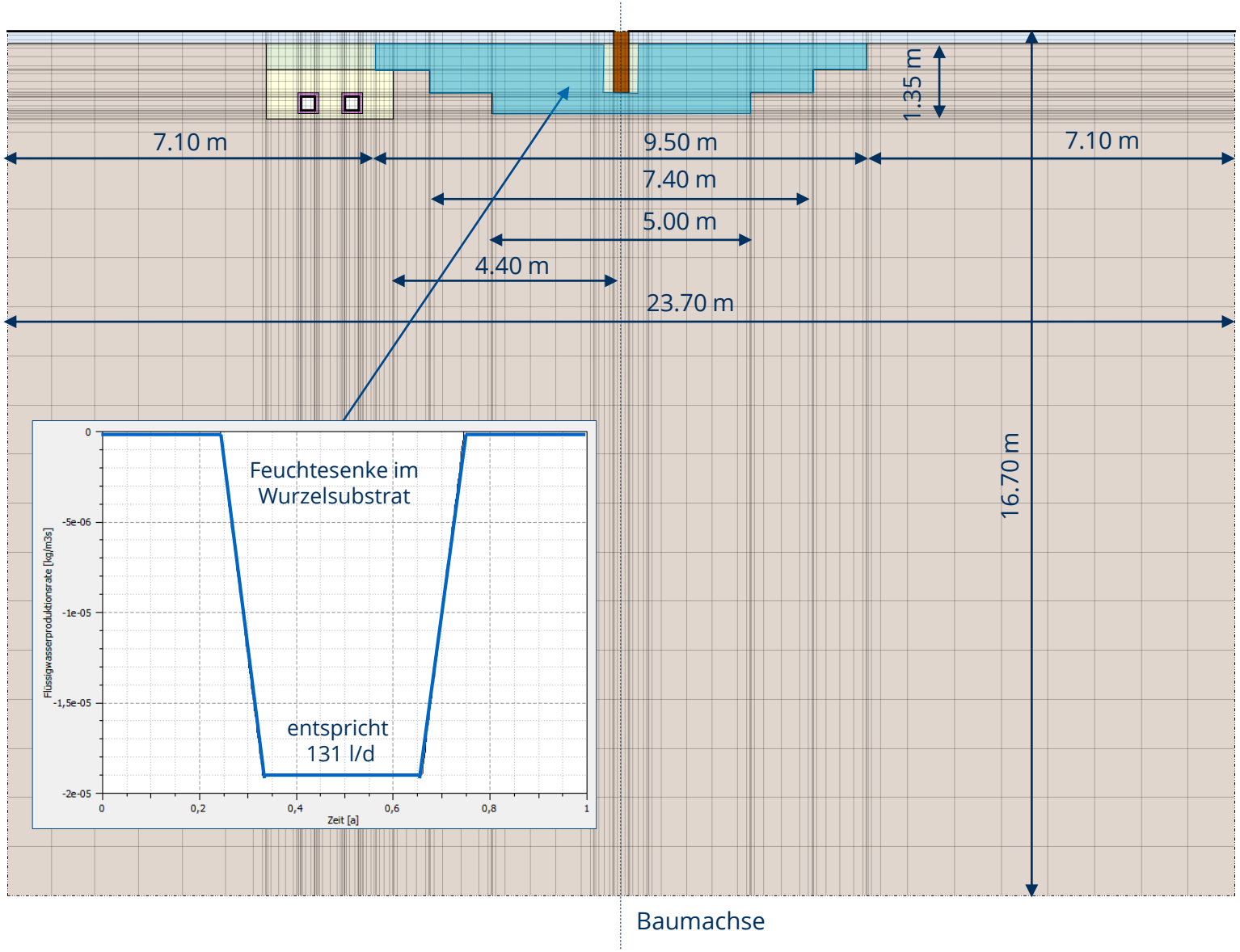
Vergleiche Baum

Ungestört (kein Betrieb) vs. Gestört (Betrieb)

Schritt 3: Vergleiche Baum ungestört / gestört

Aufbau Referenz-Varianten

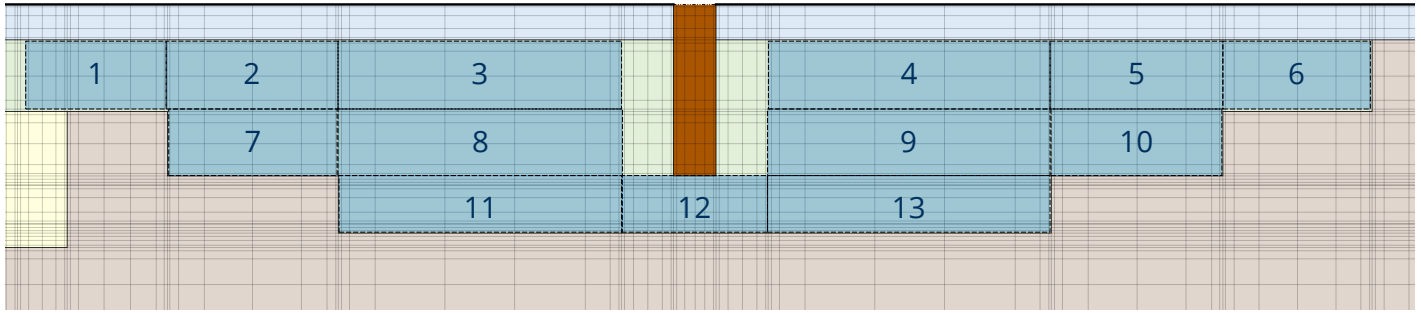
- Symmetrisch zu Baumachse
- Abstand Graben zu Baumachse aus Kalibrierung übernommen
- Modellierung der Feuchtesenke in 2D
- Ansatz der maximalen Verdunstungsrate mit 131 l/d
- 100% Regen auf OKG im Bereich der Feuchtesenke
- 40 % Regen außerhalb der Feuchtesenke (Evapo-Transpiration der Vegetation)



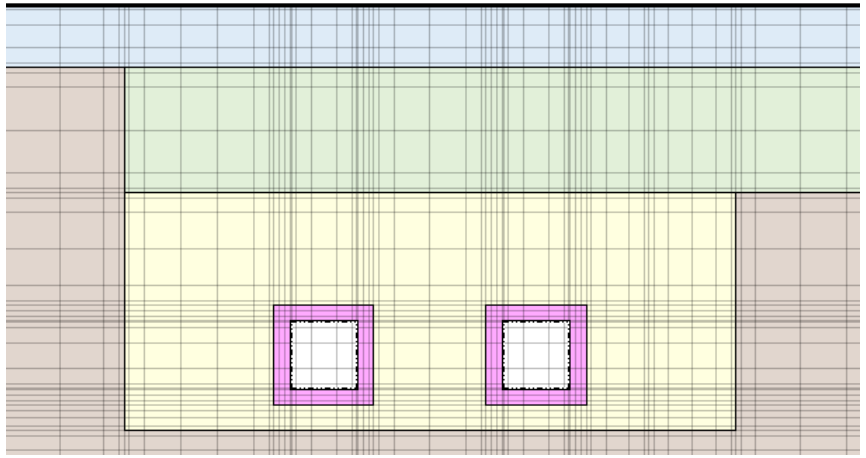
Schritt 3: Vergleiche Baum ungestört / gestört

Aufbau Referenz-Varianten

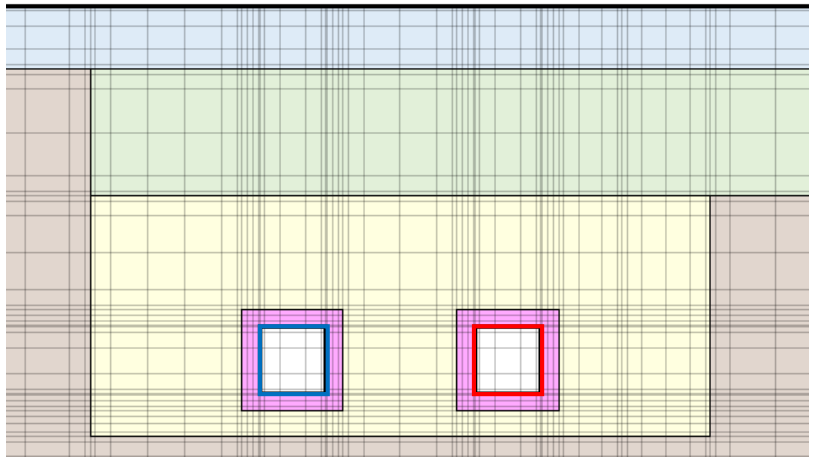
- Ausgabe der Temperaturen und Feuchtegehalte in 13 Kompartimenten im Bereich des Wurzelsubstrats
- Ausgabe der mittleren Feuchtegehalte im Wurzelsubstrat und im Gesamtgebiet

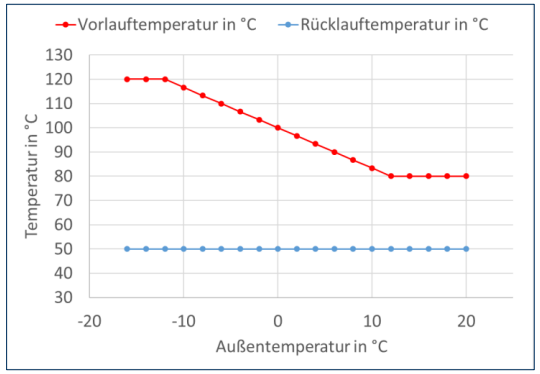


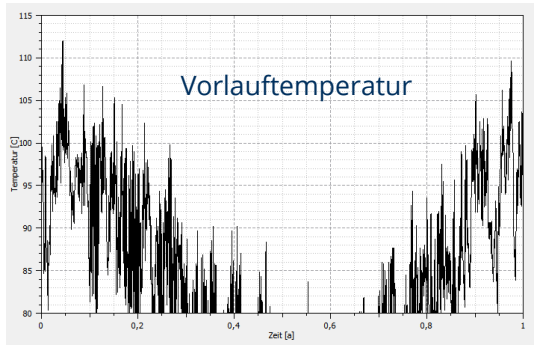
- Variante Baum **ungestört**: Fernwärme außer Betrieb (adiabate RB in Rohren)



- Variante Baum **gestört**: Fernwärme in Betrieb (RB in Rohren nach Vorgabe)

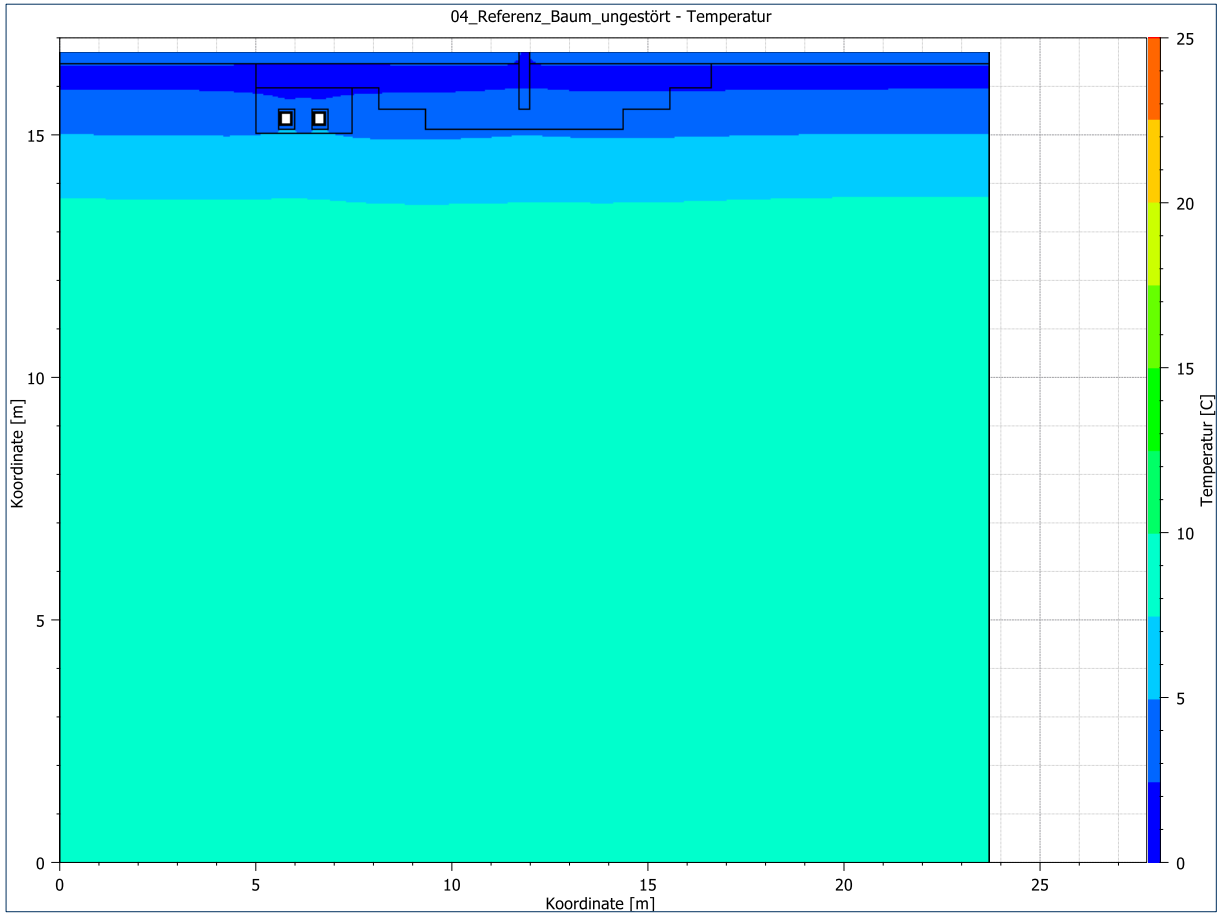


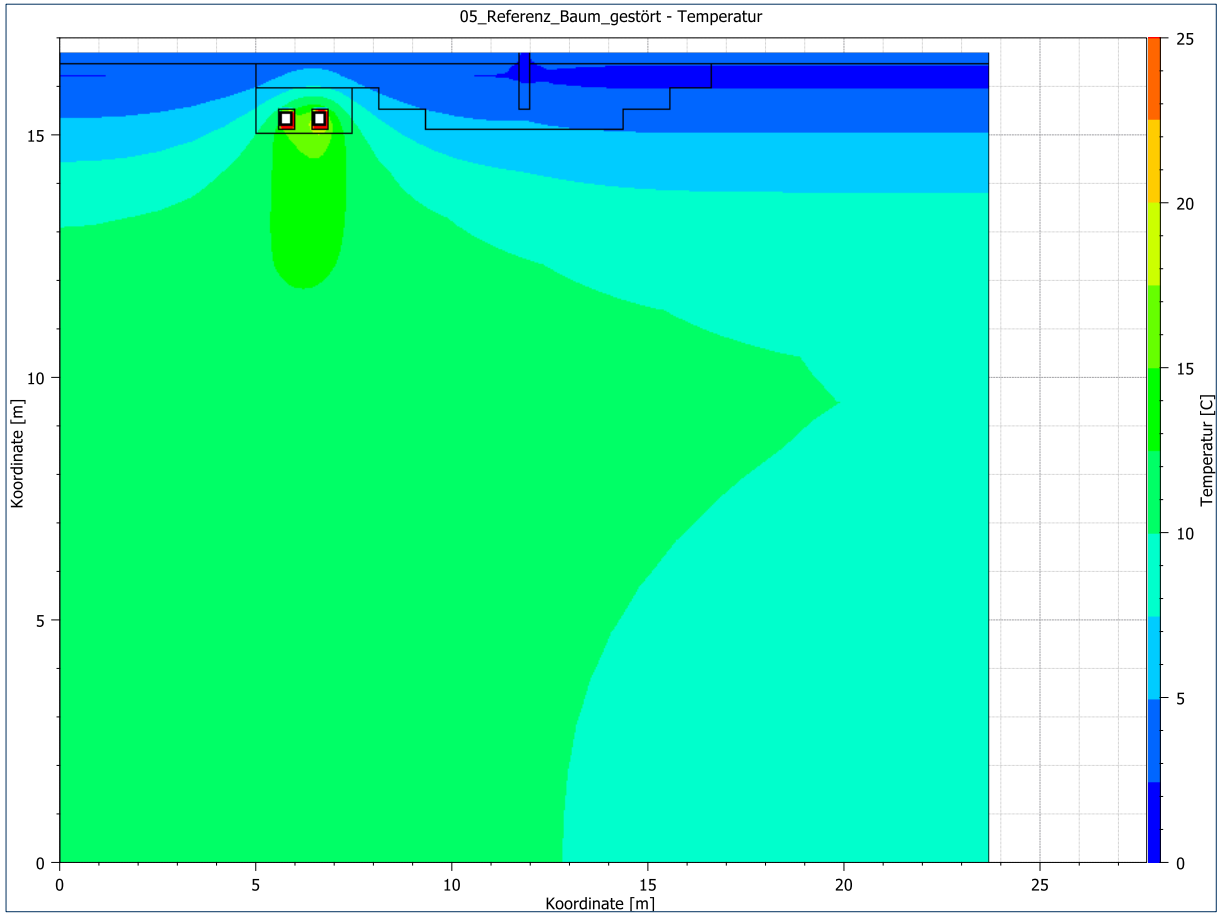




Schritt 3: Ergebnisse Vergleiche Baum ungestört / gestört

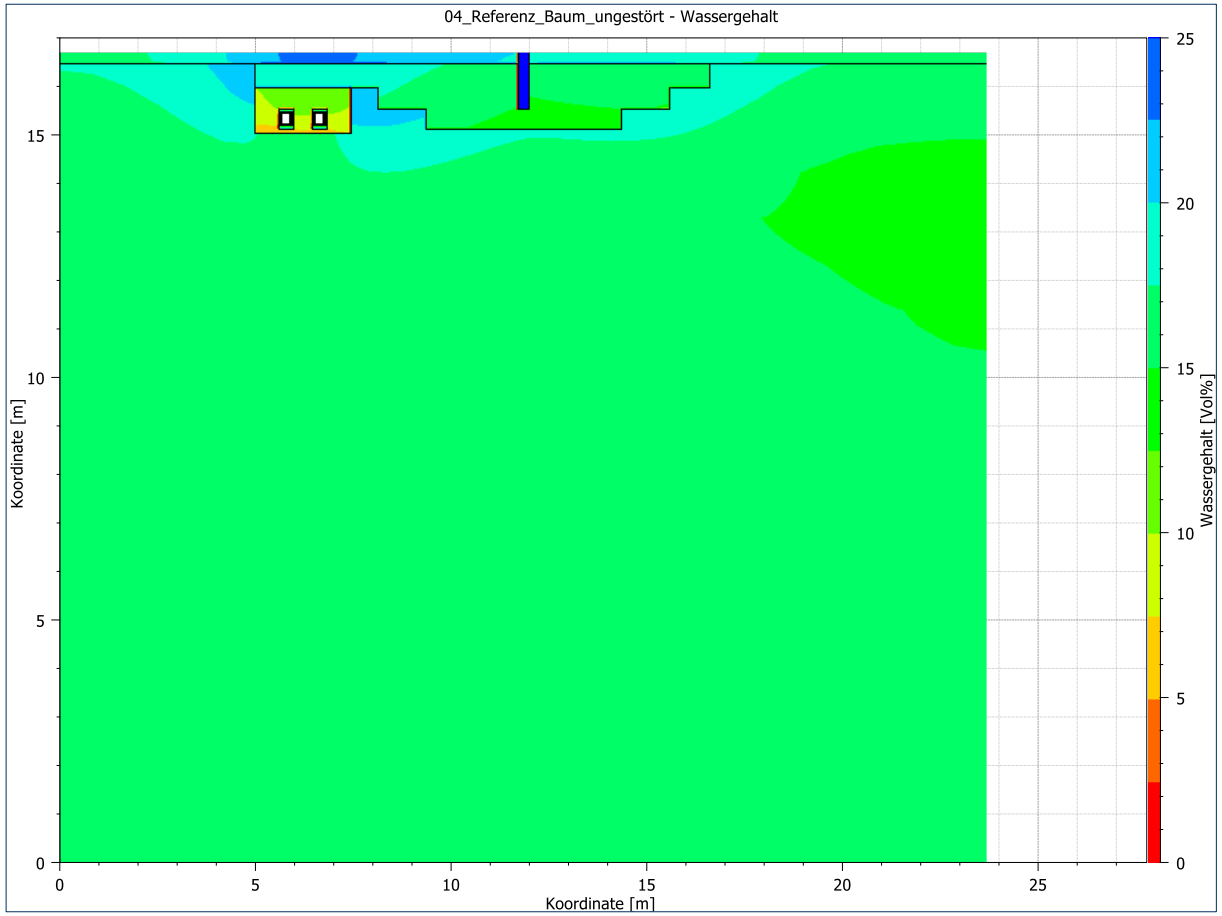
Temperaturverteilungen am 03.01.2022 um 00:00:00

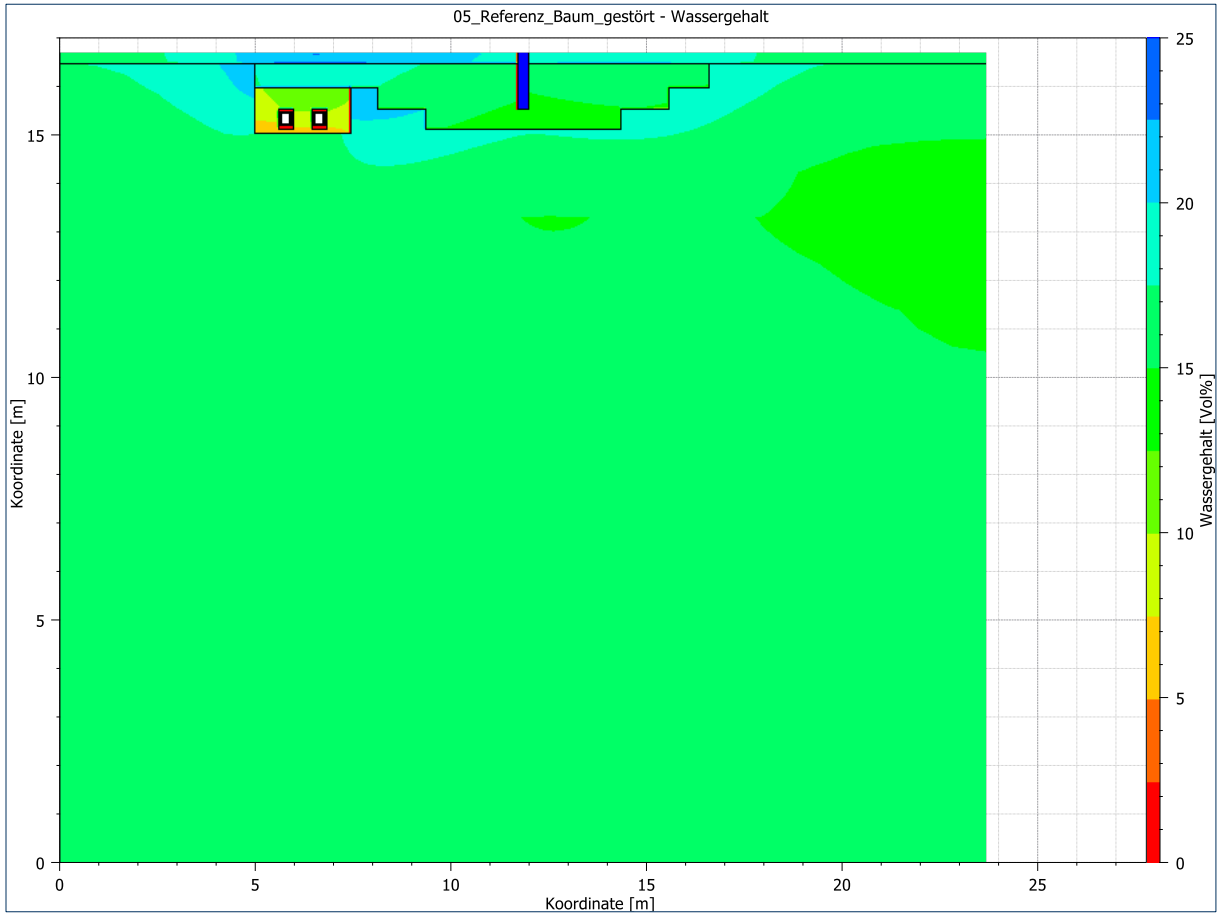




Schritt 3: Ergebnisse Vergleiche Baum ungestört / gestört

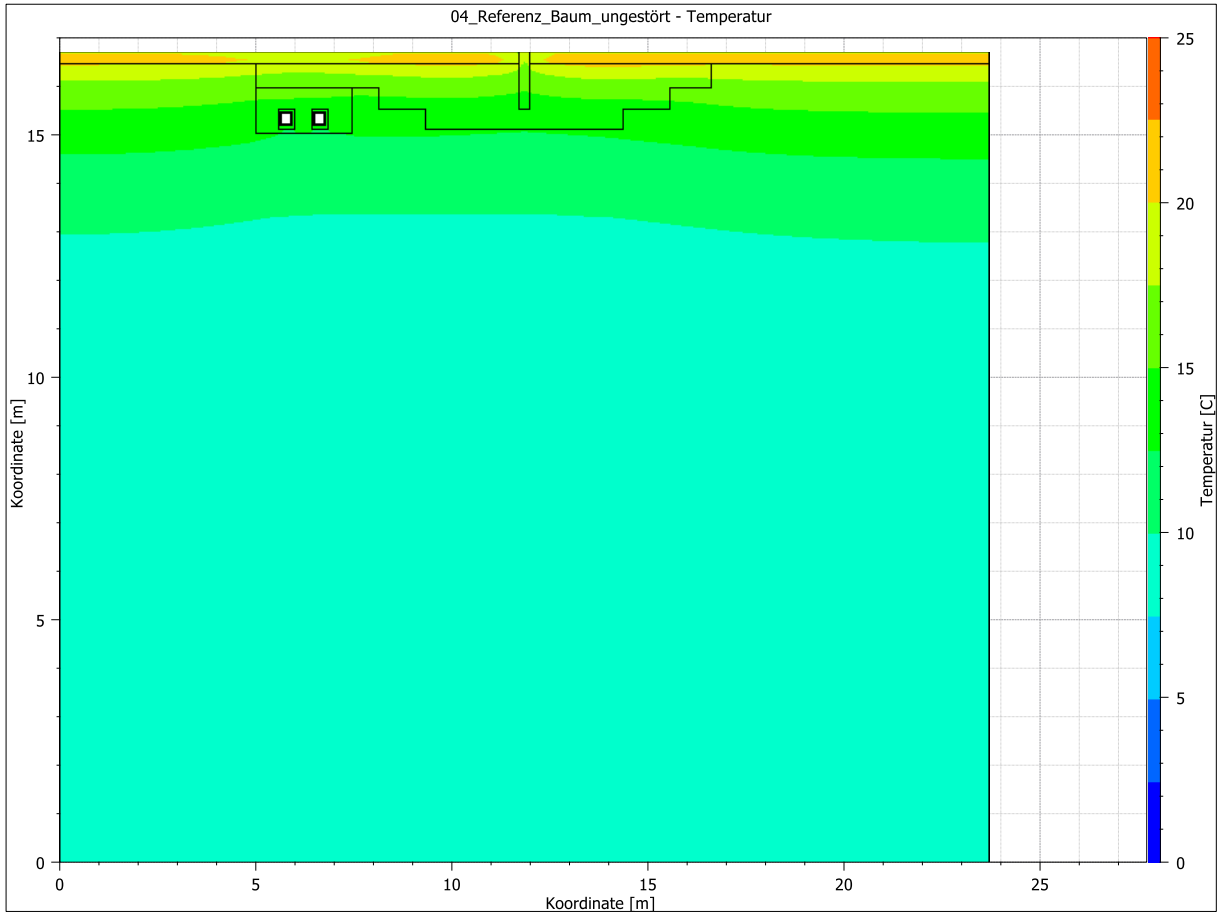
Wassergehaltsverteilungen am 03.01.2022 um 00:00:00

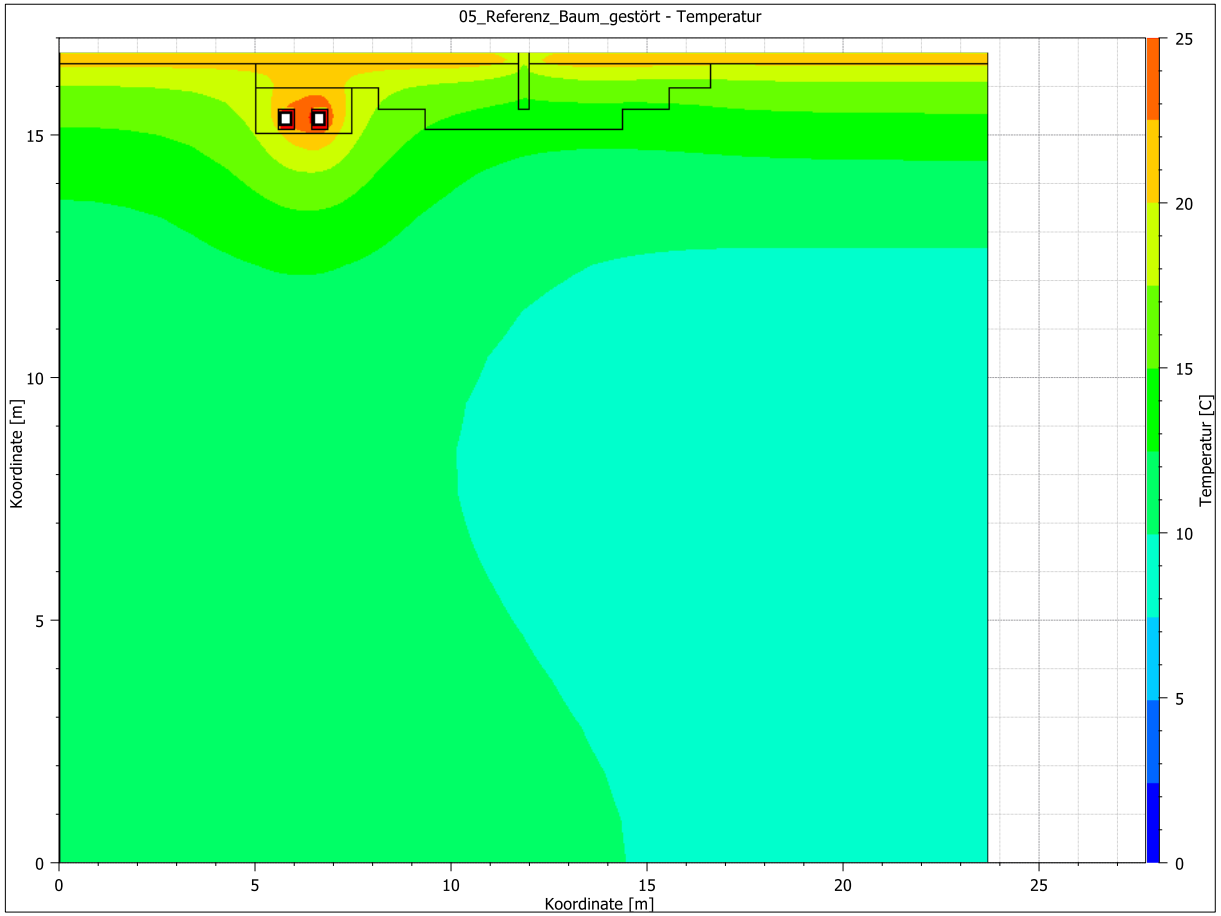




Schritt 3: Ergebnisse Vergleiche Baum ungestört / gestört

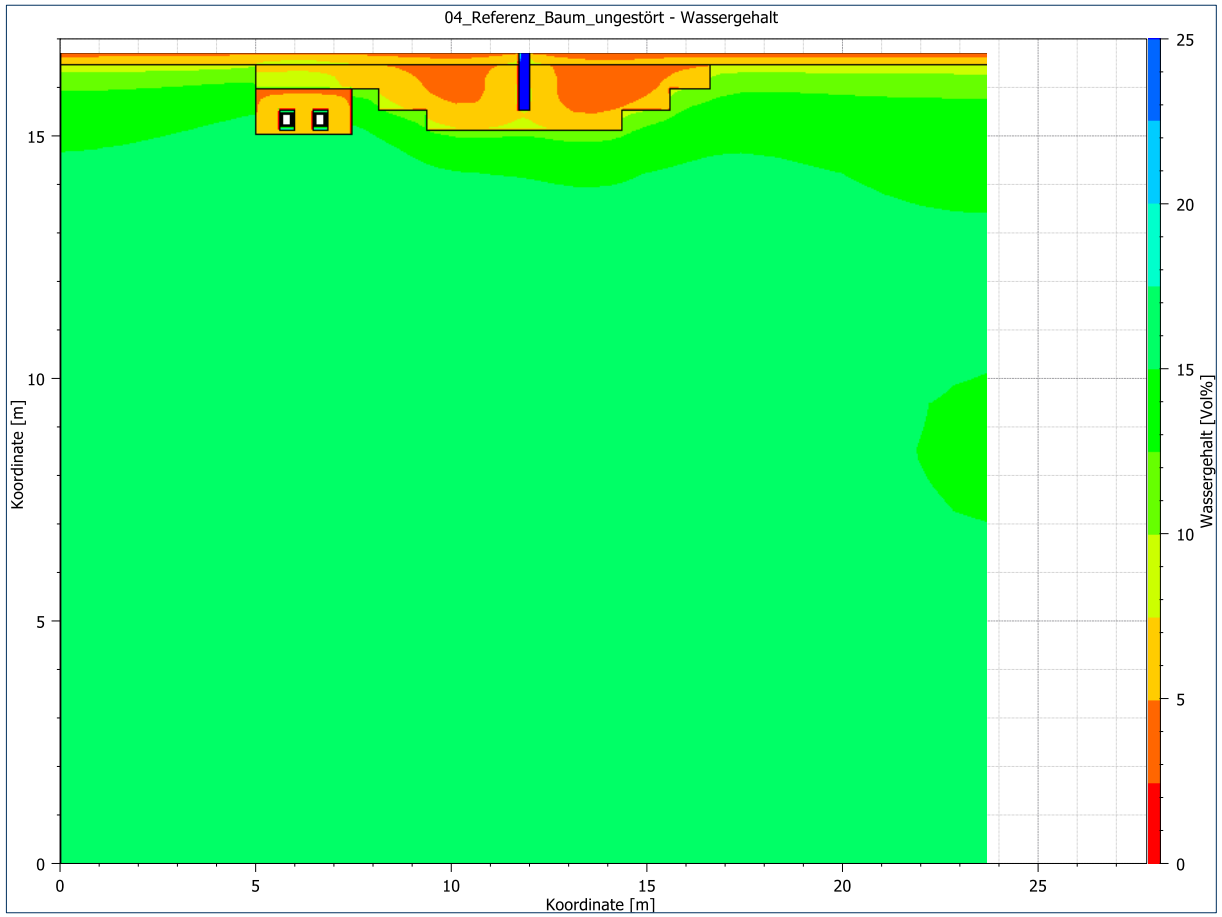
Temperaturverteilungen am 09.08.2021 um 00:00:00

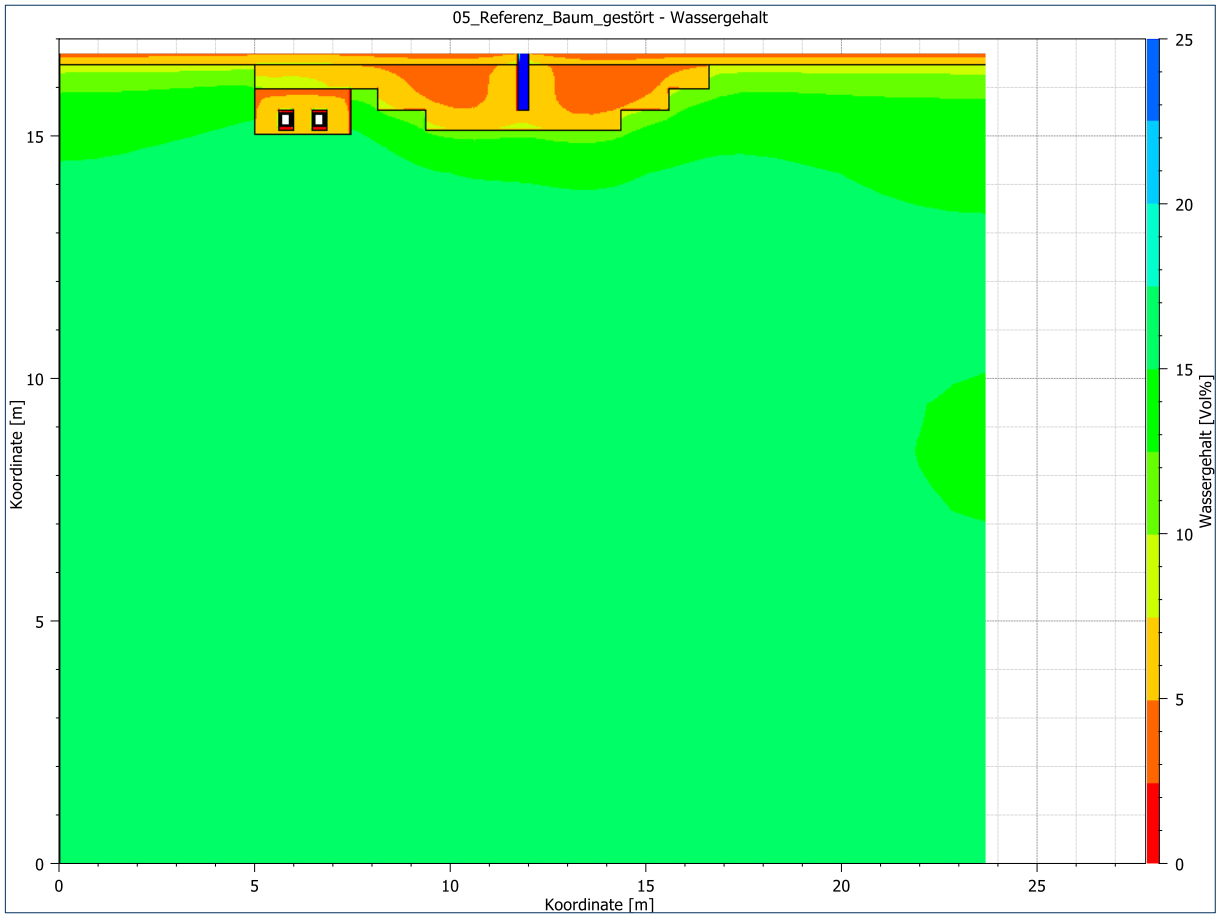




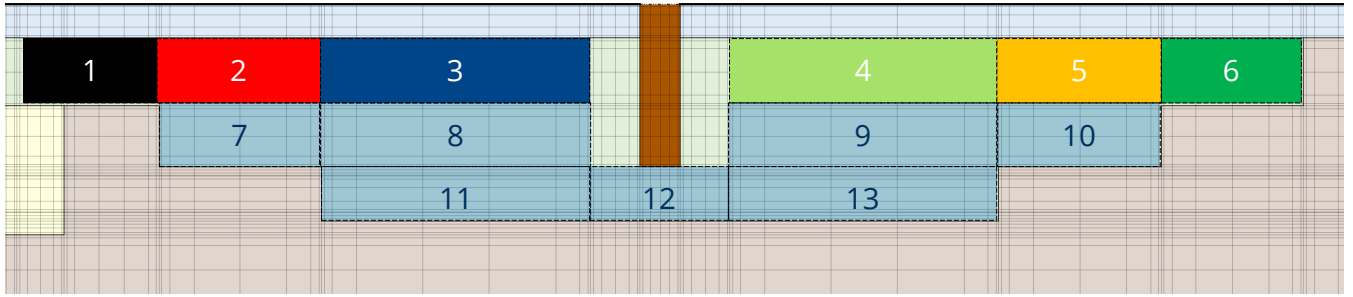
Schritt 3: Ergebnisse Vergleiche Baum ungestört / gestört

Wassergehaltsverteilungen am 09.08.2022 um 00:00:00

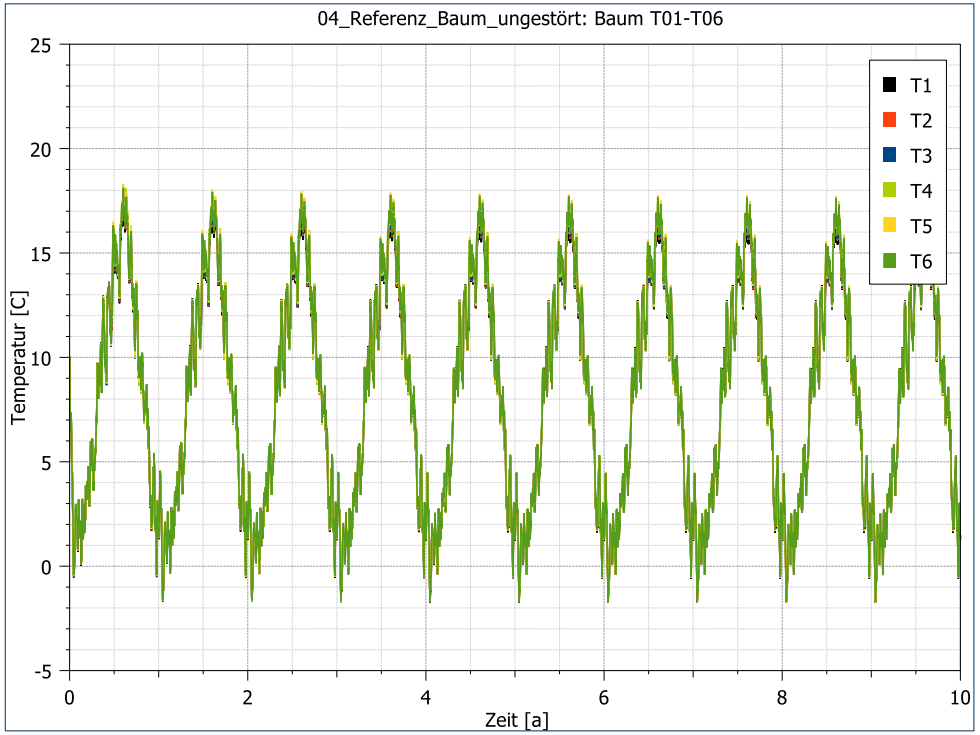




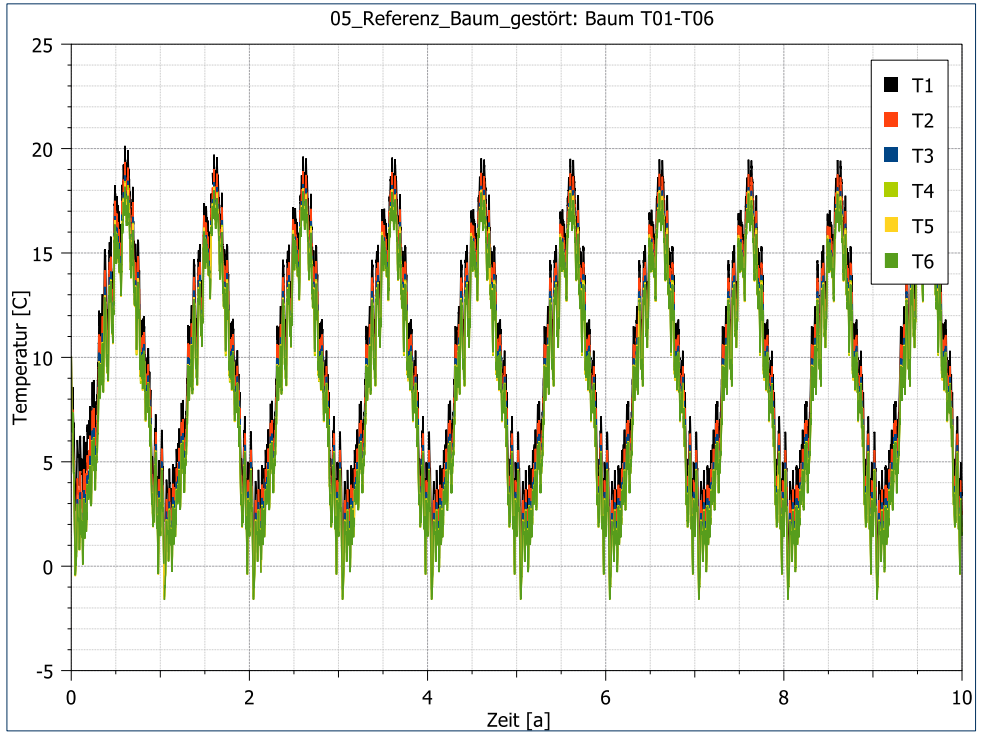
Schritt 3: Ergebnisse Vergleiche Baum ungestört / gestört



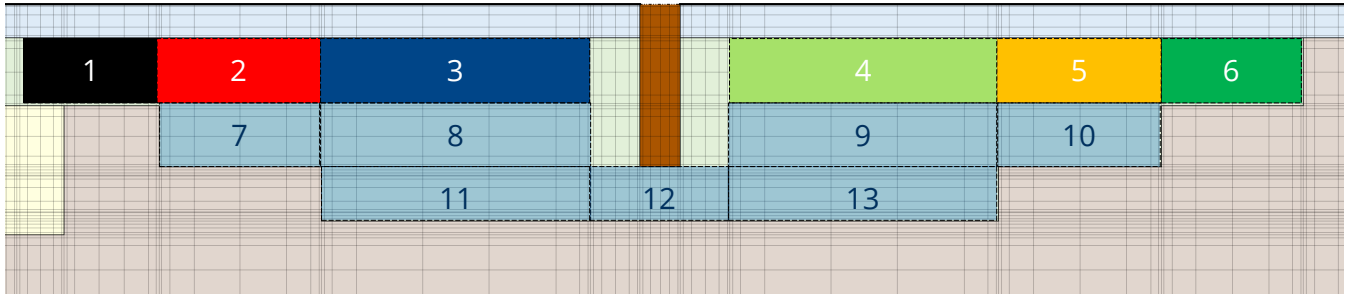
Baum ungestört: Temperaturverläufe



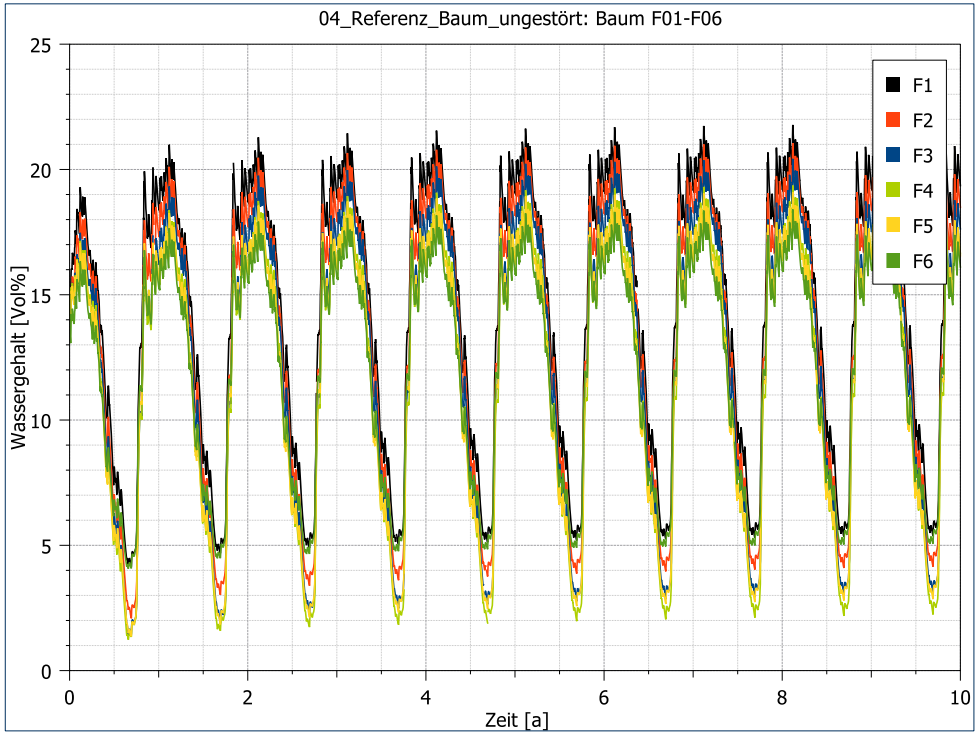
Baum gestört: Temperaturverläufe



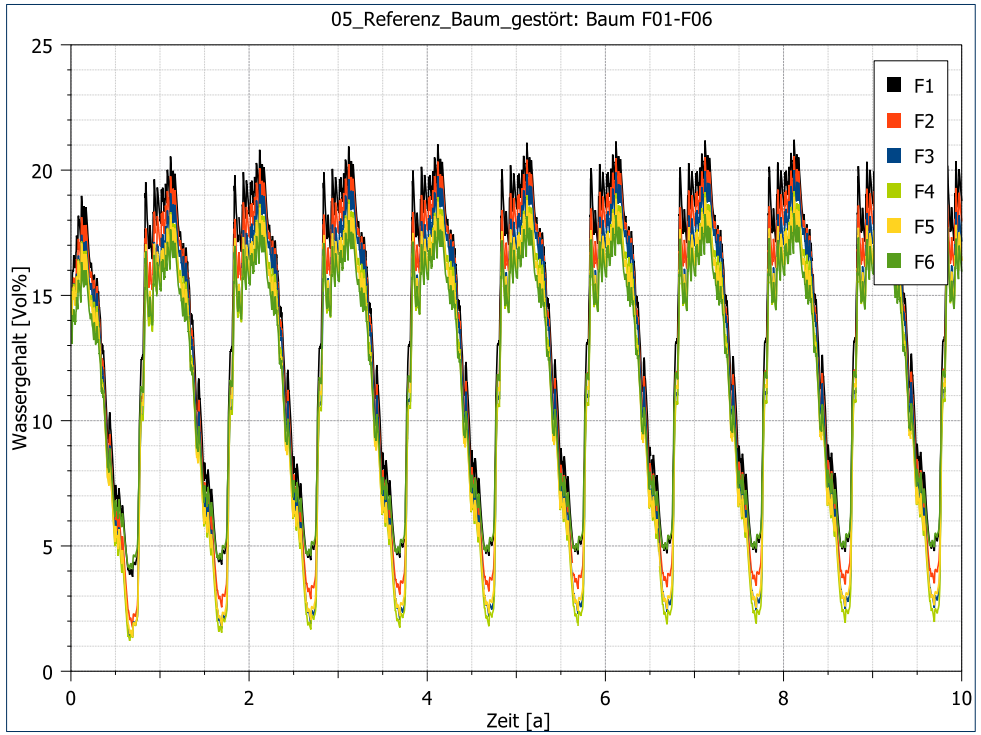
Schritt 3: Ergebnisse Vergleiche Baum ungestört / gestört



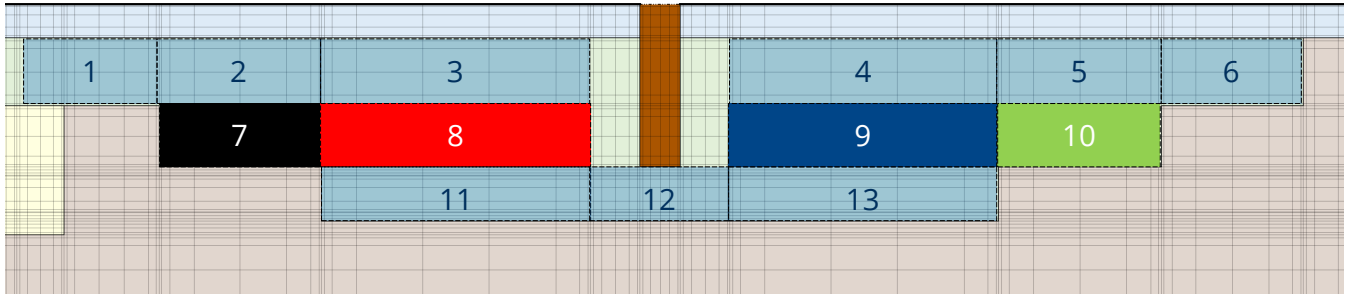
Baum ungestört: Feuchteverläufe



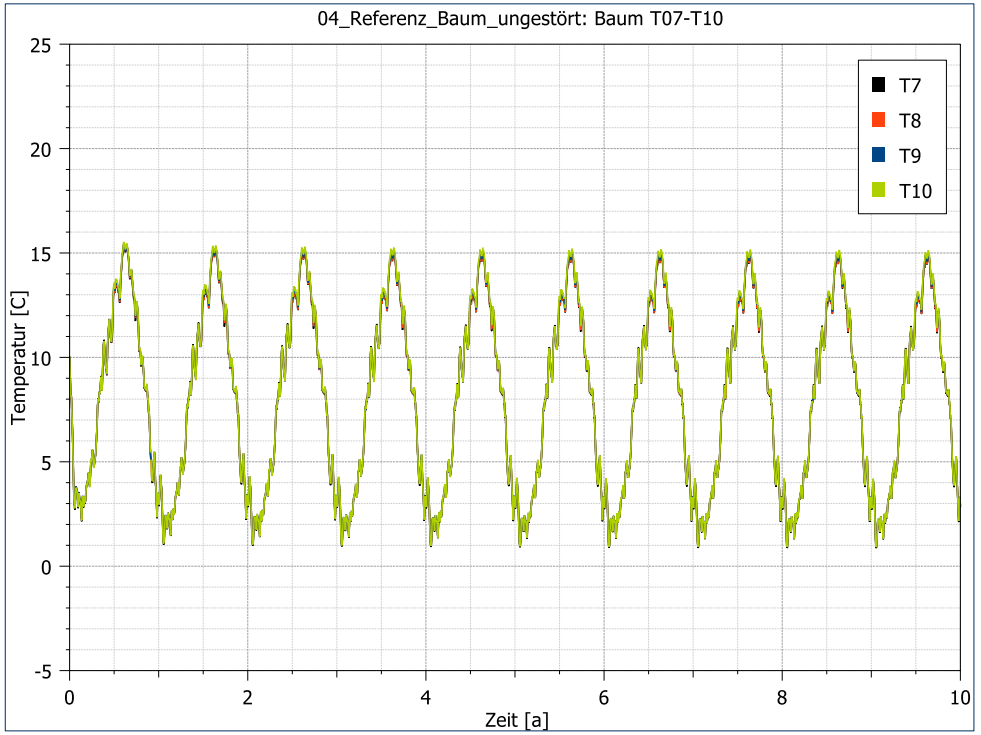
Baum gestört: Feuchteverläufe



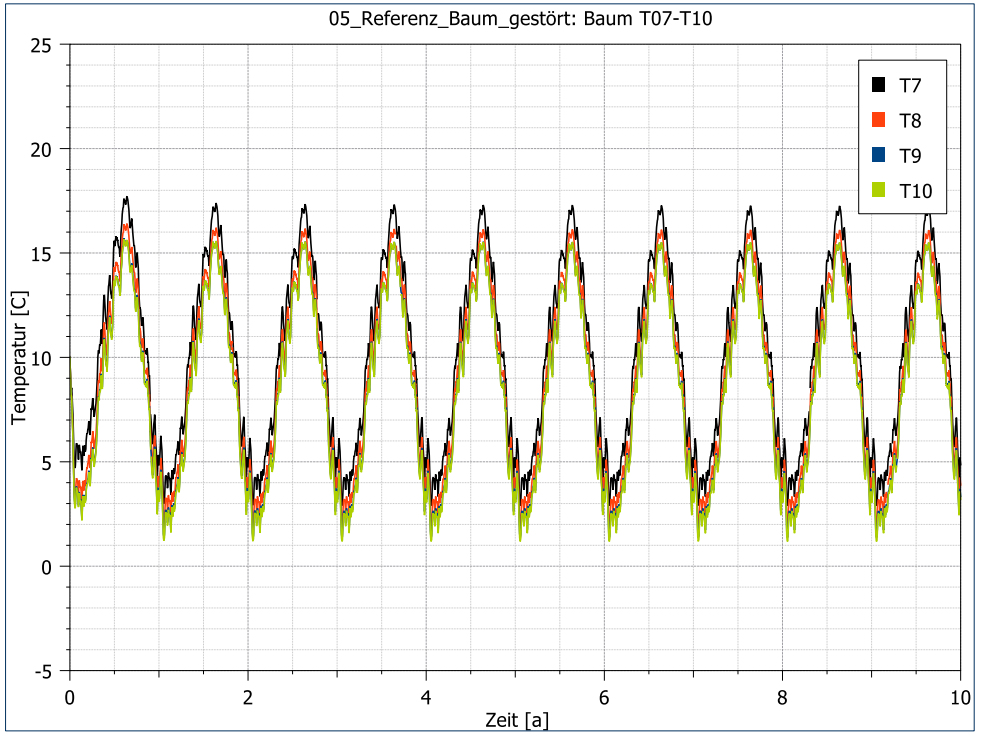
Schritt 3: Ergebnisse Vergleiche Baum ungestört / gestört



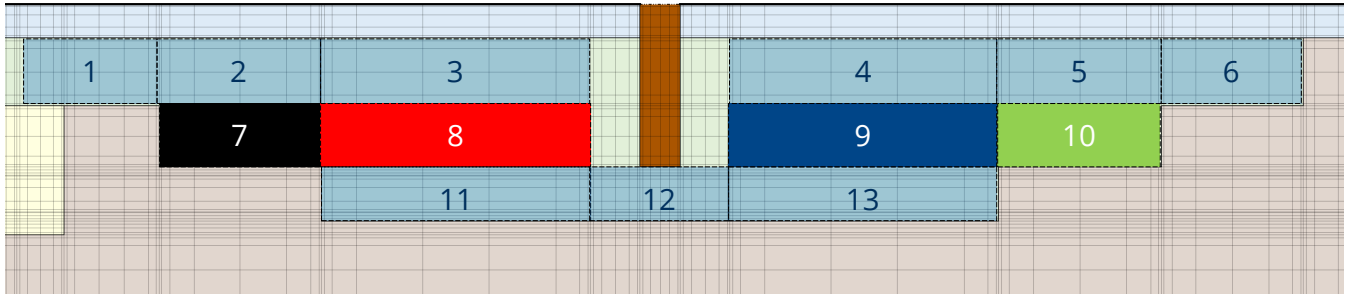
Baum ungestört: Temperaturverläufe



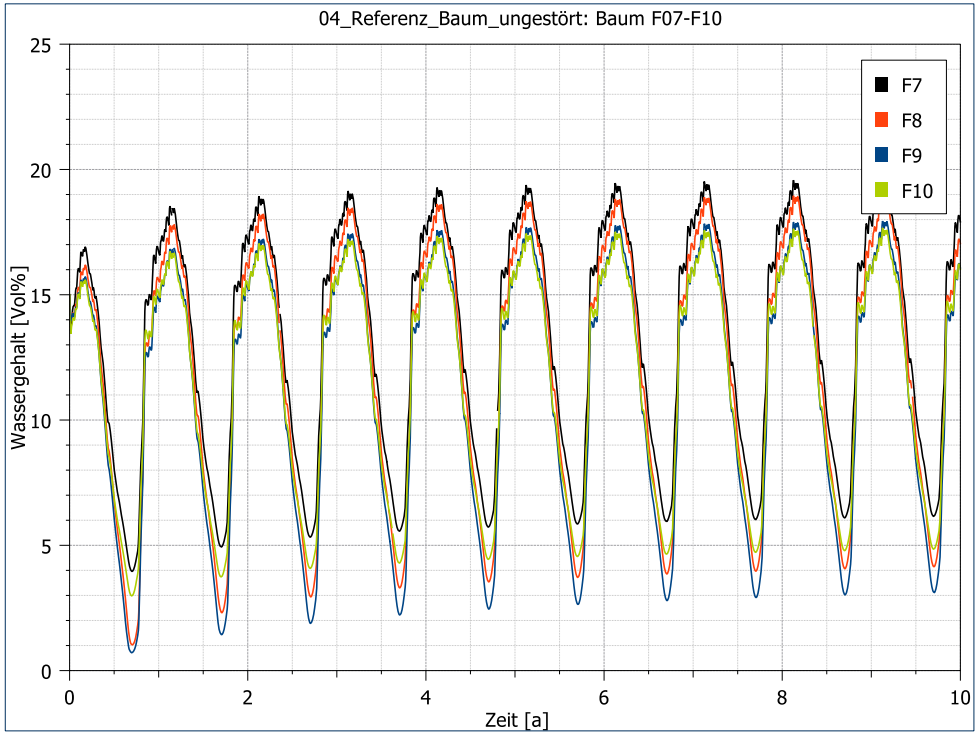
Baum gestört: Temperaturverläufe



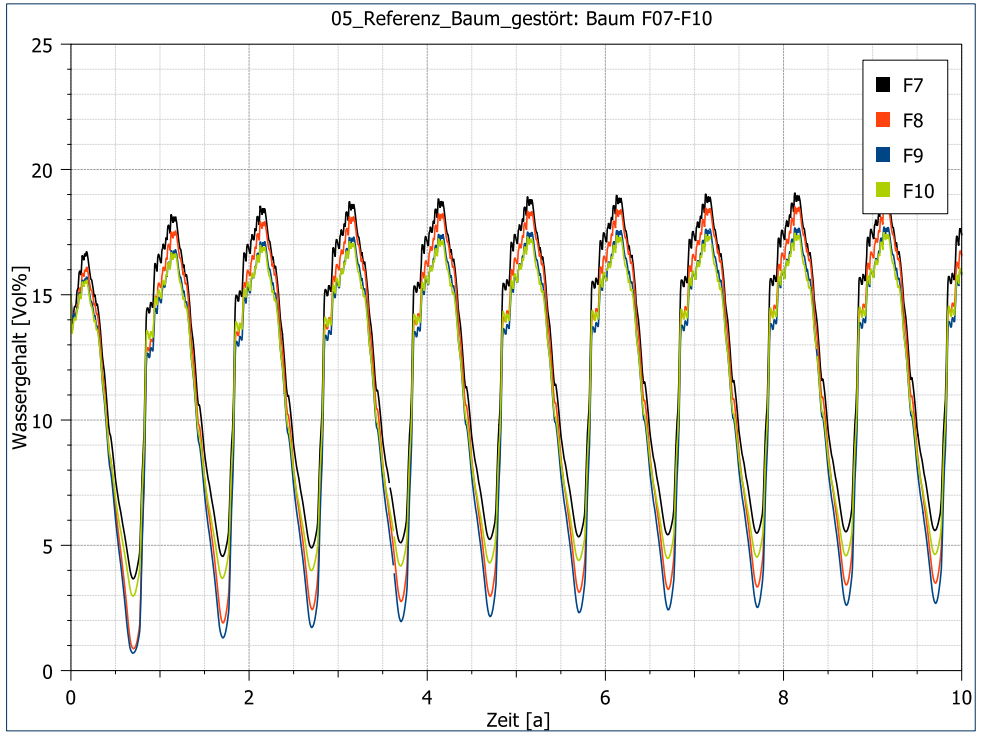
Schritt 3: Ergebnisse Vergleiche Baum ungestört / gestört



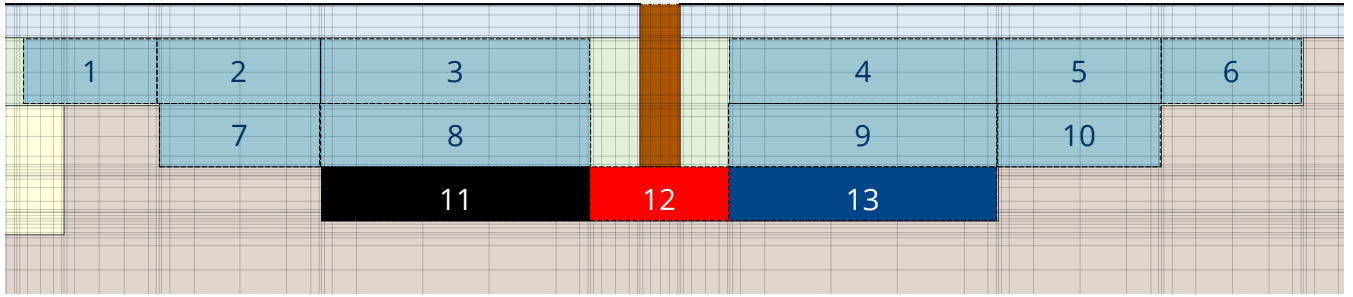
Baum ungestört: Feuchteverläufe



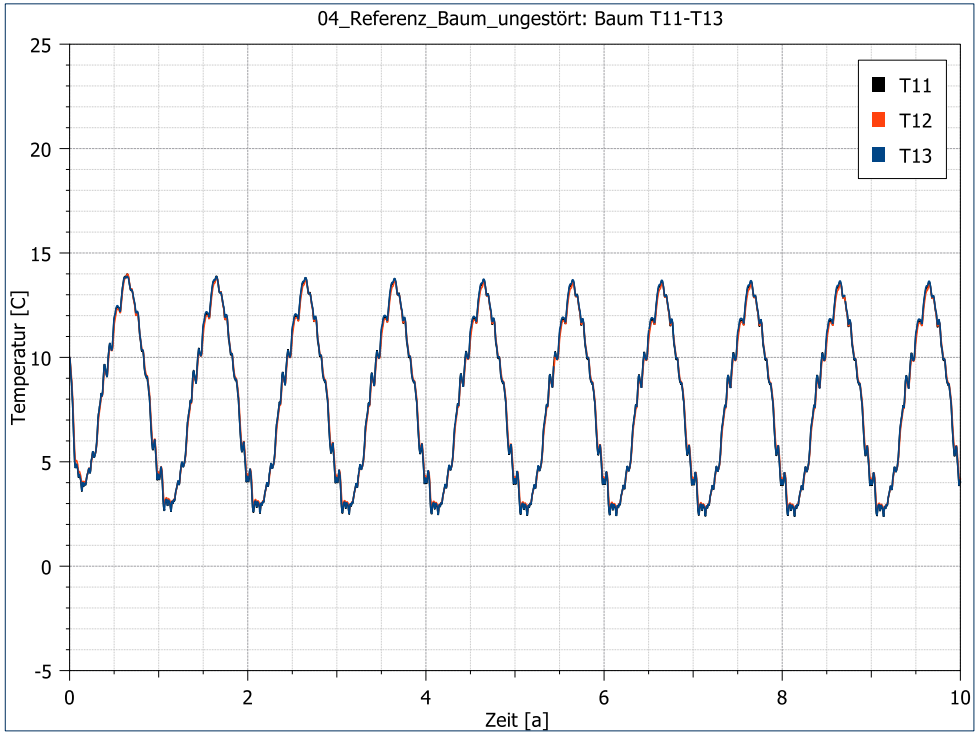
Baum gestört: Feuchteverläufe



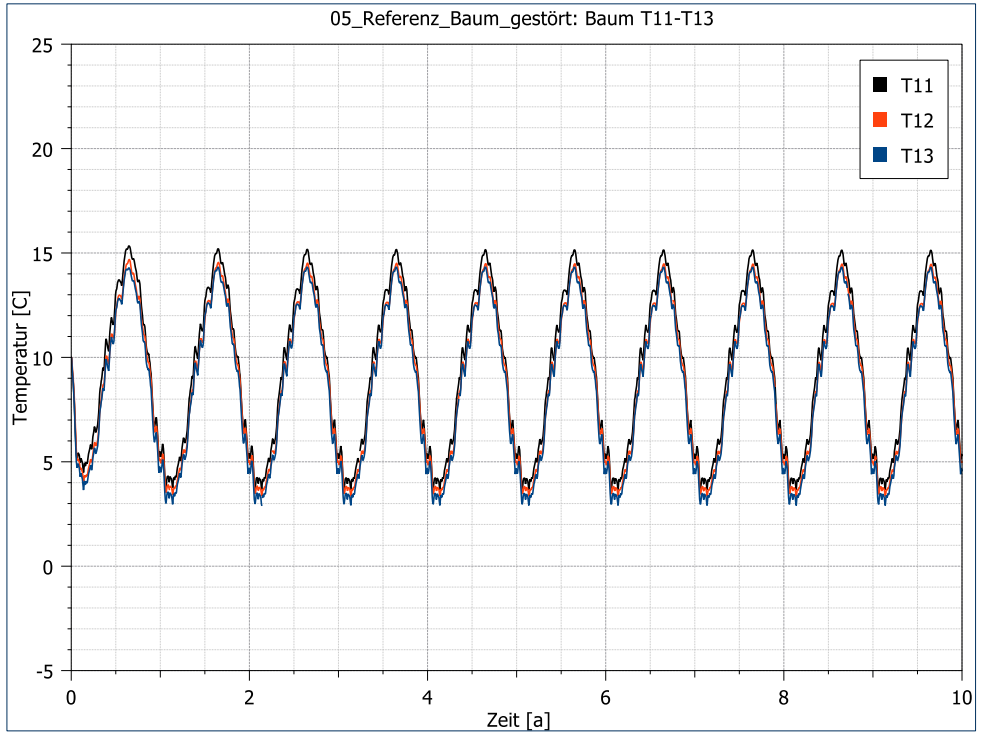
Schritt 3: Ergebnisse Vergleiche Baum ungestört / gestört



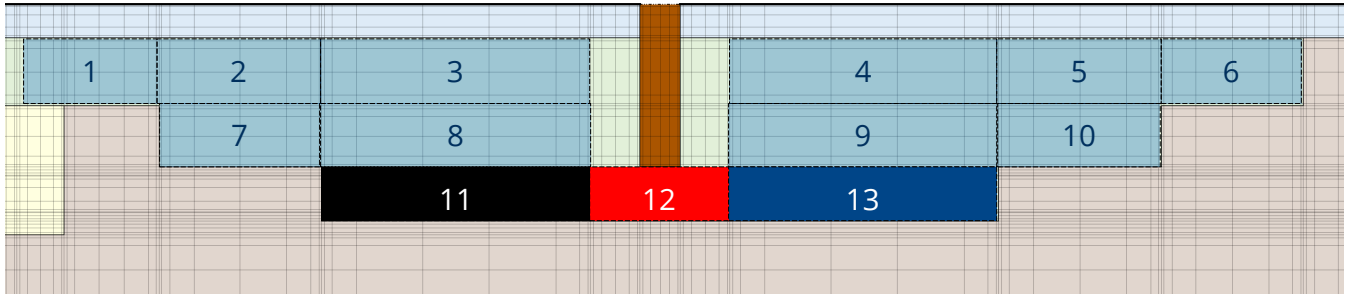
Baum ungestört: Temperaturverläufe



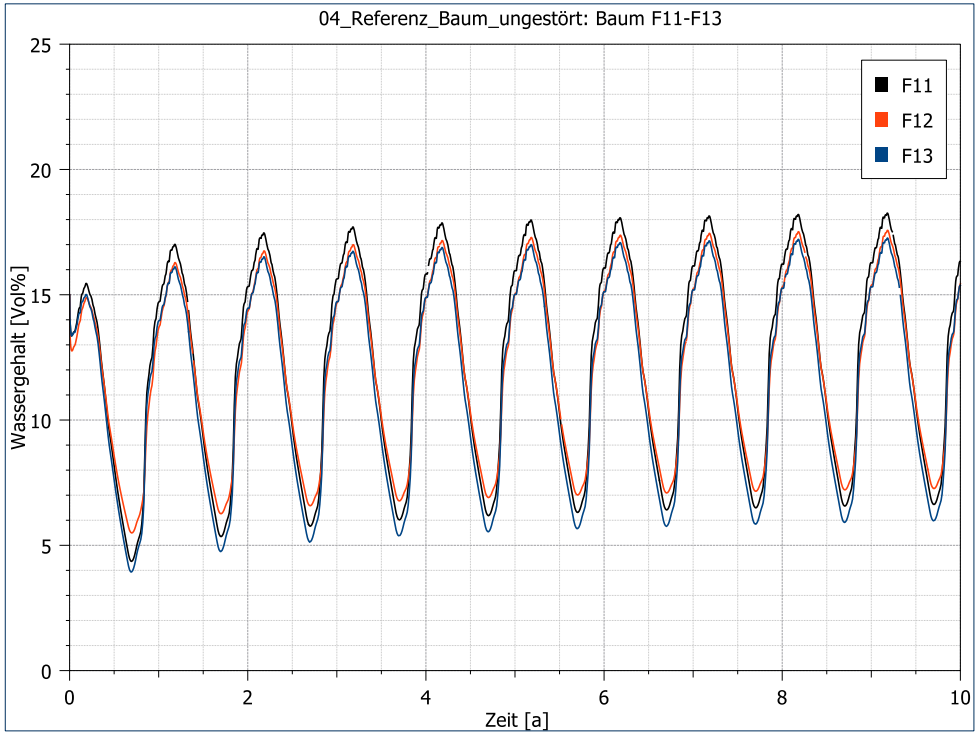
Baum gestört: Temperaturverläufe



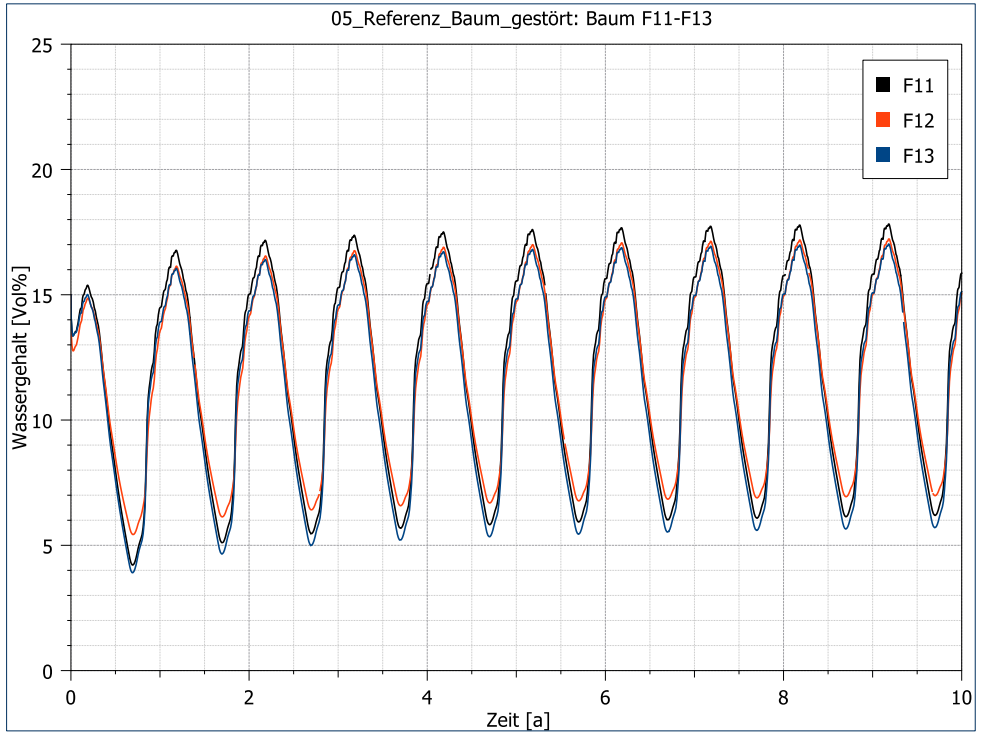
Schritt 3: Ergebnisse Vergleiche Baum ungestört / gestört



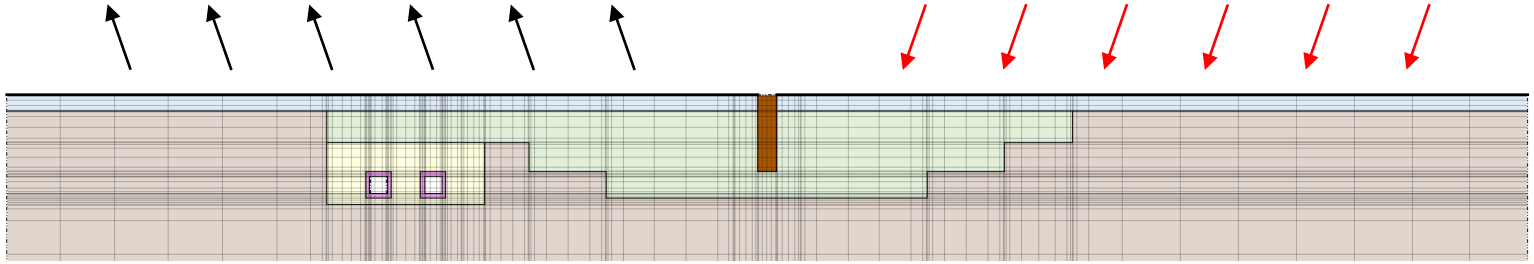
Baum ungestört: Feuchteverläufe



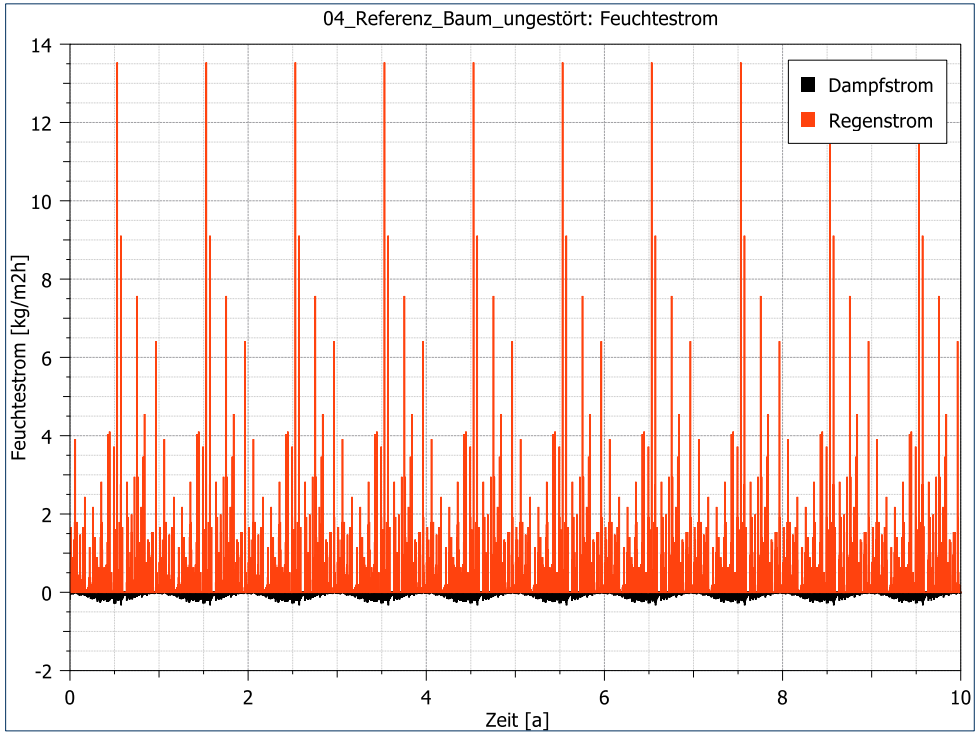
Baum gestört: Feuchteverläufe



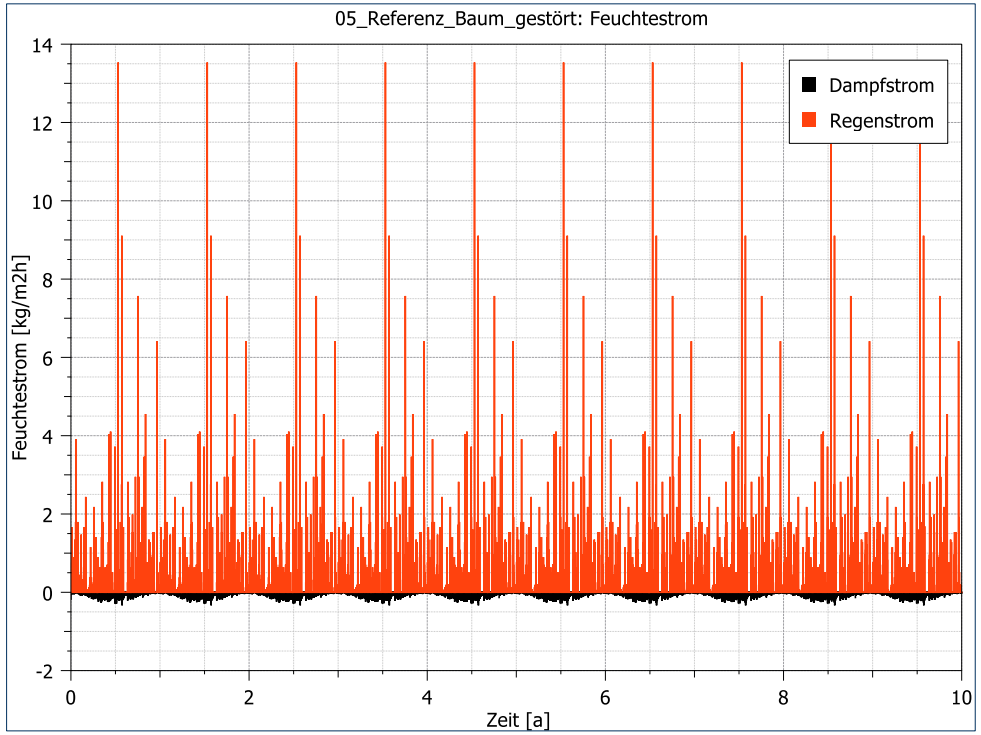
Schritt 3: Ergebnisse Vergleiche Baum ungestört / gestört



Baum ungestört: Feuchteströme



Baum gestört: Feuchteströme

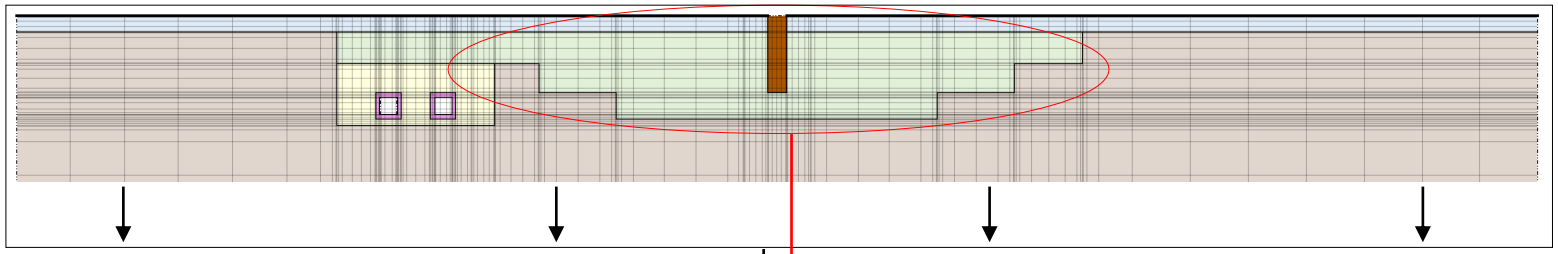


Schritt 3: Ergebnisse Vergleiche Baum ungestört / gestört

Vergleichskriterium:

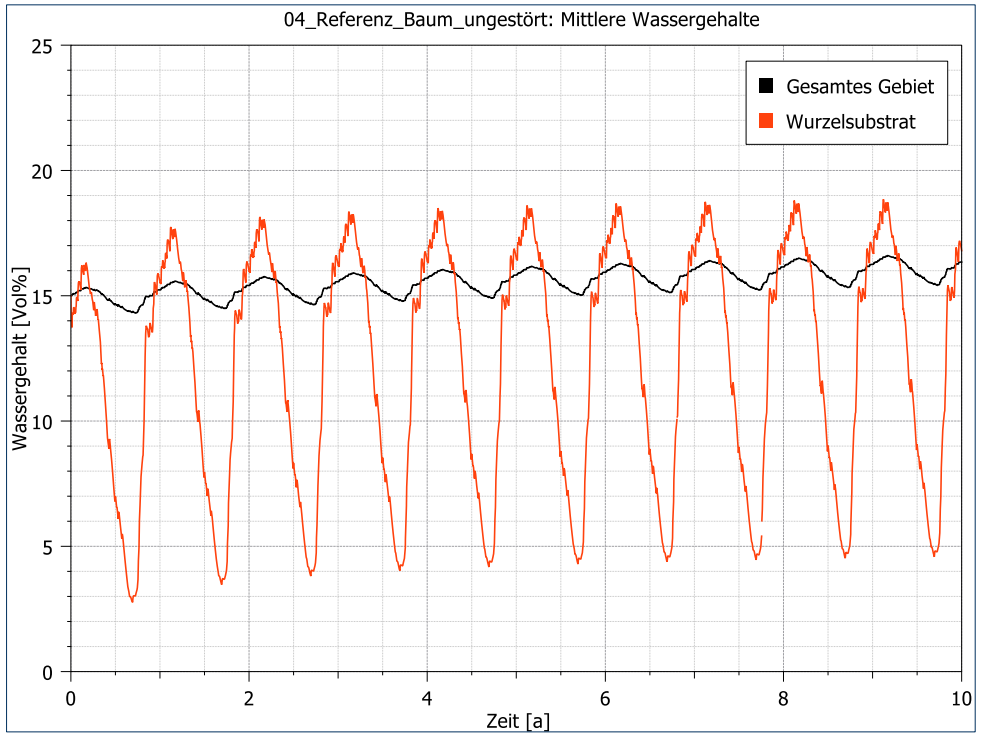
Langzeittrend des mittleren Feuchte-gehaltes
im Bereich des Wurzelsubstrats!

Ausgabe im Bereich des mit der Feuchtesenke beaufschlagten Wurzelsubstrats

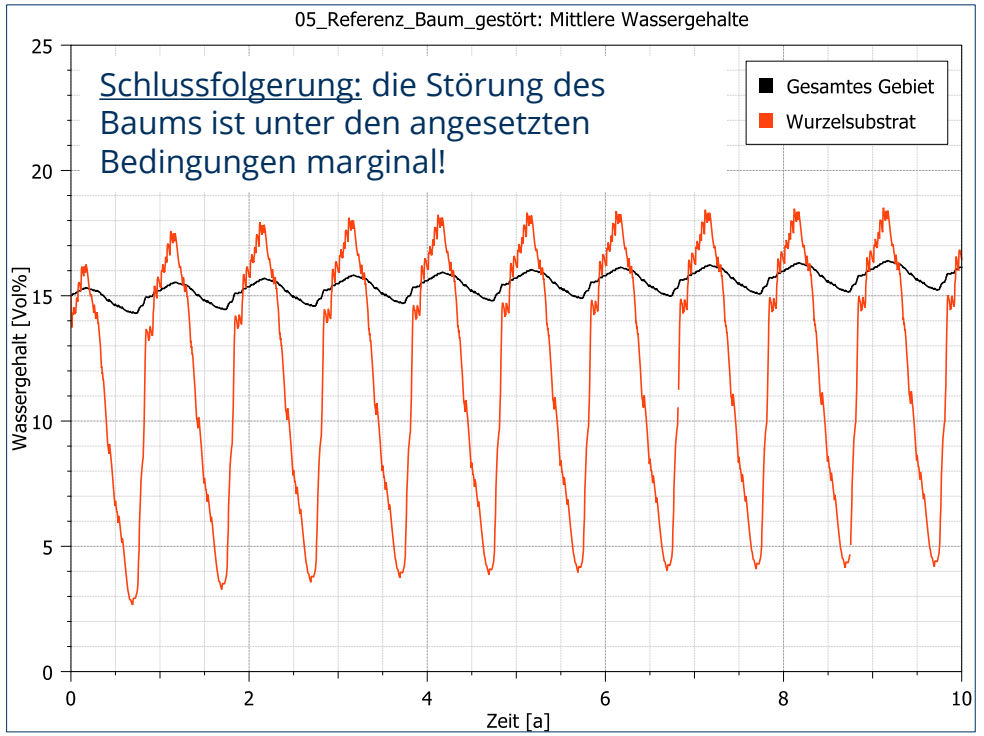


Ausgabe für das gesamte Berechnungsgebiet bis zu einer Tiefe von 16,70 m von OKG aus gemessen.

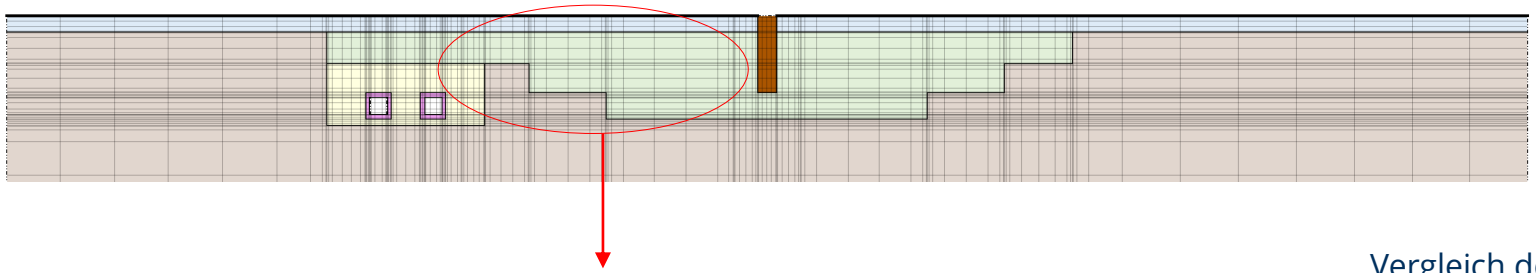
Baum ungestört: mittlere Wassergehalte

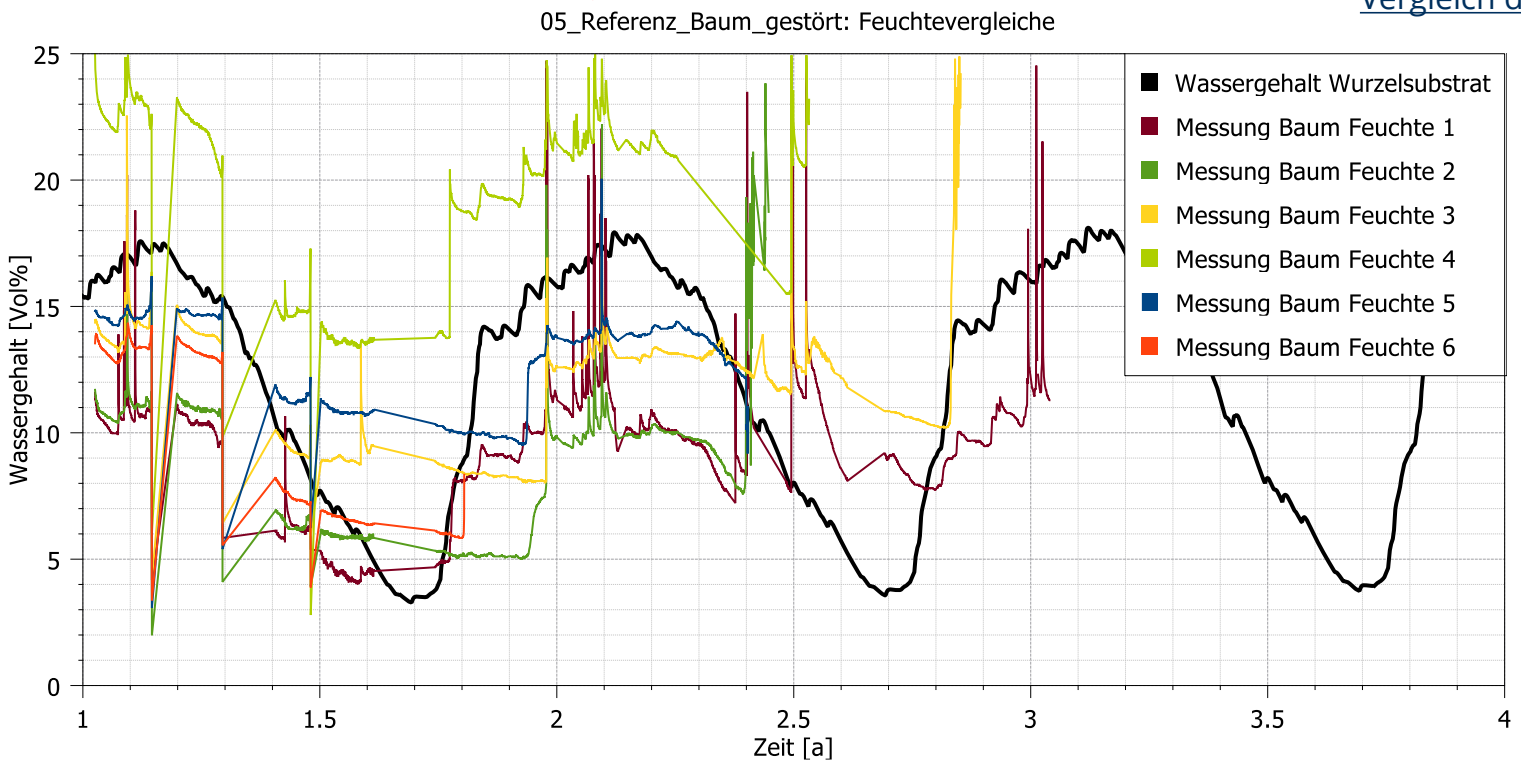


Baum gestört: mittlere Wassergehalte



Schritt 3: Ergebnisse Vergleiche Baum ungestört / gestört





Vergleich der Wassergehalte mit Messung:

- Der saisonale Zyklus der Wassergehalte im Wurzelsubstrat wird auch durch die Messungen bestätigt.
- Messung und Simulation laufen zyklisch synchron und sind in den Absolutwerten vergleichbar.

Schritt 4
Variantenanalysen

Varianten

Der Projektbegleitkreis beschließt:

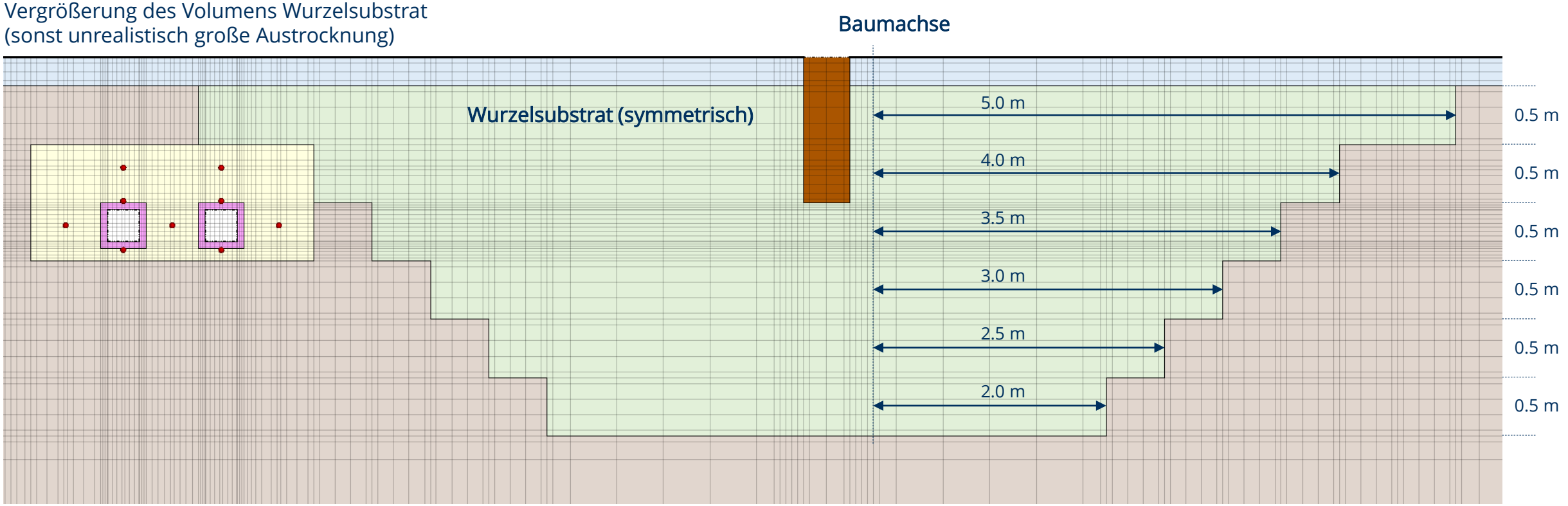
- Den Fokus auf die geometrischen und konkret beeinflussbaren Parameter zu variieren.
- Als erste Frage soll versucht werden zu beantworten „Was ist der…
  - Einfluss durch Abstand FW-Leitung/ Baum
  - Einfluss von Dämmstärke und Nennweite der Fernwärmeleitung
- Als weitere Frage ist von Interesse, wie zusätzliche durch die Baumaßnahme der FW-Leitung eingebrachte Baumsubstrate (bspw. als Verfüllmaterial über der Leitungszone aus Sand, als Deckschicht in dem durch die Baumaßnahme beeinflussten Bereich) auf die Wasserspeicherung/ Verfügbarkeit auswirken, gegenüber.
- Zu Umwelteinflüssen wie Starkregen, längere Trockenperioden, allgemein höhere Umgebungstemperaturen sind Tendenzen interessant, können aber nicht durch konkrete Baumaßnahmen beeinflusst werden (außer bspw. durch die verbesserte Wasserbereitstellung mit Substrat gegenüber anstehendem Boden). Ein direkter Variantenvergleich mit variablen Umweltparametern ist deshalb nicht im ersten Schritt nötig.

Weitere Ideen/ Hinweise:

- Wichtig zum Variantenvergleich jeweils nur einen Parameter zu variieren, um Ursache klar benennen zu können
- Für das Simulationsmodell kann die Außentemperaturgeführte Fahrweise des Versorgers integriert werden. Diese wird dem AGFW zur Verfügung gestellt und weitergeleitet.
- Die Wärmeleitfähigkeit des PUR Schaums (Dämmung des Fernwärmerohres bei KMR) ist temperaturabhängig, was ebenfalls in die Simulation integriert werden könnte.

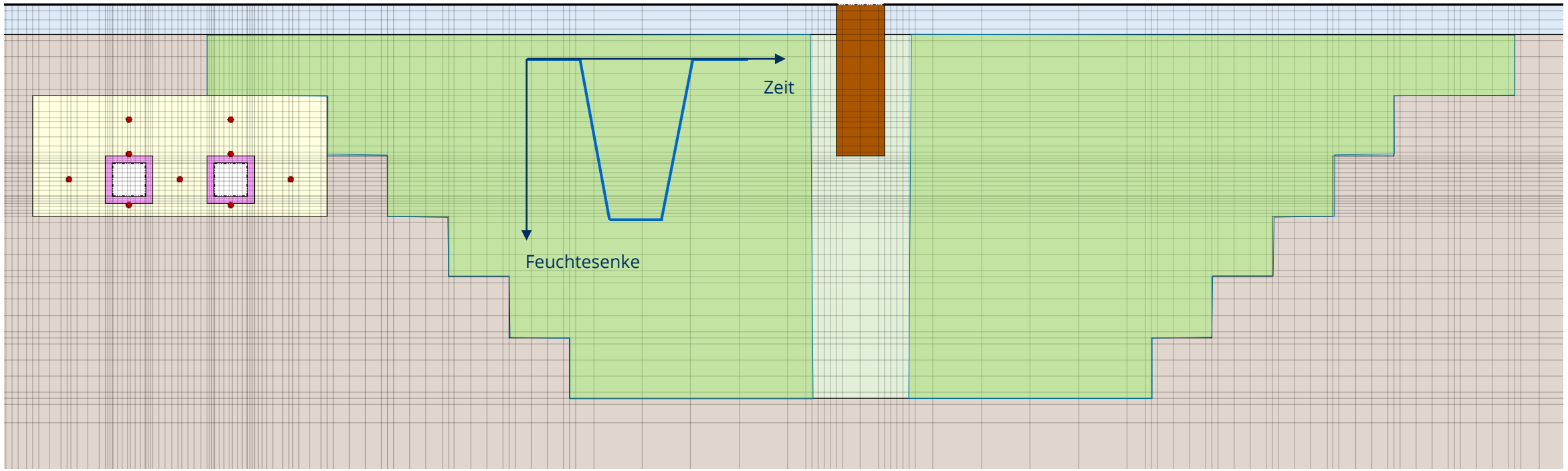
Referenz Baum ungestört

Vergrößerung des Volumens Wurzelsubstrat
(sonst unrealistisch große Austrocknung)



Referenz Baum ungestört

Neu-Definition der Feuchtesenke (quadratische Grundfläche)



Berechnung des Flächenbedarfs eines Baumes

Wasserbedarf Baum	150	l/d
Wachstumsphase	180	d/a
Jahresbedarf Baum	27000	l/a
Wasserüberschuss	300	l/m2a
Einzugsfläche	90	m2
Radius	5.4	m
Kantenlänge	9.5	m

Berechnung der jährlichen Verdunstungsrate im Volumen

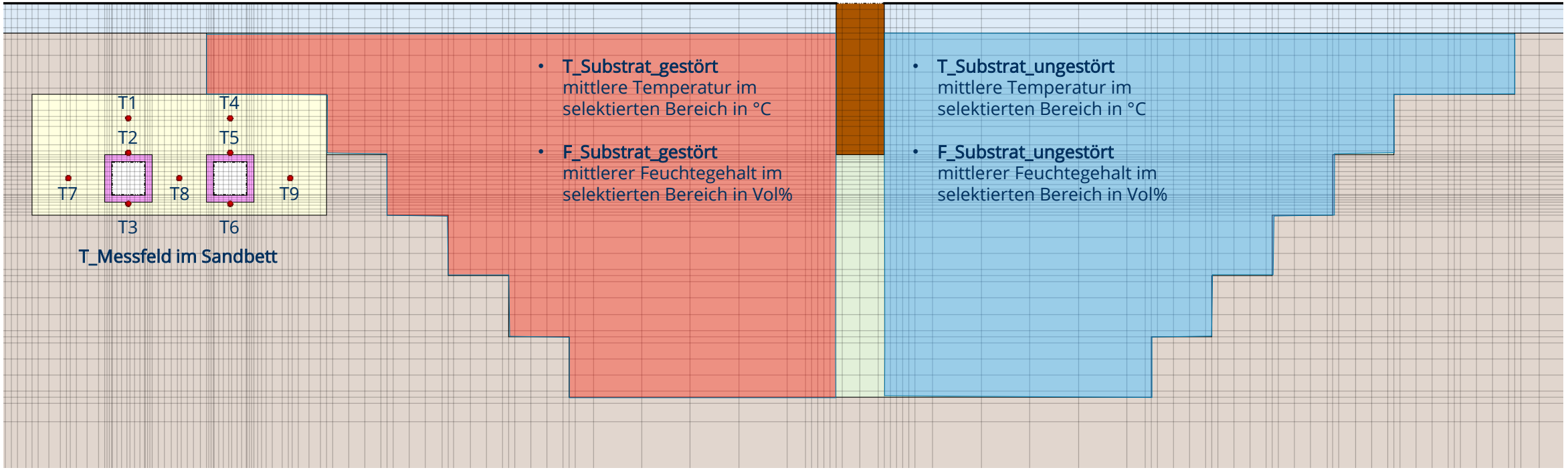
	H	S	V	
Volumen1	0.50	10.00	50.00	m3
Volumen2	0.50	8.00	32.00	m3
Volumen3	0.50	7.00	24.50	m3
Volumen4	0.50	6.00	18.00	m3
Volumen5	0.50	5.00	12.50	m3
Volumen6	0.50	4.00	8.00	m3
Volumen			145.00	m3
Verdunstungsrate			186.2	l/m3a

Festlegung einer zeitabhängigen Feuchtesenke

Datum	Tag	Uhrzeit	Feuchtesenke	Feuchtesenke
			in g/m3h	in l/m3d
01. Jan	0	00:00:00	0.00	0.00
01. Apr	90	00:00:00	0.00	0.00
01. Mai	120	00:00:00	-43.10	1.03
01. Sep	243	00:00:00	-43.10	1.03
03. Okt	275	00:00:00	0.00	0.00
31. Dez	364	23:00:00	0.00	0.00

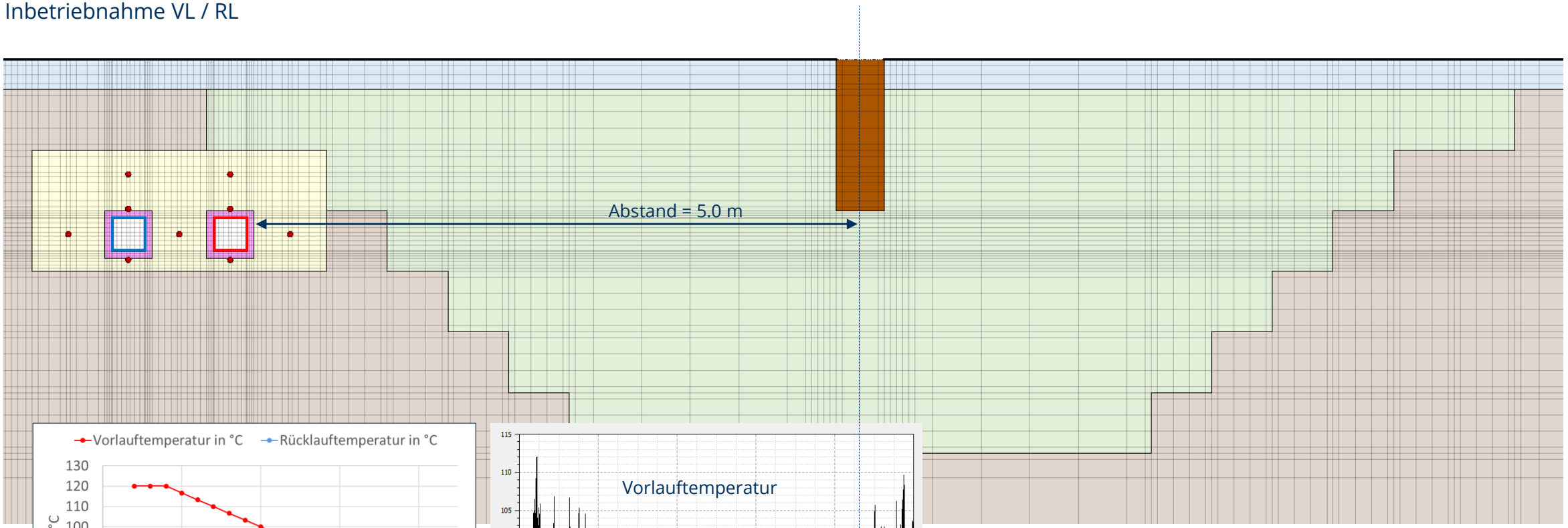
Referenz Baum ungestört

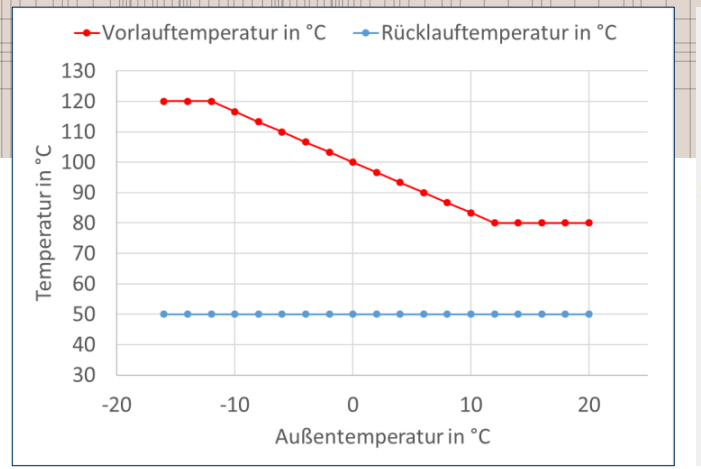
Definition der Ausgaben

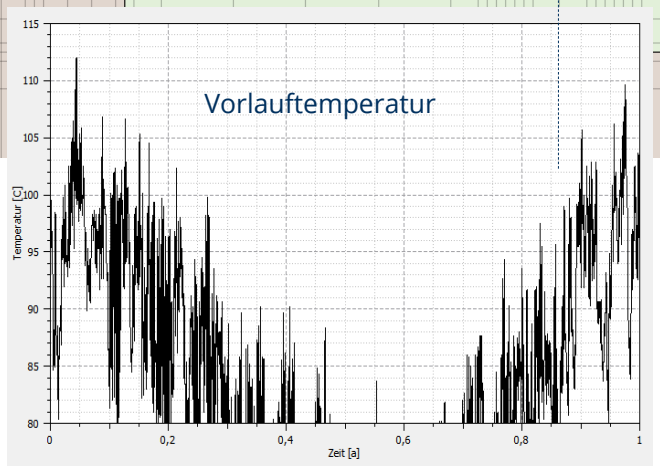


Variante 5m Sandbett

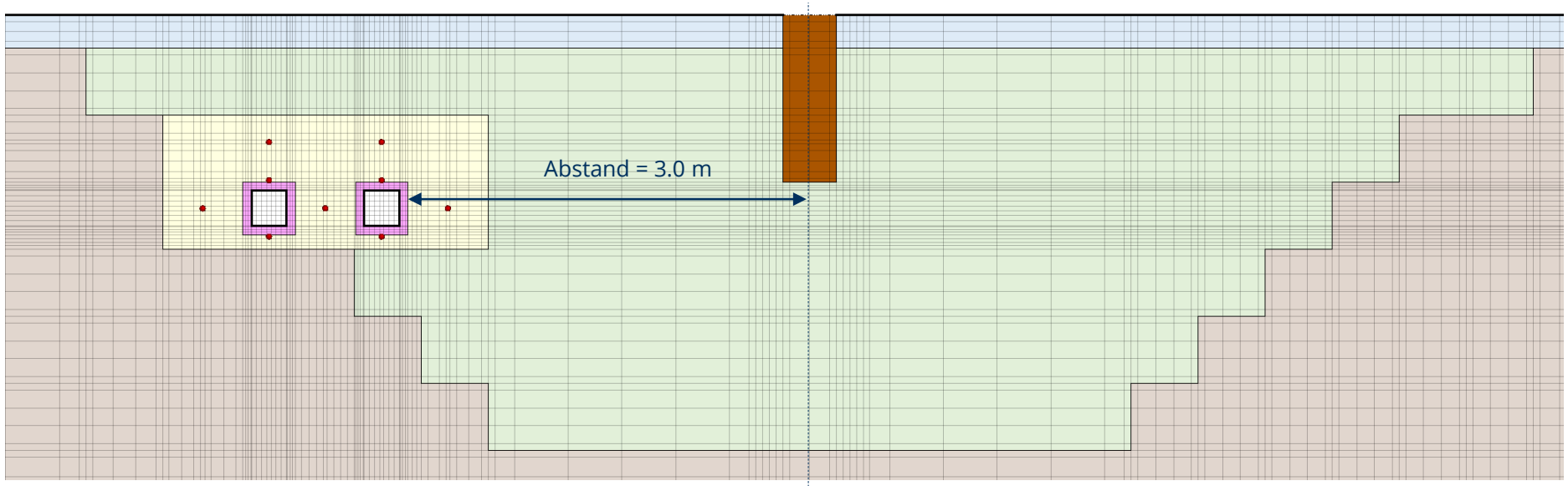
Inbetriebnahme VL / RL





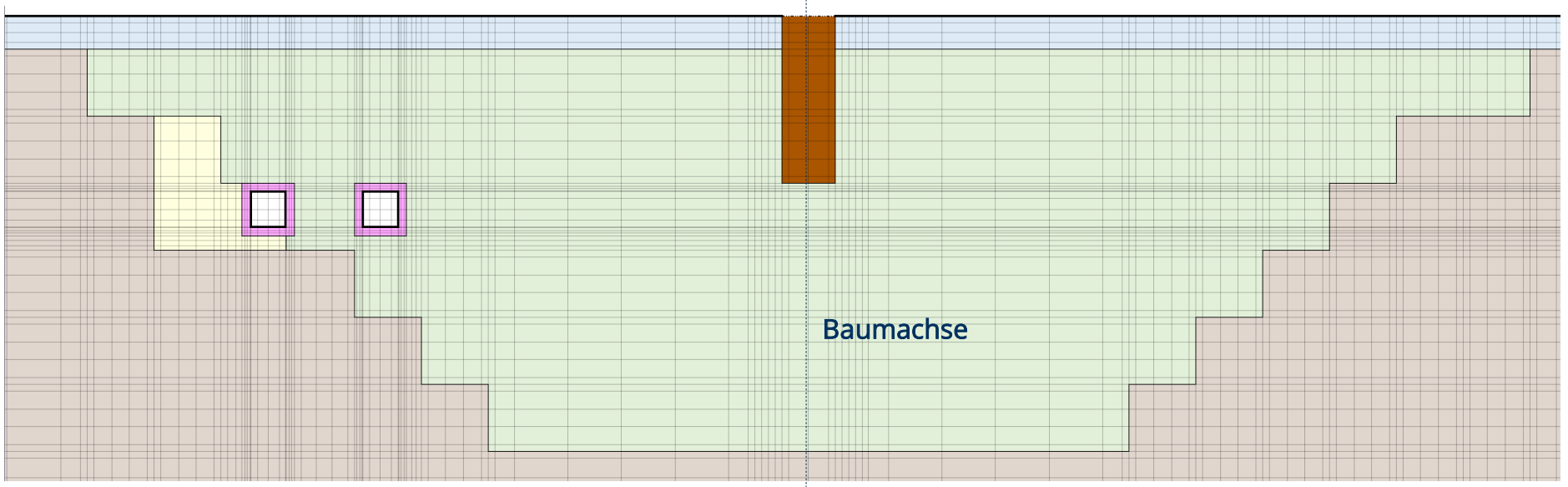


Variante 3m Sandbett / kein Sandbett



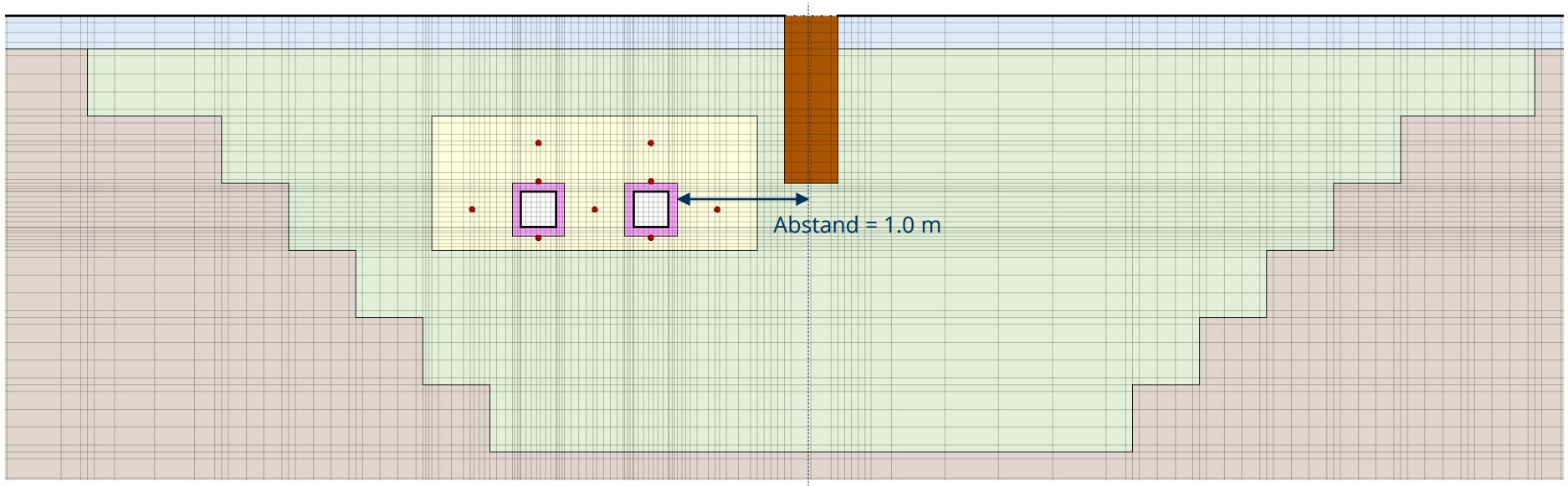
Sandbett

- Weniger Volumen Wurzelsubtrat = geringeres Wasserangebot Baum
- Keine Zuordnung der Feuchtesenke im Sandbett
- Keine Ausgabe T_Substrat / F_Substrat im Sandbett



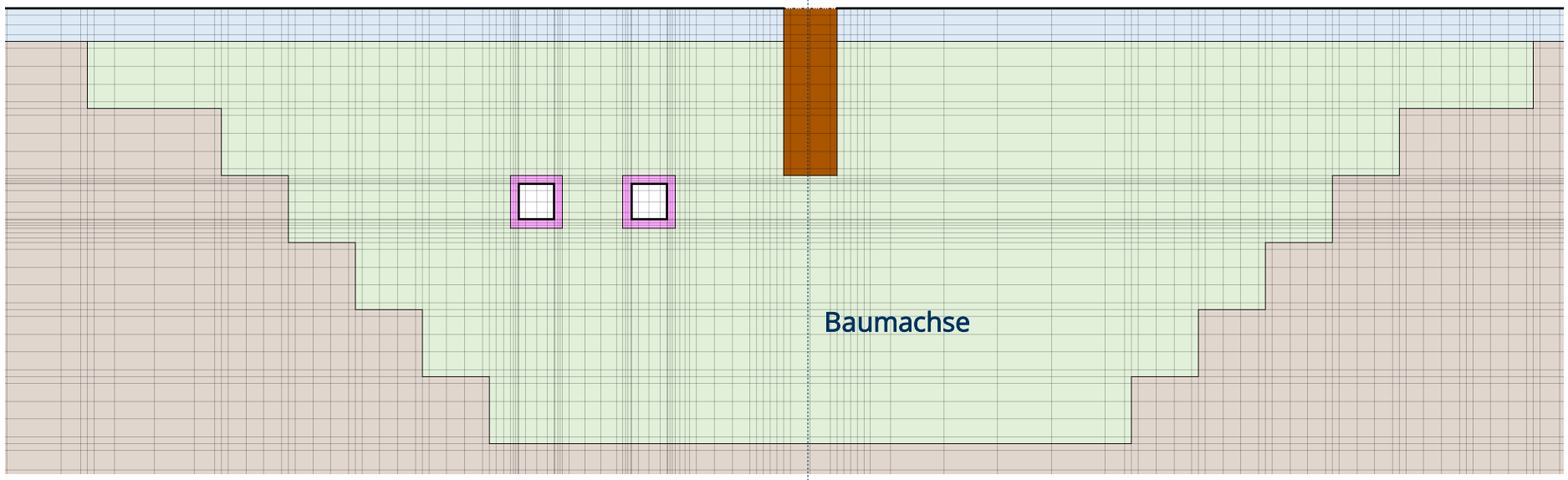
kein Sandbett

Variante 1m Sandbett / kein Sandbett



Sandbett

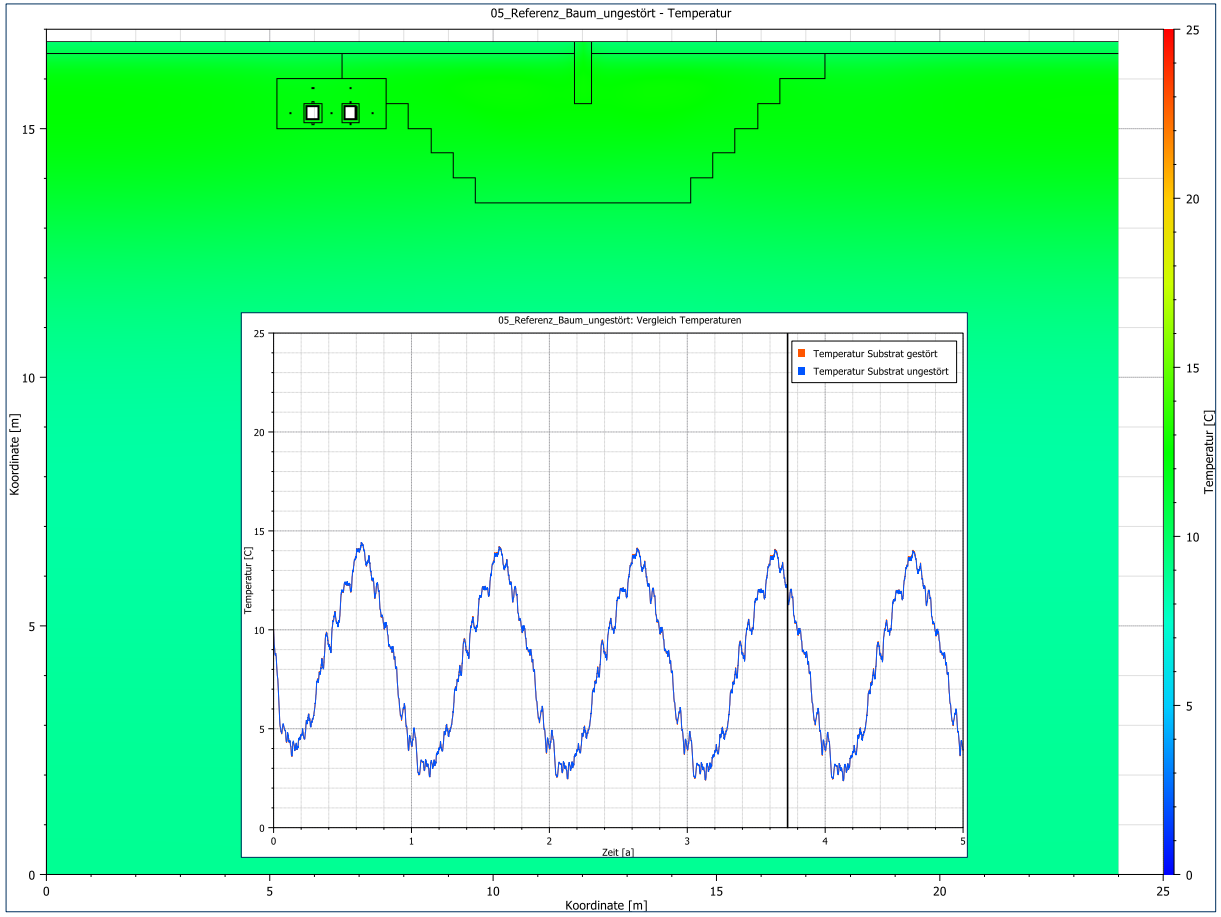
- Weniger Volumen Wurzelsubtrat = geringeres Wasserangebot Baum
- Keine Zuordnung der Feuchtesenke im Sandbett
- Keine Ausgabe T_Substrat / F_Substrat im Sandbett

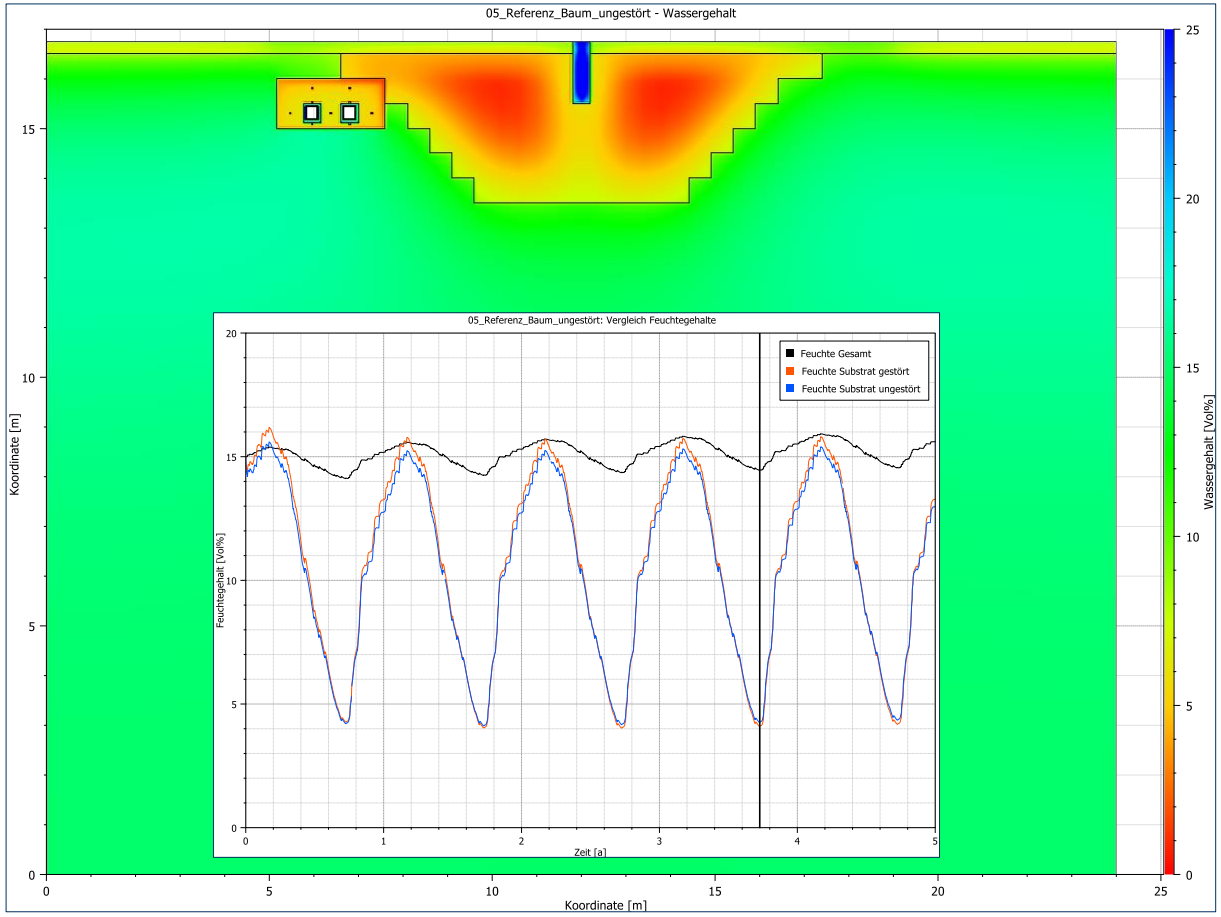


kein Sandbett

Ergebnisse Referenz Baum ungestört

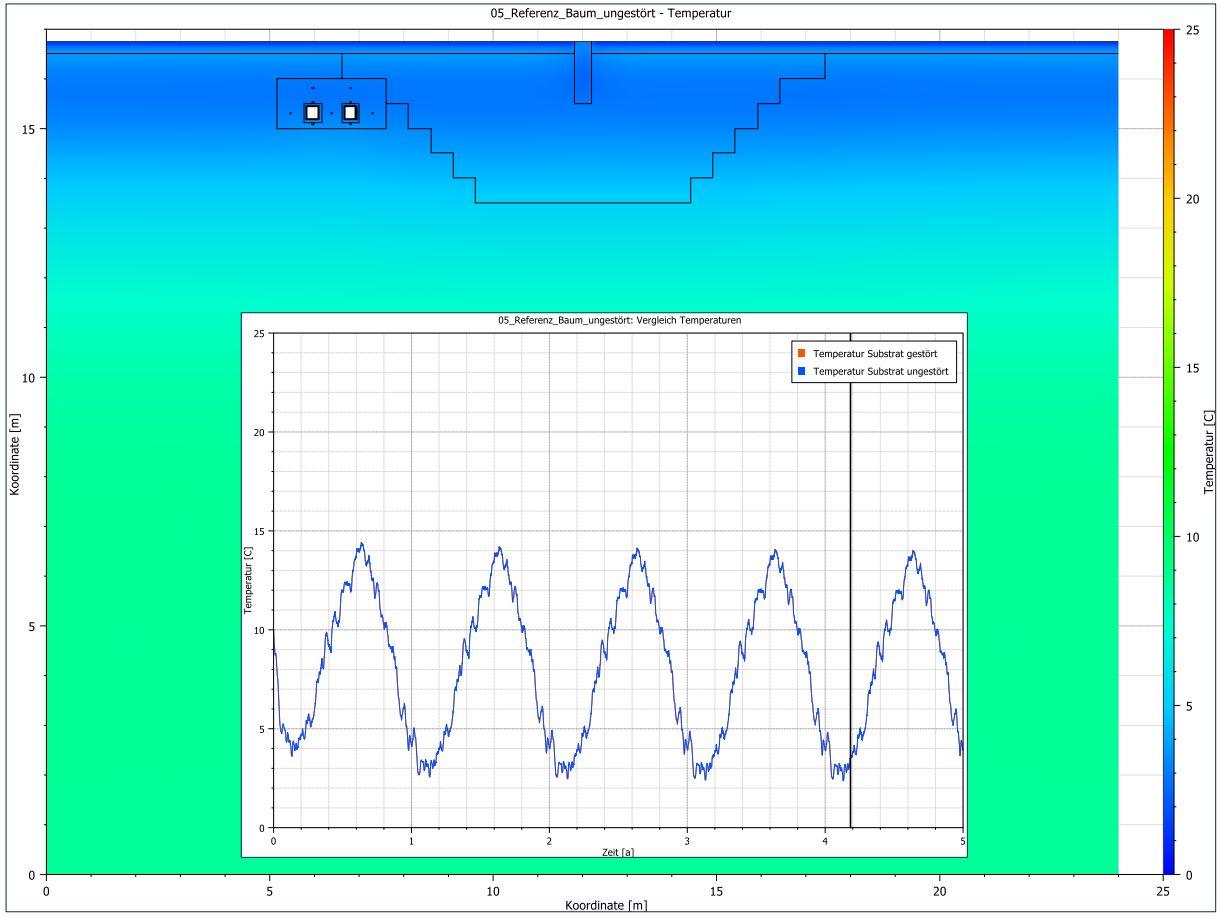
Temperatur- und Feuchtefelder am 03.September

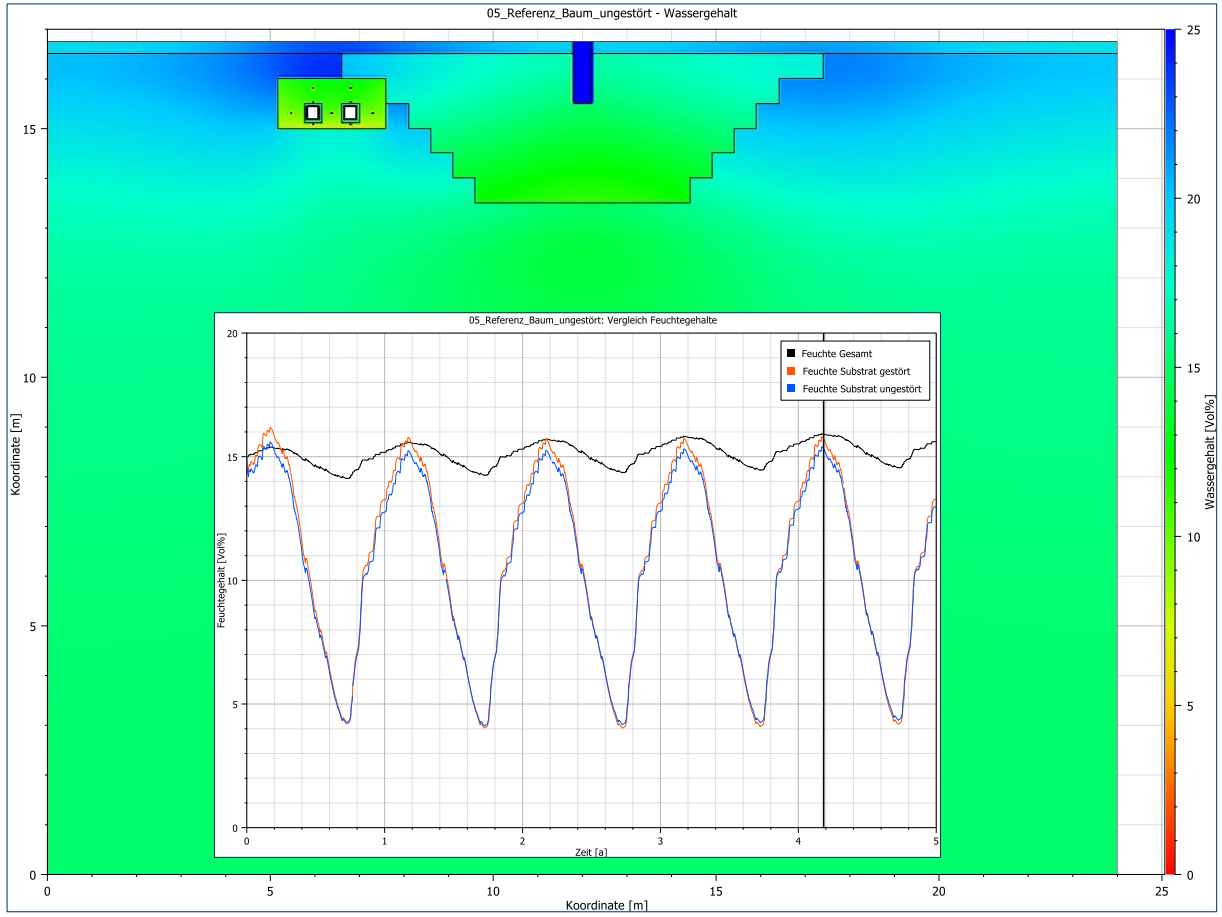




Ergebnisse Referenz Baum ungestört

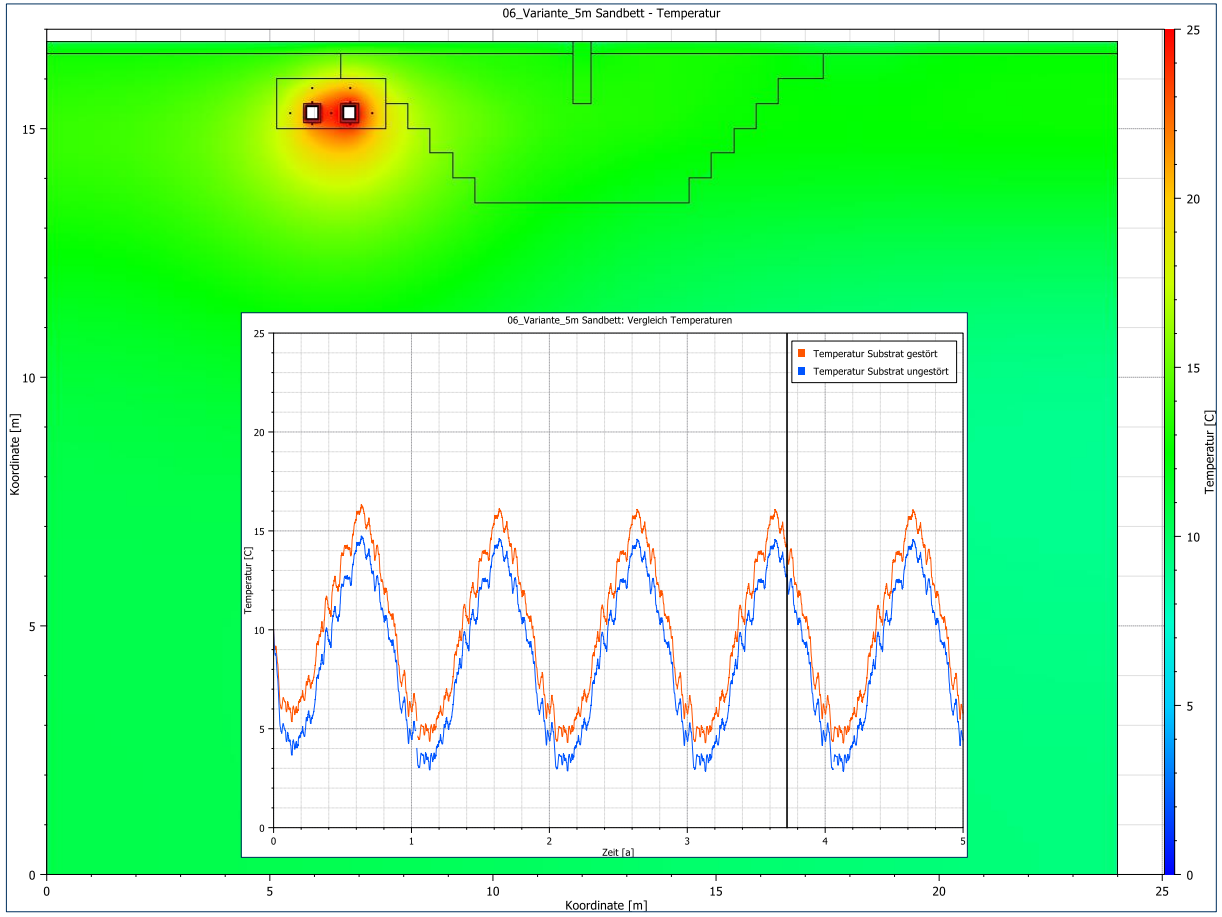
Temperatur- und Feuchtefelder am 07.März

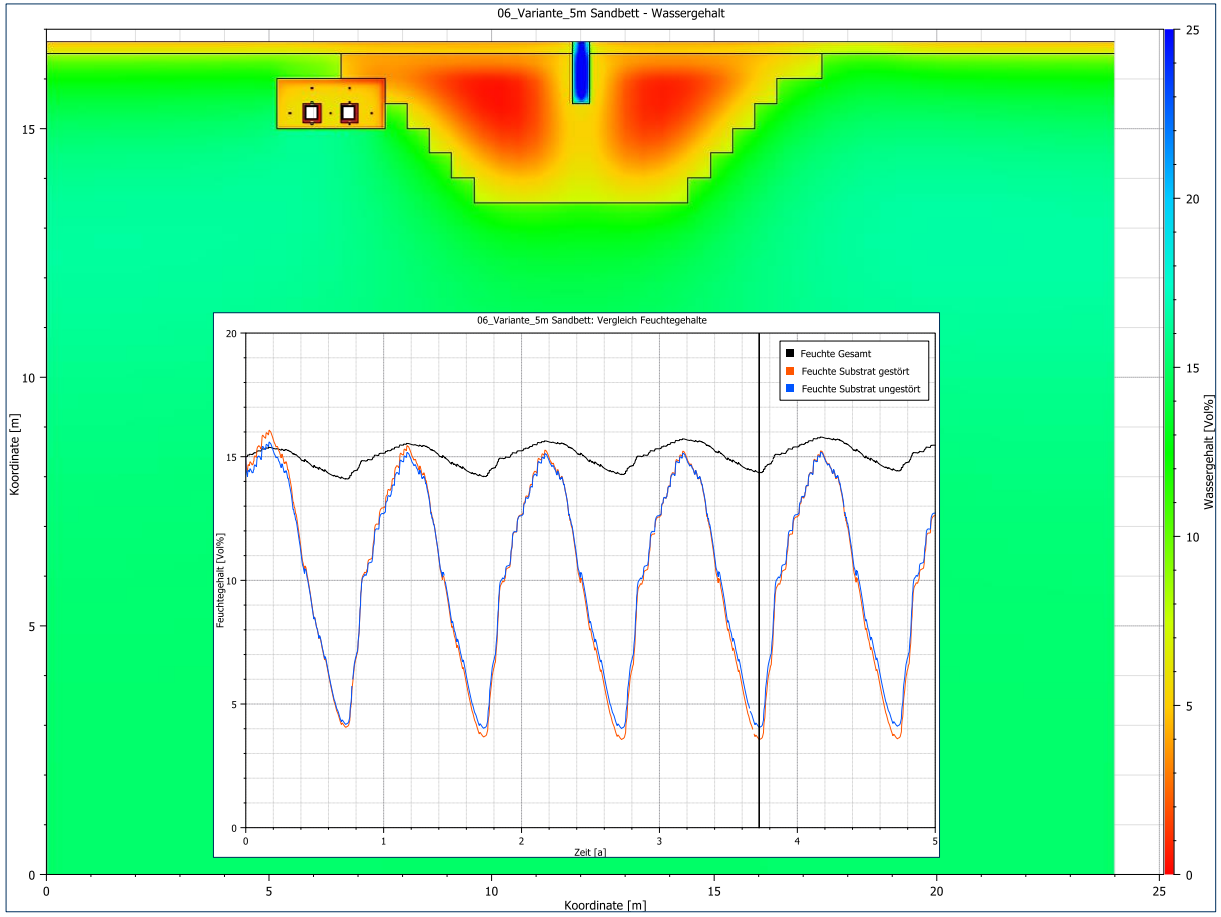




Ergebnisse Variante 5m Sandbett

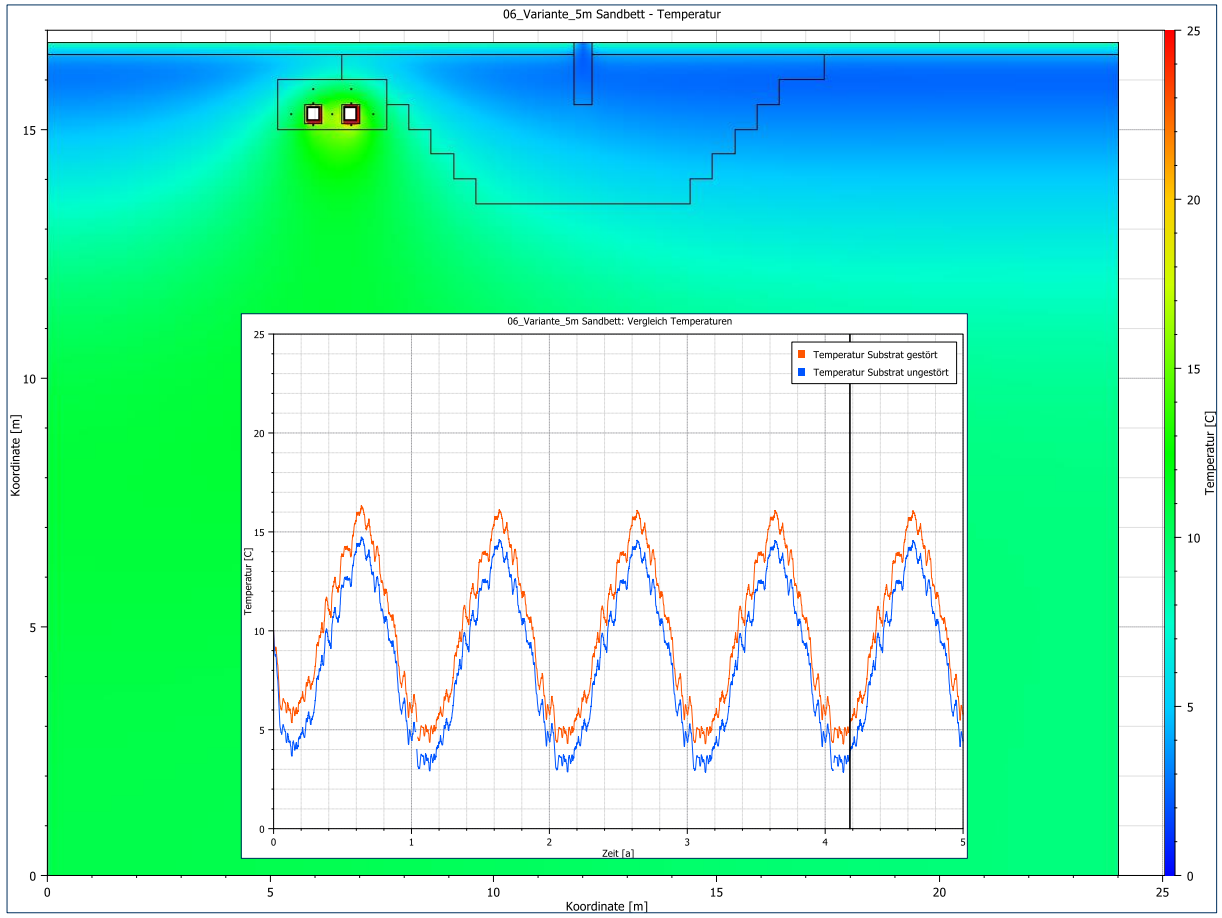
Temperatur- und Feuchtefelder am 03.September

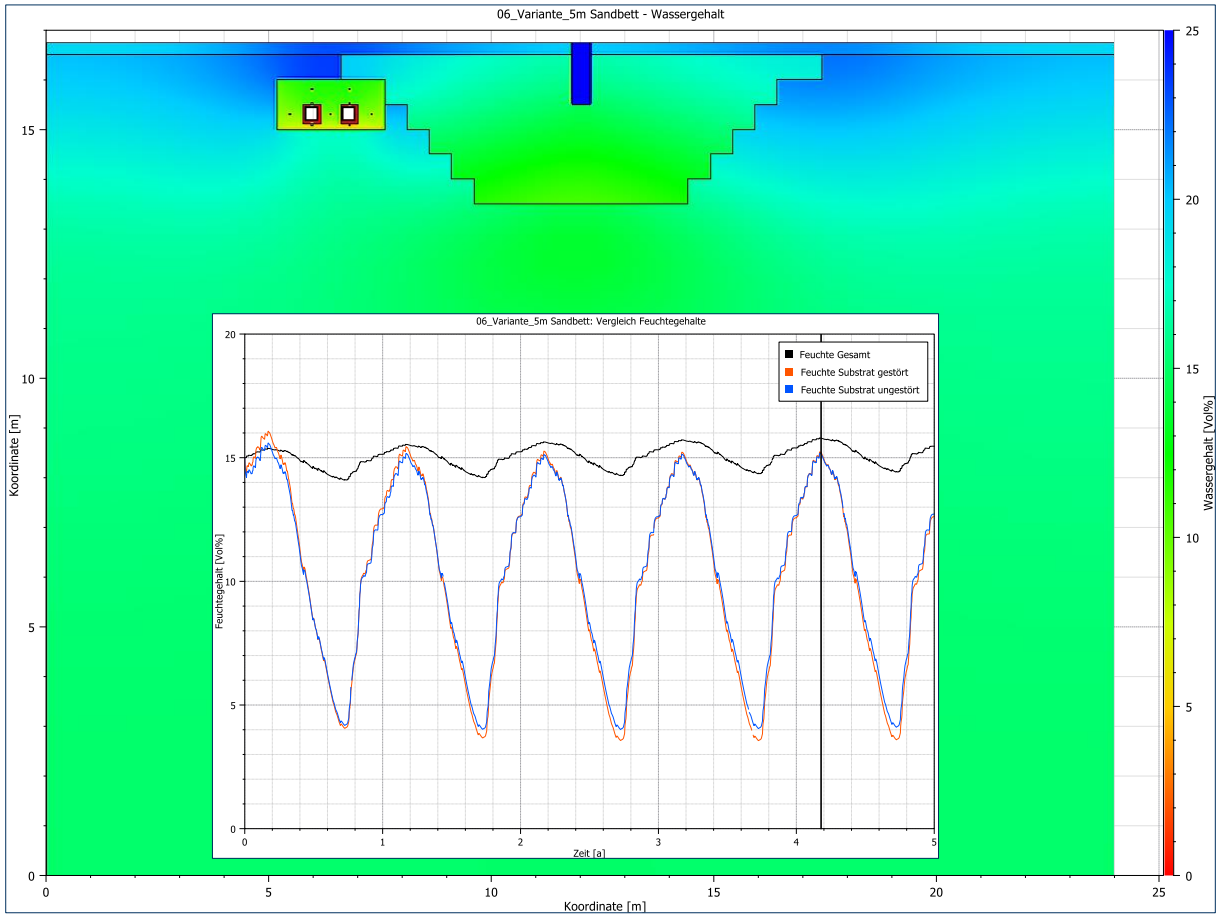




Ergebnisse Variante 5m Sandbett

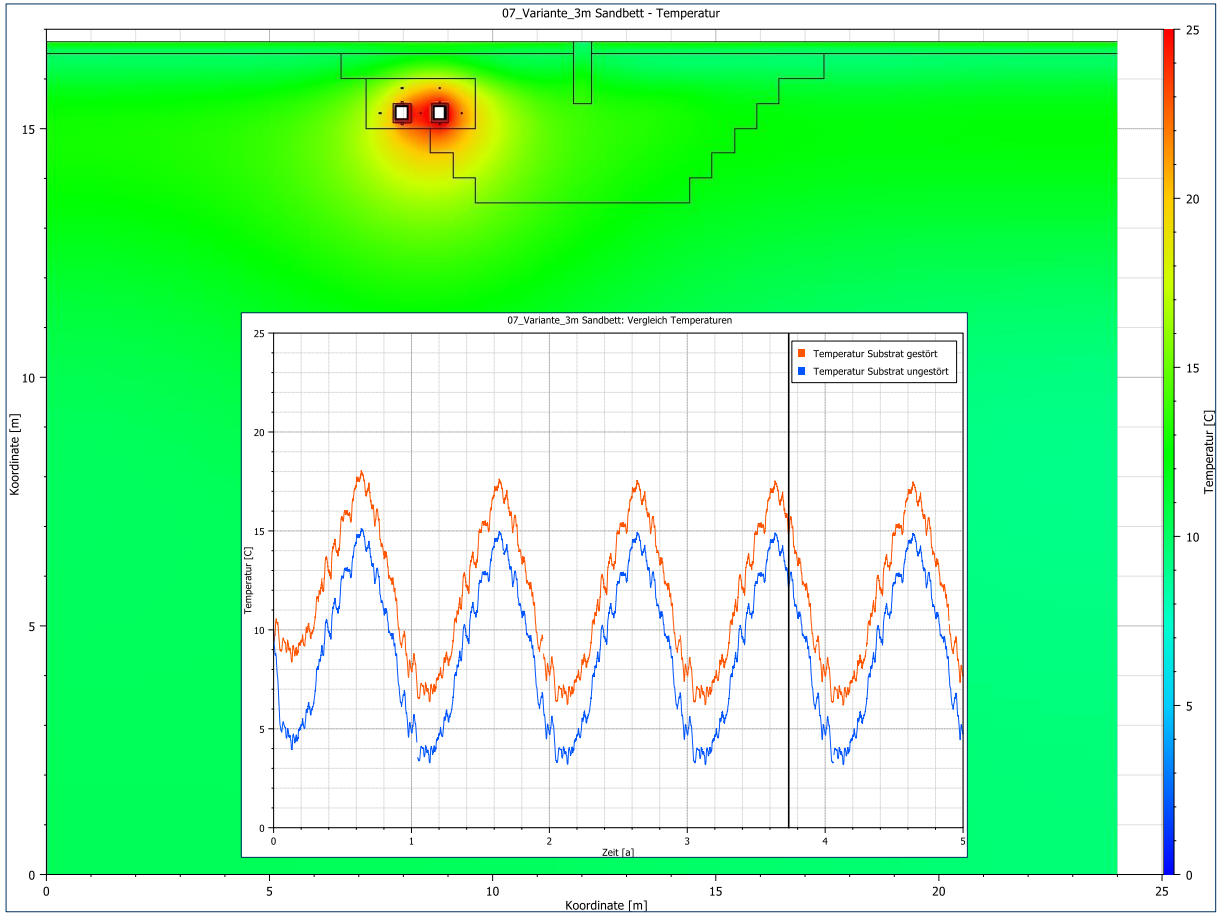
Temperatur- und Feuchtefelder am 07.März

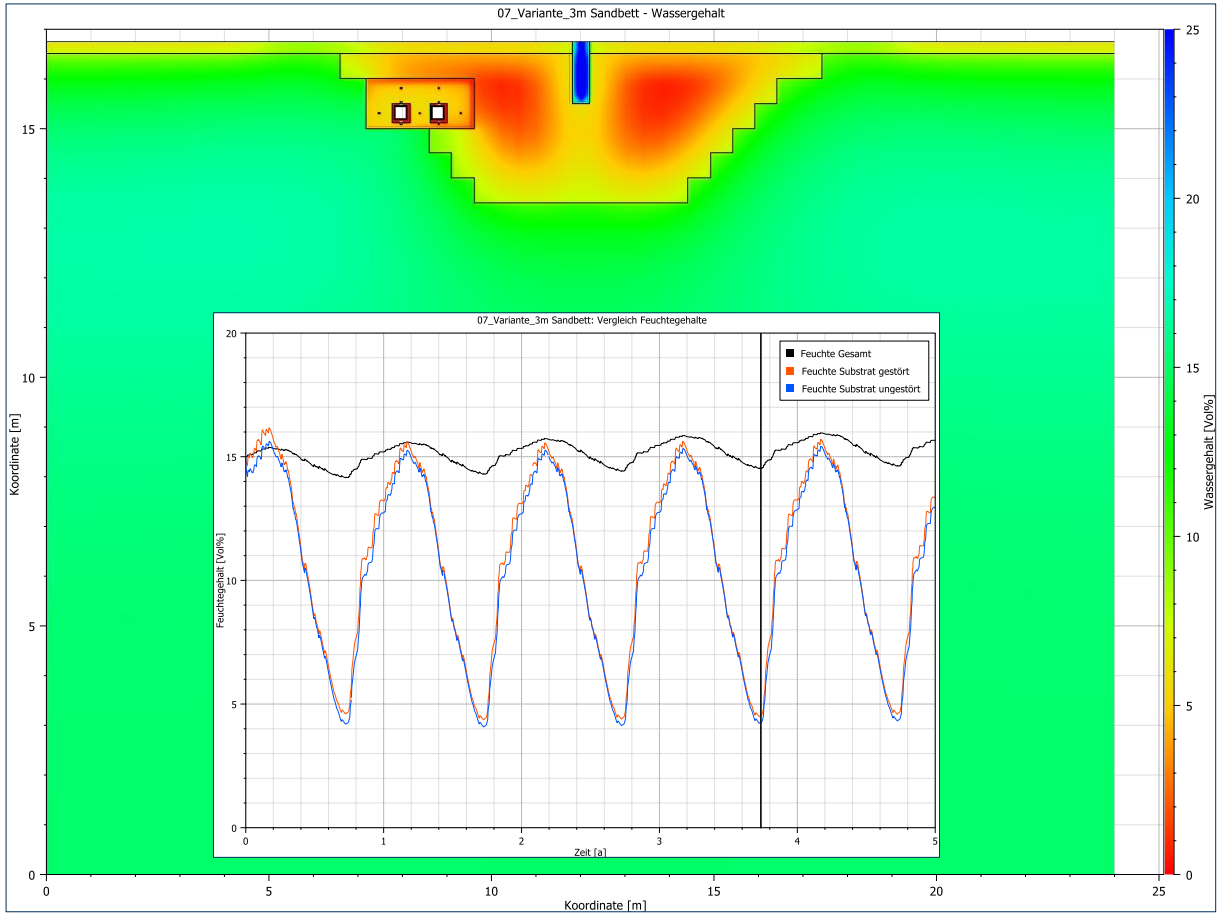




Ergebnisse Variante 3m Sandbett

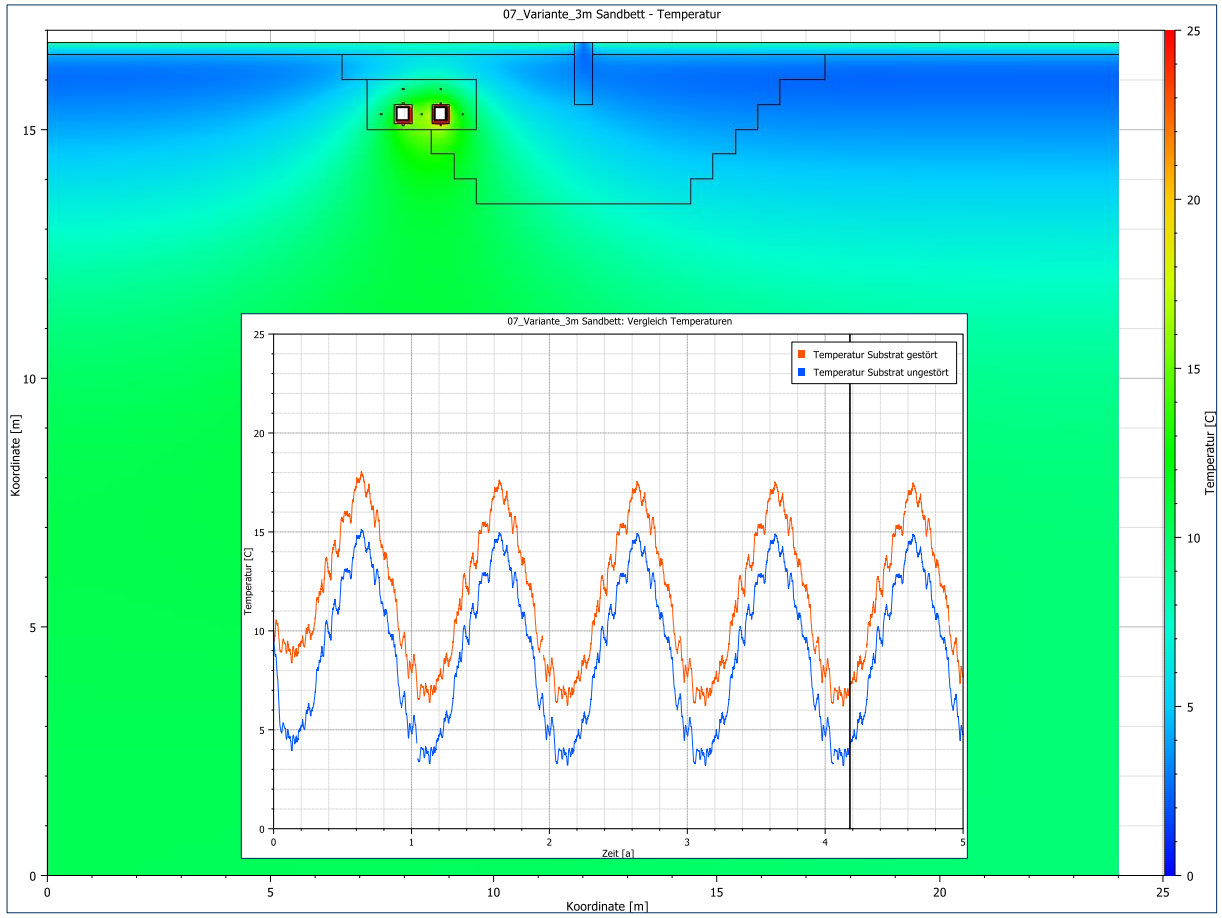
Temperatur- und Feuchtefelder am 03.September

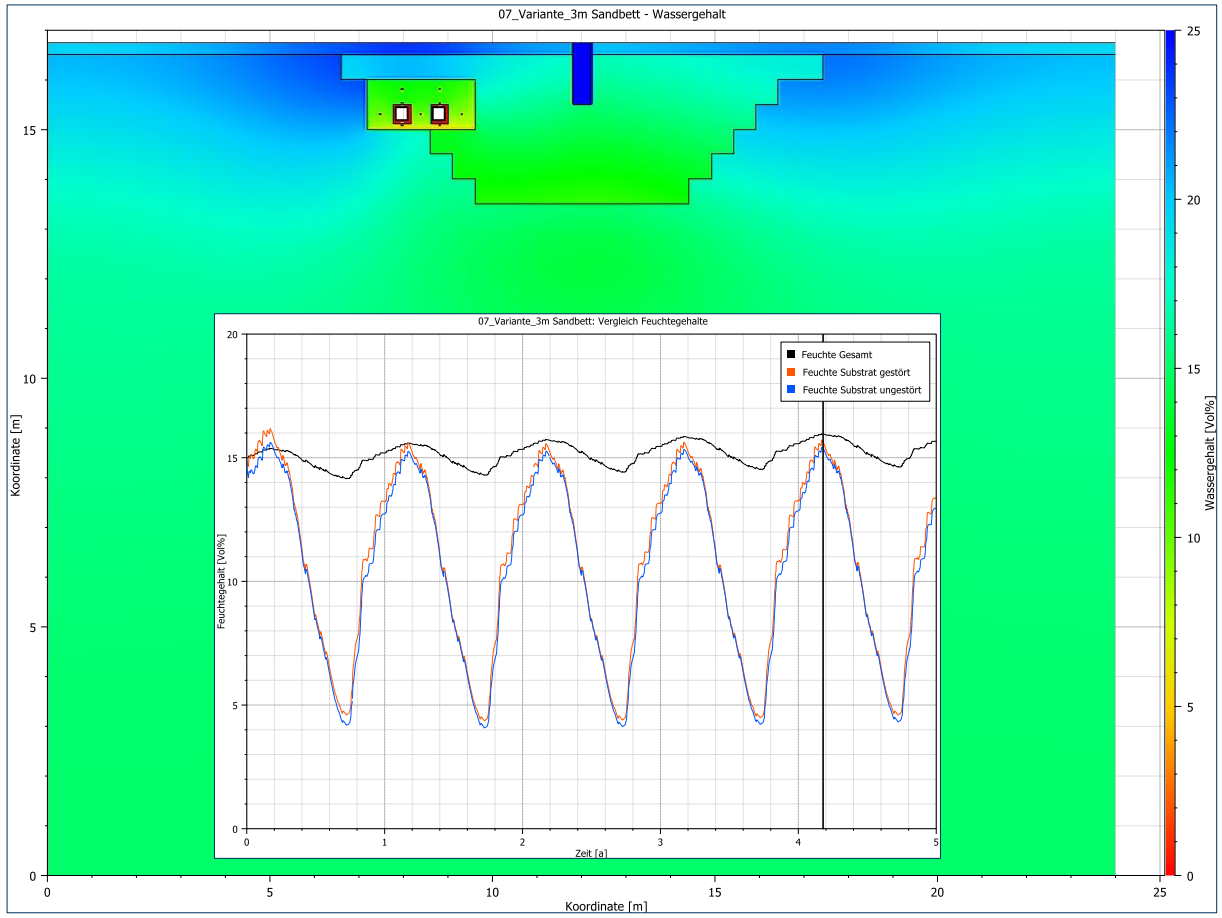




Ergebnisse Variante 3m Sandbett

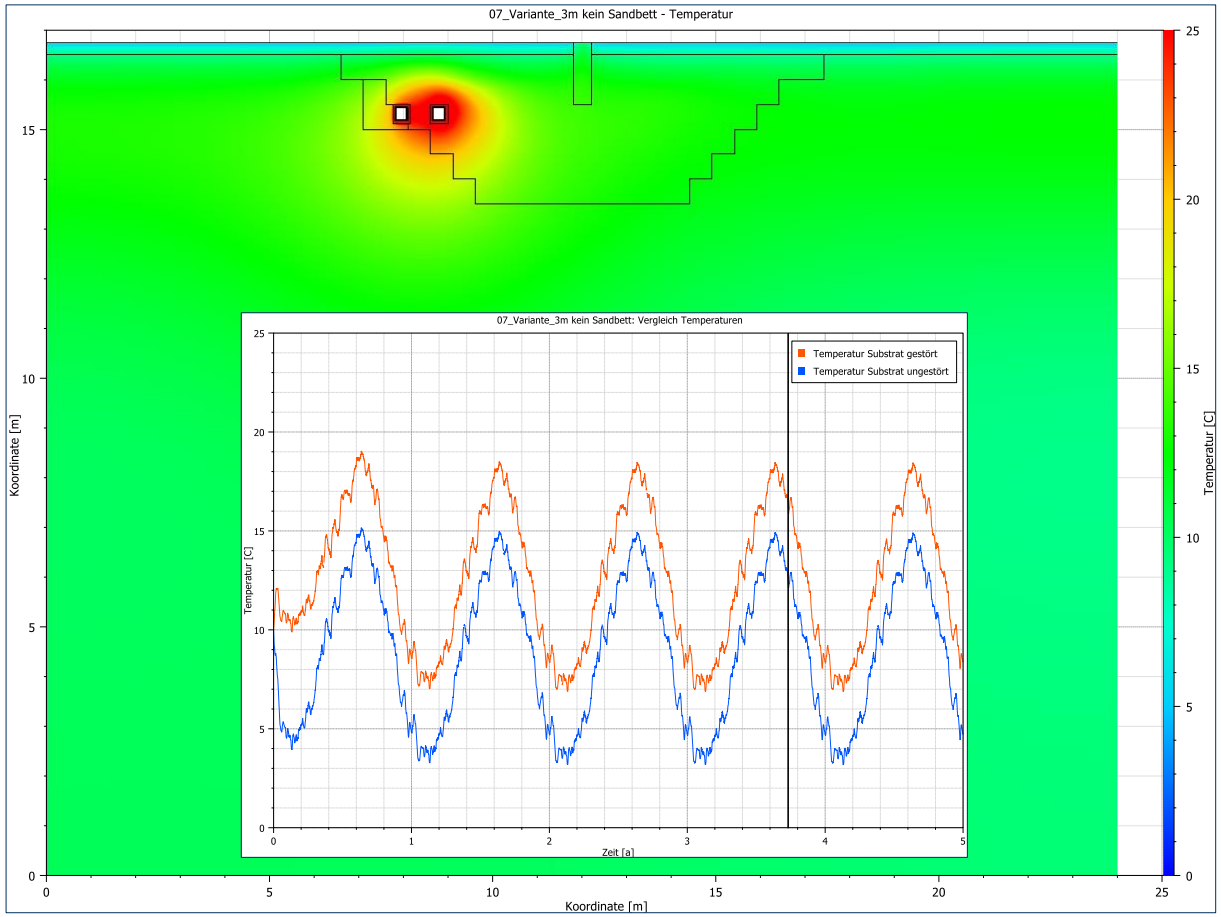
Temperatur- und Feuchtefelder am 07.März

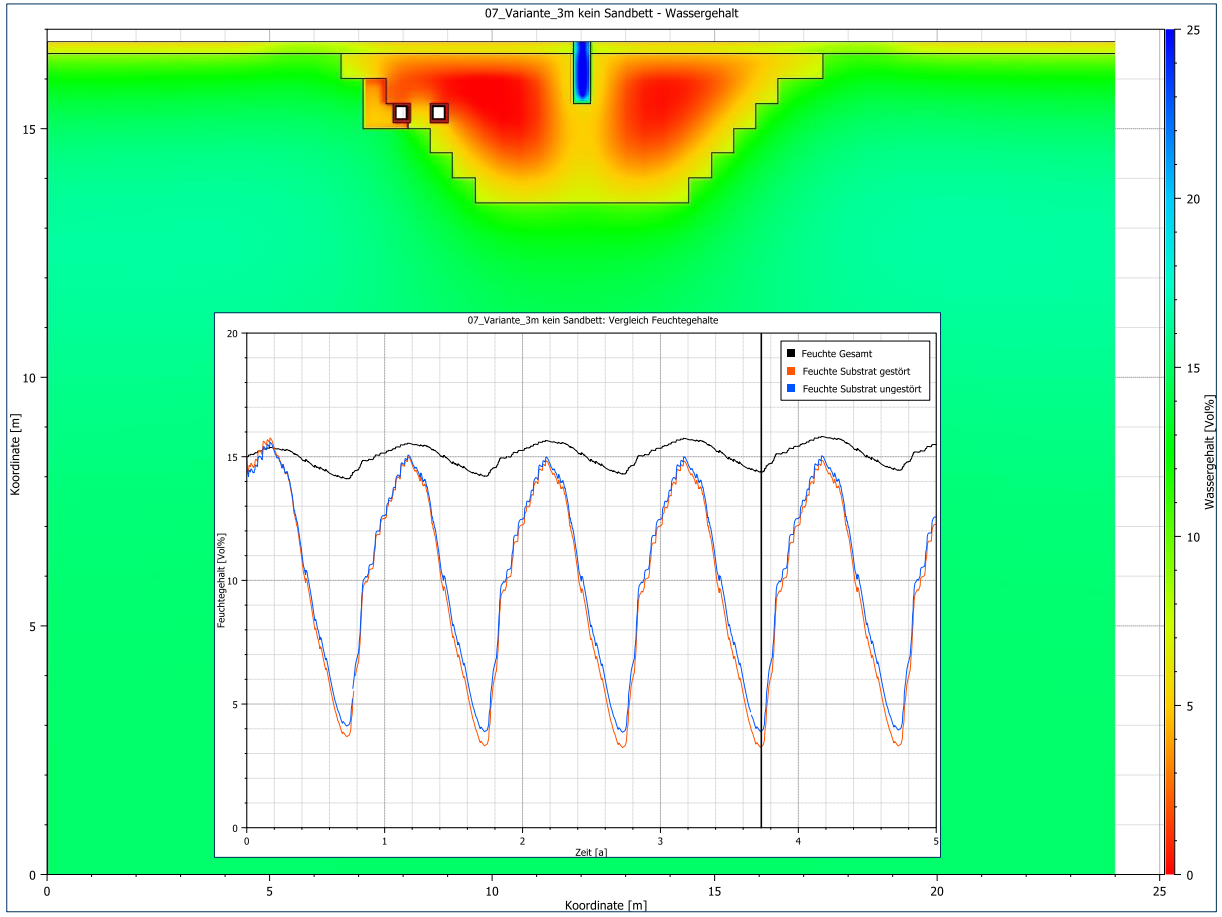




Ergebnisse Variante 3m kein Sandbett

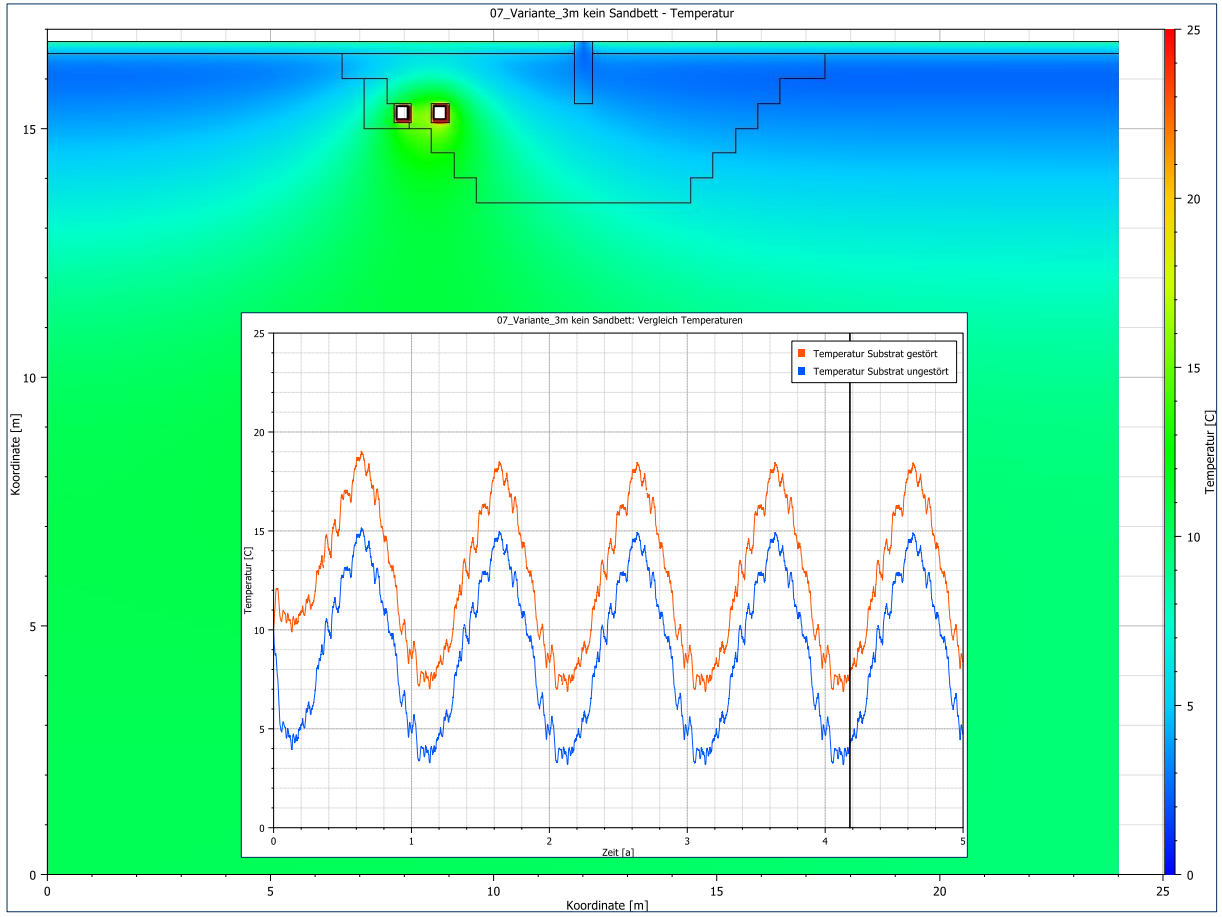
Temperatur- und Feuchtefelder am 03.September

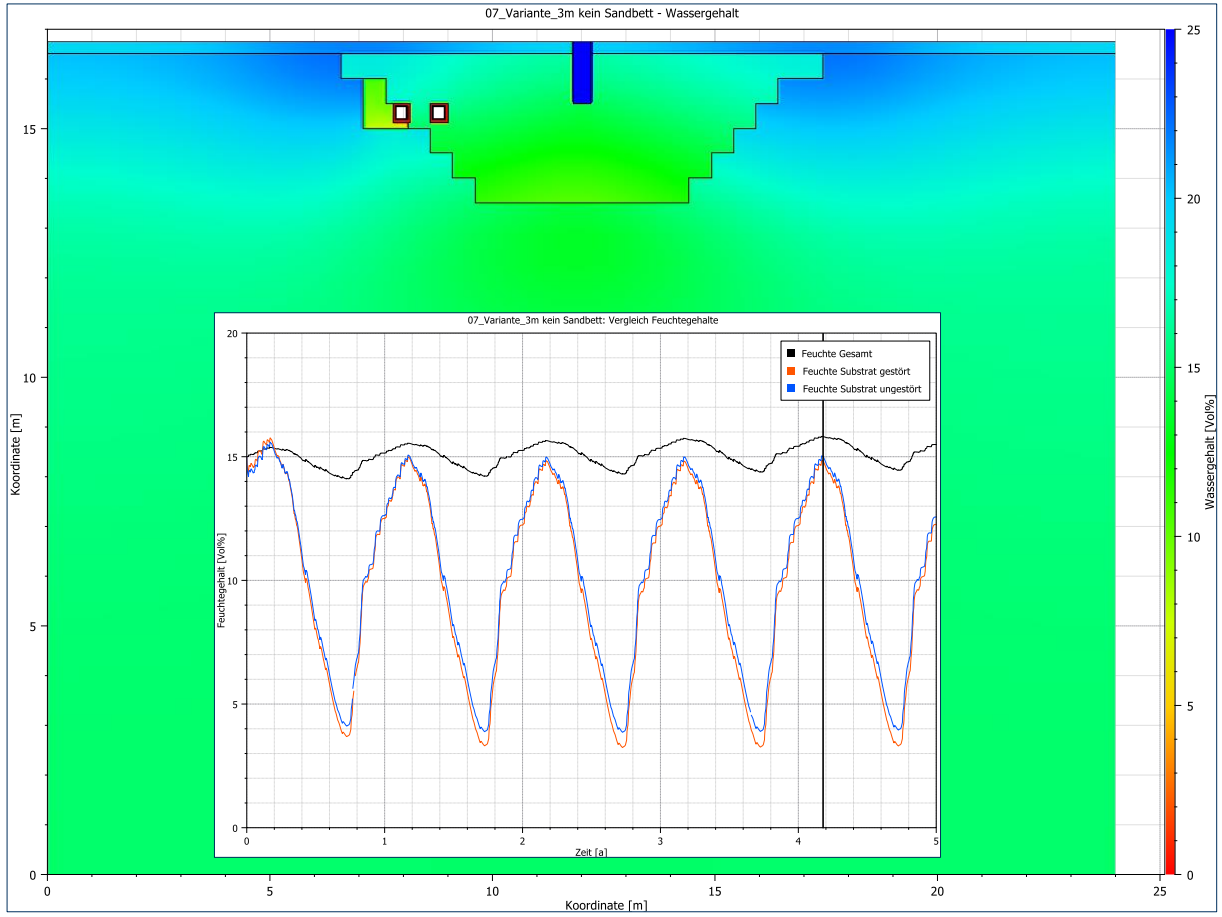




Ergebnisse Variante 3m kein Sandbett

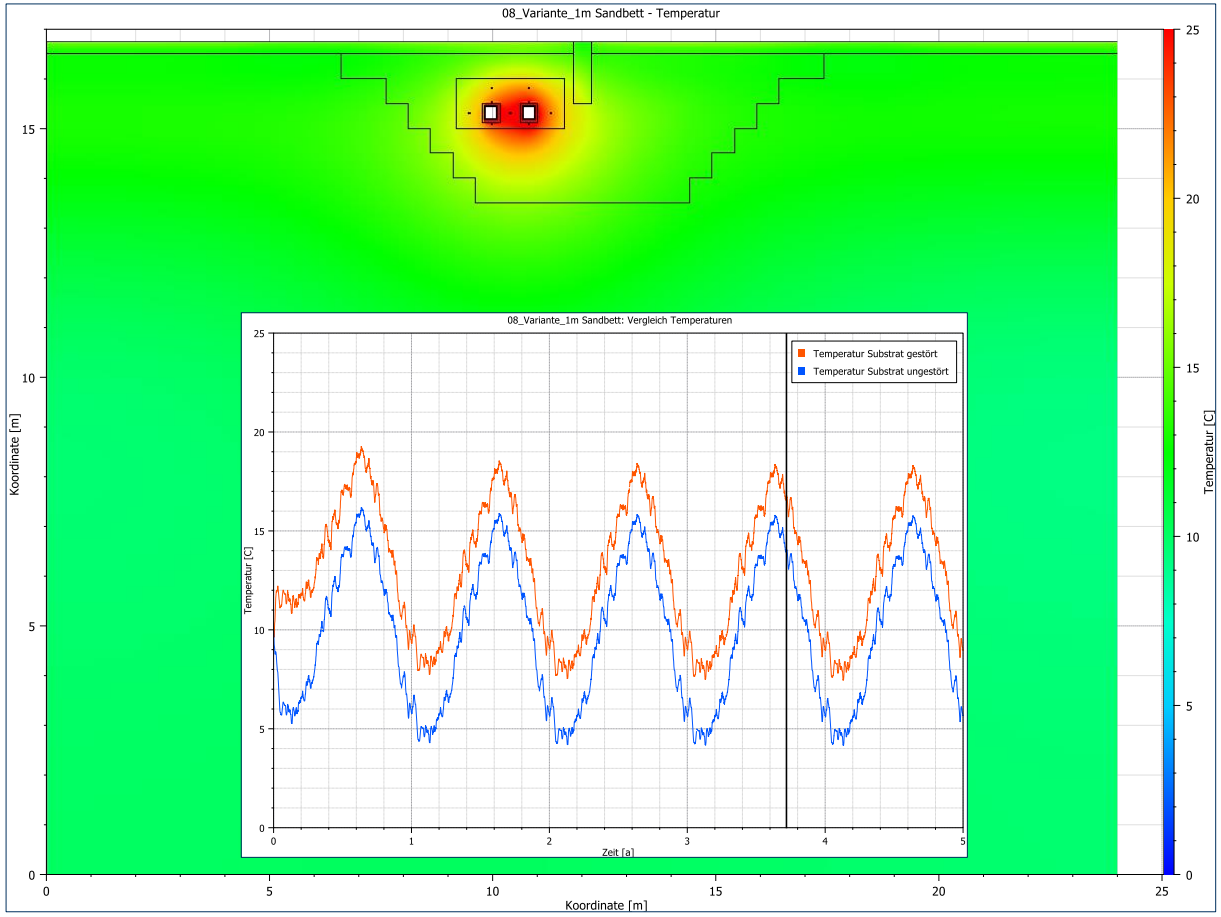
Temperatur- und Feuchtefelder am 07.März

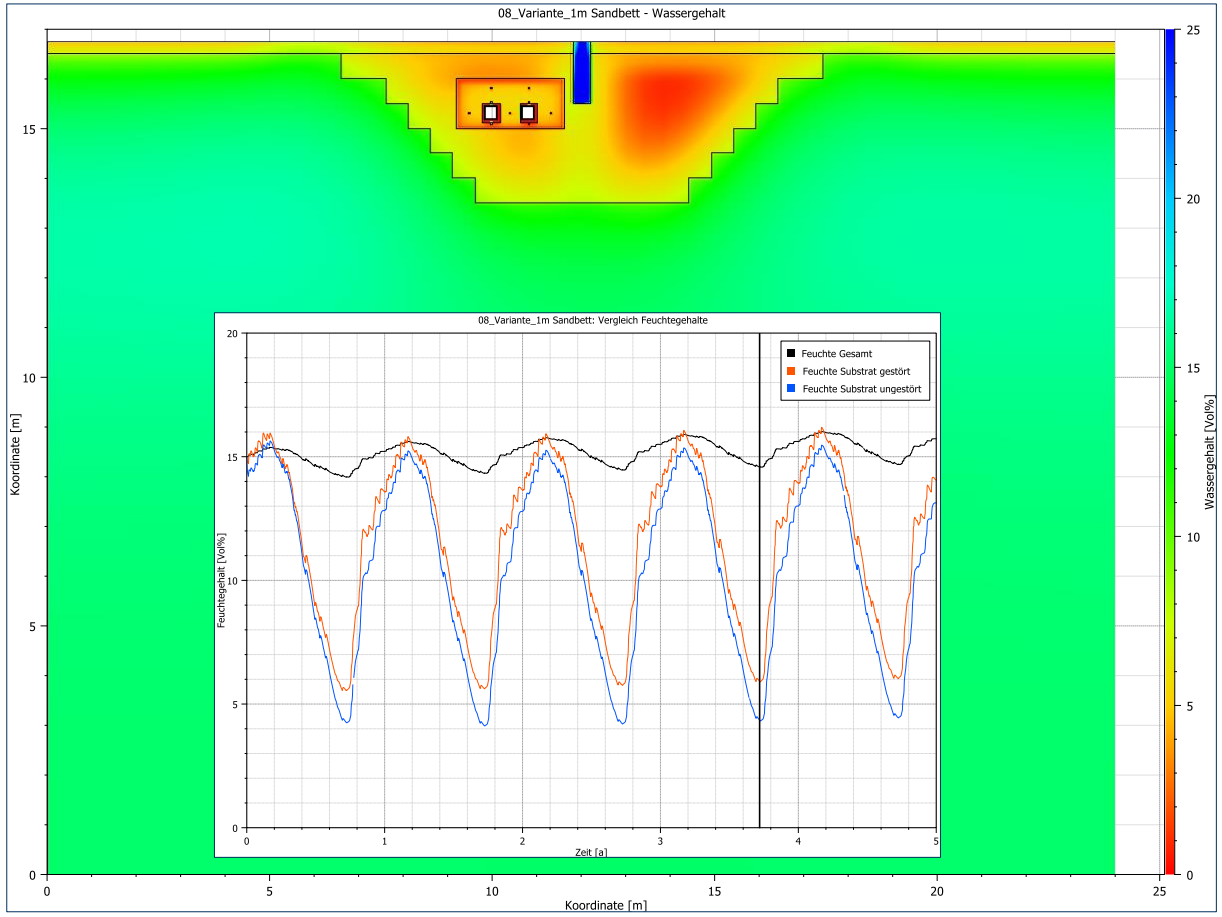




Ergebnisse Variante 1m Sandbett

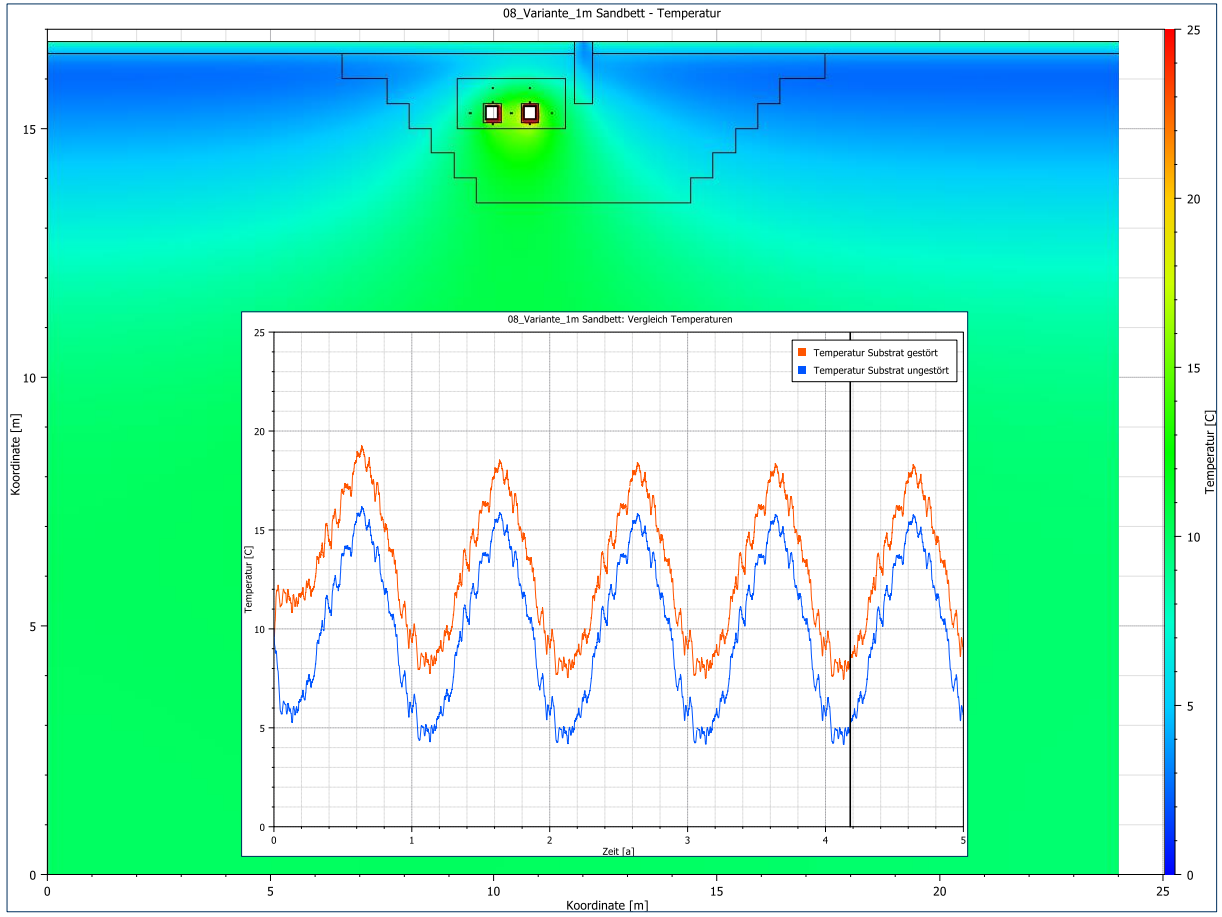
Temperatur- und Feuchtefelder am 03.September

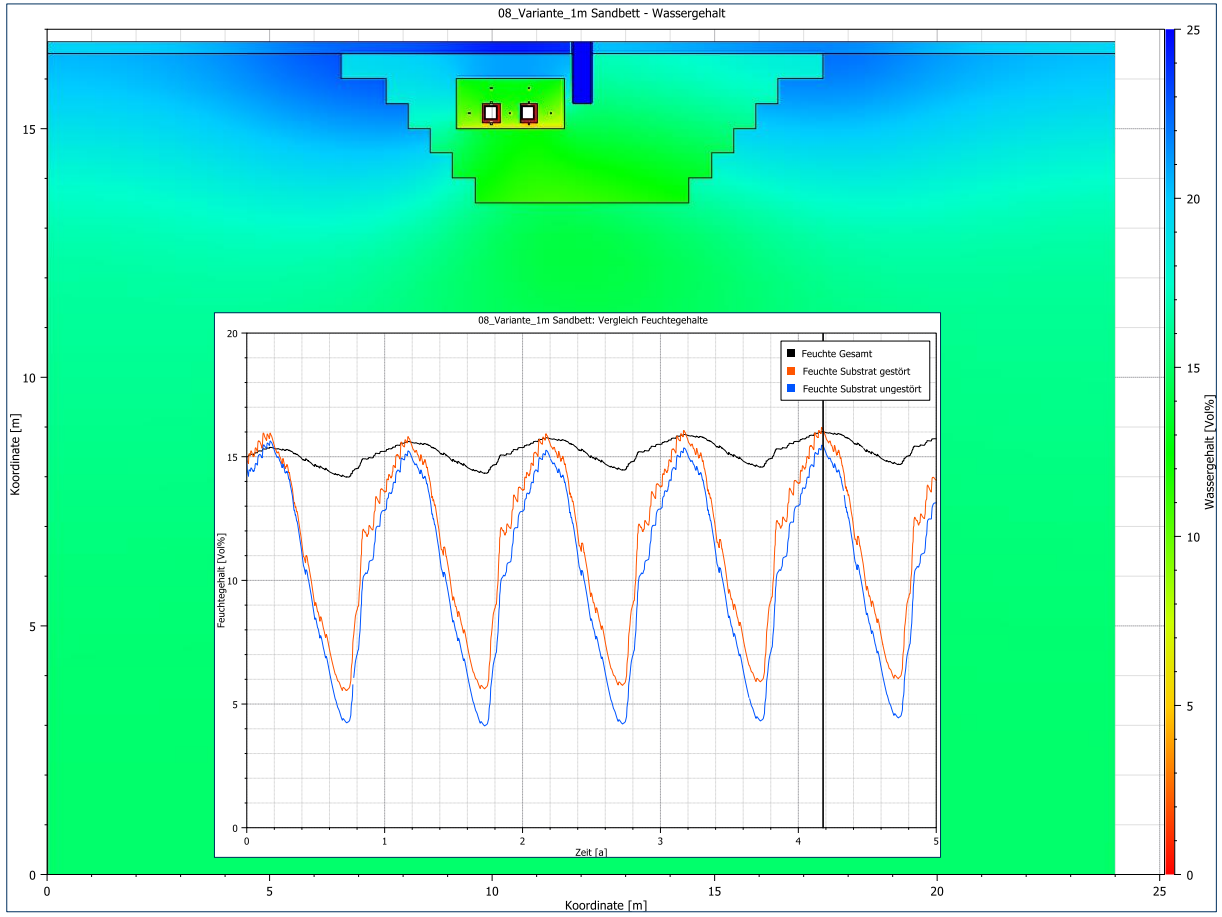




Ergebnisse Variante 1m Sandbett

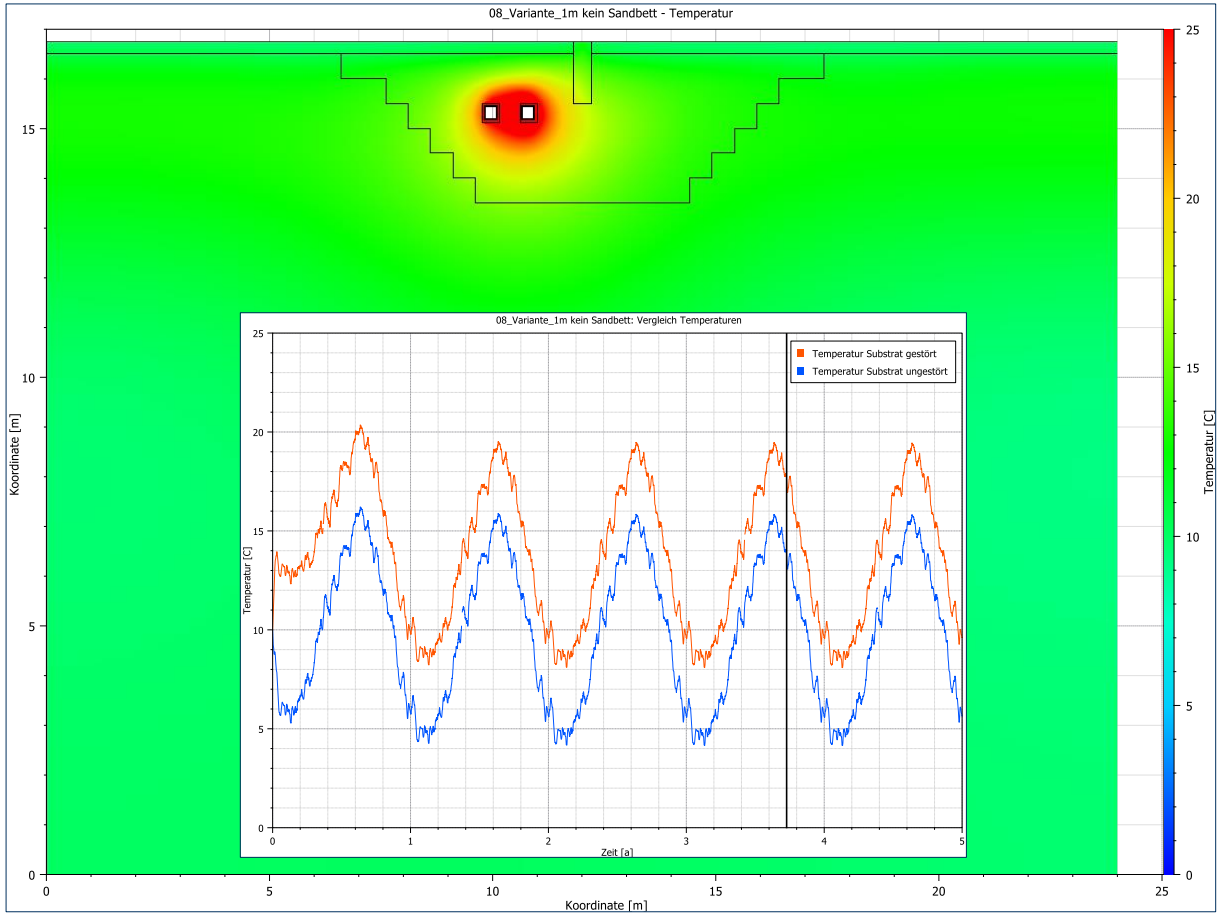
Temperatur- und Feuchtefelder am 07.März

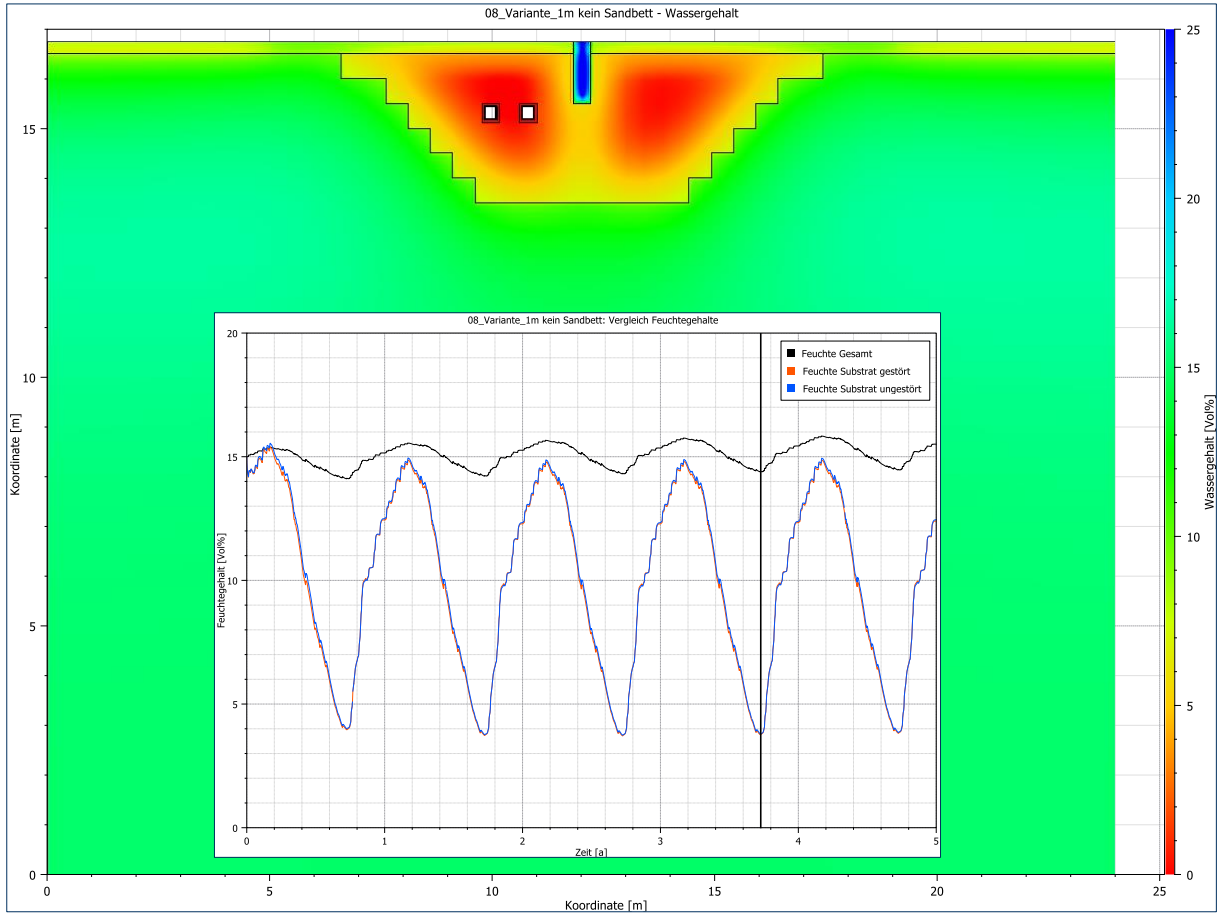




Ergebnisse Variante 1m kein Sandbett

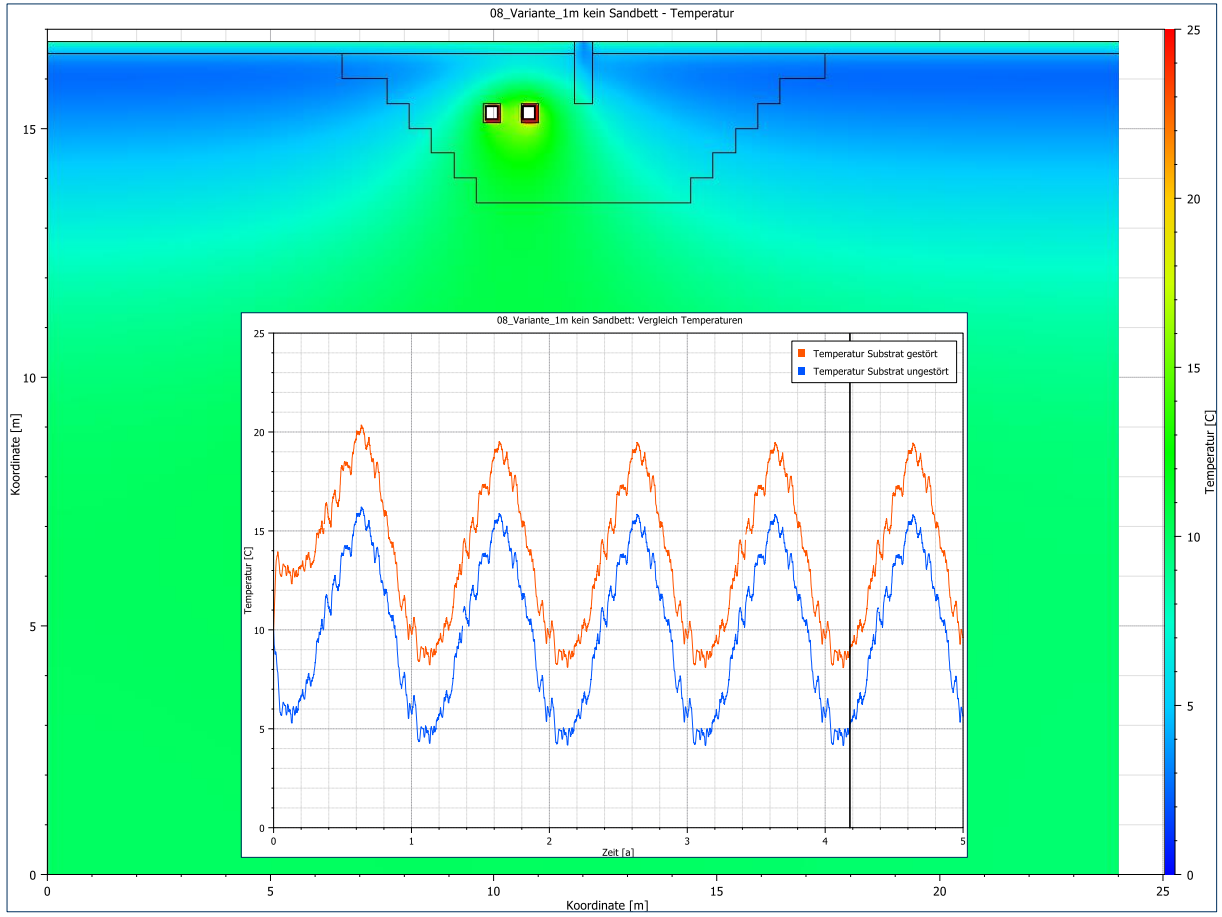
Temperatur- und Feuchtefelder am 03.September

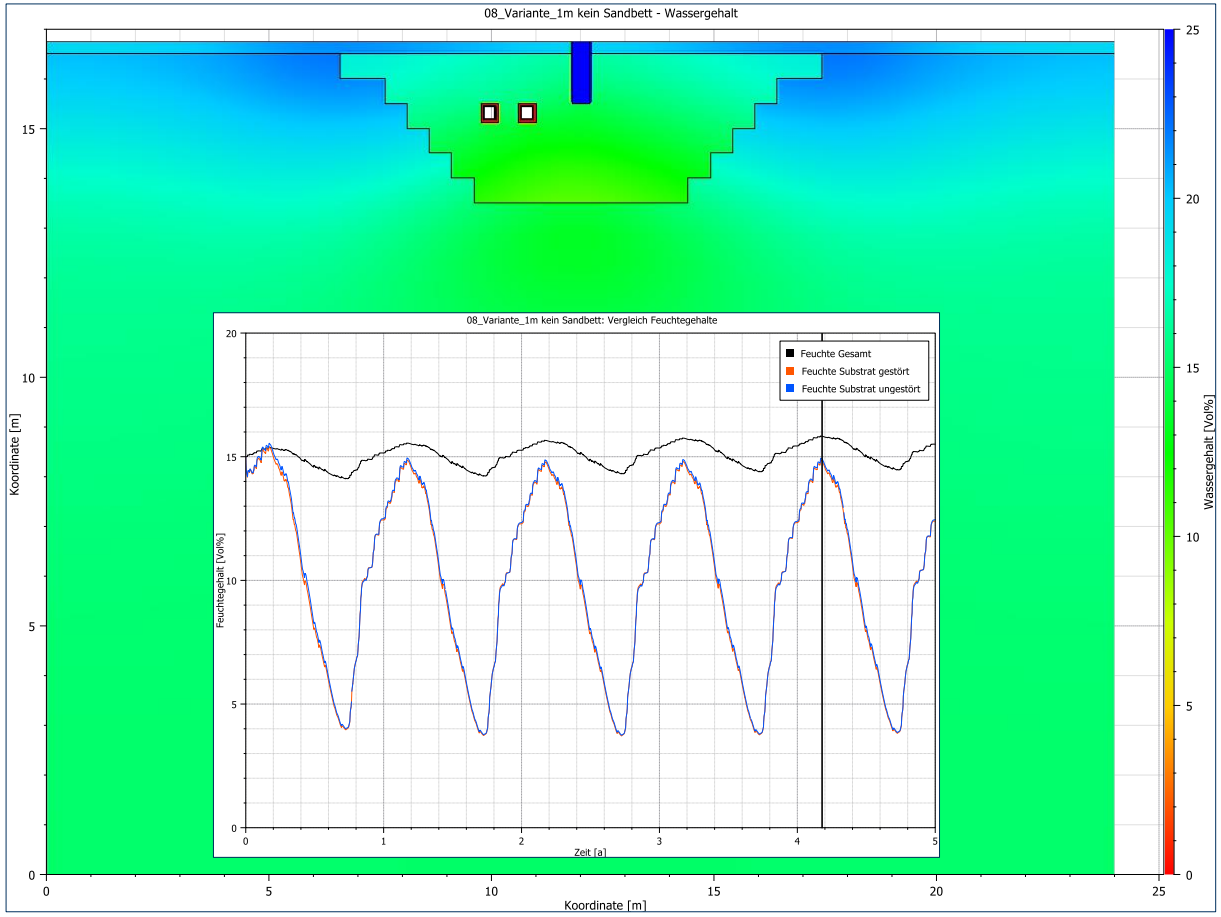




Ergebnisse Variante 1m kein Sandbett

Temperatur- und Feuchtefelder am 07.März





Varianten Dämmstärke1-2 / Nennweite300-500 / Abgesenkte VL/RL-Temperaturen

Angaben in mm

D = Außendurchmesser Mantelrohr
d = Außendurchmesser Mediumrohr
s = Wandstärke Mediumrohr
t = Dämmdicke

PREMANT

Nenn-weite DN	Stahlrohr d x s mm	Dämmstärke 1 D mm	kg/m	Dämmstärke 2 D mm	kg/m	Dämmstärke 3 D mm	kg/m
20	26.9 x 2.6	90	2.7	110	3.1	125	3.4
25	33.7 x 2.6	90	3.1	110	3.5	125	3.8
32	42.4 x 2.6	110	4.0	125	4.3	140	4.7
40	48.3 x 2.6	110	4.4	125	4.7	140	5.0
50	60.3 x 2.9	125	5.8	140	6.1	160	6.6
65	76.1 x 2.9	140	7.1	160	7.6	180	8.2
80	88.9 x 3.2	160	9.0	180	9.6	200	10.3
100	114.3 x 3.6	200	13.0	225	13.9	250	15.0
125	139.7 x 3.6	225	15.9	250	16.9	280	18.7
150	168.3 x 4.0	250	20.5	280	22.3	315	24.0
200	219.1 x 4.5	315	30.5	355	32.5	400	35.8
250	273.0 x 5.0	400	43.5	450	47.0	500	51.3
300	323.9 x 5.6	450	56.2	500	60.5	560	66.1
350	355.6 x 5.6	500	63.7	560	69.3	630	76.3
400	406.4 x 6.3	560	81.0	630	88.0	710	97.7

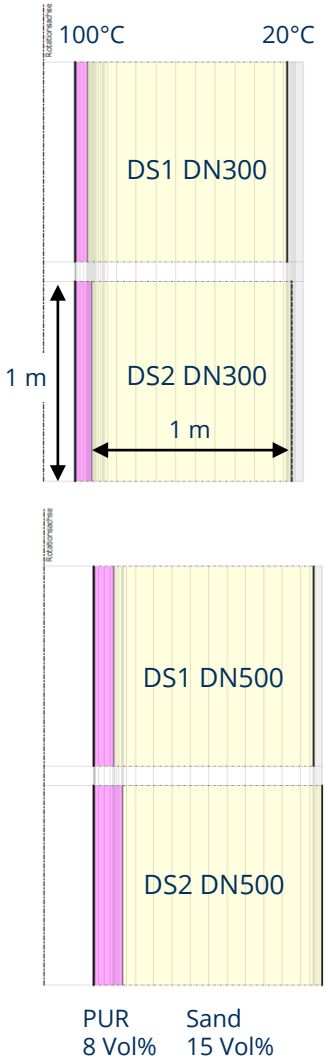
Quadratische Approximation: Gleiche Fläche oder gleicher Umfang?

Nennweite DN 300						
Nr	Dämmstärke	Bezugsgröße		1	2	
1	Außendurchmesser Mediumrohr		d	324	324	mm
2	Wandstärke Mediumrohr		s	5.6	5.6	mm
3	Außendurchmesser Mantelrohr		D	450	500	mm
4	Wandstärke PE-Mantel		PE	5.2	7.2	mm
5	**Dämmdicke**		**t**	**58**	**81**	**mm**
6	Flächeninhalt Mantelrohr		A	0.16	0.20	m2
7	Radius RADSYMM innen			156	156	mm
8	Kantenlänge 2D Mediumrohr innen	Fläche 1-2		277	277	mm
9	Kantenlänge 2D Mediumrohr innen	Umfang 1-2		246	246	mm
10	**Kantenlänge 2D Mediumrohr innen**	**Mittelung 8+9**		**261**	**261**	**mm**

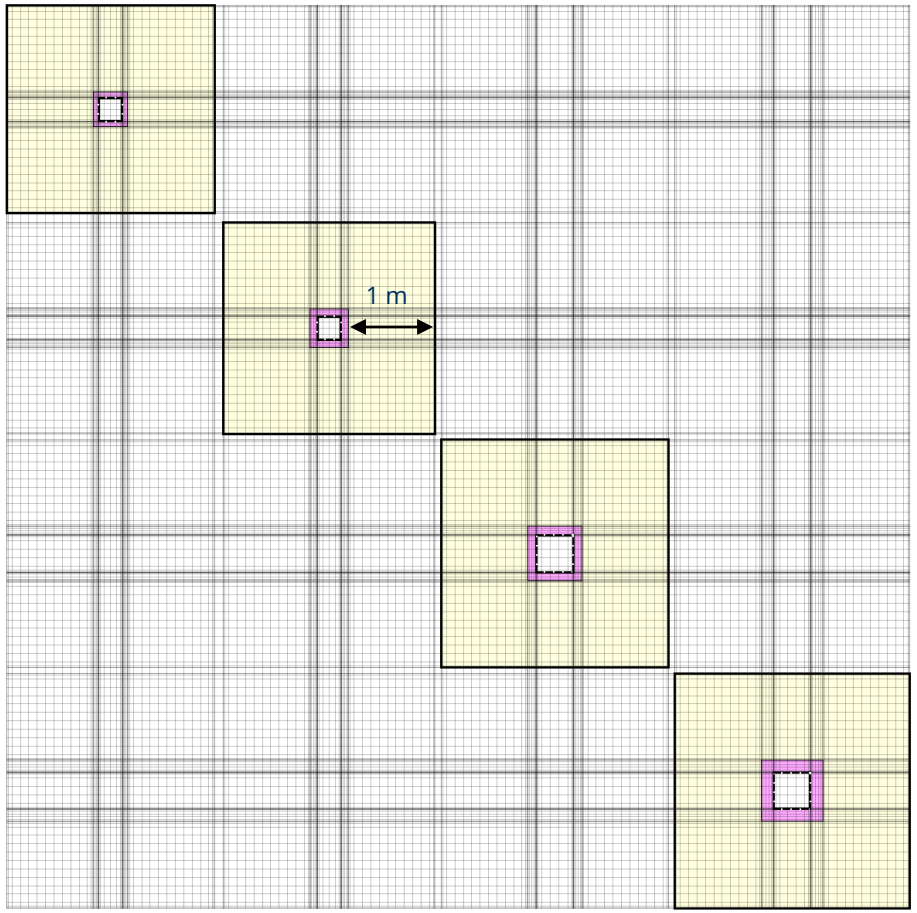
Nennweite DN 500						
Nr	Dämmstärke	Bezugsgröße		1	2	
1	Außendurchmesser Mediumrohr		d	508	508	mm
2	Wandstärke Mediumrohr		s	6.3	6.3	mm
3	Außendurchmesser Mantelrohr		D	710	800	mm
4	Wandstärke PE-Mantel		PE	5.2	7.2	mm
5	**Dämmdicke**		**t**	**96**	**139**	**mm**
6	Flächeninhalt Mantelrohr		A	0.40	0.50	m2
7	Radius RADSYMM innen			248	248	mm
8	Kantenlänge 2D Mediumrohr innen	Fläche 1-2		439	439	mm
9	Kantenlänge 2D Mediumrohr innen	Umfang 1-2		389	389	mm
10	**Kantenlänge 2D Mediumrohr innen**	**Mittelung 8+9**		**414**	**414**	**mm**

Varianten Dämmstärke1-2 / Nennweite300-500 / Abgesenkte VL/RL-Temperaturen

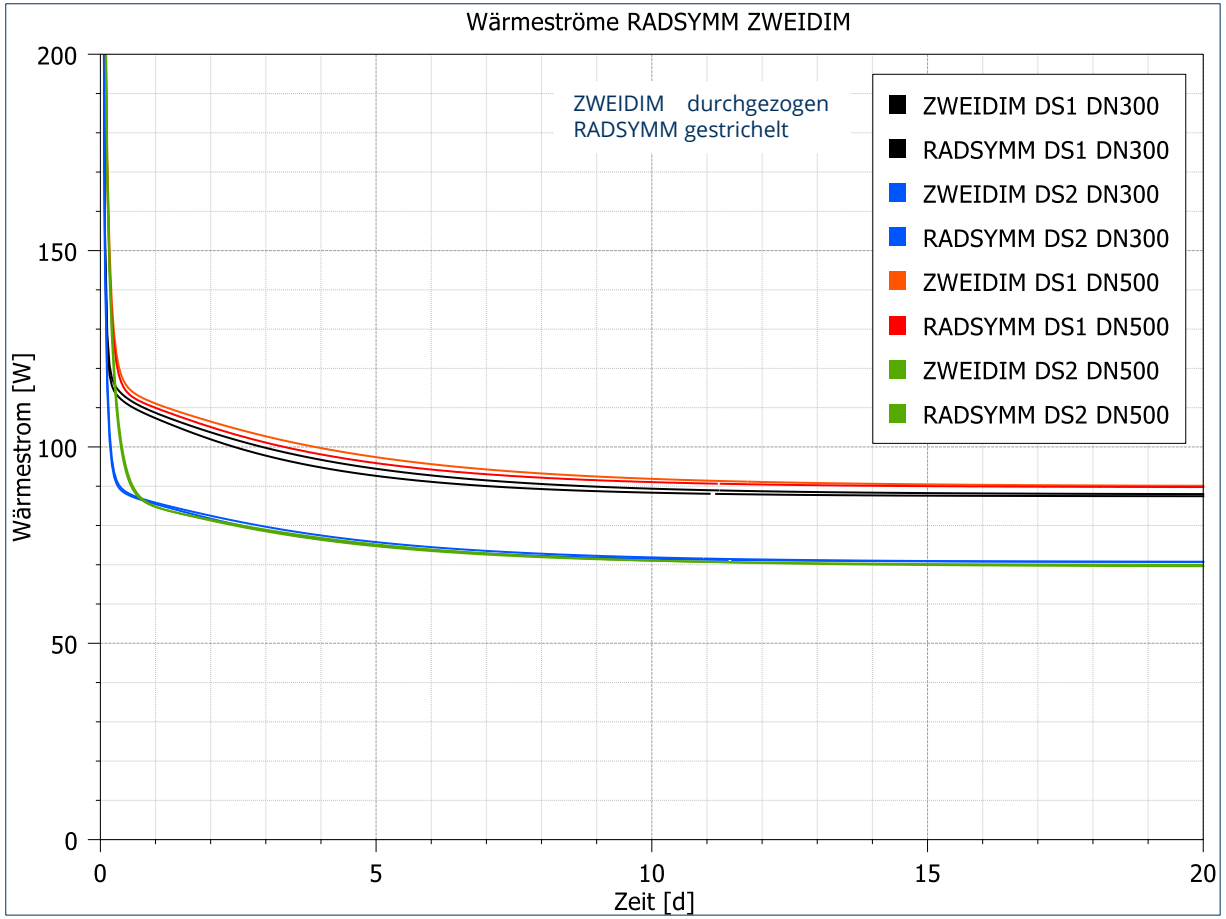
Radialsymmetrische Berechnung



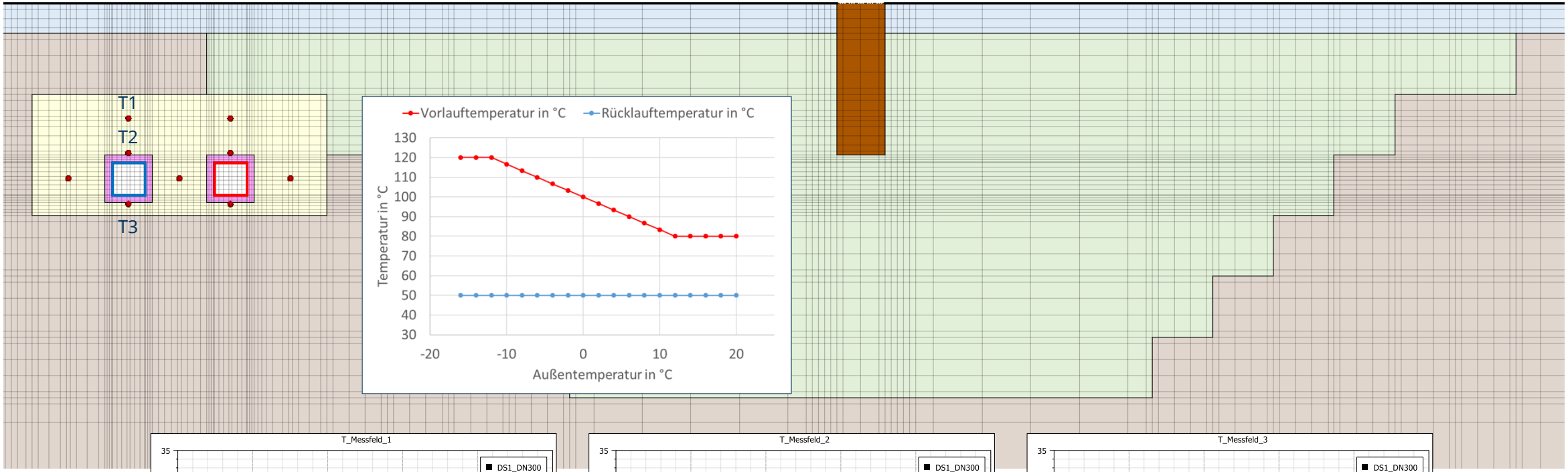
Zweidimensionale Berechnung

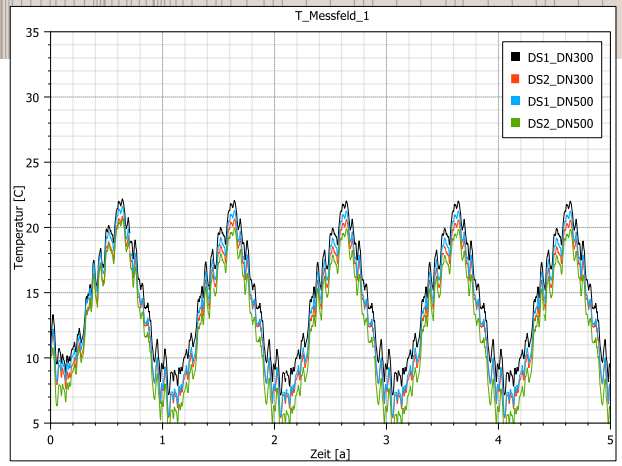


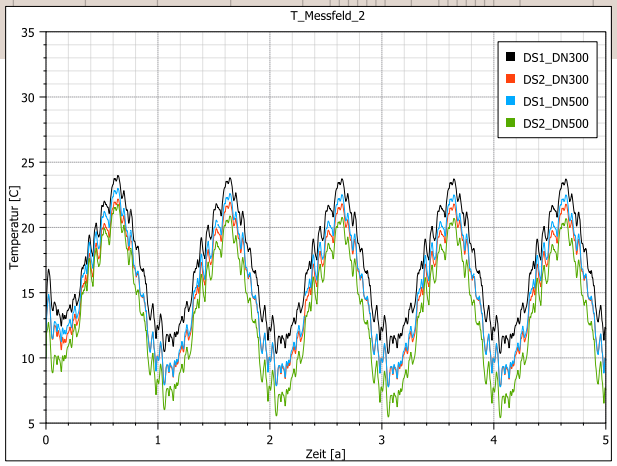
Beste Methode: Mittelung aus gleicher Fläche und gleichem Umfang

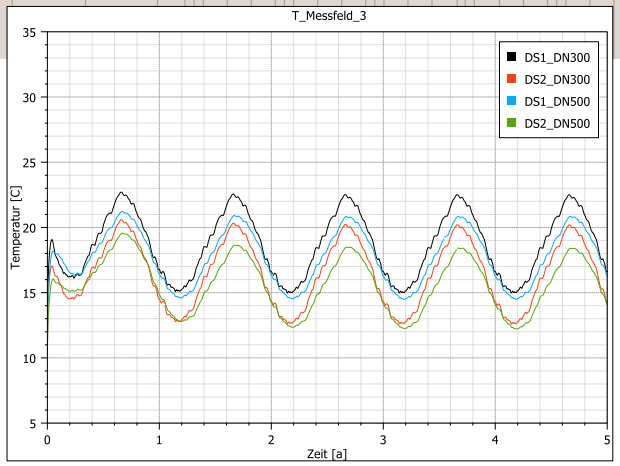


Vergleiche T_Messfeld DS1-2 DN300-500, HKL 120-80

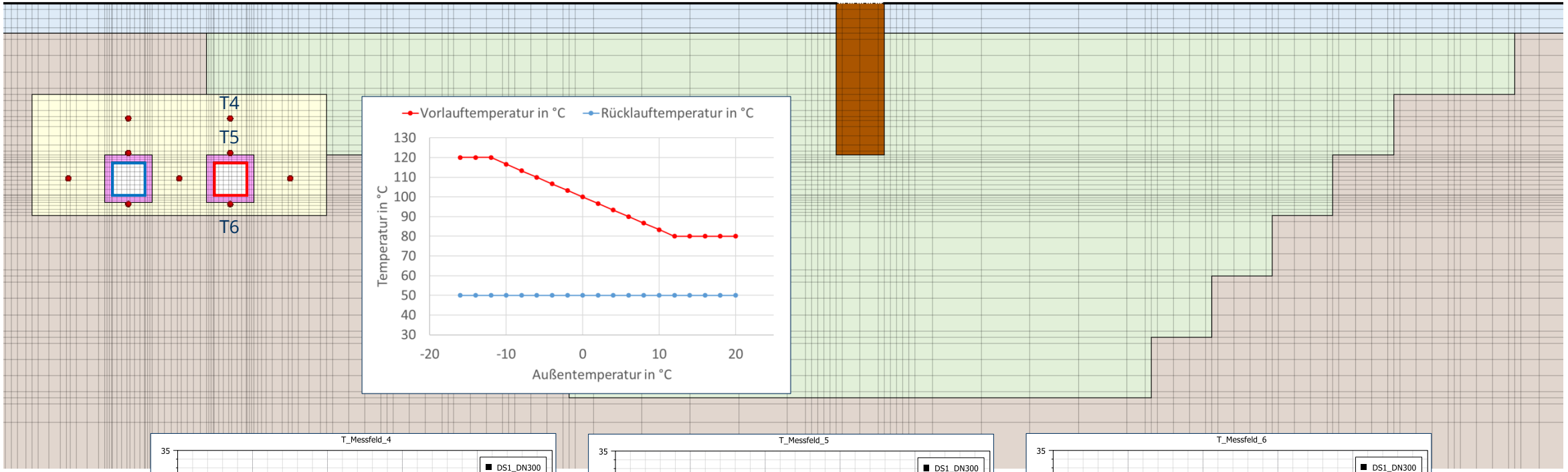


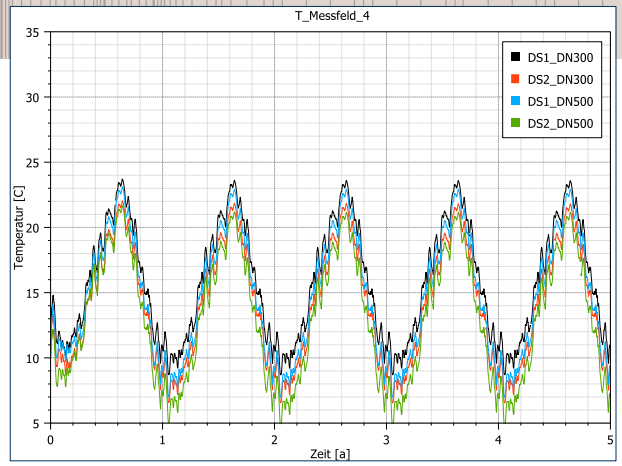


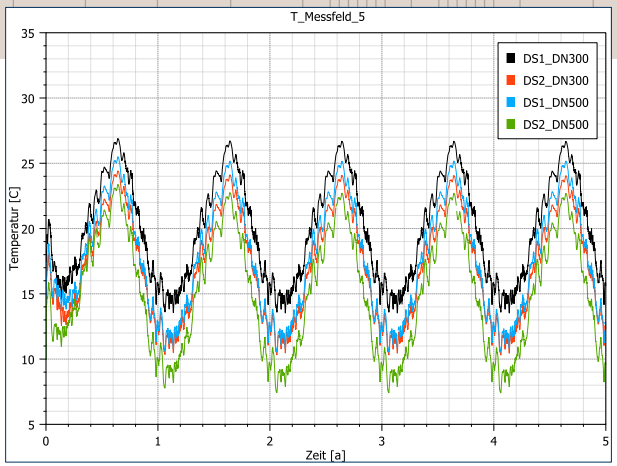


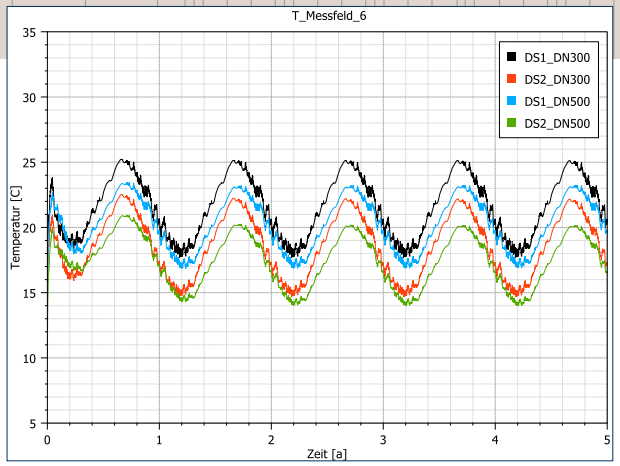


Vergleiche T_Messfeld DS1-2 DN300-500, HKL 120-80

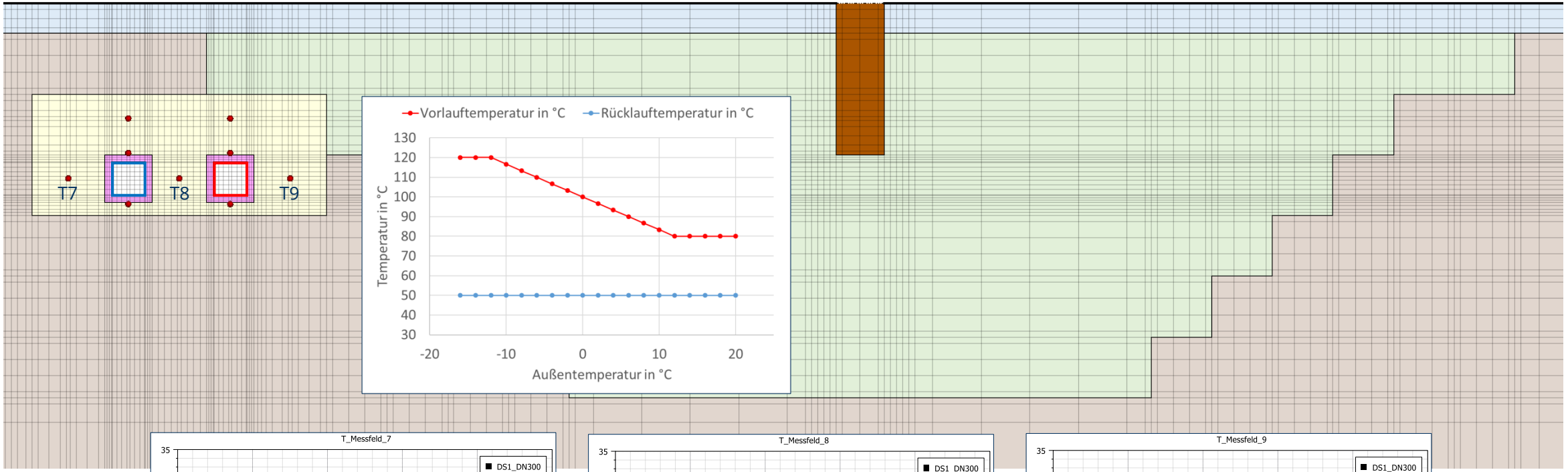


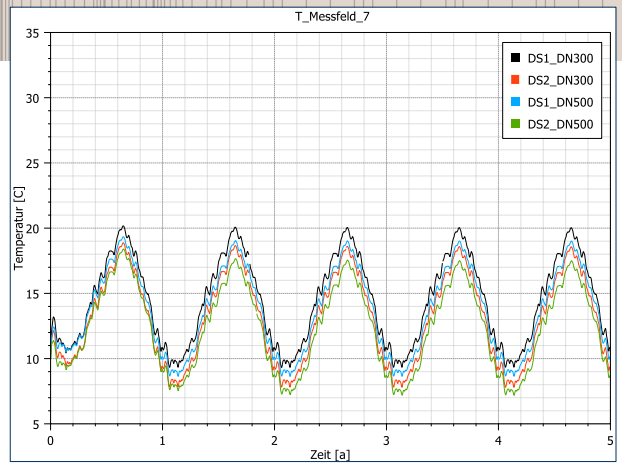


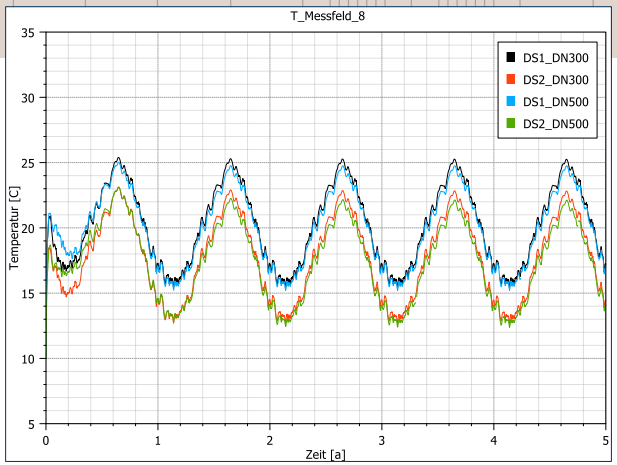


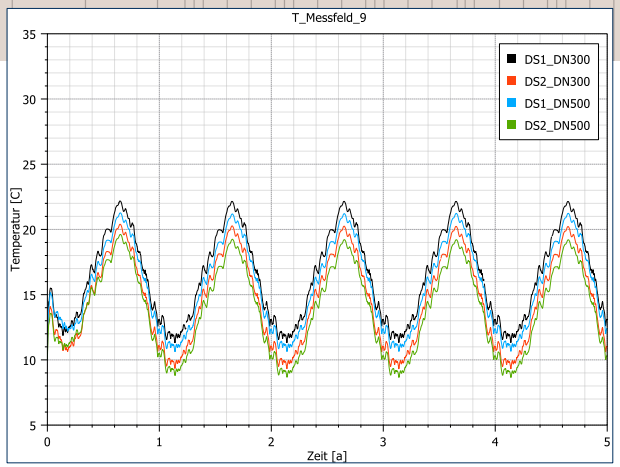


Vergleiche T_Messfeld DS1-2 DN300-500, HKL 120-80

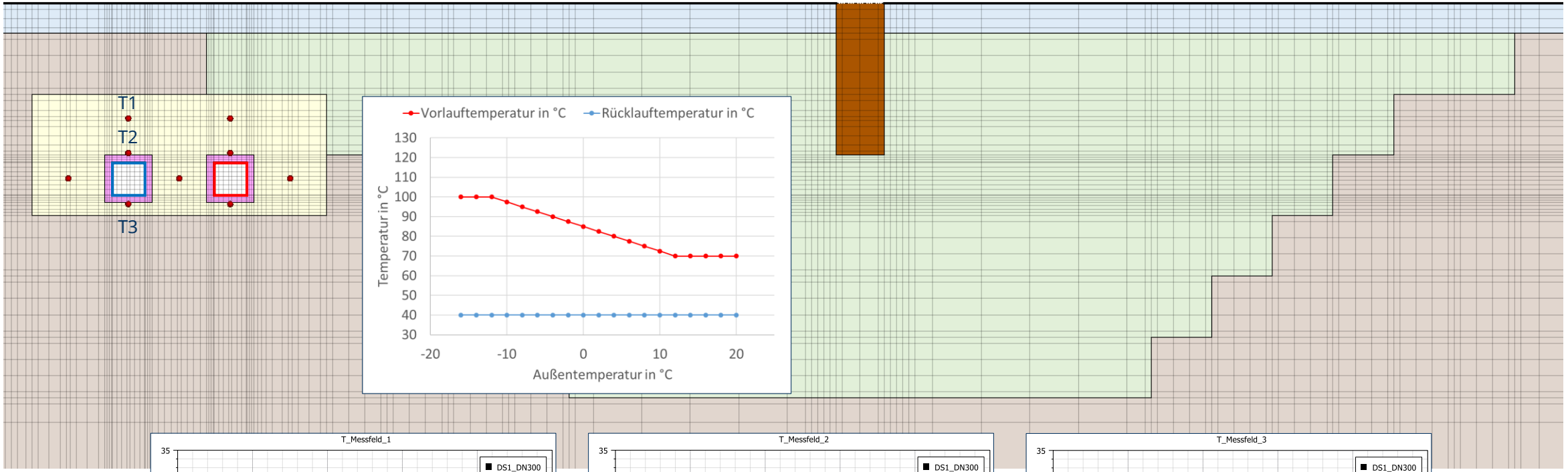


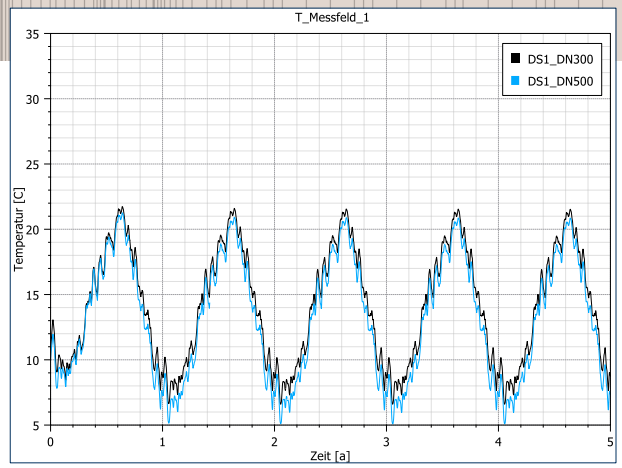


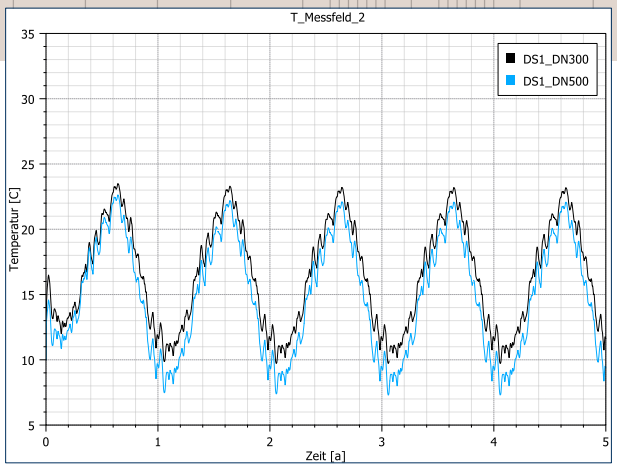


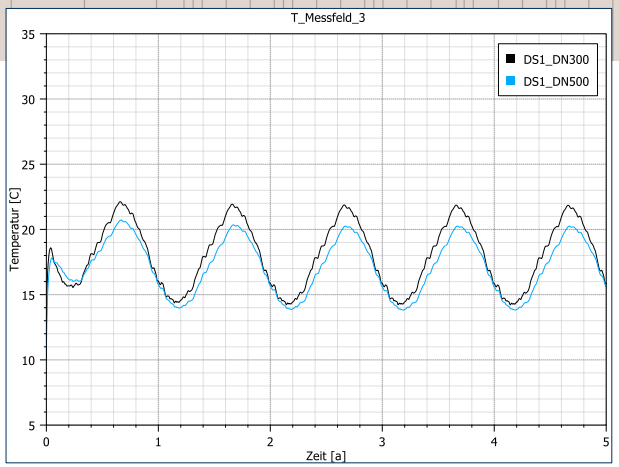


Vergleiche T_Messfeld DS1 DN300-500, HKL 100-70

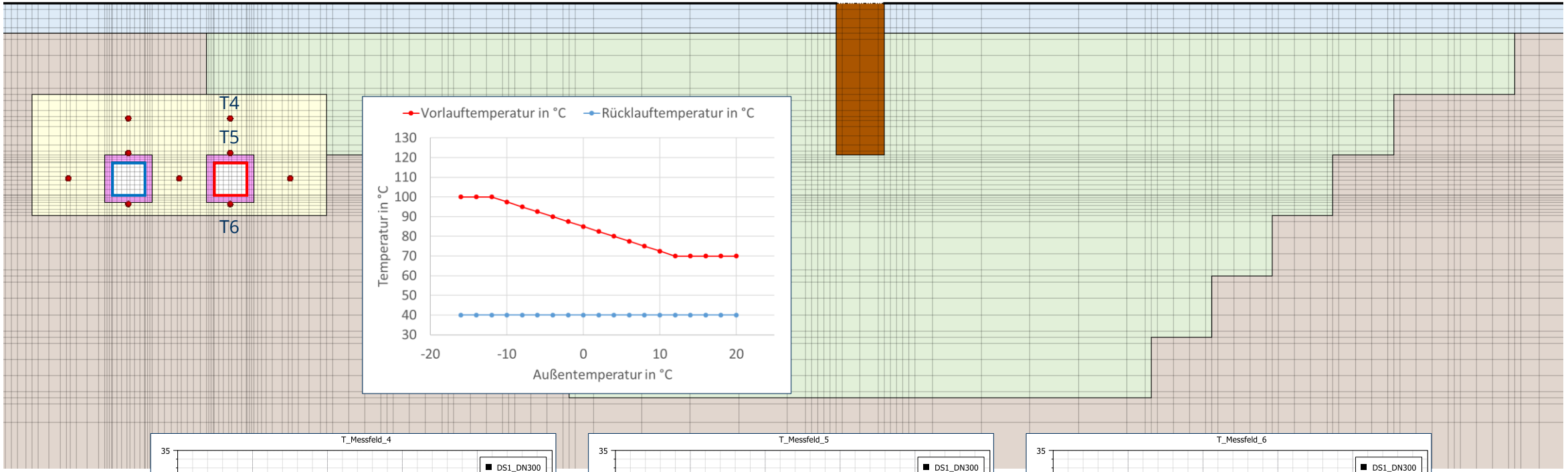


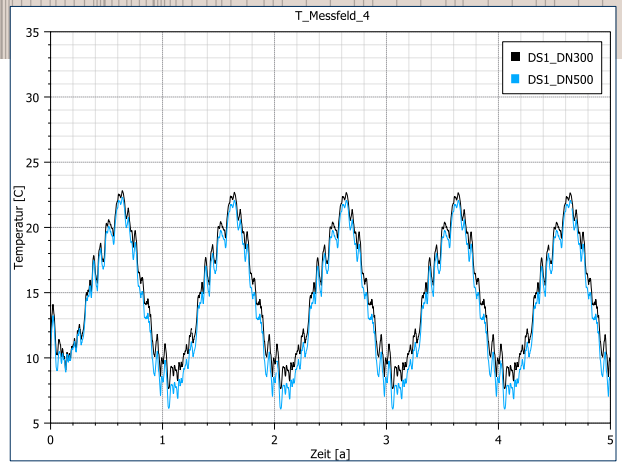


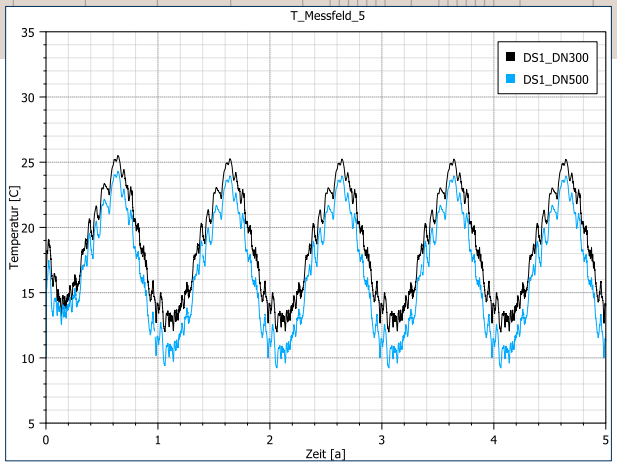


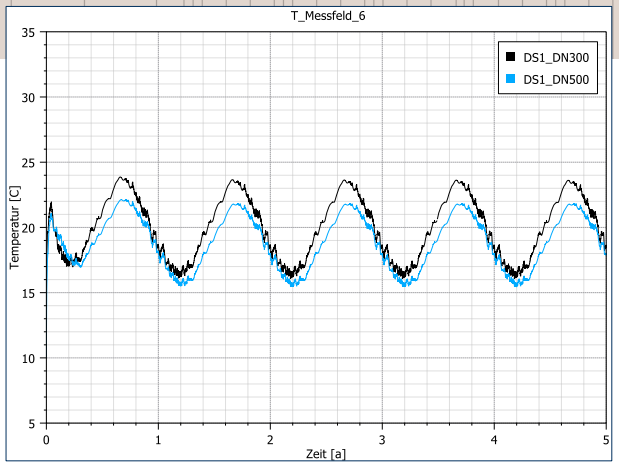


Vergleiche T_Messfeld DS1 DN300-500, HKL 100-70

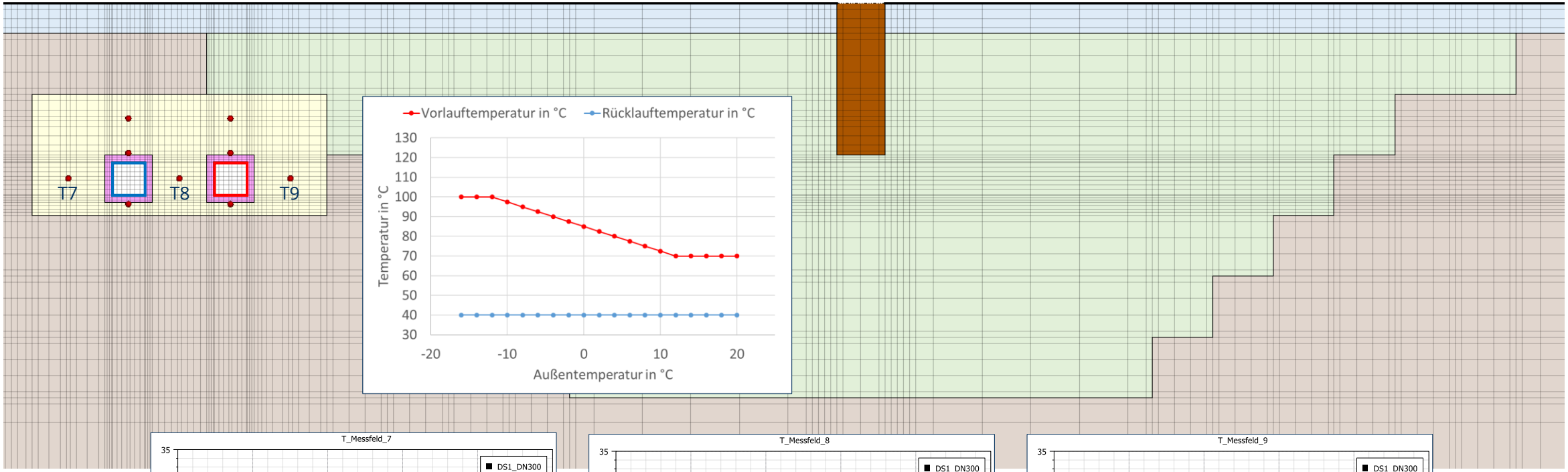


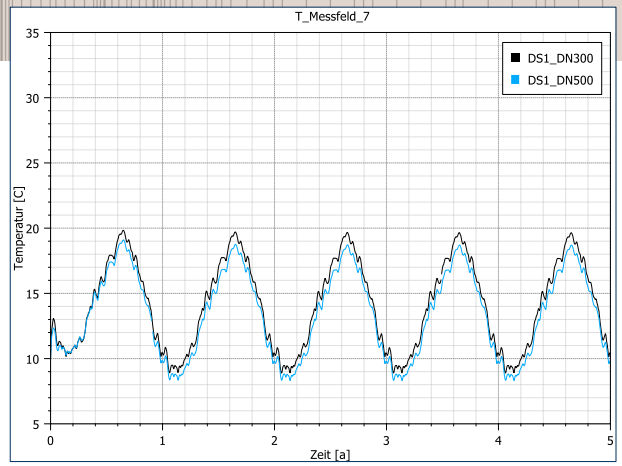


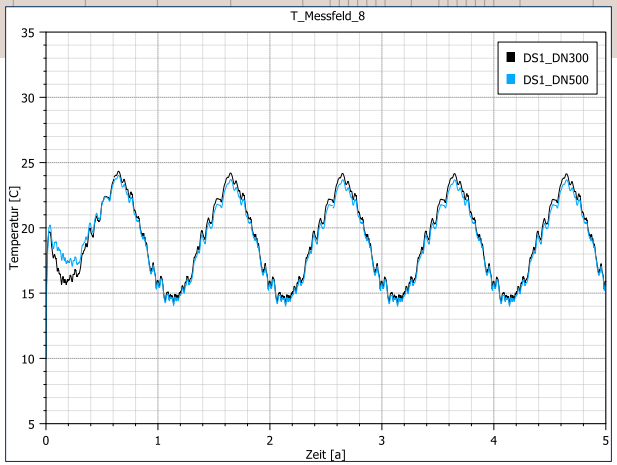


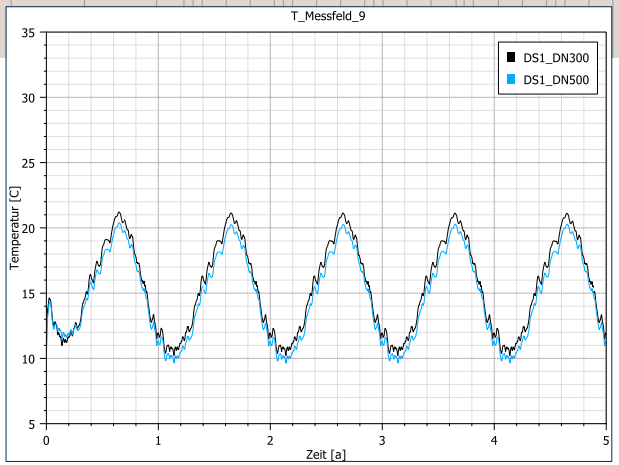


Vergleiche T_Messfeld DS1 DN300-500, HKL 100-70









Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

https://www.g-wt.de/wer-wir-sind/innovationszentren/innovationszentrum-bauklimatik-und-bauphysik-professor-grunewald

FW-Vegetation Wurze
Wärmefelder Wurzels
Szenarienanalyse Wu
FW-Vegetation Wurze
Wärmefelder Wurzels
Szenarienanalyse Wu
FW-Vegetation Wurze
Wärmefelder Wurzels
Szenarienanalyse Wu
FW-Vegetation Wurze

www.energieeffizienzverband.de