

Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn

Pilotprojekt

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 153

bast

Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn

Pilotprojekt

von

Manfred Eilers
Heinz Friedrich
Bert Quaas
Eugen Rogalski

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 153

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Berichte der **Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt F1100.2209007
Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn
– Pilotprojekt

Referat

Stahlbau, Korrosionsschutz, Brückenausstattung

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-511-8

Bergisch Gladbach, April 2020



Kurzfassung – Abstract

Pilotprojekt Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn

Bei Fahrbahnoberflächen von Brücken kommt es schneller zur Bildung von Glätte als auf Straßenabschnitten mit direktem Kontakt zum Erdboden. Insbesondere bei Brücken an ungünstigen Standorten wie in der Nähe von Gewässern oder in Einschnitten besteht vor allem im Spätherbst und im zeitigen Frühjahr eine besondere Gefahr für die Verkehrsteilnehmer.

Dem erhöhten Sicherheitsrisiko wird in der Regel mit einem intensivierten Winterdienst begegnet, was allerdings einen überdurchschnittlich hohen Zeitaufwand und Personaleinsatz bedeutet. Taumittelsprühanlagen können zu einer Entlastung führen, sind jedoch aufgrund ökologischer und ökonomischer Bedenken umstritten. Eine Alternative stellt die Temperierung der Fahrbahn dar, die im BAST-Bericht B 87 „Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie“ ausführlich erläutert ist.

Beim Ersatzneubau der Brücke über den Elbe-Lübeck-Kanal in der Ortslage Berkenthin kam erstmals in Deutschland eine mittels Geothermie temperierte Fahrbahnplatte zum Einsatz. Im Rahmen der fachtechnischen Begleitung dieser Pilotanwendung erfolgten umfangreiche Temperaturmessungen an der alten Brücke, und es wurden Einbau sowie Inbetriebnahme der Temperierungseinrichtung bei der neuen Brücke dokumentiert.

Zwei Aspekte stellen dabei eine grundlegende Innovation bei der Temperierung von Fahrbahnbelägen dar. Zum einen wurden die Rohrregister erfolgreich „schwimmend“ inmitten des Asphaltkörpers platziert, und zum anderen wird die Anlage über ein Mess-, Steuer- und Regelungssystem betrieben, sodass eine Temperierung nur im Bedarfsfall erfolgt.

Die ursprünglich vorgesehene vergleichende Betrachtung des Temperaturverhaltens konnte in Ermangelung geeigneter Messdaten der neuen Brücke nicht erfolgen. Somit war eine quantitative Bewertung der temperierten Fahrbahn nicht möglich.

Ungeachtet dessen werden aus den gewonnenen Erkenntnissen bautechnische Empfehlungen abge-

leitet, die sich für ähnliche Maßnahmen als hilfreich erweisen dürften.

Der Originalbericht enthält als Anhang einige ausgewählte Temperaturverläufe und eine gutachterliche Stellungnahme zum thermischen Verhalten von beheizten Fahrbahnplatten und deren Temperierungssystem auf Brücken.

Pilot project canal bridge Berkenthin with road surface heating

For road surfaces on bridges there exists the risk of premature icing compared to roads in contact with the ground. Particularly in the case of bridges sited at unfavourable locations, such as close to bodies of water or in ice cuttings, there is a high risk for road users – especially in late autumn and early spring.

This increased safety risk is usually countered by means of intensified winter road maintenance, but this requires a disproportionately high degree of time and personnel deployment. Although automatic spray technology systems can alleviate the problem, they are controversial for ecological and economic reasons. An environmentally friendly alternative is offered by the road surface temperature control procedure, which is comprehensively explained in BAST Report B 87 “Preventing the formation of ice on bridges by using geothermy”.

The first road surface heating in Germany has been implemented in the course of rebuilding a bridge crossing the Elbe-Lübeck channel in the city of Berkenthin. Technical and scientific steering included comprehensive thermal measurements on the old bridge as well as a documentation of construction and operation.

Two aspects are considered as fundamental innovation in the technique of road surface heating: a) the tubes were successfully placed in the middle of the asphalt and b) the facility operates by a measuring and control system, so that heating is in process only if necessary.

There was no adequate data of the new bridge available in order to compare the thermal behavior of the old and the new structure. Subsequently a quantitative examination has not been possible.

Nevertheless, recommendations for structural details are provided with the objective to support similar projects.

The original report contains an appendix with selected temperature curves and an expert's report on thermal behavior of heated carriageways and their tempering system on bridges.

Inhalt

1	Einleitung	7	5	Temperaturverhalten	13
1.1	Glättevermeidung auf Brücken.....	7	5.1	Alte Brücke.....	13
1.2	Kanalbrücke Berkenthin.....	7	5.1.1	Sensorkonzept.....	13
			5.1.2	Messergebnisse.....	14
2	Ziel und Aufgabenstellung	8	5.2	Neue Brücke.....	16
2.1	Ziel.....	8	5.3	Gegenüberstellung alte – neue Brücke.....	16
2.2	Aufgabenstellung.....	8			
3	Rohrregister	8	6	Schlussfolgerungen und Ausblick	17
3.1	Allgemeines.....	8	6.1	Allgemeines.....	17
3.2	Material.....	8	6.2	Voraussetzungen ZIE.....	17
3.3	Rohrdurchmesser.....	8	6.3	Empfehlungen für Folgeprojekte.....	18
3.4	Positionierung (vertikale Lage und Rohrabstand).....	9	6.4	Fazit.....	18
3.5	Ausrichtung.....	9			
3.6	Befestigung.....	10	Literatur		18
4	Heizung/Regelungssystem	11	Bilder		19
4.1	Allgemeines.....	11	Anhang A: Temperaturverläufe		20
4.2	Parameter.....	11			
4.3	Wärmepumpe.....	12			
4.4	Steuerung.....	12			

Der Anhang B zum Bericht ist im elektronischen BAST-Archiv ELBA unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de> abrufbar.

1 Einleitung

1.1 Glättevermeidung auf Brücken

Bei Fahrbahnoberflächen von Brücken kommt es schneller zur Bildung von Glätte als auf Straßenabschnitten mit direktem Kontakt zum Erdboden. Insbesondere bei Brücken an ungünstigen Standorten wie in der Nähe von Gewässern oder in Einschnitten besteht vor allem im Spätherbst und im zeitigen Frühjahr eine besondere Gefahr für die Verkehrsteilnehmer. Beispiel für einen schwerwiegenden Unfall ist der blitzeisbedingte Absturz eines Lkw von der Talbrücke Triwalker Graben der Bundesautobahn A 20 bei Wismar im Jahr 2007 [1].

Der besonderen Gefährdung wird in der Regel mit einem intensivierten Winterdienst begegnet, was allerdings einen überdurchschnittlich hohen Zeitaufwand und Personaleinsatz bedeutet. Taumittelsprühanlagen können zu einer Entlastung führen, sind jedoch aufgrund ökologischer und ökonomischer Bedenken umstritten. Eine Alternative stellt die Temperierung der Fahrbahn durch die Nutzung von Geothermie dar. Bei der Erneuerung der Straßenbrücke B 208/Elbe-Lübeck-Kanal in der Ortslage Berkenthin im Kreis Herzogtum Lauenburg wurde im Rahmen eines Pilotprojekts das neue Bauwerk mit einer solchen Temperierungsanlage ausgestattet [2].

1.2 Kanalbrücke Berkenthin

Die im Jahr 1900 errichtete Stahlbrücke über den Elbe-Lübeck-Kanal im Zuge der Bundesstraße B 208 in der Ortslage Berkenthin musste erneuert werden, da sie das Ende ihrer Lebensdauer erreicht

hatte. Außerdem genügte sie in der Tragfähigkeit sowie in ihren Abmessungen nicht mehr den Anforderungen sowohl des Straßen- als auch des Schiffsverkehrs (Bild 1) [2].

Bei dem neuen Bauwerk handelt es sich um eine Stahlverbund-Stabbogenbrücke mit aufgelösten, tiefgegründeten Widerlagern. Die Stützweite beträgt 59 m, die Breite zwischen den Geländern 13,85 m. Damit sich der Neubau harmonisch in das Ortsbild der Gemeinde Berkenthin einfügt, ist der Bogen bewusst flach gehalten und die Widerlager wurden ortstypisch verblendet (Bild 2).

Die Kanalbrücke Berkenthin liegt in einer Senke und überquert den Elbe-Lübeck-Kanal. Daher herrschen im Bereich der Brücke oftmals hohe relative Luftfeuchten, die vor allen Dingen im Frühjahr und im Herbst zu Nebel- und Taubildung führen. Daraus resultiert für die Brücke ein zu erwartendes hohes Vereisungsrisiko.

Mit dem Ziel der Vermeidung glättebedingter Unfälle wurde für diese Brücke ein neues Konzept der geothermischen Temperierung der Fahrbahn mittels Heizregister entwickelt. Hierbei soll vorausschauend die Glättebildung auf der Fahrbahn durch Wärmezufuhr in den Brückenbelag verhindert werden. Darüber hinaus kann der Brückenbelag im Sommer durch Wärmeabführung gekühlt werden, um eine Spurrinnenbildung zu vermeiden. Damit sich die Beheizung der Brücke dauerhaft wirtschaftlich und umweltfreundlich betreiben lässt, wurde von Anfang an auf die Nutzung des Untergrundes zur Bereitstellung von gleichmäßig temperiertem Wasser gesetzt.

Die Verkehrsfreigabe der neuen Brücke erfolgte am 22.12.2010. Während des anschließenden Betriebs



Bild 1: Alte Kanalbrücke



Bild 2: Neue Kanalbrücke

wurde die Steuerung in mehreren Schritten optimiert, um die Reaktionszeiten zu verkürzen. Nach fünfjährigem Betrieb kann die Funktionalität der Temperierungseinrichtung bestätigt werden [3].

2 Ziel und Aufgabenstellung

2.1 Ziel

Die Zielsetzung bei diesem Projekt ist, das Bauverhalten der Kanalbrücke Berkenthin mit integrierter Temperierung bei der Planung, Umsetzung und im Betrieb fachtechnisch zu begleiten. In diesen drei Punkten sollen Erfahrungen gesammelt und dokumentiert werden. Auf Grundlage dieser Erfahrungen sollen Empfehlungen für weitere derartige Bauverhalten gegeben werden.

2.2 Aufgabenstellung

Wesentliche Aufgaben bestehen darin, das Temperaturverhalten des Brückenbelages auf der alten Brücke zu erfassen und den Einbau und den späteren Betrieb der Temperierungsanlage auf der neuen Brücke zu dokumentieren und zu bewerten sowie den Nutzen der Maßnahme zu quantifizieren. Im Fokus stehen dabei die Rohrregister, das Regelungssystem und das Temperaturverhalten des Brückenbelags.

Neben dem Nutzen bei möglichen Folgeanwendungen speziell im Brückenbau bilden die Erkenntnisse eine richtungweisende Grundlage für die Temperierung von Fahrbahnen im Straßenwesen allgemein.

3 Rohrregister

3.1 Allgemeines

Die Rohrregister müssen eine gleichmäßige und effiziente Temperierung der Fahrbahnoberfläche gewährleisten und gleichzeitig den unterschiedlichsten Beanspruchungen standhalten wie z. B. dem Einbau von Gussasphalt. Die erforderlichen Eigenschaften stehen in Korrelation mit verschiedenen Parametern: Material, Durchmesser, Positionierung, Ausrichtung und Befestigung. Neben einer Beschreibung der beim Pilotprojekt gewählten Variante wird gegebenenfalls auch auf mögliche Alternativen eingegangen.

3.2 Material

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Vermeidung von Glatteisbildung auf Brücken“ [4] wurden mehrere auf dem Markt verfügbare Rohre aus unterschiedlichen Materialien untersucht. Als beste Variante haben hier PE-Xa Rohre mit Aluminiumummantelung abgeschnitten (Bild 3), die nicht nur den thermischen Einwirkungen von 230 °C heißem Gussasphalt standhalten, sondern auch ohne aufwendige Hilfsmittel gebogen werden können (Bild 4). Beim Einsatz in Berkenthin wurden die positiven Eigenschaften dieses Materials bestätigt.

3.3 Rohrdurchmesser

Es gibt viele Aspekte, die bei der Wahl des Rohrdurchmessers relevant sind. Wenn der Durchmesser klein ist, können auch kleine Radien eingebaut und enge Rohrabstände realisiert werden. Zugleich werden die Störungen im Asphalt geringer. Aller-



Bild 3: PE-Xa-Rohr mit Aluminiumummantelung



Bild 4: Rohrbiegung

dings steigt dadurch der Energieaufwand für die Zirkulation des Mediums, und der Wärmetransport zwischen Rohr und Asphalt wird beeinträchtigt. Bei größeren Durchmessern verhält es sich genau entgegengesetzt.

Basierend auf den Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt [4] und aufgrund von Erfahrungen aus den Niederlanden wird ein Rohrdurchmesser von 20 mm empfohlen. Derartige Systeme werden für die Gebäudetemperierung verwendet und stehen auf dem freien Markt zu Verfügung.

3.4 Positionierung (vertikale Lage und Rohrabstand)

Die Wärmeausbreitung hin zur Fahrbahnoberfläche ist abhängig von der vertikalen Lage der Rohre und dem Rohrabstand. Um eine möglichst gleichmäßige Oberflächentemperatur zu erreichen, sollte der Rohrabstand nicht mehr als 10 cm betragen. Im Bild 6 ist eine Wärmebildaufnahme zu sehen, die eine Oberfläche zeigt, die mit zwei verschiedenen Rohrabständen (links 10 cm bzw. rechts 15 cm) angefertigt wurden ist. Auf der rechten Seite ist deutlich zu sehen, dass der Rohrabstand von 15 cm zu einer inhomogenen Temperaturverteilung an der Oberfläche führt. Bei der vertikalen Positionierung der Rohrlage stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Das Rohrregister kann entweder auf der Dichtungsschicht (in der Regel Bitumen-Schweißbahn) oder auf der Gussasphalt-Schutzschicht angeordnet werden. Die Anordnung des Rohrregisters auf der Dichtungsschicht hat sich als nicht zielführend erwiesen. Zum einen vergrößern sich aufgrund des großen Abstandes zur Belagsoberfläche die Reaktionszeiten deutlich, und es kommt zu sehr hohen

Wärmeverlusten an der Unterseite der Fahrbahntafel. Zum anderen ist eine ausreichende Befestigung des Rohrregisters auf der Dichtungsschicht ohne deren Beschädigung nicht zu realisieren.

Optimal ist die Anordnung des Rohrregisters etwa in der Mitte des Belags auf der Schutzschicht. Dabei kann das Rohrregister entweder in einer in der Dicke vergrößerten Deckschicht oder in einer Zwischenschicht eingebaut werden (Bild 5). Durch die Nähe zur Belagsoberfläche ergibt sich eine ausreichend kurze Reaktionszeit. Andererseits bleibt eine ausreichende Asphaltüberdeckung, sodass Beschädigungen durch den Verkehr weitgehend ausgeschlossen sind. Es besteht später auch die Möglichkeit, ggf. die Deckschicht zu erneuern, ohne das Rohrregister zu beschädigen.

3.5 Ausrichtung

Beim Bau der Brücke in Berkenthin wurden ca. 6.000 m Rohre längs in Fahrtrichtung verlegt und diese in 46 Registerleitungen auf vier regelbare Hauptzirkulationskreisläufe aufgeteilt. Grundsätz-

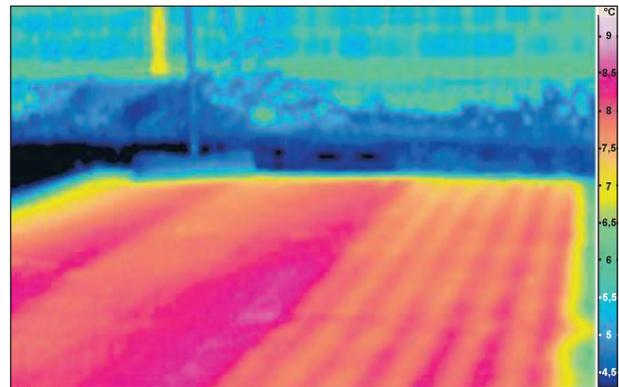


Bild 6: Infrarot-Aufnahme der Testfläche

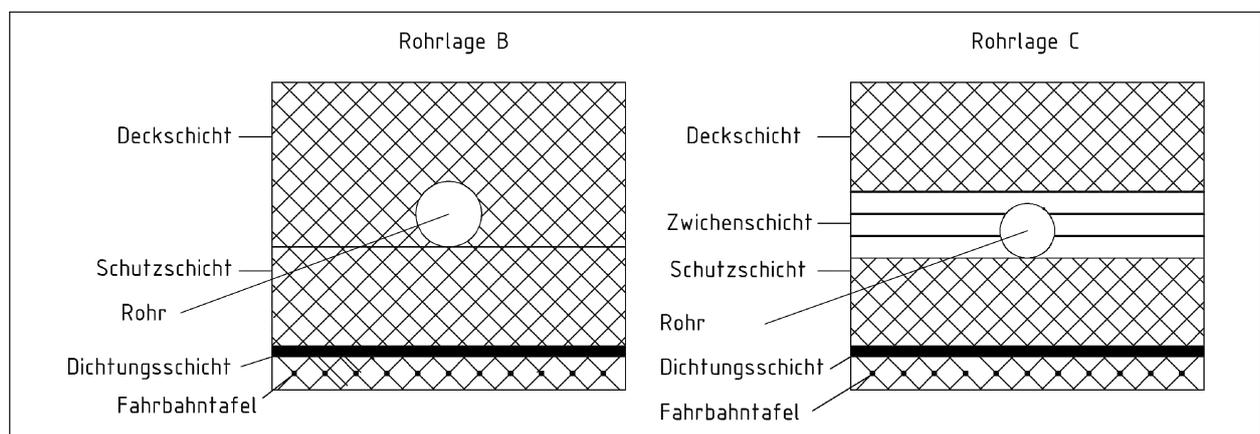


Bild 5: Positionierung der Rohre innerhalb des Schichtenpaketes

lich besteht auch die Möglichkeit, das Rohrregister quer zur Fahrtrichtung auszurichten. Abhängig von der Ausrichtung ergeben sich jeweils verschiedene Vorteile und Einschränkungen.

Bei einer Längsausrichtung lässt sich das System so aufteilen, dass einzelne Fahrstreifen unabhängig voneinander gesteuert werden können. Damit besteht auch die Möglichkeit, bei einer Fehlstelle oder einem Defekt im Rohrsystem separate Fahrstreifen für eine Instandsetzung zu sperren. Die Verteiler der einzelnen Kreisläufe können an einem Ende der Brücke bzw. Brückenkappe montiert werden. Darüber hinaus erfahren die Rohre statisch gesehen günstigere Beanspruchungen, da eine Scheiteldruckbelastung der Rohre durch das rollende Rad günstiger ist als Einwirkungen quer zur Rohrachse.

Quer ausgerichtete Rohrregister wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „Gussasphalt mit integrierten Rohrregistern zur Temperierung von Brücken“ [5] auf einer Brücke im Zuge der L 150 über die BAB A 555 untersucht. Im Fokus stand dabei primär die Beurteilung des Verhaltens der Straßenoberfläche unter realen Verkehrsbedingungen. Hinsichtlich des Einbaus und der Dauerhaftigkeit konnte die grundsätzliche Praxistauglichkeit von quer zur Fahrtrichtung ausgeführten Rohrregistern nachgewiesen werden.

3.6 Befestigung

Bei der Art der Befestigung der Rohrregister auf der Unterlage wurden in [4] die folgenden drei Varianten betrachtet:

Variante 1: Verwendung eines Befestigungsgitters aus Kunststoff

Bei dieser Variante werden Kunststoffgitter verwendet, in die sich die Kunststoffrohre in einem definierten Abstand einklipsen lassen (Bild 7). Die einzelnen Elemente des Kunststoffgitters lassen sich untereinander verbinden, sodass eine flächige und gleichmäßige Verlegung der Rohrregister gewährleistet ist. Diese Gitter wurden für den Einbau von Rohrregistern in Walzasphaltschichten konzipiert, wobei durch die konstruktive Ausbildung des Kunststoffgitters ein Aufschwimmen der Rohrregister während des Walzasphalteinbaus verhindert wird. Theoretisch können diese Kunststoffgitter auch zum Einbau der Walzasphaltschicht befahren werden.

Beim Gussasphalteinbau besteht bei der Verwendung dieser Befestigungsgitter die Gefahr, dass die Rohrregister incl. Befestigungsgitter aufschwimmen [4]. Um dies zu verhindern, wäre eine ausreichende Befestigung der Befestigungsgitter auf der Gussasphalt-Schutzschicht notwendig. Außerdem haben die Untersuchungen gezeigt, dass sich der Asphalt nicht ausreichend mit dem Kunststoffgitter verbindet und insbesondere unter den Querstegen des Befestigungsgitters Hohlräume entstehen. Dies führt zu einer nicht tolerierbaren Schwächung des Belagsaufbaus.

Variante 2: Fixieren in der Schutzschicht mit Befestigungsmitteln

Eine sichere aber sehr aufwändige Befestigung der Rohrregister stellt die Fixierung mittels aufgeschraubter oder aufgenagelter Metalllaschen dar (Bild 8). Zeitsparend ist das Aufschießen der Metalllaschen mittels Nagelpistolen auf die ausgehärtete

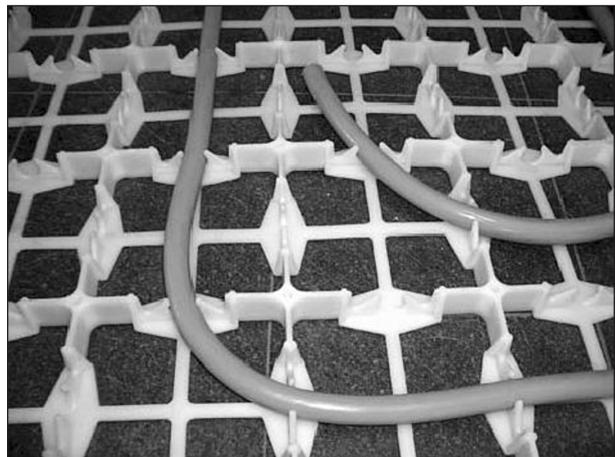


Bild 7: Befestigungsvariante 1



Bild 8: Befestigungsvariante 2



Bild 9: Befestigungsvariante 3

Gussasphalt-Schutzschicht, wobei darauf geachtet werden muss, dass durch die Nägel die Dichtungsschicht nicht verletzt wird.

Durch dieses Verfahren werden die unvermeidbaren Störstellen in den Gussasphaltschichten minimiert. Da die Voruntersuchungen zum Haftverhalten der Asphalt-Deckschicht an der mit Rohren versehenen Schutzschicht bei dieser Variante durchweg positiv waren [5], wurde dieses Verfahren beim Einbau der Rohrregister bei der Brücke in Berkenthin angewendet.

Variante 3: Befestigung der Rohre an einem Metallgitter

Als weitere Variante bietet sich die Befestigung der Rohrregister an Metallgittern (z. B. Baustahlmatten) an. Diese Metallgitter können entweder nachträglich mit Schrauben oder Nägeln an der Gussasphalt-Schutzschicht befestigt werden, oder sie werden unter Verwendung angeschweißter Abstandhalter direkt nach dem Einbau in die noch weiche Gussasphalt-Schutzschicht eingelassen (Bild 9).

4 Heizung/Regelungssystem

4.1 Allgemeines

Der effiziente und wirtschaftliche Betrieb einer Fahrbahntemperierung erfordert ein Mess-, Steuer und Regelungssystem (MSR), das auf die projektspezifischen Anforderungen angepasst ist. Dabei sollte eine temporäre Beheizung der Brücke angestrebt werden, die eine Anpassung der Verhältnisse auf der Brücke an die Oberflächenbedin-

gungen des Belages vor und hinter der Brücke in dem kritischen Temperaturbereich zwischen $+3\text{ °C}$ und ca. -3 °C sicherstellt. Bei Temperaturen unter -3 °C wird auf die weitere Heizung des Brückenbelages verzichtet, da bei diesen Temperaturen die Bedingungen auf und vor sowie hinter der Brücke gleichermaßen kritisch sind. Desweiteren besteht theoretisch auch die Möglichkeit, den Belag im Sommer zu kühlen, um Spurrinnen zu vermeiden.

Eine komplette Schnee- und Eisfreihaltung der Brücke in der kritischen Jahreszeit würde einen sehr hohen Energie- und Kostenaufwand bedeuten.

Um das Einfrieren des Heizmediums in den Rohrregistern auszuschließen, kommt ein Gemisch aus Wasser und Frostschutz in einem geschlossenen Kreislauf zum Einsatz. Diesem Heizmedium wird über einen Wärmetauscher aus dem Grundwasser Wärme zugeführt. Die relativ langen Rohrregister, die realisierbaren Durchflussmengen und die vor Ort anstehende Grundwassertemperatur von ca. 11 °C bewirken eine sehr träge Reaktion des Heizsystems. Daher wurde bei dem Pilotprojekt Berkenthin zusätzlich eine Wärmepumpe installiert, um die Temperatur des Heizmediums erhöhen zu können und die Reaktionszeit zu minimieren.

Als geothermische Wärmequelle dient ein ca. 86 m tiefer Brunnen, aus dem ganzjährig ca. 11 °C warmes Grundwasser gefördert wird. Durch einen Wärmetauscher wird dann die Wärme an ein Wasser-Glykol-Gemisch (sog. Fluid) abgegeben und ggf. mit einer mehrstufigen Wärmepumpe bis auf ca. 55 °C erhöht. Das so erwärmte Fluid wird über Zirkulationspumpen in das Fahrbahn-Temperierungs-Register (FTR) geleitet und die Fahrbahn erwärmt.

4.2 Parameter

Für die Temperierung der Fahrbahn auf der Brücke in Berkenthin sind in Abhängigkeit von der jeweiligen Anforderung fünf Modi vorgesehen:

„Aus“/„Standby-Betrieb“

Diese Betriebsarten basieren auf zwei möglichen Umgebungsbedingungen: Zum einen bei Fahrbahntemperaturen zwischen 3 °C und der Grenztemperatur 50 °C und zum anderen bei angeglichenen Fahrbahnsituationen Brücke und erdgebundene Fahrbahn (z. B. bei langanhaltenden Kälteperioden (Hochdruckwetterlagen)).

Freie Temperierung (Heizen)

In diesem Modus wird die Wärme aus dem Grundwasser über einen Wärmetauscher auf das Fluid übertragen. Mit dem so aufgewärmten Fluid wird der Fahrbahnbelag geheizt. Eine Erhöhung der Temperatur durch Wärmepumpen ist zunächst nicht vorgesehen. Aus Gründen der Energie- bzw. Kosteneinsparung ist für den Heizbetrieb vorzugsweise diese Temperierung anzustreben, da lediglich Hilfsenergie für die Förderung des Grundwassers und die Umwälzung der Solekreise in der Geoenergiezentrale aufgebracht werden muss.

Wird mit der freien Temperierung die notwendige Temperaturerhöhung im Fahrbahnbelag innerhalb eines definierten Zeitfensters nicht erreicht, werden die unten beschriebenen wärmepumpenunterstützten Temperierungen (Stufe 1 oder 2) aktiviert.

Freie Temperierung (Kühlen)

Bei Überschreiten einer festgelegten Grenztemperatur an der Oberfläche der Asphaltsschichten (z. B. 50 °C) ist eine Kühlung des Belages vorgesehen. Die Kühlung erfolgt mittels Abkühlen der Fluidtemperatur über die Wärmetauscher, eine weitergehende Kühlung ist nicht vorgesehen, aber auch nicht notwendig, da zwischen der Asphalttemperatur und der Temperatur des Fluids ein Temperaturunterschied von ca. 40 K besteht. Die Temperatur des Fluids sollte daher ausreichen, den Belag in einer ausreichend kurzen Zeitdauer zu kühlen.

Während des Kühlvorgangs ist eine Taupunktüberwachung wichtig, um eine Taubildung auf der Fahrbahnoberfläche und damit eine Verkehrsgefährdung zu verhindern. Hierzu werden die Asphalttemperaturen und die Außentemperaturen herangezogen und verglichen.

Temperierung wärmepumpenunterstützt (Verdichter 1)

Bei dieser Betriebsart wird durch das Zwischenschalten einer Wärmepumpe eine Heizleistung von ca. 65 kW (entspricht ca. 110 W/m²) in das FTR eingebracht, um eine schnellere Temperaturerhöhung im Fahrbahnbelag zu erreichen. Die Wärmepumpe arbeitet in diesem Modus im Teillastbetrieb. Dieser Teillastbetrieb realisiert nur eine geringfügige Leistungserhöhung, sollte aber in vielen Fällen eine ausreichende Temperaturerhöhung erreichen. Eine

Reduzierung des Pumpenvolumenstroms ist vorzusehen.

Temperierung wärmepumpenunterstützt (Verdichter 1 + 2)

Bei dieser Betriebsart wird mittels zweier Wärmepumpen eine zusätzliche Heizleistung von ca. 135 kW (entspricht ca. 225 W/m²) in das FTR eingebracht.

Die Wärmepumpe arbeitet dann im Vollastbetrieb. Der Vollastbetrieb soll aus energetischen Gesichtspunkten lediglich der Abdeckung von Leistungsspitzen und, wenn notwendig, zur Verkürzung der Angleichzeit dienen. Bei dieser Betriebsart wird durch die SPS fortlaufend die Möglichkeit des Übergangs in den Betriebsmodus 1 bzw. freie Temperierung geprüft. Diese Anforderungen sind im MSR-System implementiert [6].

4.3 Wärmepumpe

Wie unter Punkt 4.2 Parameter beschrieben, wird angestrebt, die freie Temperierung im Kühl- oder Heizbetrieb zu nutzen. Reicht bei einem raschen Absinken der Fahrbahntemperatur die von der freien Temperierung eingebrachte Energie nicht aus, um die Fahrbahn innerhalb einer bestimmten Zeit (ca. 15 min) auf den Sollwert von 2,0 °C zu heizen, wird die Wärmepumpe Stufe 1 bzw. Verdichter 1 bzw. ggf. die Wärmepumpe Stufe 2 zugeschaltet.

4.4 Steuerung

Zur Gewährleistung einer optimalen Anlageneffizienz wird die Temperierung der Brückenfahrbahn (Wärmezufuhr oder Kühlung) durch die Geoenergiezentrale und FTR mittels MSR bestimmt. Die intelligente Geothermiezentrale muss hier also nur so lange arbeiten, wie es entsprechend den Wetterbedingungen erforderlich und wirtschaftlich sinnvoll ist. Als Messgrößen werden dazu ausgewählte lokale meteorologische Parameter wie Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Niederschlag etc. durch eine eigens vor Ort eingerichtete Wettermessstation erfasst. Zusätzlich gehen Temperaturmessungen in der Fahrbahn bzw. im Fluidstrom des FTR in das MSR-Konzept ein. Dabei kommt erstmals für derartige Anwendungen eine aus der Wehrtechnik stammende spezielle Infrarotmesstechnik zum Ein-

satz, die zur großflächigen Erfassung der Fahr-
bahnoberflächentemperatur geeignet ist. Die wäh-
rend des Betriebes gemessenen und aufgezeichne-
ten Daten werden systematisch ausgewertet und
zur weiteren Präzisierung des intelligenten MSR
herangezogen. Dadurch kann eine vorausschauende
Steuerung der Geothermiezentrale erreicht und
die Glättebildung noch effizienter vermieden wer-
den.

5 Temperaturverhalten

5.1 Alte Brücke

5.1.1 Sensorkonzept

Um für eine Beurteilung der Wirksamkeit der Tem-
perierung des Brückenbelages auf der neuen Brü-

cke Vergleichsdaten zur Verfügung zu stellen, wur-
den an der alten Brücke über einen Zeitraum von
ca. 1 Jahr Temperaturmessungen durchgeführt. Die
Temperaturmessungen erfolgten in drei Messprofi-
len. Zwei dieser Messprofile lagen auf der Brücke
(etwa in der Mitte der Brücke (Q1) sowie in dem
Viertelpunkt auf der Seite Harmsdorf (Q2)), das
dritte Messprofil (Q3) diente als Referenz und lag im
Bereich der Fahrbahn der Strecke auf der Seite
Harmsdorf (siehe Bild 10).

Die Profile waren jeweils mit vier Oberflächensensoren
sowie einem Temperaturfühler in einer Tiefe von 2 cm
ausgestattet (Bilder 11 und 13). In dem
Messprofil Q2 wurde zusätzlich mit zwei weiteren
Oberflächenfühlern die Temperatur an der Unterseite
der Fahrbahnplatte gemessen. Desweiteren wurde
bei den Profilen Q2 und Q3 jeweils die Lufttemper-
atur ermittelt. Die Aufzeichnung der Signale er-

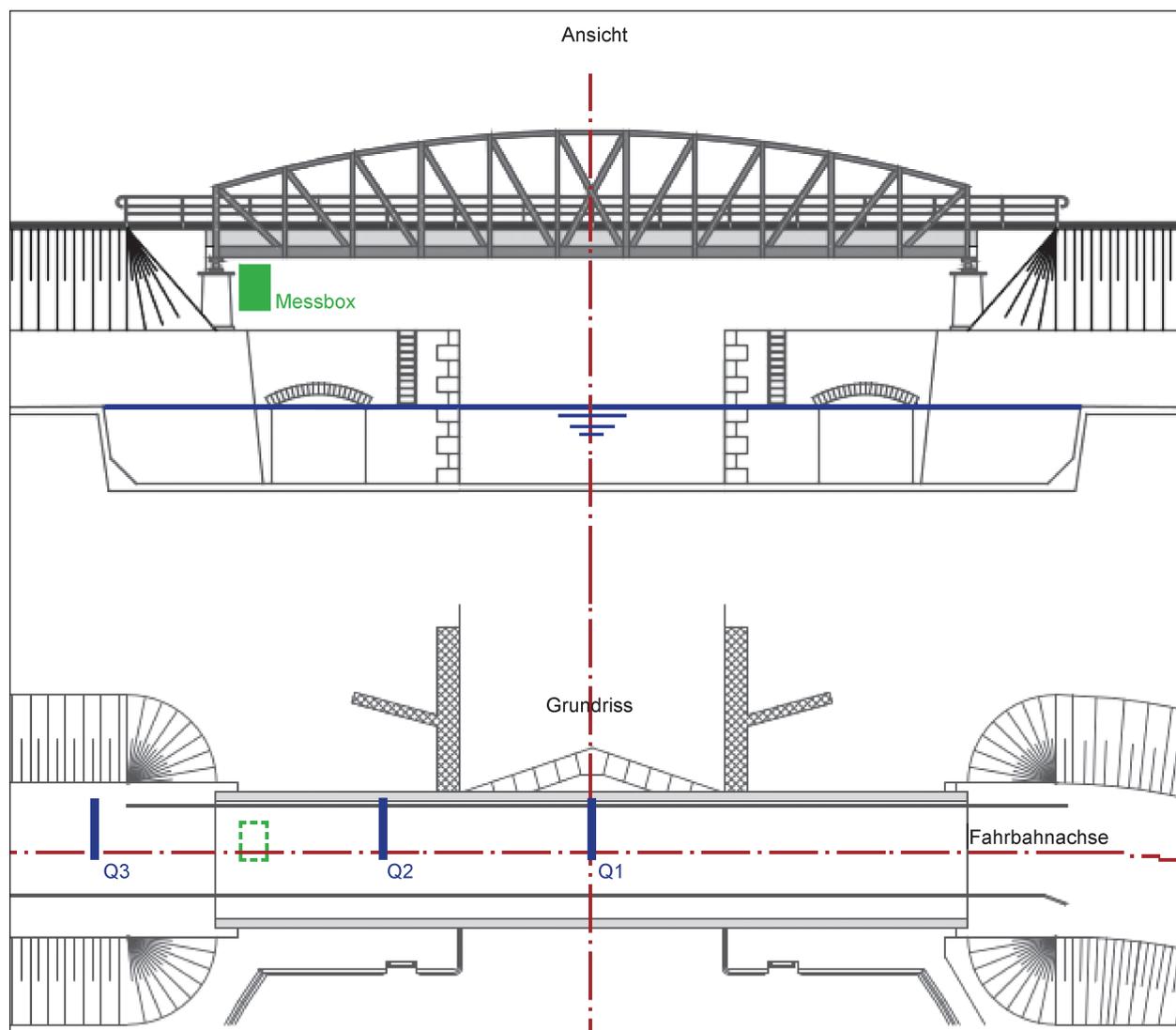


Bild 10: Lage der Querschnitte Q3, Q2, Q1



Bild 11: Sensoren und Verkabelung Q3, Q2, Q1

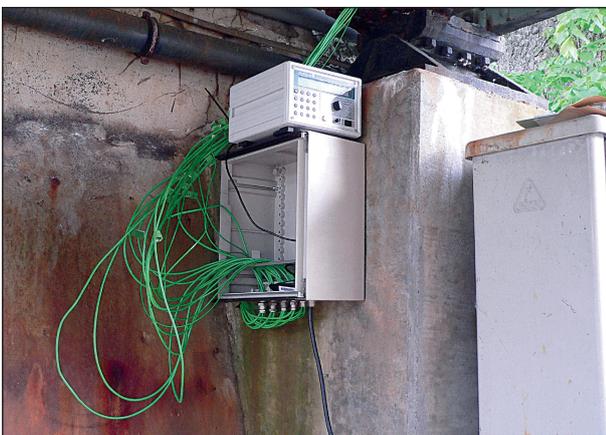


Bild 12: Messbox mit Datenlogger unter der Brücke

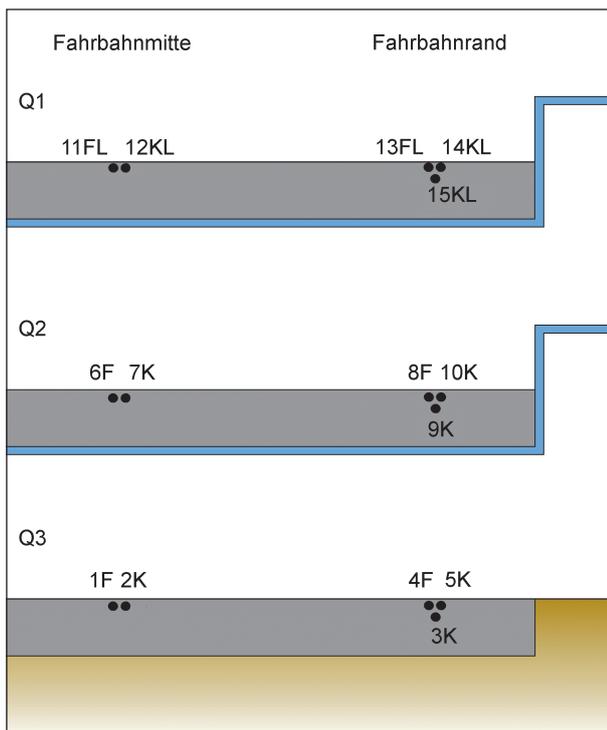


Bild 13: Lagen der Temperatursensoren

folgte mittels eines unter der Brücke installierten Datenloggers (Bild 12).

Die Messungen erstreckten sich über den Zeitraum vom 16.07.2009 bis zum 31.05.2010, wobei für die zu untersuchende Fragestellung insbesondere die Zeiträume interessant sind, bei denen sich die Temperaturen um den Gefrierpunkt bewegen. Im Anhang A sind 13 solcher Temperaturverläufe exemplarisch dargestellt, die für eine Untersuchung der Wirksamkeit der Belagstemperierung an der neuen Brücke geeignet scheinen.

5.1.2 Messergebnisse

Eine detaillierte Auswertung der Messergebnisse zeigt deutlich, dass eine generelle Aussage über das unterschiedliche Temperaturverhalten des Brückenbelages gegenüber dem Temperaturverhalten der freien Strecke nicht möglich ist. Das tatsächliche Temperaturverhalten hängt von vielen, auch lokalen Einflussgrößen ab. Neben der Lufttemperatur können Windgeschwindigkeit und Windrichtung, Bodentemperatur, Wassertemperatur, Sonneneinstrahlung und Abschattungen, Bewölkung oder auch der Verkehr einen Einfluss auf die Oberflächentemperatur haben. Diese Einflüsse können eine große Streuung der Oberflächentemperaturen hervorrufen, die sich z. B. im Bild 14 in den großen Temperaturunterschieden zwischen den jeweils an den Rändern der Profile gemessenen Temperaturen gegenüber den in der Fahrbahnmitte gemessenen Temperaturen zeigen. Insbesondere auf der Brücke wurden teilweise Temperaturunterschiede von bis zu 5 K zwischen der Temperatur in Fahrbahnmitte und der Temperatur am Fahrbahnrand festgestellt.

Nichtsdestotrotz konnten durch eine gezielte Auswertung Temperaturverläufe detektiert werden, bei denen die Gefahr einer vorzeitigen Vereisung der Fahrbahn auf der Brücke gegeben und damit der Einsatz der Brückenheizung angezeigt ist. In Bild 15 ist exemplarisch ein solcher Temperaturverlauf dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Oberflächentemperatur der Brückenfahrbahn (Q1 und Q2) deutlich schneller abkühlt als die Oberflächentemperatur der Fahrbahn der freien Strecke (Q3). Die kritische Temperatur von 0 °C wird auf der Brücke um ca. 20:30 Uhr und damit ca. zwei Stunden früher als auf der freien Strecke (ca. 22:30 Uhr) erreicht. Genau hier kann die Brückenheizung die Gefahr der vorzeitigen Vereisung vermeiden, indem durch den rechtzeitigen Start des Heizvorgangs eine

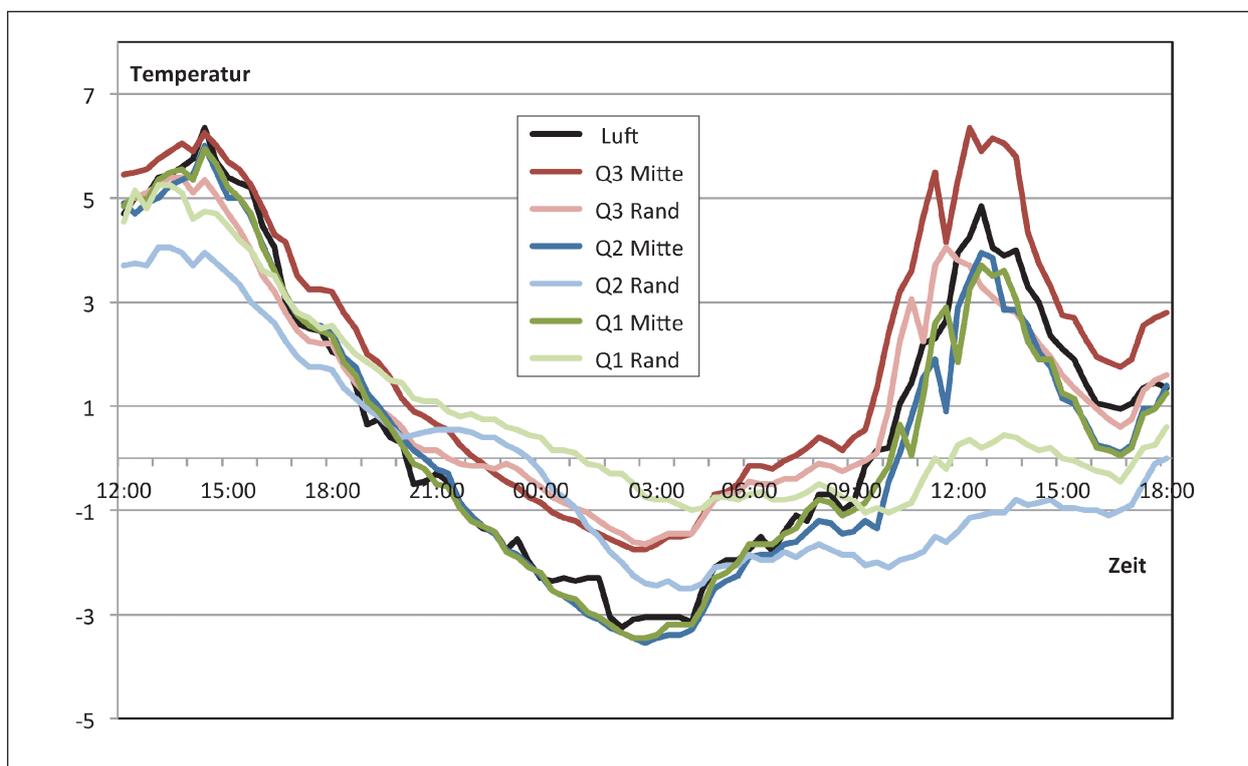


Bild 14: Temperaturverläufe 01.12.2009 12:00 h bis 02.12.2009 18:00 h

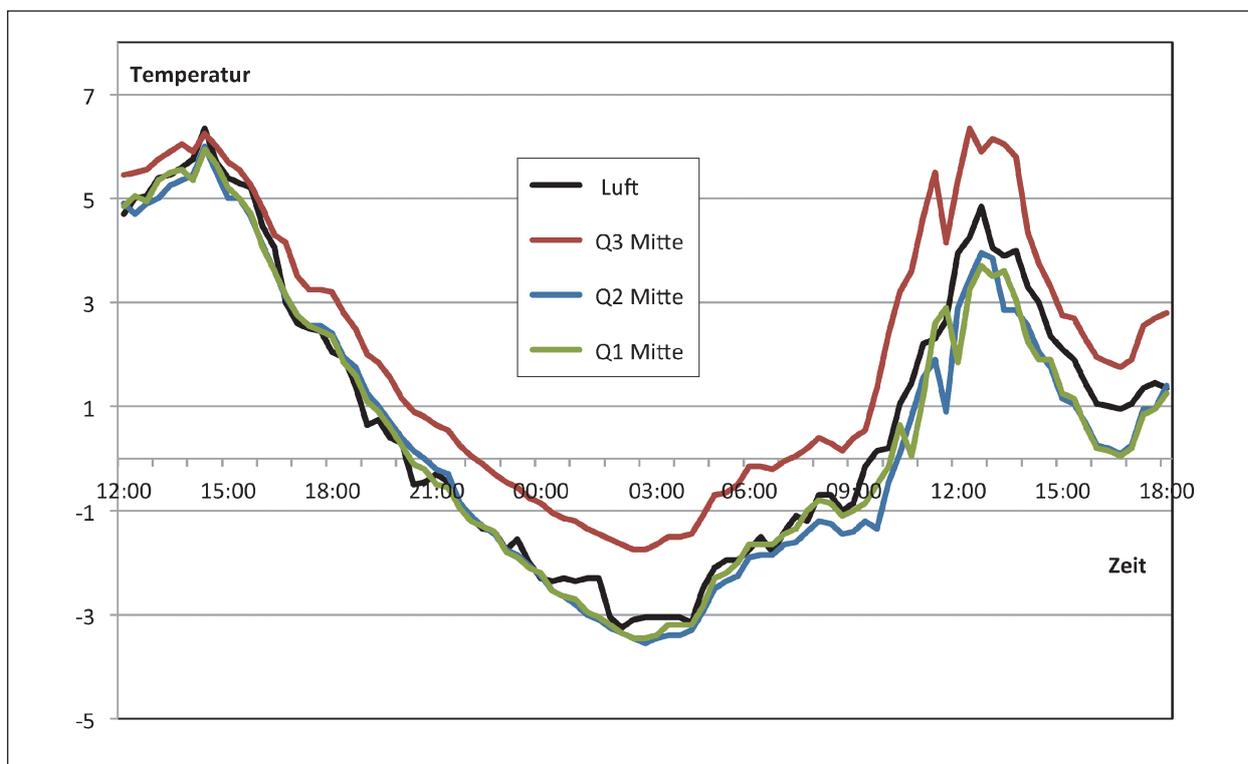


Bild 15: Temperaturverläufe 01.12.2009 12:00 h bis 02.12.2009 18:00 h (Fahrbahnmitte)

Angleichung der Oberflächentemperaturen auf der Brücke an die Oberflächentemperaturen auf der freien Strecke erfolgt. Z. B. würde bei einer eingestellten Temperaturschwelle von 3 °C der Heizvor-

gang um ca. 17 Uhr beginnen und es stünde ein Zeitraum von ca. 3,5 Stunden zur Verfügung, um die Temperaturen anzugleichen.

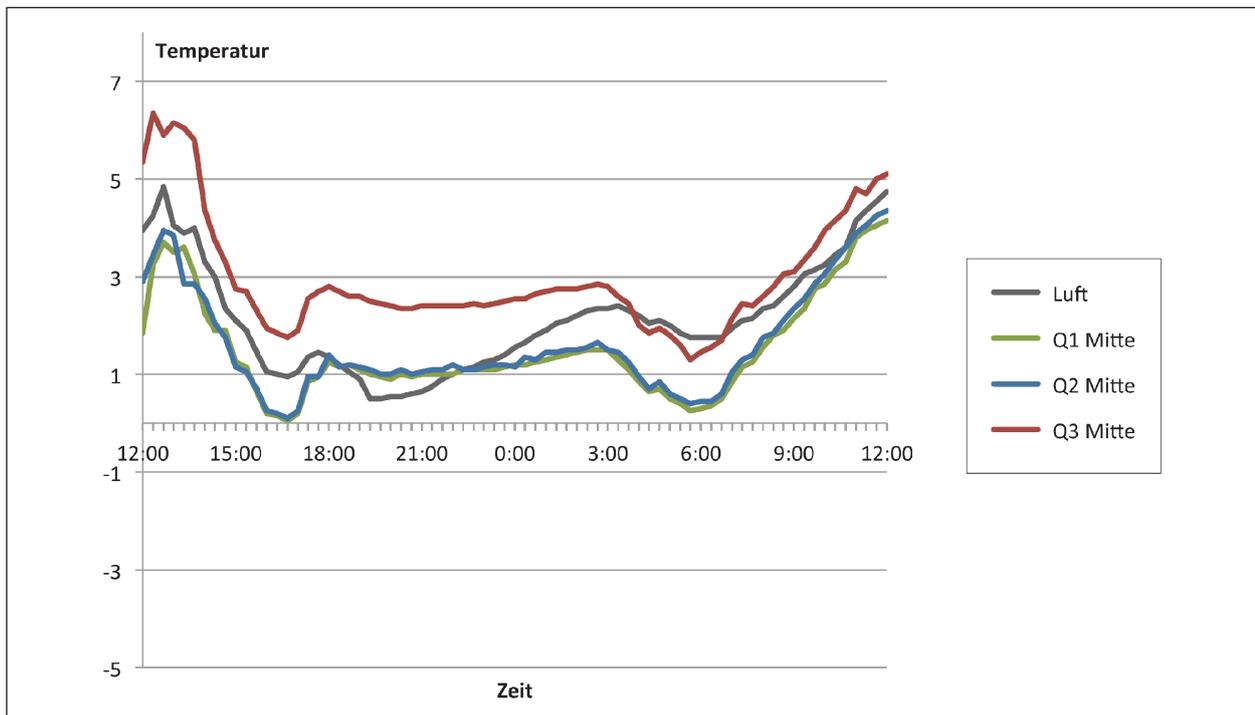


Bild 16: Temperaturverläufe 02.12.2009 12:00 h bis 03.12.2009 12:00 h (Fahrbahnmitte)

Man sieht im Bild 15 auch deutlich, dass die minimale Oberflächentemperatur auf der Brücke um bis zu 2 K unter der minimalen Oberflächentemperatur auf der freien Strecke liegen kann. Daraus können sich Situationen ergeben, bei denen die Oberflächentemperatur auf der freien Strecke noch knapp über dem Gefrierpunkt liegt, während die Oberflächentemperatur auf der Brücke bereits deutlich unter dem Gefrierpunkt liegt. Auch in solchen Situationen ist der Einsatz einer Brückenheizung sinnvoll.

Allerdings zeigen sich die Temperaturverläufe nicht immer so klar und eindeutig wie das Beispiel in Bild 15. Das wird in der Praxis dazu führen, dass in einigen Fällen der Brückenbelag geheizt wird, obwohl der tatsächliche weitere Temperaturverlauf eigentlich keine Beheizung erfordert. In Bild 16 ist ein solcher Temperaturverlauf dargestellt. Das Unterschreiten des Schwellenwertes von z. B. 3 °C würde um ca. 14 Uhr zum Einschalten der Brückenheizung führen, obwohl die kritische Temperatur von 0 °C später nicht unterschritten wird. In der Praxis wird man mit Sicherheit kein Risiko eingehen und die Brückenheizung lieber ein paar Mal zu oft einschalten, als ein Mal zu wenig.

Die Auswertungen zeigten aber auch, dass es Zeiträume gibt, in denen die Oberflächentemperaturen auf der freien Strecke permanent unterhalb der Oberflächentemperaturen auf der Brücke liegen. Die ist z. B. bei und nach langen Frostperioden der

Fall, bei denen die Oberflächentemperaturen auf der freien Strecke durch die im Untergrund gespeicherte Kälte gemindert werden.

5.2 Neue Brücke

Die Erfassung der meteorologischen Daten an der neuen Brücke erfolgt durch ein in sich geschlossenes Mess-, Auswerte- und Regelungssystem, wobei die Software ein internes Datenformat verwendet. Dieses Datenformat kann von anderen, üblicherweise für Auswertungen verwendeten Programmen nicht gelesen werden. Daher ist es bisher leider nicht gelungen, die gemessenen Daten in einem auswertbaren Datenformat zu erhalten. Vom Betreiber wird aber mitgeteilt, dass die Anlage funktioniert und weiterhin nicht gestreut werden muss; ein Grund für die Ausstattung mit Geothermie war die große Entfernung zur nächsten Straßenmeisterei. Früher war ein prophylaktisches Streuen notwendig, was nun nicht mehr praktiziert werden muss.

5.3 Gegenüberstellung alte – neue Brücke

Eine quantitative Bewertung der Maßnahme ist ohne Daten von der neuen Brücke nicht möglich.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

6.1 Allgemeines

Im Rahmen der oben beschriebenen Untersuchungen konnte eine Reihe von grundsätzlichen Anforderungen an Systeme zur Temperaturerhöhung in Fahrbahnbelägen nachgewiesen werden, die sich in einigen Fällen theoretisch auch auf die Heizung von Fahrbahnen auf der freien Strecke übertragen lassen. Allerdings gibt es bei Brückenbelägen eine Reihe von Besonderheiten, die diese Übertragbarkeit einschränken, hierzu zählen insbesondere die geringe Dicke des Brückenbelages (in der Regel ca. 7 cm), die Besonderheiten der Unterlage und die Anfälligkeit gegenüber schnellen Temperaturwechseln.

Bei der oberflächennahen Anordnung der Rohrregister besteht hinsichtlich der Temperierung der Fahrbahnoberfläche kein signifikanter Unterschied, aus welchem Material die Fahrbahnplatte besteht oder ob an der Unterseite eine Wärmeschutzisolierung montiert ist. Die Voraussetzungen und Empfehlungen gelten daher unabhängig vom Material der Fahrbahntafel.

Das Abkühlverhalten des Belages korreliert mit der Masse (des Brückenbelages und der Fahrbahntafel), die als Wärmepuffer zur Verfügung steht. Stahlbrücken sind aufgrund der geringen Masse der orthotropen Fahrbahntafel anfälliger für vorzeitige Vereisung als Verbund- oder Betonbrücken mit vergleichsweise dicken Betonfahrbahntafeln. Daher kann insbesondere bei Stahlbrücken der Einsatz von Temperierungsanlagen sinnvoll sein.

Primär eignen sich Temperierungsanlagen für den Einsatz bei neuen Brücken, bei denen die notwendigen Versorgungseinrichtungen schon bei der Planung berücksichtigt werden können. Aber auch bei bestehenden Brücken ist ggf. ein Einsatz denkbar.

Für die Temperierung der Fahrbahntafel ist die Art der Energiequelle unerheblich, vorausgesetzt, es steht jederzeit ausreichend Energie zur Verfügung. Varianten, die auf der Nutzung von Geothermie basieren, gelten aber als besonders umweltfreundlich und wirtschaftlich.

Für einen wirtschaftlichen Betrieb sollte die Temperierungsanlage nicht im Dauerbetrieb betrieben, sondern mittels eines für den jeweiligen Anwen-

dungsfall optimierten Mess-, Steuerungs- und Regelungssystems bedarfsgerecht gesteuert werden.

6.2 Voraussetzungen ZiE

Da es für Temperierungsanlagen auf Brücken bisher keine verbindlichen Regelungen gibt, ist für deren Realisierung eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) erforderlich. Zu diesem Zweck sollten im Vorfeld die Nachweise erbracht werden, dass ein erhöhtes Sicherheitsrisiko infolge vorzeitiger Vereisung existiert und dass eine geeignete Energiequelle zur Verfügung steht (hier: geothermische Nutzung des Untergrunds). Darüber hinaus sind mögliche Alternativen hinsichtlich Aufwand und Nutzen zu bewerten.

Nachweis eines erhöhten Sicherheitsrisikos infolge vorzeitiger Vereisung

Der Einsatz von Anlagen zur Glättevermeidung ist nur sinnvoll, wenn ein erhöhtes Sicherheitsrisiko infolge vorzeitiger Vereisung der Fahrbahnoberflächen besteht. Daher sollte in jedem Einzelfall ein entsprechender Nachweis geführt werden (z. B. anhand von Wetterdaten in Kombination mit der Dokumentation glättebedingter Unfälle).

Nachweis der Voraussetzungen für eine geothermische Nutzung des Untergrunds

Eine effektive Nutzung oberflächennaher geothermischer Energie ist abhängig von den meteorologischen, geologischen und topografischen Randbedingungen des Einzelfalls und bedarf sorgfältiger Untersuchungen im Planungsstadium. Als geeignete Lösungen zur Energieentnahme aus dem Erdreich bzw. dem Grundwasser kommen die folgenden Varianten infrage:

- a) Untergrund ohne Grundwasserfluss; Speicherung der Wärme im Erdreich,
- b) Untergrund ohne Grundwasserfluss; Speicherung der Wärme in einem Aquifer,
- c) Untergrund mit starkem Grundwasserfluss; Wärmeentnahme aus dem Grundwasser mittels Brunnen.

Als besonders wirtschaftlich hat sich im Rahmen des Projektes [4] die Variante c) erwiesen.

Für den Fall, dass andere Energiequellen genutzt werden sollen (Fernwärme o. ä.), ist ein entsprechender Nachweis erforderlich.

Bewertung möglicher Alternativen hinsichtlich Aufwand und Nutzen

Im Vorfeld eines Bauvorhabens sollten auch mögliche Alternativen hinsichtlich des Nutzens und des Aufwandes bewertet werden (z. B. intensivierter Winterdienst mit Einsatz von Glättemeldeanlagen, Taumittelsprühanlagen).

6.3 Empfehlungen für Folgeprojekte

Aus den Erfahrungen des Pilotprojekts incl. Voruntersuchungen lassen sich Hinweise und Empfehlungen für mögliche Folgeprojekte ableiten.

Aufgrund ihrer thermischen Widerstandsfähigkeit und ihres Verformungsvermögens wird für die Rohrregister in Asphaltbelägen die Verwendung von PE-Xa-Rohren mit Aluminiumummantelung empfohlen. Als Rohrdurchmesser hat sich ein Durchmesser von 20 mm bewährt.

Die Ausrichtung der Rohrregister kann entweder längs oder quer zur Fahrtrichtung erfolgen, wodurch sich jeweils verschiedene Vorteile und Einschränkungen ergeben. Eine konkrete Entscheidung ist projektspezifisch abhängig von Bauwerkslänge, Standort und den geothermischen Gegebenheiten am Einbauort zu treffen.

Die Positionierung erfolgt sinnvollerweise auf der Schutzschicht in einer zusätzlich einzuplanenden Zwischenschicht. Um eine gleichmäßige Wärmeverteilung an der Fahrbahnoberfläche zu erreichen, sollte der Abstand der Rohre untereinander 10 cm nicht überschreiten. Für die Befestigung beim Einbau haben sich aufgeschossene Rohrhalschellen bewährt.

Der Einsatz einer auf der Basis der Temperatur des Grundwassers betriebenen Brückenheizung ohne Zuhilfenahme einer Wärmepumpe gestaltet sich schwierig (Anhang B). Selbst bei einer Fluid-Temperatur von 12 °C mit hoher Fließgeschwindigkeit (400 l/h) und kurzer Leitungslänge (15 m) beträgt die Reaktionszeit zwei Stunden, um die Oberflächentemperatur von 0 °C auf 2 °C anzuheben. Bei der Nutzung von Grundwasser als Energieträger wird daher grundsätzlich der Einsatz einer Wärmepumpe empfohlen.

Für einen wirtschaftlichen Betrieb sollte auf jeden Fall der Einsatz einer projektspezifischen Steuerungsanlage vorgesehen werden.

6.4 Fazit

Zusammenfassend kann das Pilotprojekt Kanalbrücke „Berkenthin mit temperierter Fahrbahn“ als erfolgreich eingestuft werden [3].

Für einen Vergleich des Temperaturverhaltens zwischen der alten Brücke und der neuen Brücke steht zurzeit kein auswertbares Datenformat zur Verfügung. Dabei wären insbesondere die Betriebsphasen der Temperierungsanlage an der neuen Brücke von Interesse.

Für mögliche Folgeprojekte kann auf umfassende Empfehlungen zurückgegriffen werden.

Literatur

- [1] 10. Symposium Brückenbau in Leipzig, Ausgabe 4.2009/1.2010
- [2] MACKERT, Klaus-Ulrich: Die Brücke in Berkenthin (Landkreis Herzogtum Lauenburg) als Geothermie-Pilotprojekt; Straße und Autobahn; 2.2012
- [3] MACKERT, Klaus-Ulrich; KÜHL, Jens-Uwe: Geothermische Temperierung der Fahrbahntafel – Pilotprojekt Kanalbrücke Berkenthin; Straßenverkehrstechnik 5.2016
- [4] Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 87, Bergisch Gladbach, Mai 2011
- [5] Gussasphalt mit integrierten Rohrregistern zur Temperierung von Brücken, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 122, Bergisch Gladbach, November 2015
- [6] FREUNDL, Roland: Geothermiebrücke Berkenthin, igf Rostock, Ergebnisbericht 2011/2012

Bilder

- Bild 1: Alte Kanalbrücke
- Bild 2: Neue Kanalbrücke
- Bild 3: PE-Xa-Rohr mit Aluminiumummantelung
- Bild 4: Rohrbiegung
- Bild 5: Positionierung der Rohre innerhalb des Schichtenpaketes
- Bild 6: Infrarot-Aufnahme der Testfläche
- Bild 7: Befestigungsvariante 1
- Bild 8: Befestigungsvariante 2
- Bild 9: Befestigungsvariante 3
- Bild 10: Lage der Querschnitte Q3, Q2, Q1
- Bild 11: Sensoren und Verkabelung Q3, Q2, Q1
- Bild 12: Messbox mit Datenlogger unter der Brücke
- Bild 13: Lagen der Temperatursensoren
- Bild 14: Temperaturverläufe 01.12.2009 12:00 h bis 02.12.2009 18:00 h
- Bild 15: Temperaturverläufe 01.12.2009 12:00 h bis 02.12.2009 18:00 h (Fahrbahnmitte)
- Bild 16: Temperaturverläufe 02.12.2009 12:00 h bis 03.12.2009 12:00 h (Fahrbahnmitte)

Anhang A

Temperaturverläufe (alte Brücke)

Allgemein

In diesem Anhang werden exemplarisch Temperaturverläufe an der alten Brücke von Zeitabschnitten dargestellt, bei denen sich die Oberflächentemperaturen der Fahrbahn um den Gefrierpunkt bewegen und damit theoretisch die Gefahr einer Glättebildung gegeben ist. Die Anhänge A1 bis A13 (Bilder 1 bis 104) zeigen die Temperaturverläufe für 13 ausgewählte Zeitabschnitte jeweils von 12:00 Uhr bis 12:00 Uhr des Folgetags.

Basis dafür sind von der BASt an der alten Kanalbrücke Berkenthin im Zeitraum vom 16.07.2009 bis zum 31.05.2010 (vgl. Kapitel 5.1) durchgeführte Temperaturmessungen. Die Darstellungen enthalten ausschließlich Luft- und/oder Oberflächentemperaturen, da hier ein direkter Zusammenhang mit einer möglichen Glättebildung besteht. Weitere Messdaten (Blechtemperaturen, Asphalttemperaturen in etwa 2 cm Tiefe) wurden erfasst, sind aber bei dieser Auswertung nicht berücksichtigt. Einem Zeitabschnitt sind jeweils acht Bilder mit Temperaturverläufen zugeordnet: Luft und einzelne Querschnitte sowie deren Kombinationen.

Luft und einzelne Querschnitte

Die beiden gemessenen Lufttemperaturen zeigen meist einen sehr ähnlichen Verlauf und liegen in der gleichen Größenordnung (jeweils erstes Bild je Zeitabschnitt).

Bei den gemessenen Oberflächentemperaturen der einzelnen Querschnitte fällt auf, dass jeweils deutliche Unterschiede zwischen den Temperaturverläufen in Fahrbahnmitte und am Fahrbahnrand bestehen (siehe jeweils zweites, drittes und viertes Bild je Zeitabschnitt).

Kombinationen

Die Darstellung aller Temperaturverläufe (Luft + einzelne Querschnitte) ist aufgrund der großen Streuungen unübersichtlich und nur wenig aussagekräftig (jeweils fünftes Bild je Zeitabschnitt). Die Bildung von Mittelwerten bei benachbarten Sensoren führt zu einer leichten Verbesserung (jeweils sechstes Bild je Zeitabschnitt). Als deutlich übersichtlicher erweist sich die getrennte Betrachtung der Werte für Fahrbahnmitte und Fahrbahnrand (jeweils siebtes und achtes Bild je Zeitabschnitt).

A1 Temperaturverläufe 01.12.2009 12:00 h bis 02.12.2009 12:00 h

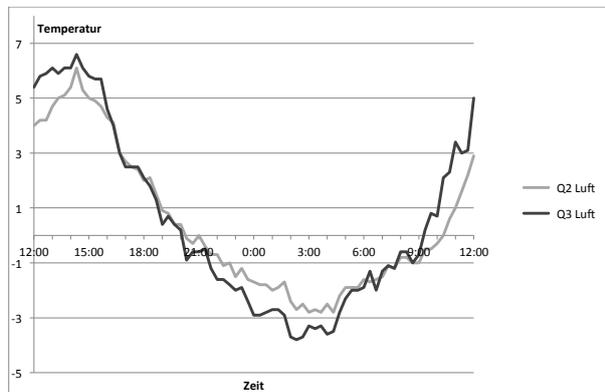


Bild 1: Lufttemperatur

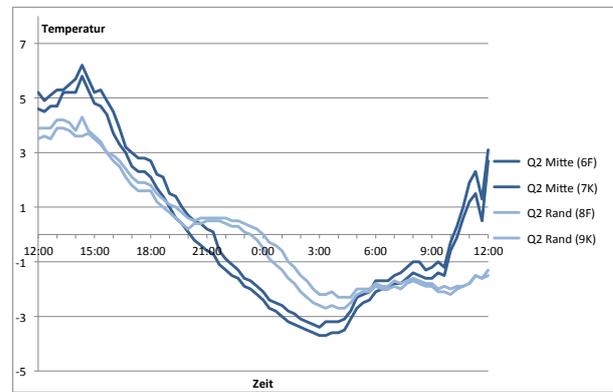


Bild 3: Querschnitt Q2

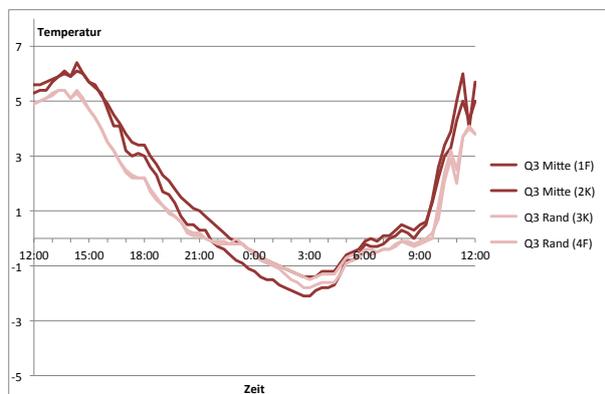


Bild 2: Querschnitt Q3

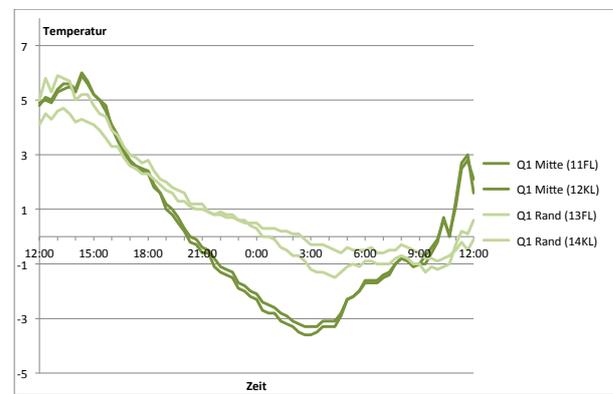


Bild 4: Querschnitt Q1

A1 Temperaturverläufe 01.12.2009 12:00 h bis 02.12.2009 12:00 h

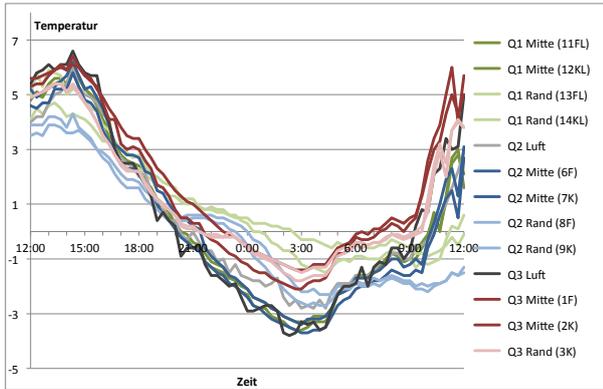


Bild 5: Querschnitte Q3, Q2, Q1

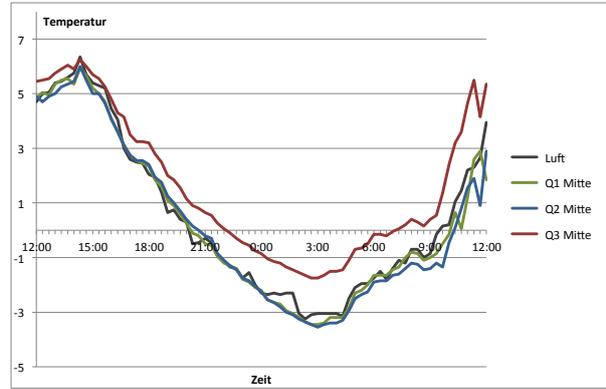


Bild 7: Fahrbahnmitte (Mittelwert)

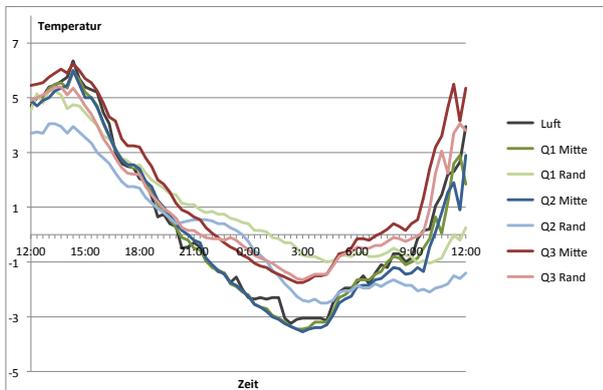


Bild 6: Querschnitte Q3, Q2, Q1 (Mittelwert)

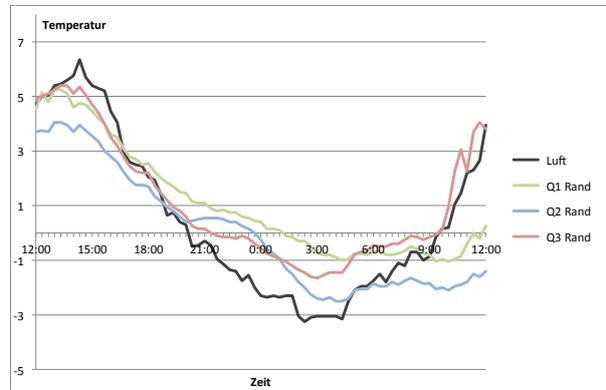


Bild 8: Fahrbahnrand (Mittelwert)

A2 Temperaturverläufe 02.12.2009 12:00 h bis 03.12.2009 12:00 h

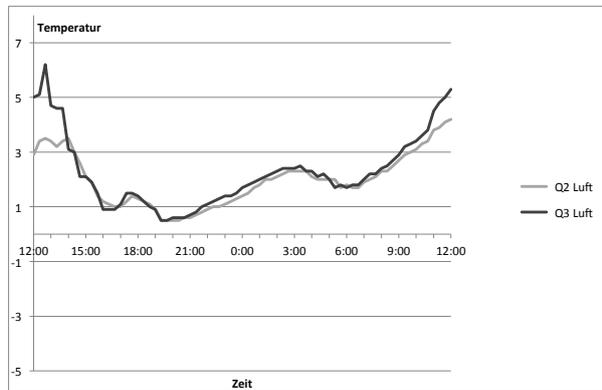


Bild 9: Lufttemperatur

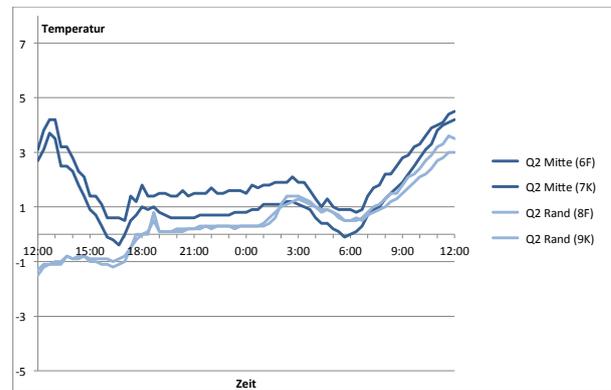


Bild 11: Querschnitt Q2

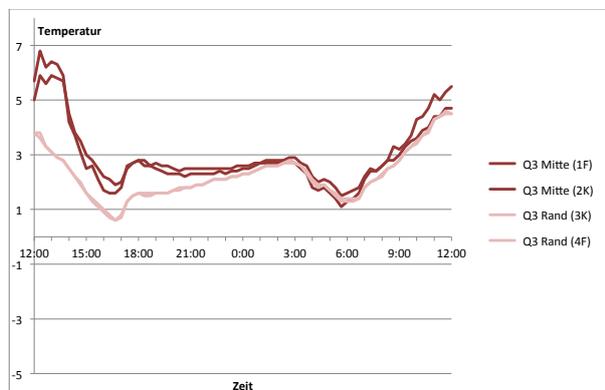


Bild 10: Querschnitt Q3

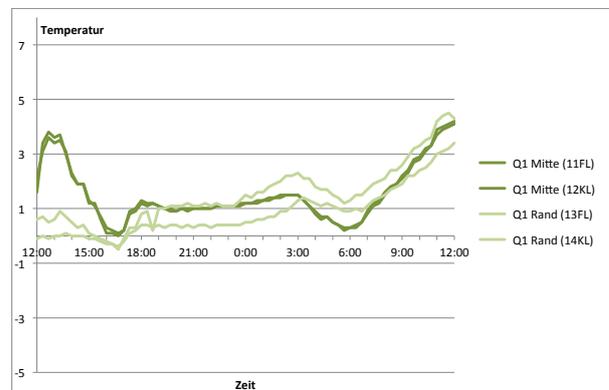


Bild 12: Querschnitt Q1

A2 Temperaturverläufe 02.12.2009 12:00 h bis 03.12.2009 12:00 h

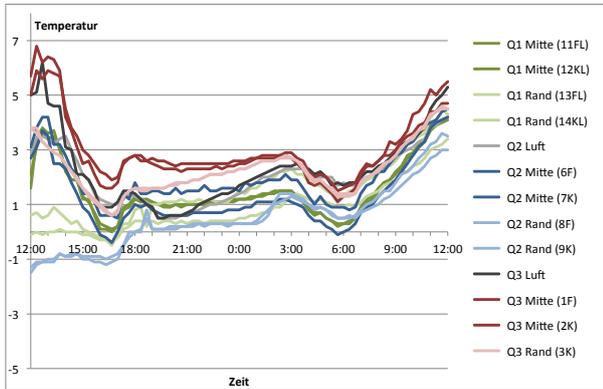


Bild 13: Querschnitte Q3, Q2, Q1

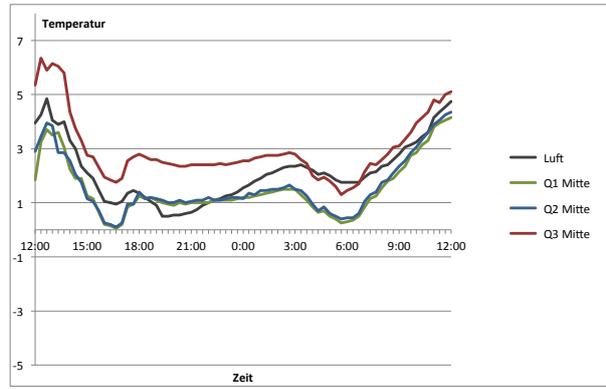


Bild 15: Fahrbahnmittle (Mittelwert)

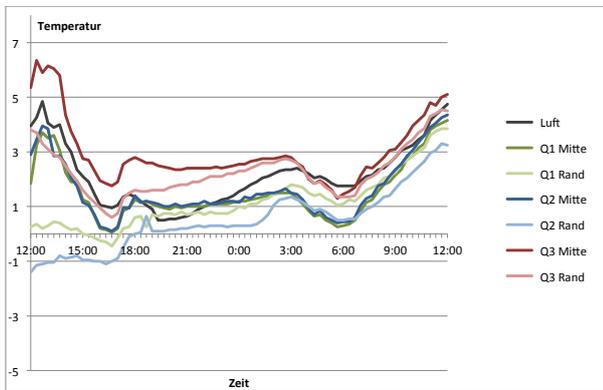


Bild 14: Querschnitte Q3, Q2, Q1 (Mittelwert)

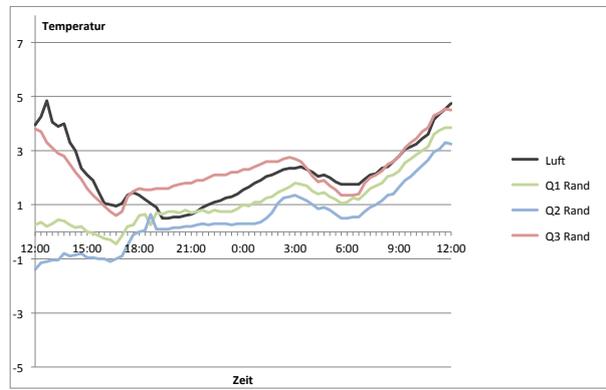


Bild 16: Fahrbahnrand (Mittelwert)

A3 Temperaturverläufe 12.12.2009 12:00 h bis 13.12.2009 12:00 h

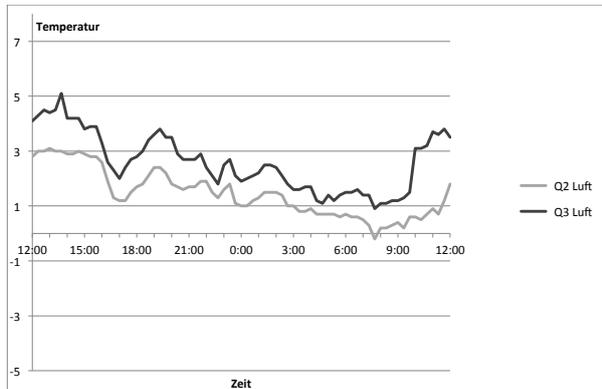


Bild 17: Lufttemperatur

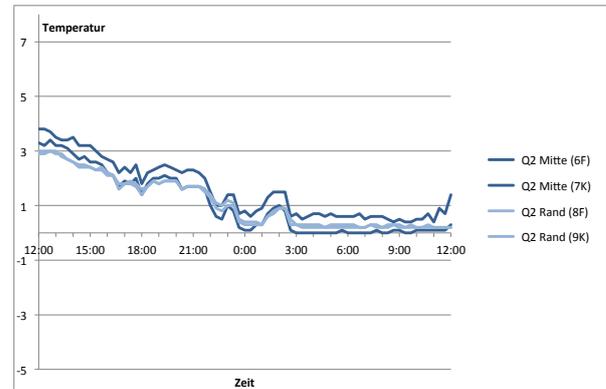


Bild 19: Querschnitt Q2

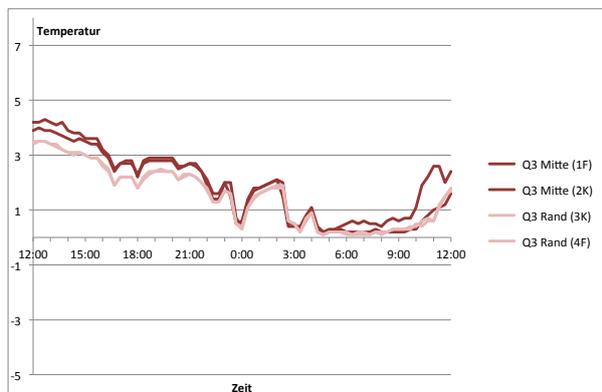


Bild 18: Querschnitt Q3

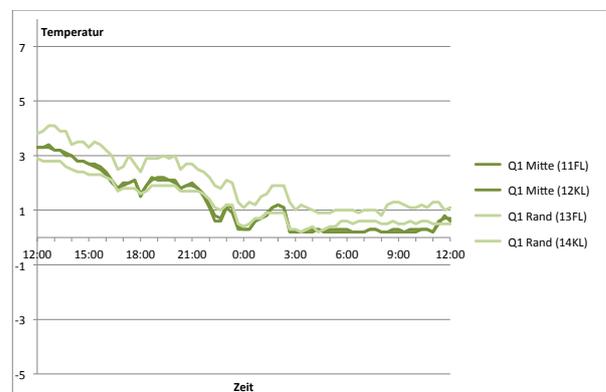


Bild 20: Querschnitt Q1

A3 Temperaturverläufe 12.12.2009 12:00 h bis 13.12.2009 12:00 h

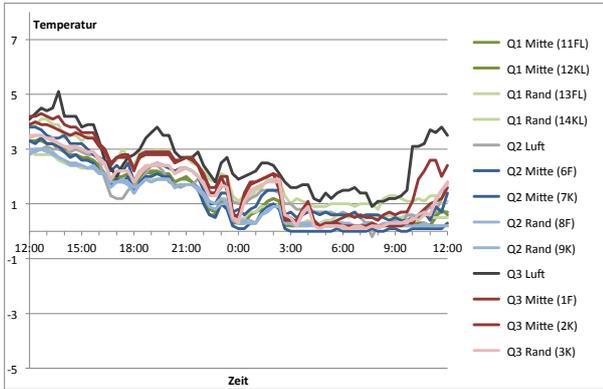


Bild 21: Querschnitte Q3, Q2, Q1

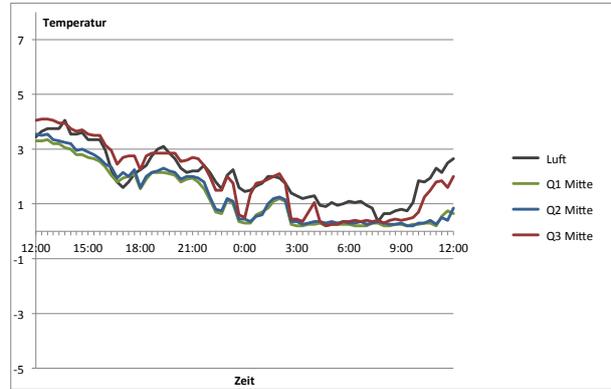


Bild 23: Fahrbahnmitte (Mittelwert)

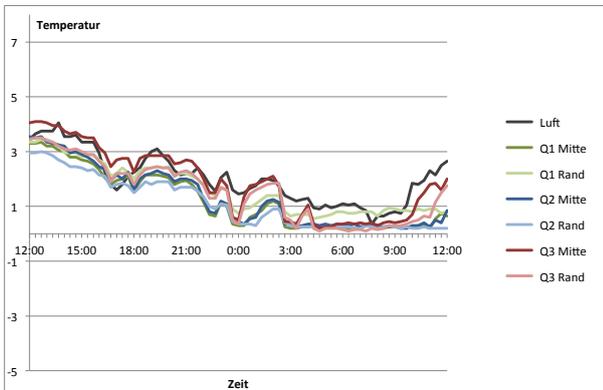


Bild 22: Querschnitte Q3, Q2, Q1 (Mittelwert)

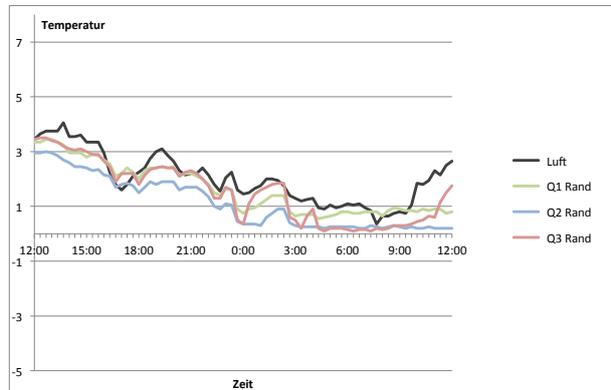


Bild 24: Fahrbahnrand (Mittelwert)

A4 Temperaturverläufe 13.12.2009 12:00 h bis 14.12.2009 12:00 h

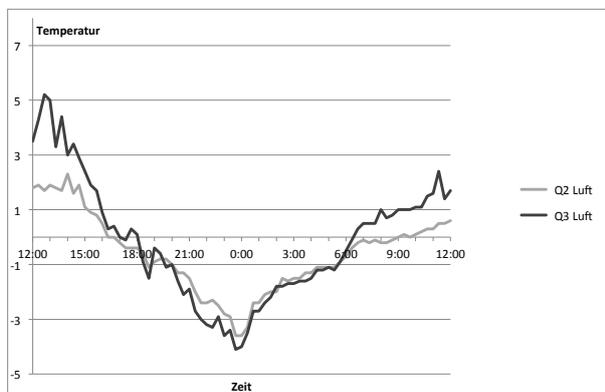


Bild 25: Lufttemperatur

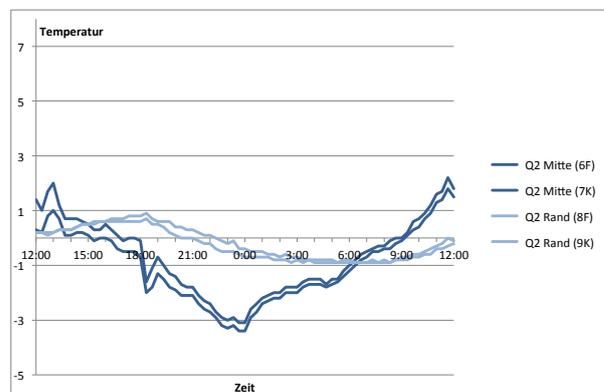


Bild 27: Querschnitt Q2

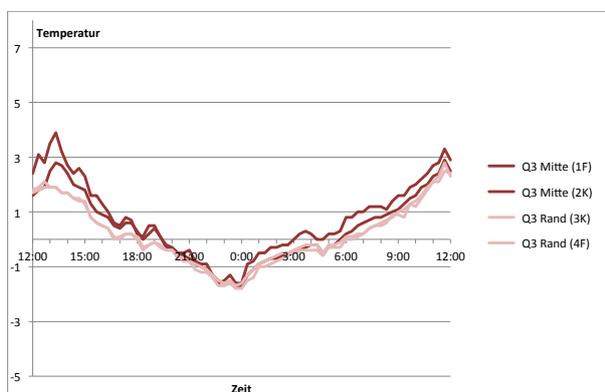


Bild 26: Querschnitt Q3

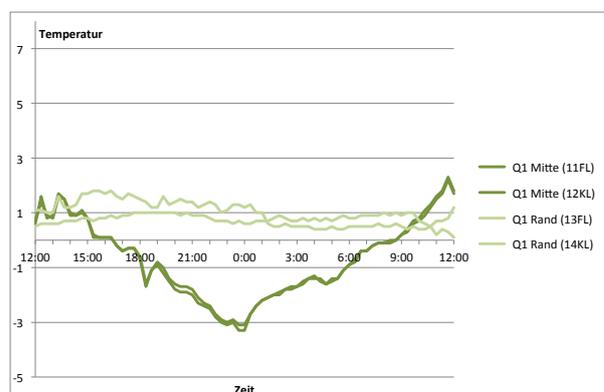


Bild 28: Querschnitt Q1

A4 Temperaturverläufe 13.12.2009 12:00 h bis 14.12.2009 12:00 h

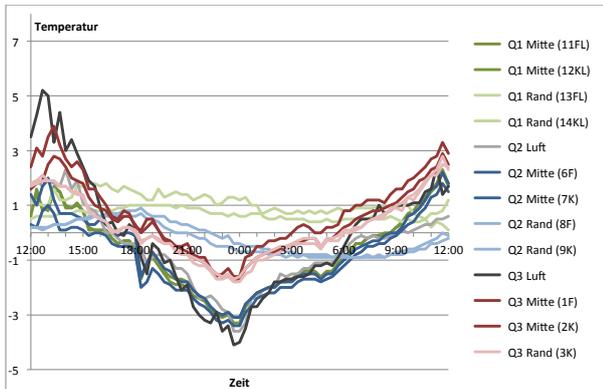


Bild 29: Querschnitte Q3, Q2, Q1

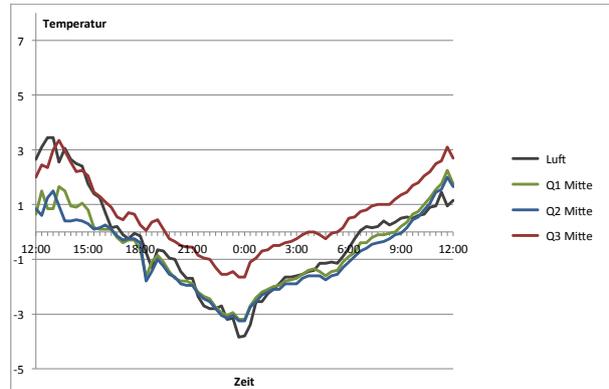


Bild 31: Fahrbahnmitte (Mittelwert)

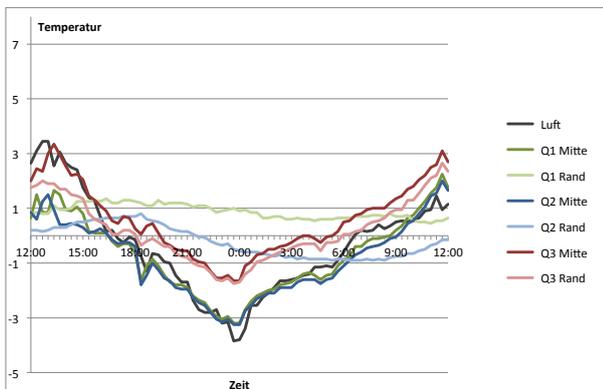


Bild 30: Querschnitte Q3, Q2, Q1 (Mittelwert)

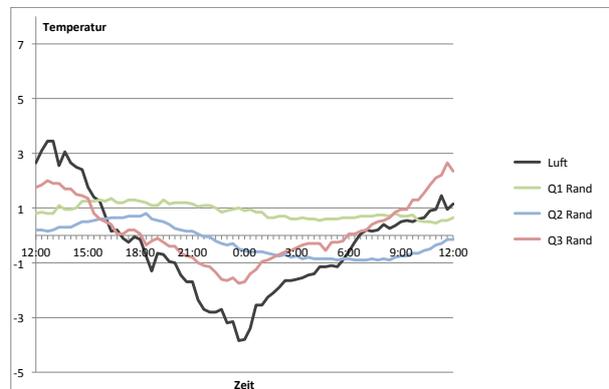


Bild 32: Fahrbahnrand (Mittelwert)

A5 Temperaturverläufe 16.12.2009 12:00 h bis 17.12.2009 12:00 h

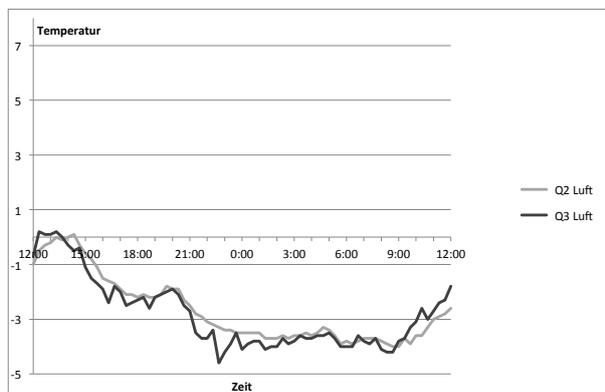


Bild 33: Lufttemperatur

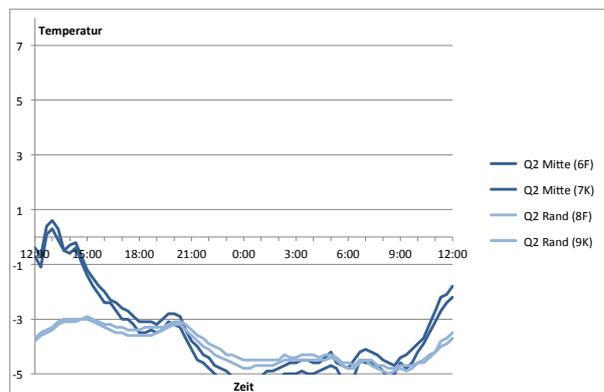


Bild 35: Querschnitt Q2

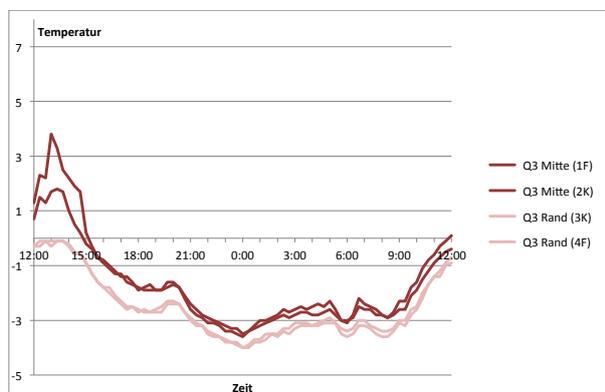


Bild 34: Querschnitt Q3

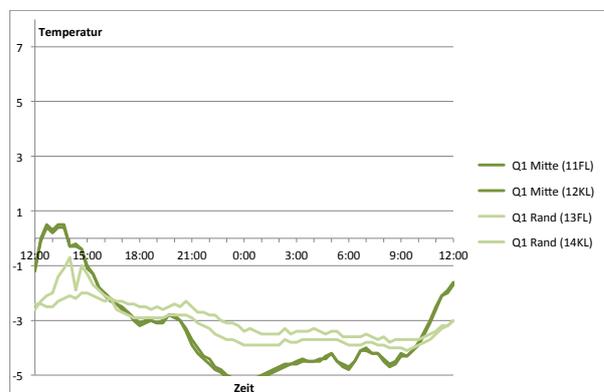


Bild 36: Querschnitt Q1

A5 Temperaturverläufe 16.12.2009 12:00 h bis 17.12.2009 12:00 h

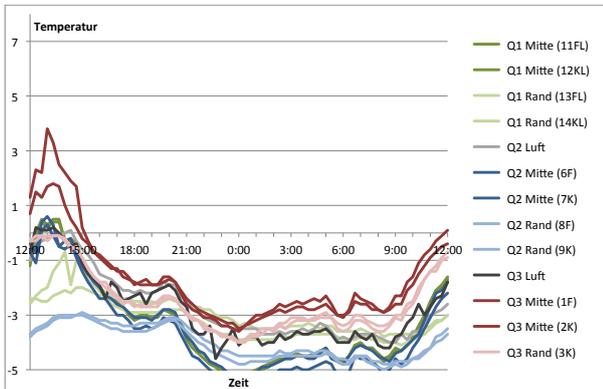


Bild 37: Querschnitte Q3, Q2, Q1

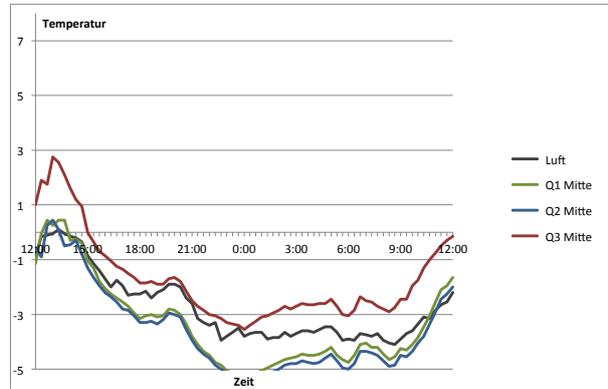


Bild 39: Fahrbahnmitte (Mittelwert)

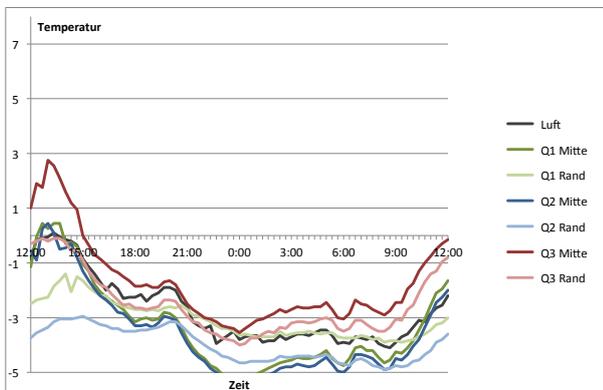


Bild 38: Querschnitte Q3, Q2, Q1 (Mittelwert)

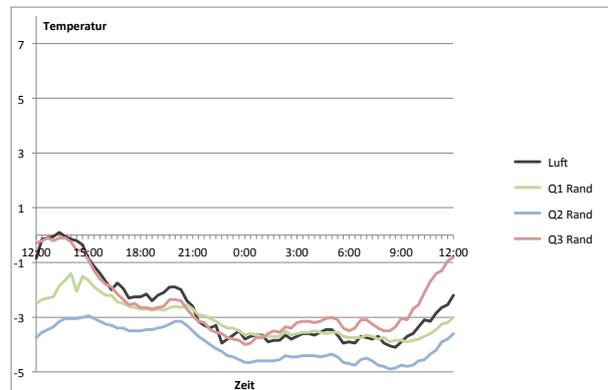


Bild 40: Fahrbahnrand (Mittelwert)

A6 Temperaturverläufe 28.12.2009 12:00h bis 29.12.2009 12:00h

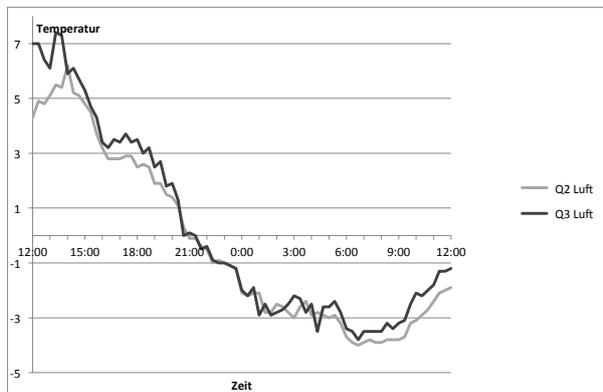


Bild 41: Lufttemperatur

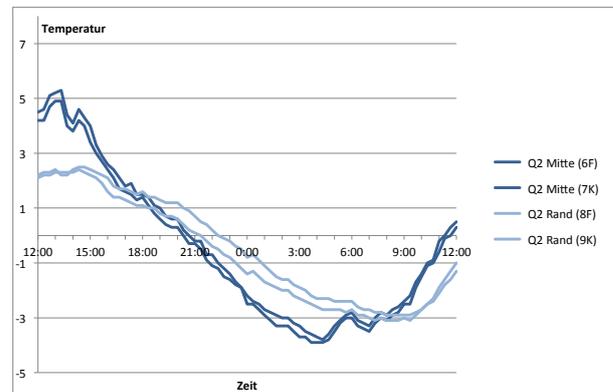


Bild 43: Querschnitt C2

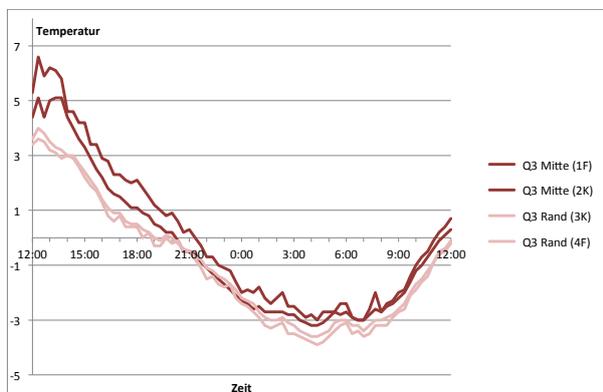


Bild 42: Querschnitt Q3

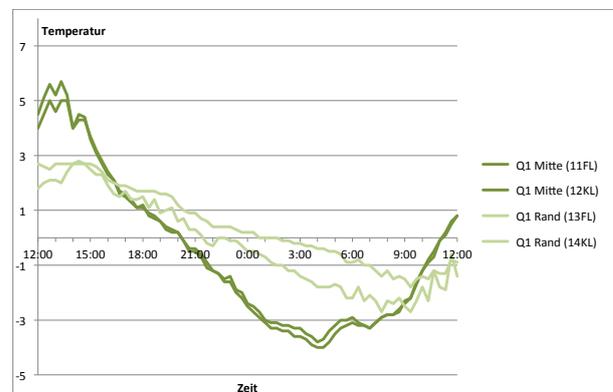


Bild 44: Querschnitt C1

A6 Temperaturverläufe 28.12.2009 12:00h bis 29.12.2009 12:00h

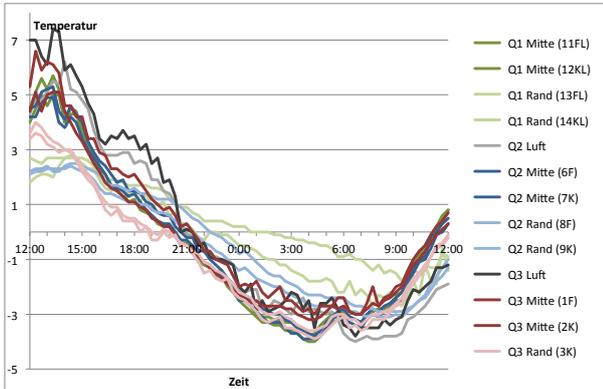


Bild 45: Querschnitte Q3, Q2, Q1

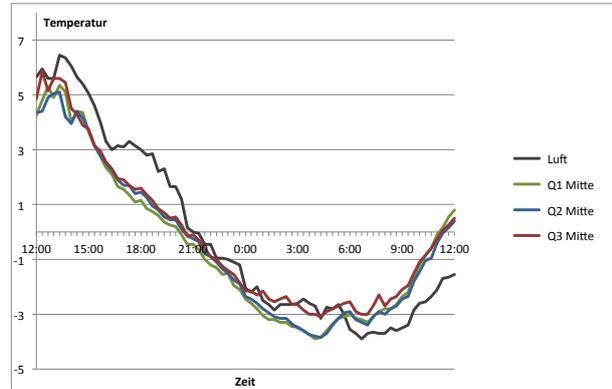


Bild 47: Fahrbahnmitte (Mittelwert)

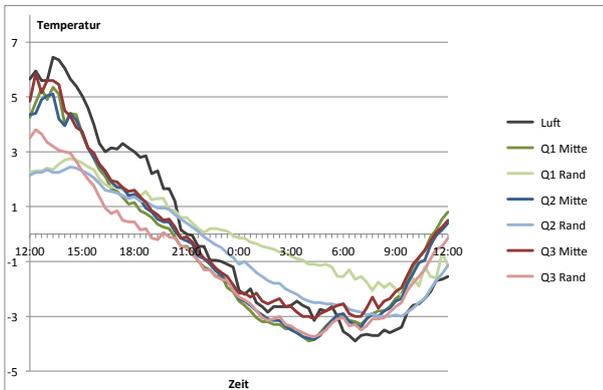


Bild 46: Querschnitte Q3, Q2, Q1 (Mittelwert)

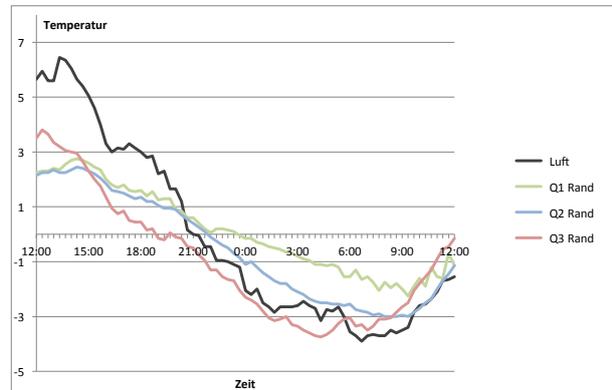


Bild 48: Fahrbahnrand (Mittelwert)

A7 Temperaturverläufe 11.01.2010 12:00h bis 12.01.2010 12:00h

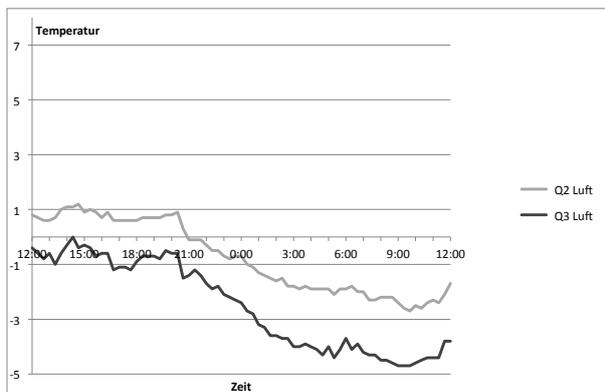


Bild 49: Lufttemperatur



Bild 51: Querschnitt Q2

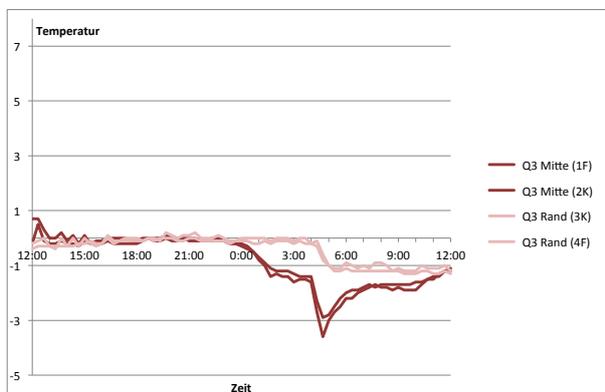


Bild 50: Querschnitt Q3

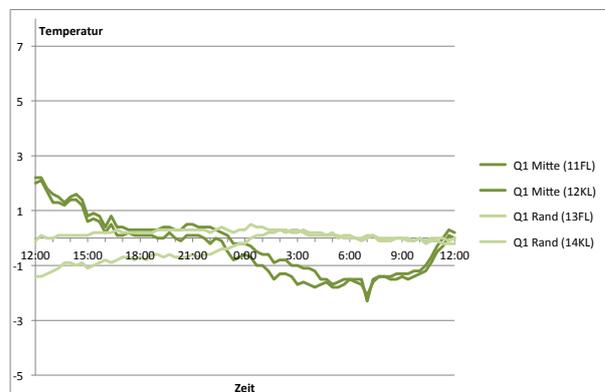


Bild 52: Querschnitt Q1

A7 Temperaturverläufe 11.01.2010 12:00h bis 12.01.2010 12:00h

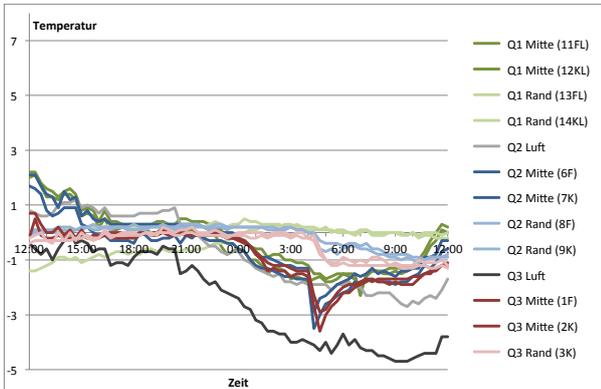


Bild 53: Querschnitte Q3, Q2, Q1

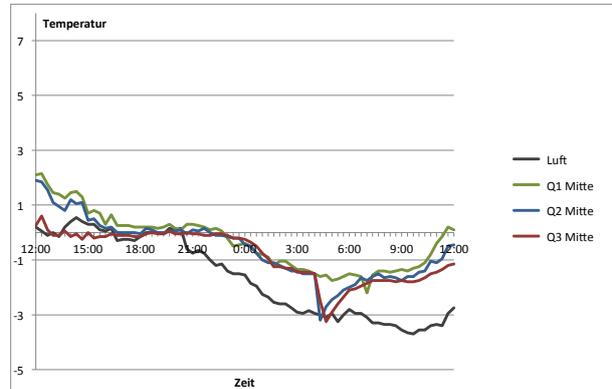


Bild 55: Fahrbahnmitte (Mittelwert)

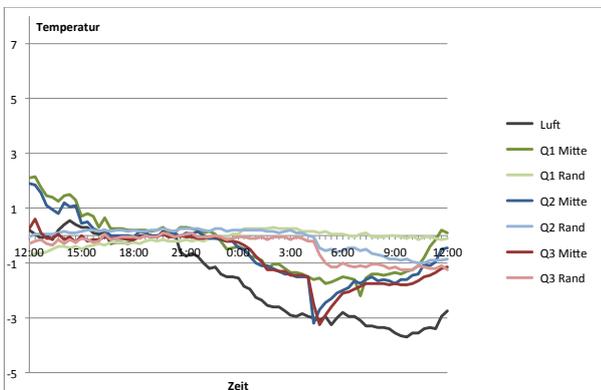


Bild 54: Querschnitte Q3, Q2, Q1 (Mittelwert)

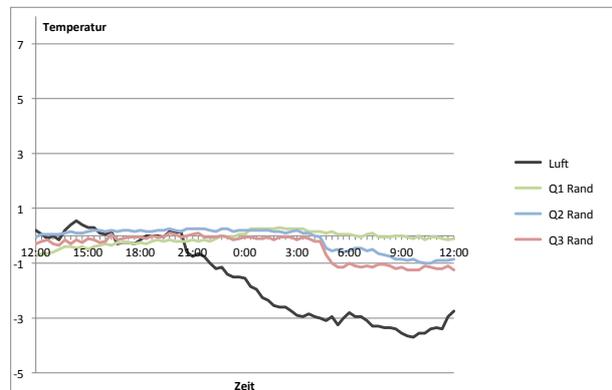


Bild 56: Fahrbahnrand (Mittelwert)

A8 Temperaturverläufe 28.01.2010 12:00h bis 29.01.2010 12:00h

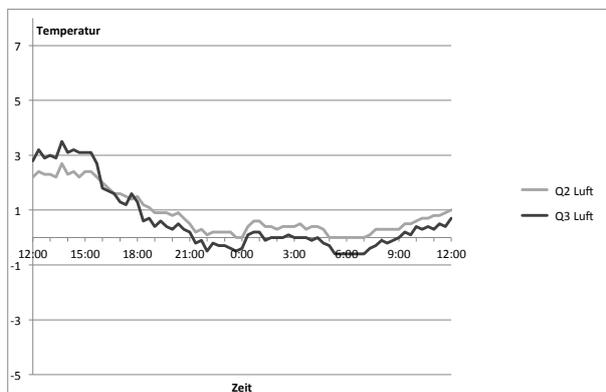


Bild 57: Lufttemperatur

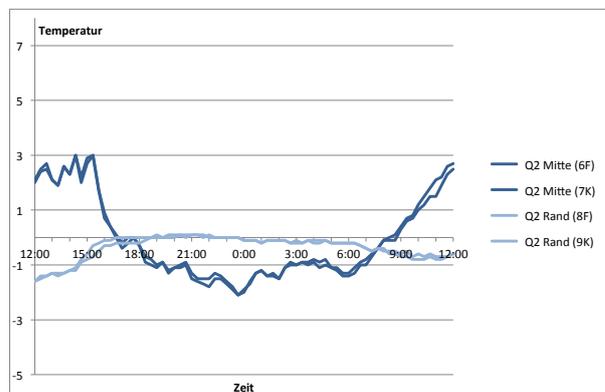


Bild 59: Querschnitt Q2

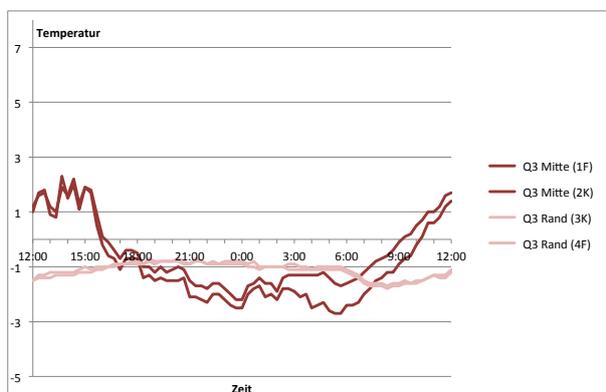


Bild 58: Querschnitt Q3

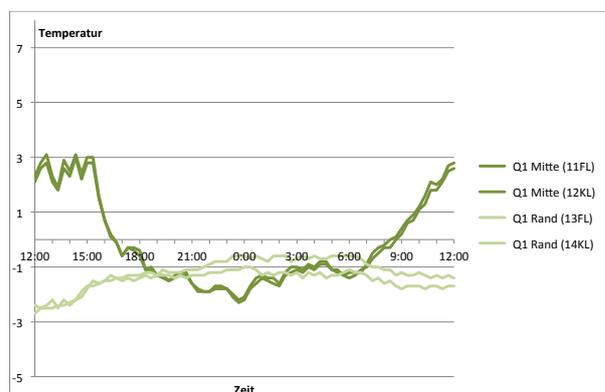


Bild 60: Querschnitt Q1

A8 Temperaturverläufe 28.01.2010 12:00h bis 29.01.2010 12:00h

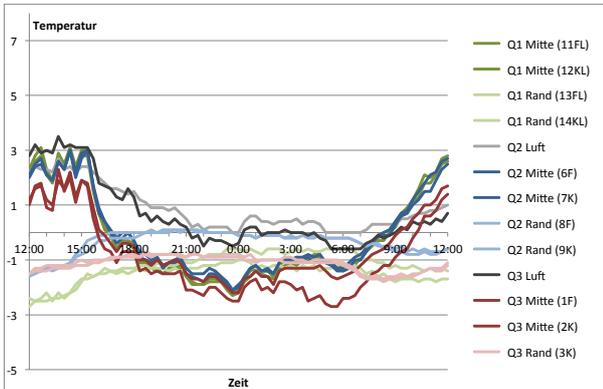


Bild 61: Querschnitte Q3, Q2, Q1

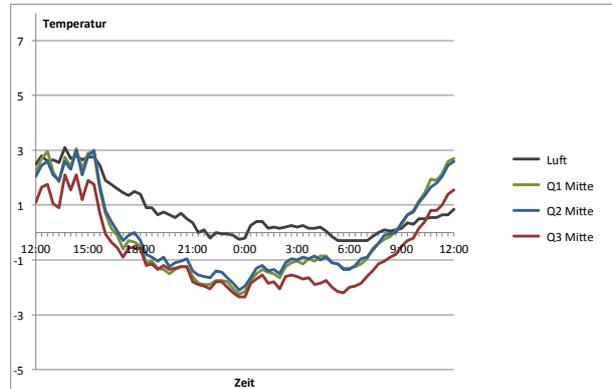


Bild 63: Fahrbahnmitte (Mittelwert)

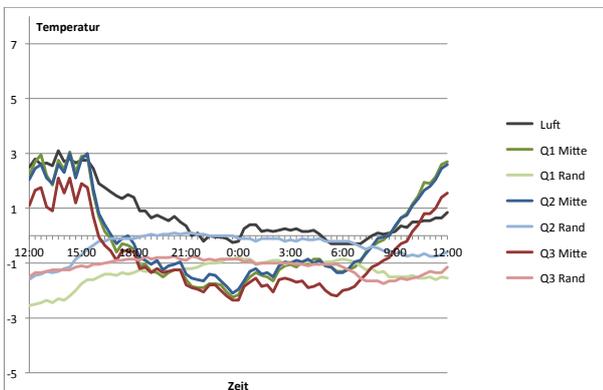


Bild 62: Querschnitte Q3, Q2, Q1 (Mittelwert)

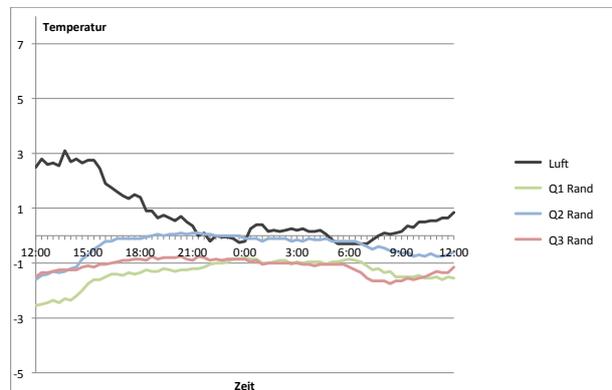


Bild 64: Fahrbahnrand (Mittelwert)

A9 Temperaturverläufe 02.02.2010 12:00h bis 03.02.2010 12:00h

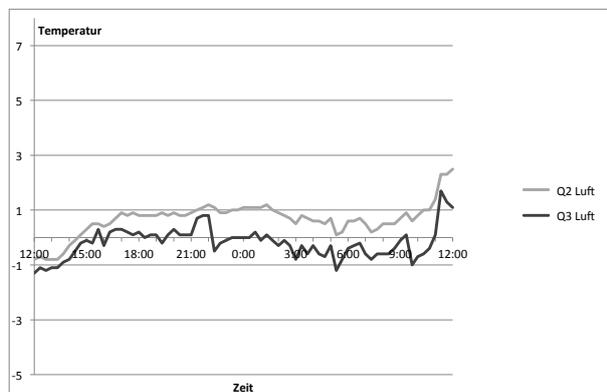


Bild 65: Lufttemperatur

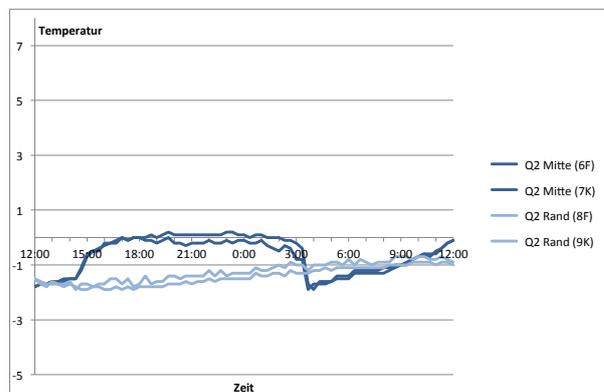


Bild 67: Querschnitt Q2

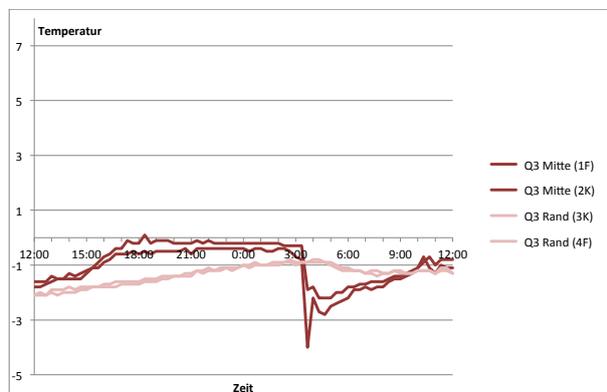


Bild 66: Querschnitt Q3

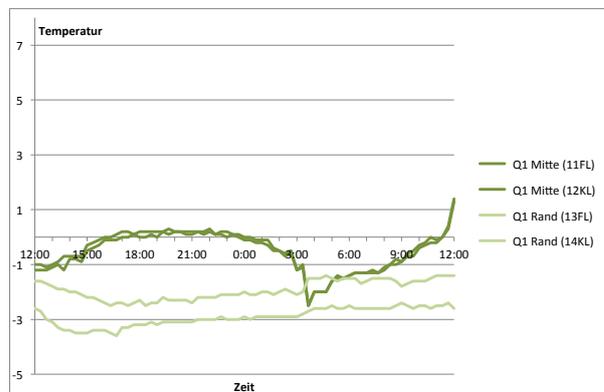


Bild 68: Querschnitt Q1

A9 Temperaturverläufe 02.02.2010 12:00h bis 03.02.2010 12:00h

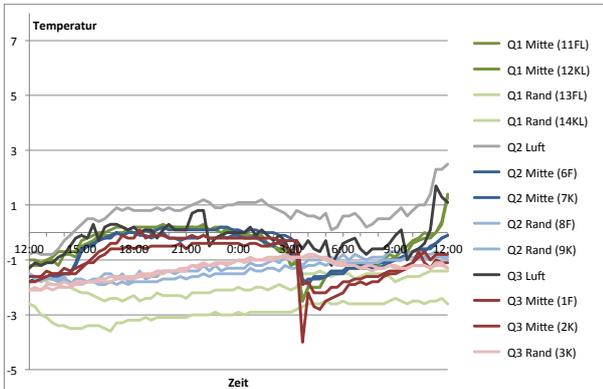


Bild 69: Querschnitte Q3, Q2, Q1

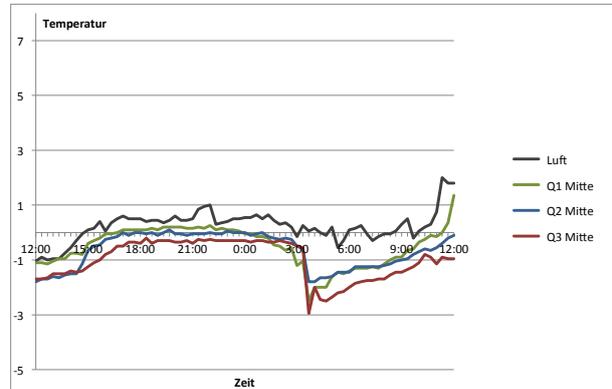


Bild 71: Fahrbahnmitte (Mittelwert)

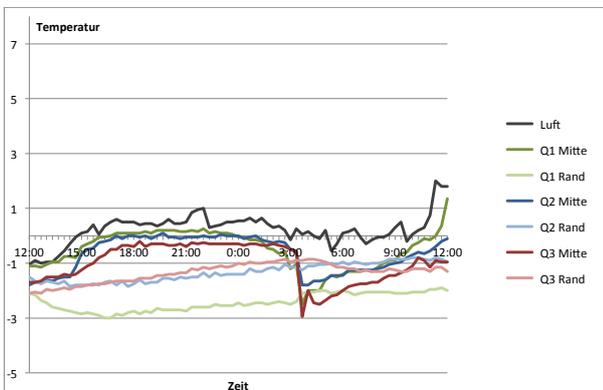


Bild 70: Querschnitte Q3, Q2, Q1 (Mittelwert)

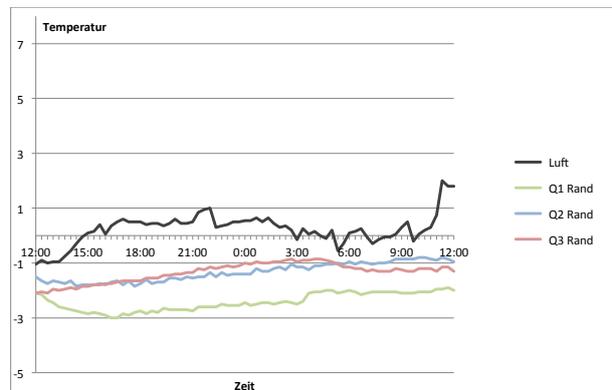


Bild 72: Fahrbahnrand (Mittelwert)

A10 Temperaturverläufe 04.03.2010 12:00h bis 05.03.2010 12:00h

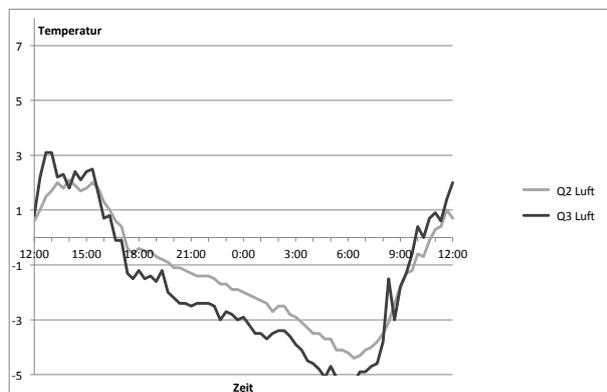


Bild 73: Lufttemperatur

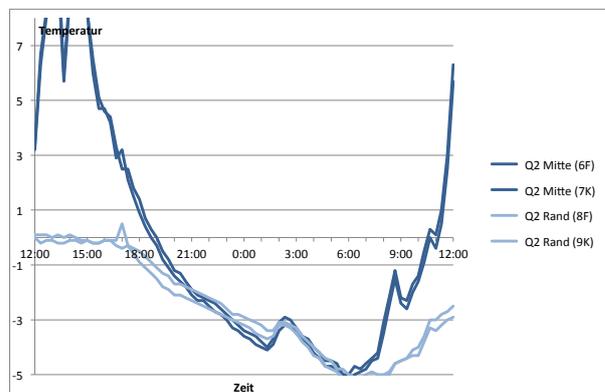


Bild 75: Querschnitt Q2

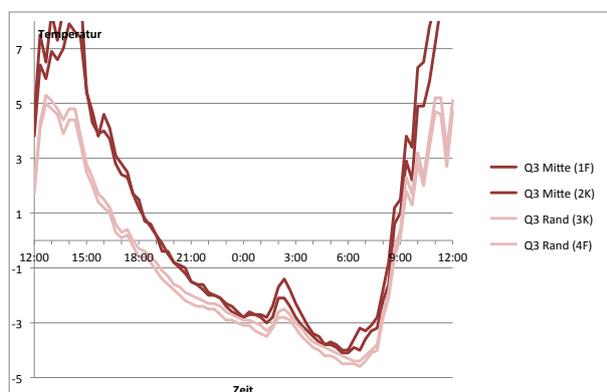


Bild 74: Querschnitt Q3

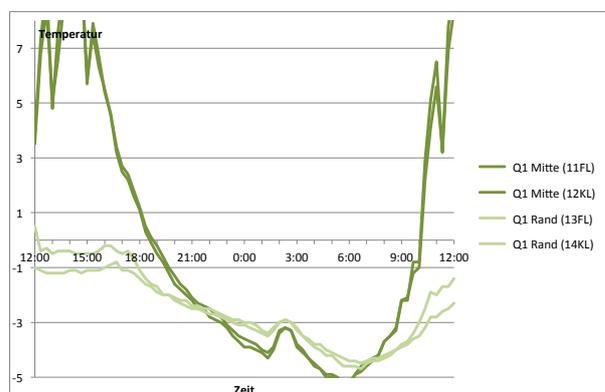


Bild 76: Querschnitt Q1

A10 Temperaturverläufe 04.03.2010 12:00h bis 05.03.2010 12:00h

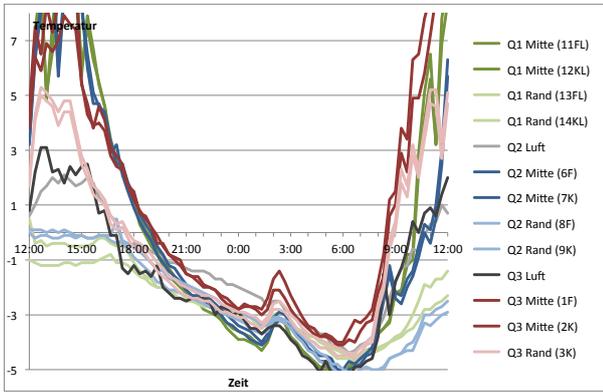


Bild 77: Querschnitte Q3, Q2, Q1

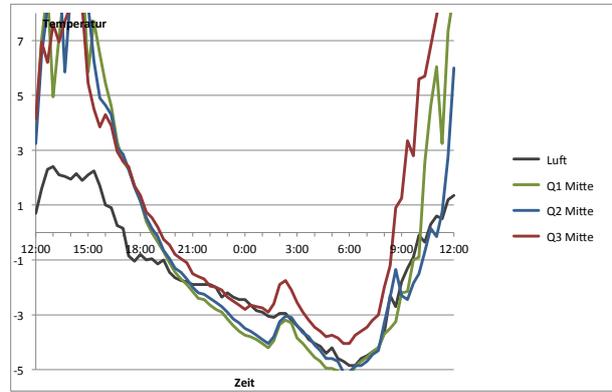


Bild 79: Fahrbahnmitte (Mittelwert)

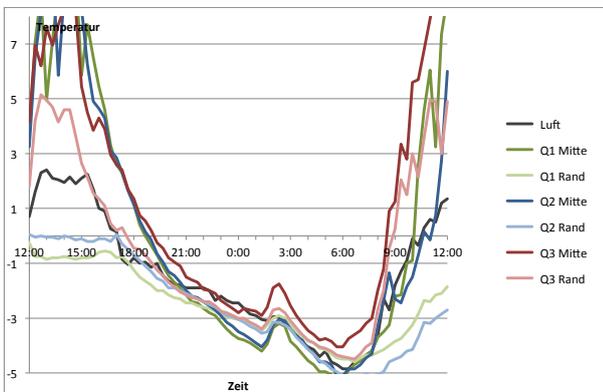


Bild 78: Querschnitte Q3, Q2, Q1 (Mittelwert)

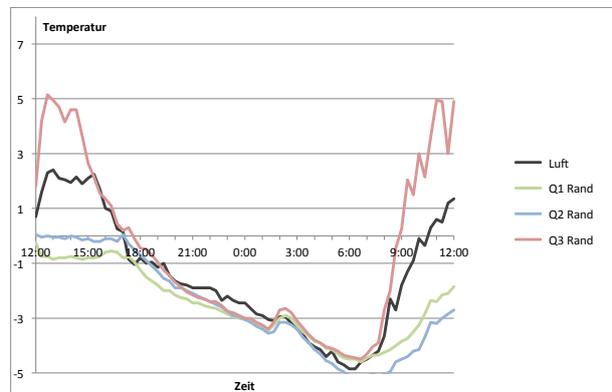


Bild 80: Fahrbahnrand (Mittelwert)

A11 Temperaturverläufe 05.03.2010 12:00h bis 06.03.2010 12:00h

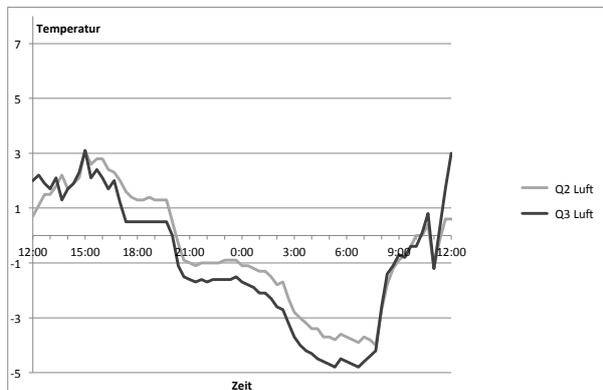


Bild 81: Lufttemperatur

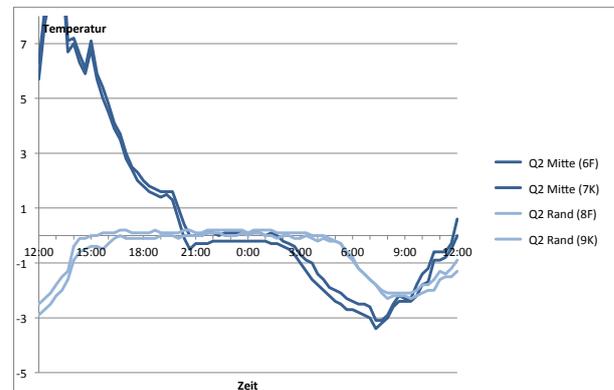


Bild 83: Querschnitt Q2

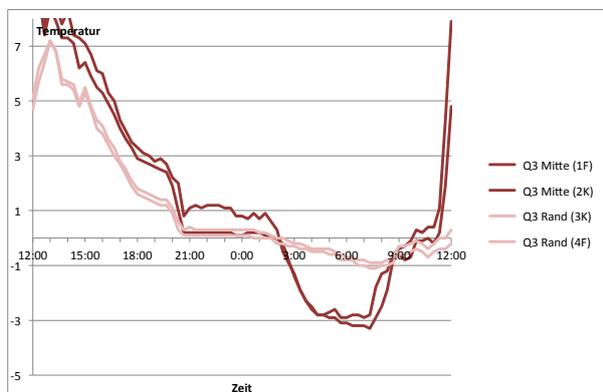


Bild 82: Querschnitt Q3

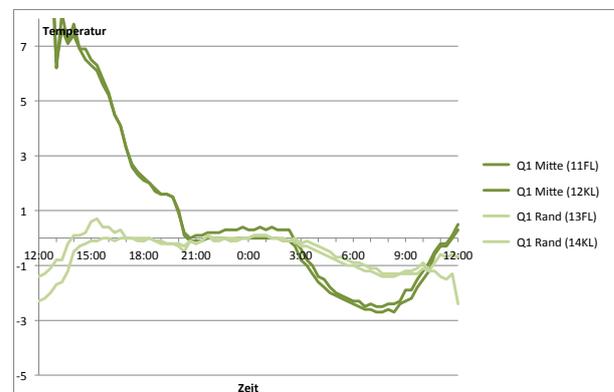


Bild 84: Querschnitt Q1

A11 Temperaturverläufe 05.03.2010 12:00h bis 06.03.2010 12:00h

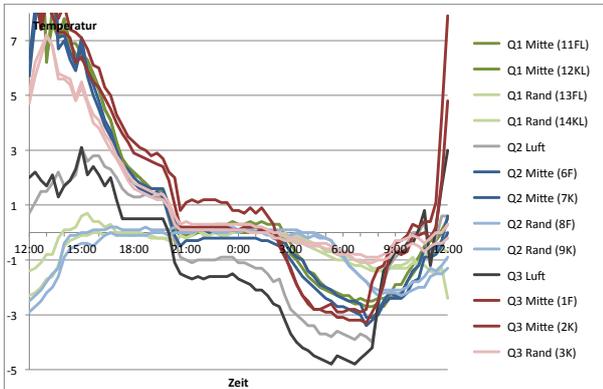


Bild 85: Querschnitte Q3, Q2, Q1

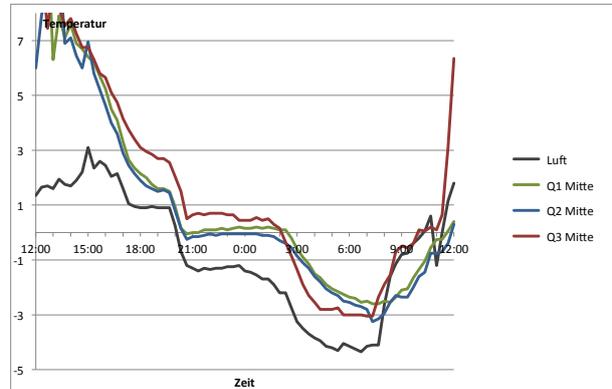


Bild 87: Fahrbahnmitte (Mittelwert)

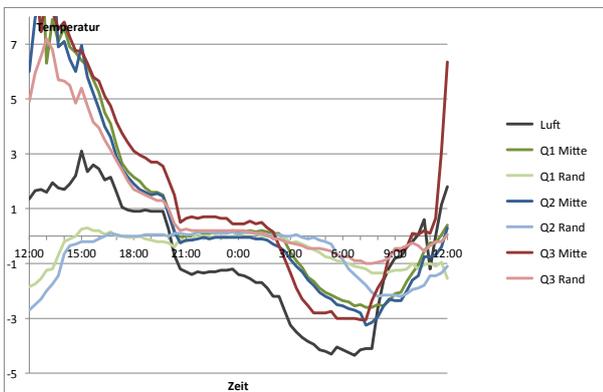


Bild 86: Querschnitte Q3, Q2, Q1 (Mittelwert)

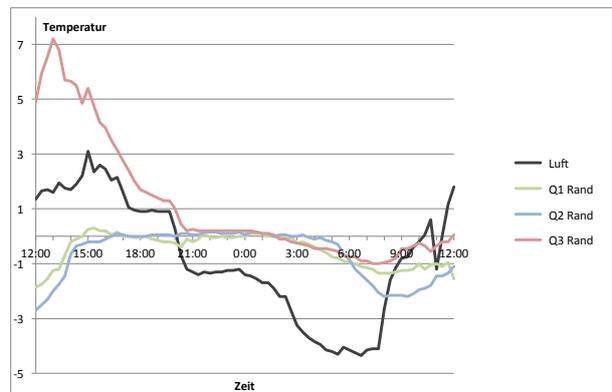


Bild 88: Fahrbahnrand (Mittelwert)

A12 Temperaturverläufe 06.03.2010 12:00h bis 07.03.2010 12:00h

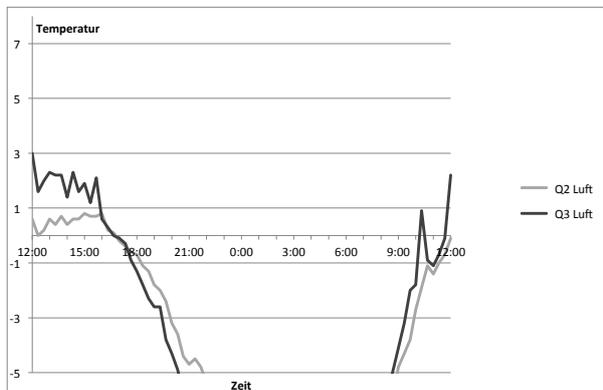


Bild 89: Lufttemperatur

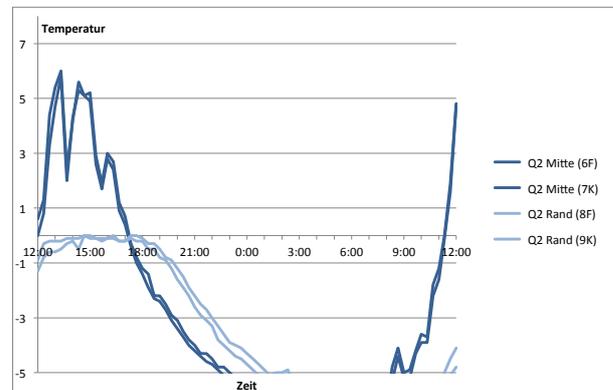


Bild 91: Querschnitt Q2

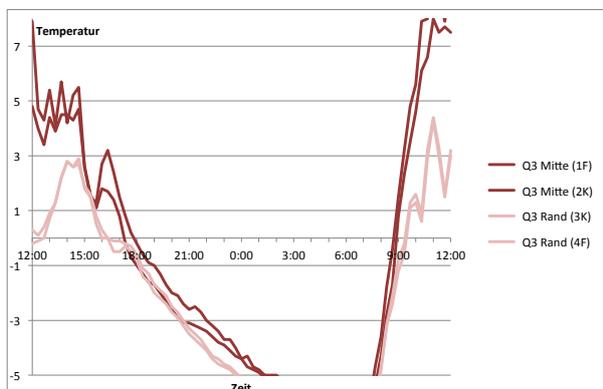


Bild 90: Querschnitt Q3

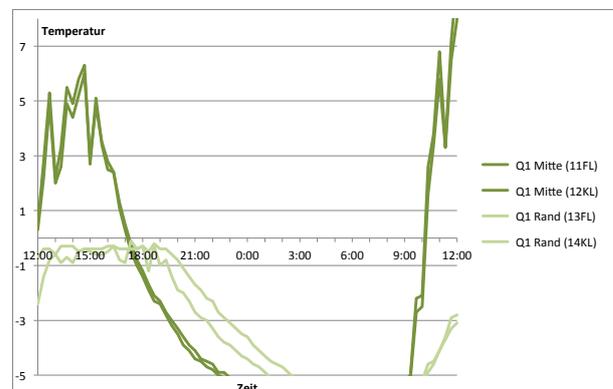


Bild 92: Querschnitt Q1

A12 Temperaturverläufe 06.03.2010 12:00h bis 07.03.2010 12:00h

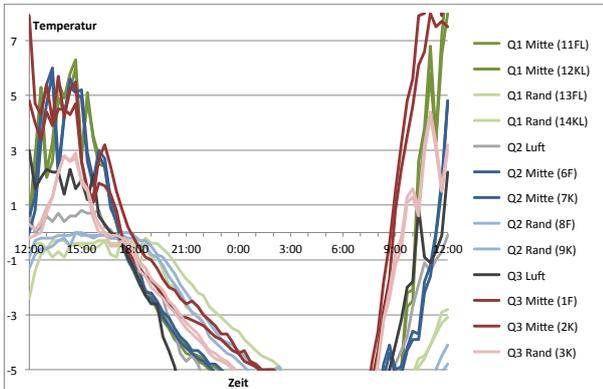


Bild 93: Querschnitte Q3, Q2, Q1

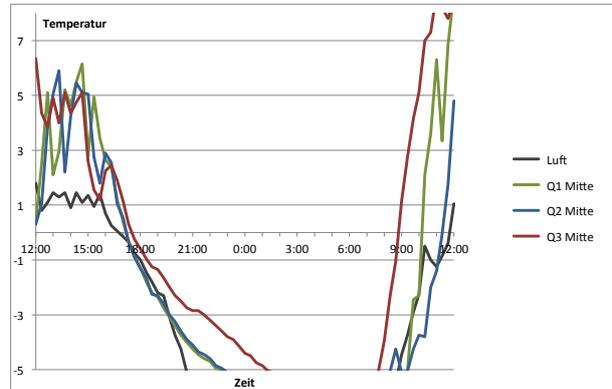


Bild 95: Fahrbahnmitte (Mittelwert)

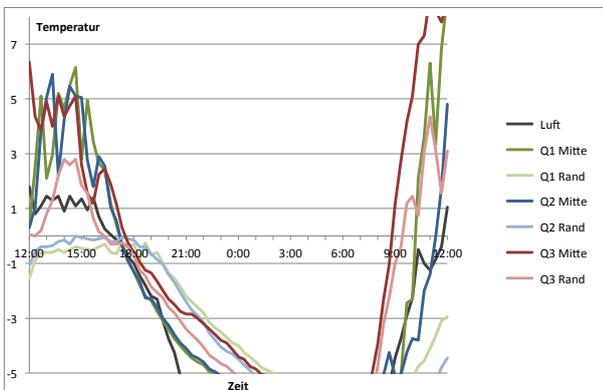


Bild 94: Querschnitte Q3, Q2, Q1 (Mittelwert)

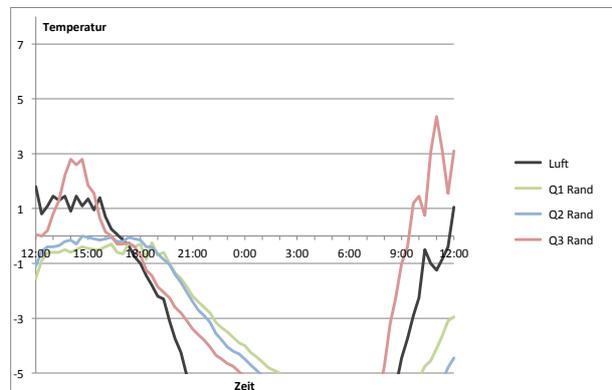


Bild 96: Fahrbahnrand (Mittelwert)

A13 Temperaturverläufe 07.03.2010 12:00h bis 08.03.2010 12:00h

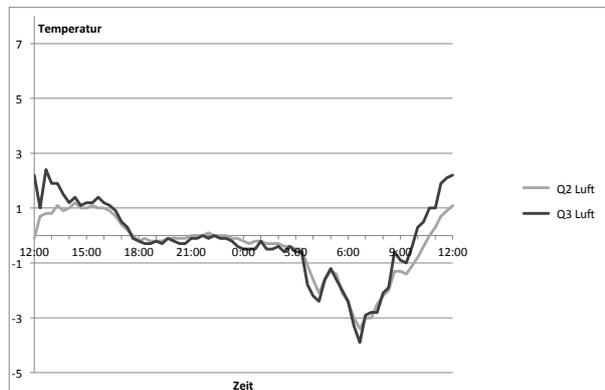


Bild 97: Lufttemperatur

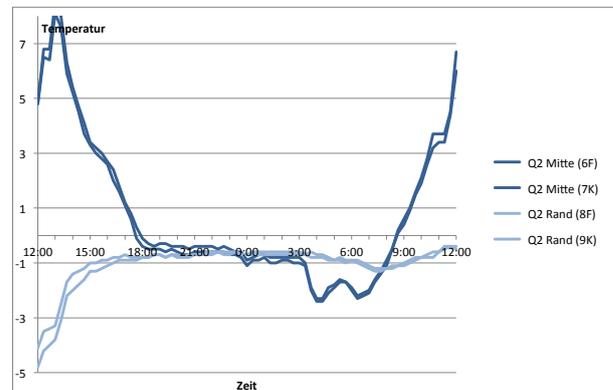


Bild 99: Querschnitt Q2

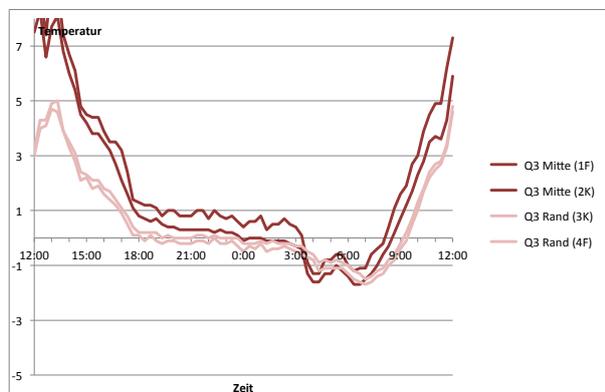


Bild 98: Querschnitt Q3

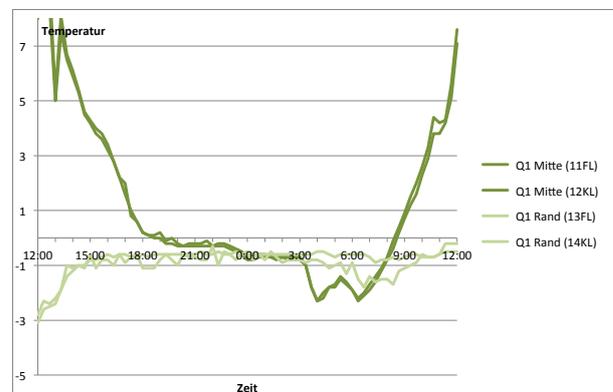


Bild 100: Querschnitt Q1

A13 Temperaturverläufe 07.03.2010 12:00h bis 08.03.2010 12:00h

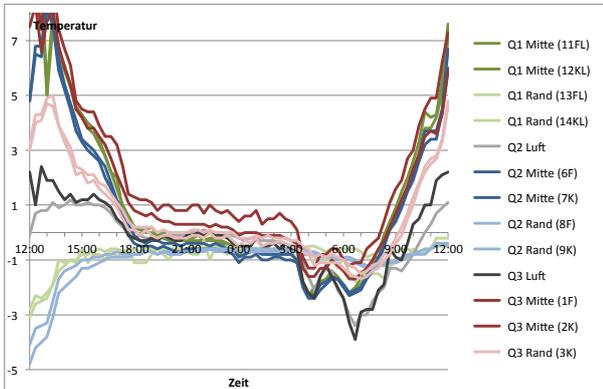


Bild 101: Querschnitte Q3, Q2, Q1

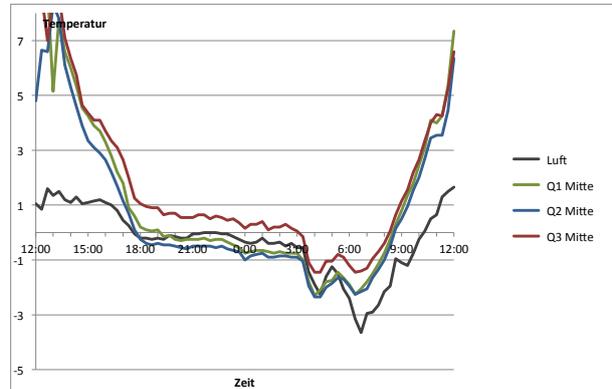


Bild 103: Fahrbahnmitte (Mittelwert)

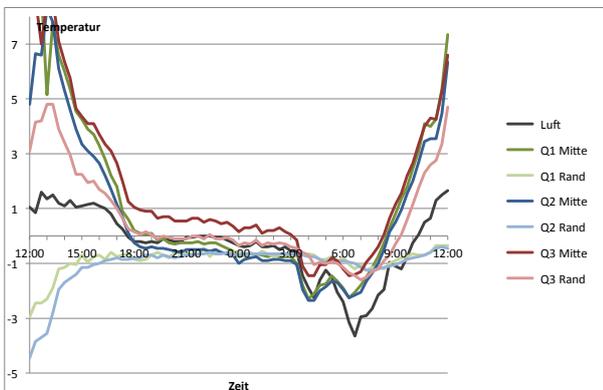


Bild 102: Querschnitte Q3, Q2, Q1 (Mittelwert)

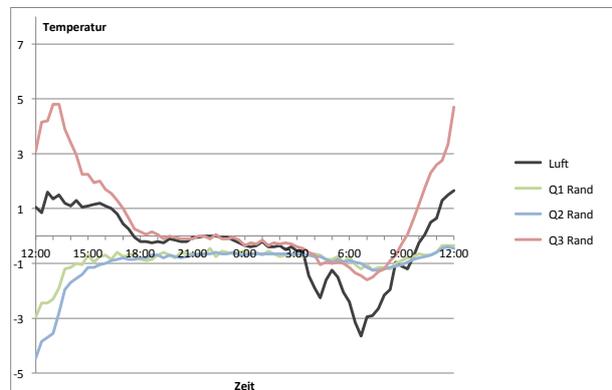


Bild 104: Fahrbahnrand (Mittelwert)

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2015

B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken

Kuhlmann, Maier, Ummenhofer, Zinke,
Fischer, Schneider € 14,00

B 113: Versagen eines Einzelelementes bei Stützkonstruktionen aus Gabionen

Placzek, Pohl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 114: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln

Mayer, Brennberger, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 115: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln

Mayer, Brennberger, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 116: Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton

Schnellenbach-Held, Peeters, Brylka, Fickler, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 117: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells

Thöns, Borrmann, Straub, Schneider, Fischer, Bügler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 118: Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit

Siegert, Holst, Empelmann, Budelmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 119: Untersuchungen zum Brandüberschlag in Straßentunneln

Schmidt, Simon, Guder, Juknat,
Hegemann, Dehn € 16,00

B 120: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an einem vorgespannten Zweifeldträger

Maurer, Gleich, Heeke, Zilch, Dunkelberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 121: Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse

Diersch, Taffe, Wöstmann, Kurz, Moryson
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 122: Gussasphalt mit integrierten Rohrregistern zur Temperierung von Brücken

Eilers, Friedrich, Quaaas, Rogalski, Staeck
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2016

B 123: Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung

Geißler, Krohn € 15,50

B 124: Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke

Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 125: Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit

Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thrö
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 126: Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur

Mielecke, Graubner, Roth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 127: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden

Kuhlmann, Hubmann € 21,50

B 128: Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden

Ungermann, Brune, Giese € 21,00

B 129: Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen

Schmellekamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 130: Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags

Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 132: Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke

Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 133: Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit

Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 134: Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Erhaltungskonzepte von Straßenbrücken

Gehrlein, Lingemann, Jungwirth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2017

B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton

Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50
B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken
Mayer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie

Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5

U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln

Moormann, Buhmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken

Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brenner, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018**B 143: Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

B 144: Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke

Neumann, Brauer € 16,50

B 145: 8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019**B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen**

Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020**B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden**

Paschen, Dürrer, Gronau, Rentmeister
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 148: Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Maurer, Bettin
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 149: Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

Keßler, Gehlen € 16,00

B 150: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 151: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, Vorwagner
In Vorbereitung

B 152: Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens

Kuhlmann, Stempniewski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.

**Gutachterliche Stellungnahme zum thermischen Verhalten von
beheizten Fahrbahnplatten und deren Temperierungssystemen
auf Brücken**

- Schlussbericht –

Untersuchungen für das
Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS),
vertreten durch die
Bundesanstalt für Straßenwesen

FE-Nr.: 89.0285/2013

Aachen, 28. Februar 2014

Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Dr. Ing. Daniel Pak
Dipl.-Ing. Dominik Pyschny

75 Seiten einschließlich Deckblatt

Inhalt:

1	Anlass	5
2	Aufgabenstellung und Vorgehen	6
3	Technische Angaben	8
3.1	Zugrunde gelegte Unterlagen	8
3.2	Temperierungssysteme auf Brücken – Geometrie, Material, Belastung	8
3.3	Vorgehensweise	9
3.4	Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x)$ im maßgebenden Querschnitt – eingeschwungener Zustand („steady state“), $T_U = const$	10
3.5	Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x)$ im maßgebenden Querschnitt – eingeschwungener Zustand („steady state“), $T_U = beliebig$	14
3.6	Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x,t)$ im maßgebenden Querschnitt, $T_U = const$	15
3.7	Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x,t)$ im maßgebenden Querschnitt, $T_U = beliebig$	18
3.8	Ermittlung der Oberflächentemperatur T_O zum Zeitpunkt t basierend auf der Temperaturentwicklung $T_w(x,t)$	19
4	Beschreibung des verwendeten Finite Elemente (FE) Modells	22
4.1	FE-Modell Betonfahrbahn	22
4.2	FE-Modell Stahlfahrbahn	23
4.3	Wärmeübergangskoeffizient Wasser - Rohr	24
5	Ermittlung des Einflusses benachbarter Rohre sowie unterschiedlicher Rohrkonfigurationen („Rohrbögen“)	27
6	Grenzbetrachtungen / Aufzeigen der Systemgrenzen	29
6.1	Stahlbrücke / Verbundbrücke	29
6.2	Bauwerkstemperatur / Außentemperatur („Starttemperatur“)	33
6.3	Vorlaufzeit	33
6.4	Fließgeschwindigkeit	34
6.5	Möglicher Einsatz des Systems ohne Wärmepumpe	34
7	Schlussfolgerungen	37
8	Literaturverweise und Dokumente	37
Anhang A Validierung der Berechnungsergebnisse an einem Versuch im Deckenprüfstand		38
Anhang A.1	Messungen am Deckenprüfstand	38
Anhang A.2	Handrechenergebnisse, basierend auf FE-Untersuchungen	40
Anhang B Vorbemessungstafeln (Verbundbrücke)		44
Anhang B.1	Verbundbrücke, $T_w = 10^\circ\text{C}$	45
Anhang B.2	Verbundbrücke, $T_w = 12^\circ\text{C}$	50

Anhang B.3	Verbundbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$	55
Anhang C	Vorbemessungstafeln (Stahlbrücke).....	60
Anhang C.1	Stahlbrücke, $T_w=10^\circ\text{C}$	61
Anhang C.2	Stahlbrücke, $T_w=12^\circ\text{C}$	66
Anhang C.3	Stahlbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$	71

1 Anlass

Im Rahmen des Forschungsprojektes FE 15.401/2004/ARB wurden vom Institut für Stahlbau der RWTH Aachen umfangreiche Untersuchungen zu beheizten Fahrbahnplatten und deren Temperierungssystemen auf Brücken vorgenommen.

Die konstruktiven sowie thermischen Fragestellungen das neue System betreffend wurden geklärt und ermöglichten u.a. die Ausstattung der Kanalbrücke Berkenthin mit dem neuartigen Temperierungssystem. Eine Dimensionierungshilfe, welche eine Optimierung des Systems in der Planungsphase erleichtert, ist jedoch nicht vorhanden. Diese wird im Rahmen des Projektes „Gutachterliche Stellungnahme zum Thermischen Verhalten von beheizten Fahrbahnplatten und deren Temperierungssysteme auf Brücken“ entwickelt.

2 Aufgabenstellung und Vorgehen

Zur Entwicklung der Dimensionierungshilfe sind folgende Schritte erforderlich:

1. Aufstellen einer Temperaturgleichung $T_w(x)$ für den eingeschwungenen Zustand („Steady State“) über die Rohrlänge
 - a. unter gleichen Randbedingungen (Temperatur Oberkante Bauwerk = Temperatur Unterkante Bauwerk) ([Kapitel 3.4](#))
 - b. unter beliebigen Randbedingungen ([Kapitel 0](#))

Als Eingangsparameter dienen:

- Wärmestrom „Q“ über den Rohrumfang in einem beliebigen Schnitt [W/mm] im eingeschwungenen Zustand (mittels der Finite Elemente Methode, FE, 2D)
- Volumenspezifische Wärmekapazität „c“ des Trägermediums
- Fläche des Rohrquerschnitts „A_w“
- Fließgeschwindigkeit „v“
- Vorlauftemperatur „T₀“

Die Lösung der Differentialgleichung liefert eine Temperaturgleichung, welche es ermöglicht, die Temperatur des Trägermediums im eingeschwungenen Zustand an jeder beliebigen Stelle des Rohres zu ermitteln (-> Rücklauftemperatur). Liegen Randbedingungen wie unter b) beschrieben vor, ist die Ermittlung des Wärmestroms zu zwei Zeitpunkten erforderlich (z.B. T₁=600 sec, T₂=eingeschwungen).

2. Aufstellen der Temperaturgleichung $T_w(x,t)$ für den nicht eingeschwungenen Zustand („Transient State“) über die Rohrlänge

Die Temperaturgleichung $T_w(x,t)$ erweitert die unter 1.a) ([Kapitel 3.6](#)) bzw. 1.b) ([Kapitel 3.7](#)) ermittelte Gleichung $T_w(x)$. Hierzu wird der mittels FE bestimmte Wärmestrom „Q“ für eine gegebene Vorlauftemperatur über die Zeit aufgetragen und durch eine Regressionsanalyse approximiert.

3. Ermittlung des Einflusses „Interaktion zwischen benachbarten Rohren“ ([Kapitel 5](#))

Der Einfluss unterschiedlicher Temperaturen in benachbarten Rohren wird mit Hilfe eines FE-Modells (2D, „Steady State“) ermittelt; die Ergebnisse fließen (soweit erforderlich) über einen Korrekturfaktor in die Gleichung ($T_w(x,t)$, siehe 2.) ein.

4. Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Rohrkonfigurationen („Rohrbögen“) ([Kapitel 5](#))

Der Einfluss der Rohrbögen auf den abgegebenen Wärmestrom „Q“ wird anhand eines 3D-FE Modells ermittelt:

- Ermittlung des Gesamtwärmestroms „Q“ unter Konfiguration „A“ (Rohrregister längs zur Fahrbahn) (T₁=600 sec, T₂=eingeschwungen)
- Ermittlung des Gesamtwärmestroms „Q“ unter Konfiguration „B“ (Rohrregister quer zur Fahrbahn) (T₁=600 sec, T₂=eingeschwungen)
- Vergleich der Ergebnisse, falls nötig Ermittlung eines Korrekturfaktors für Temperaturgleichung ($T_w(x,t)$, siehe 2.)

5. Validierung der Berechnungsergebnisse an einem Versuch im Deckenprüfstand ([Anhang A](#))

Ermittlung der Rücklauftemperaturen über die Zeit, Vergleich mit berechneten Ergebnissen (Probekörper: Stahl-Verbunddecke mit Rohrsystem)

6. Erstellung eines Formelwerkes zur Dimensionierung der Rohrregister ([Anhang B](#), [Anhang C](#))

- Temperaturgleichung $T_w(x,t)$ wie unter (2.) ermittelt und unter (5.) validiert
- Korrekturfaktoren für Bögen (4.) sowie Interaktion zwischen den Rohren (3.) (soweit Einfluss vorhanden)
- Eingangsparameter für die Temperaturgleichung für unterschiedliche Brückenkonfigurationen (zu ermitteln mittels FE, wie unter 1. und 2. beschrieben)

- Variation: Brückenaufbau: Betonfahrbahntafel einer Verbundbrücke / orthotrope Fahrbahnplatte
- Variation: Reaktionszeit / Vorlaufzeit: 1h, 2h, 4h
- Variation: Fahrbahn- bzw. Brückentemperaturen: -6°C, -4°C, -2°C, 0°C, 2°C,
- Variation: Wassertemperatur (Vorlauftemperatur): 10°C, 12°C, 14°C
- Variation: Fließgeschwindigkeit / Fördervolumen: 100l/h, 200l/h, 400l/h
- konstant: Rohrabstand (10cm), Rohrmaterial (PE-Xa) und -durchmesser (20mm), Rohrlage, Schichtdicken (Schutz- und Deckschicht)

Einen Hauptteil der Dimensionierungshilfe stellen Diagramme dar, um dem Anwender einen schnellen Überblick über die Gesamtzusammenhänge zu geben.

7. Erstellung eines Excel-Tools zur Dimensionierung der Rohrregister

Zur Dimensionierung des Temperierungssystems auch über die gewählten Parametergrenzen hinaus wird ein Excel-Tool erstellt. Dieses wird dem Anwender auf geeignete Weise zugänglich gemacht.

8. Grenzbetrachtungen / Aufzeigen der Systemgrenzen (Kapitel 6)

Durch Grenzwertbetrachtungen werden realistische Systemgrenzen aufgezeigt (Rohrlänge, Anzahl der Windungen, Pumpenkapazität, Vor- und Rücklauftemperaturen). Die Parameter werden basierend auf einem Grundsystem variiert, um deren Einfluss auf das System identifizieren zu können.

Im Rahmen der Untersuchungen (Schritt 6. und 7.) werden folgende Systeme betrachtet:

Tabelle 1: Zu variierte Parameter im Rahmen der Arbeitsschritte (6.) und (8.)

		Vorlaufzeit 1h									Vorlaufzeit 2h									Vorlaufzeit 4h									
		Temperatur Wasser									Temperatur Wasser									Temperatur Wasser									
		10°C			12°C			14°C			10°C			12°C			14°C			10°C			12°C			14°C			
		Fördervolumen									Fördervolumen									Fördervolumen									
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Verbundbrücke	Brückentemperatur	-6°C																											
		-4°C																											
		-2°C																											
		0°C																											
		2°C																											
orthotrope Platte	Brückentemperatur	-6°C																											
		-4°C																											
		-2°C																											
		0°C																											
		2°C																											

jeweils ein Diagramm

3 Technische Angaben

Die technischen Angaben wurden vom Auftraggeber „Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS)“, vertreten durch die „Bundesanstalt für Straßenwesen“, bereitgestellt.

3.1 Zugrunde gelegte Unterlagen

Folgende Unterlagen wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt:

- [1] BAST-Bericht B 87, Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie

Darüber hinaus wurden für die Untersuchungen weitere Dokumente und Richtlinien verwendet:

- [2] Mackert, K.-U., Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn
- [3] Rehau Produktinformation RAUGEO stabil Rohr
- [4] Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik

3.2 Temperierungssysteme auf Brücken – Geometrie, Material, Belastung

Die den Untersuchungen zu Grunde gelegten Brückenquerschnitte (inkl. Schutz- und Deckschicht sowie Temperierungssystem) weisen folgende Spezifikationen auf:

1. Betonfahrbahntafel einer Verbundbrücke (System A, „Verbundbrücke“):
 - a. Aufbau:
 - Deckschicht: $h = 35\text{mm}$ (Abbildung 1, [2])
 - Zwischenschicht: $h = 45\text{mm}$ (Abbildung 1, [2])
 - Schutzschicht: $h = 30\text{mm}$ (Abbildung 1, [2])
 - Dichtungsschicht: $h = 10\text{mm}$ (Abbildung 1, [2])
 - Betonfahrbahntafel: $h = 320\text{mm}$ (Abbildung 1, [2])
 - Rohrregister (Lage): auf der Schutzschicht
 - b. Rohrregister:
 - Material: PE-Xa mit Aluminiumummantelung [3]
 - Rohrabmessungen: $d = 25\text{mm}$ (Außendurchmesser), $t = 2,3\text{mm}$
 - Rohrabstand: $b = 100\text{mm}$
 - c. Belastung:
 - Temperatur: -6°C , -4°C , -2°C , 0°C , 2°C
2. Orthotrope Fahrbahnplatte (System B, „Stahlbrücke“):
 - a. Aufbau:
 - entspricht dem Aufbau aus System A, jedoch anstelle der Betonfahrbahntafel:
 - orthotrope Platte: $a = 300\text{mm}$
 $e = 300\text{mm}$
 $t_{\text{Dbl}} = 14\text{mm}$
 $h_{\text{Rippe}} = 200\text{mm}$
 $t_{\text{Rippe}} = 12\text{mm}$
 - b. Rohrregister:
 - entspricht dem Aufbau aus System A
 - c. Belastung:
 - entspricht den Belastungen aus System A

Die geometrischen Abmessungen des Überbaus sind gemäß diesen Angaben in Abbildung 1 dargestellt.

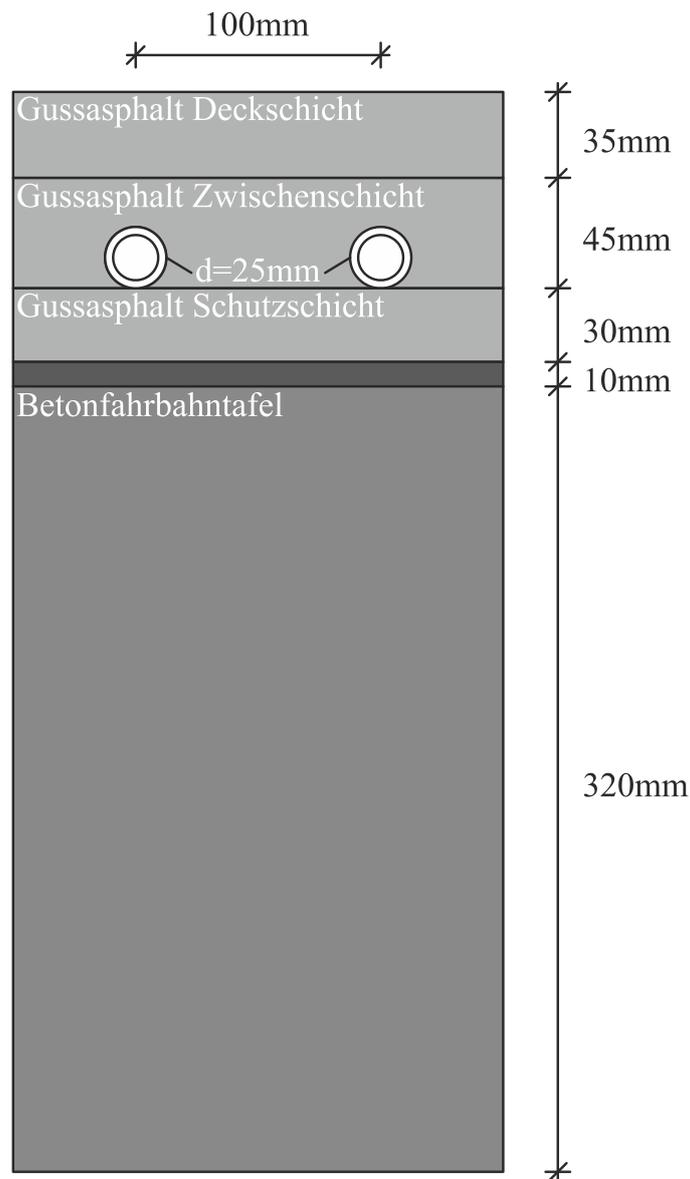


Abbildung 1: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn, Fahrbahnaufbau

3.3 Vorgehensweise

Die Temperatur auf Fahrbahnoberfläche T_O hängt von folgenden Parametern ab:

- Aufbau des Fahrbahnsystems (inkl. Lage und Abstand der Rohre)
- Außen- / Umgebungstemperatur T_U
- Temperatur des Mediums (z.B. Wasser) $T_{w,v}$ (Vorlauftemperatur)
- Fließgeschwindigkeit des Kühlmediums v
- Position des betrachteten Querschnitts / Rohrlänge L
- Vorlaufzeit T (Reaktionszeit)

Die Ermittlung der Temperatur T_O erfolgt in zwei konsekutiven Schritten:

- Ermittlung der Temperaturentwicklung $T_w(x,t)$ im maßgebenden Querschnitt (Rücklauftemperatur) bis zum Zeitpunkt T (Reaktionszeit)
- Ermittlung der Oberflächentemperatur T_O zum Zeitpunkt T basierend auf der Temperaturentwicklung $T_w(x,t)$

3.4 Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x)$ im maßgebenden Querschnitt – eingeschwungener Zustand („steady state“), $T_U = const$

Die Temperatur des Mediums T_w nimmt über die Länge des Rohres ab, da diesem aufgrund des vorherrschenden Temperaturgefälles Wärme entzogen wird. Der Wärmestrom steigt hierbei linear zum Temperaturgefälle an, im Gleichgewichtszustand ($T_w = T_{Bauteil}$) findet kein Wärmetransport statt.

Mit Hilfe einer Finite-Elemente-Berechnung wird zunächst für den eingeschwungenen Zustand der Wärmestrom für ein frei gewähltes Temperaturgefälle ($T_{w,1} - T_{u,1} < 0$) ermittelt. Dieser ermöglicht die Ermittlung des Wärmestroms für beliebige Temperaturgefälle bzw. beliebige Temperaturen T_w :

$$\theta(T_w) = \frac{\theta(T_{w,1}) - \theta(T_{w,2})}{T_{w,1} - T_{w,2}} \cdot T_w + \theta(T_{w,2}) - \frac{\theta(T_{w,1}) - \theta(T_{w,2})}{T_{w,1} - T_{w,2}} \cdot T_{w,2}$$

Sind die Umgebungstemperaturen an der Bauteilperipherie überall identisch ($T_U = const$), so findet bei einer Temperatur $T_{w,2} = T_{u,1}$ kein Wärmestrom statt ($\theta(T_{u,1}) = 0$), die Gleichung kann wie folgt vereinfacht werden:

$$\theta(T_w, T_U) = \frac{\theta(T_{w,1})}{T_{w,1} - T_{u,1}} \cdot (T_w - T_{u,1})$$

bzw.

$$\theta(T_w) = a \cdot (T_w - T_{u,1})$$

$$a = \frac{\theta(T_{w,1})}{T_{w,1} - T_{u,1}}$$

Somit kann nun für jede beliebige Temperatur T_w im Rohr der resultierende Wärmestrom ermittelt werden.

Beispiel:

Für das Modell mit folgenden Randbedingungen wird der Wärmestrom in das Rohr hinein im eingeschwungenen Zustand („steady state“, $t = \infty$) berechnet:

- Außen- / Umgebungstemperatur $T_U = -2^\circ\text{C}$
- Temperatur des Mediums $T_w = 16^\circ\text{C}$

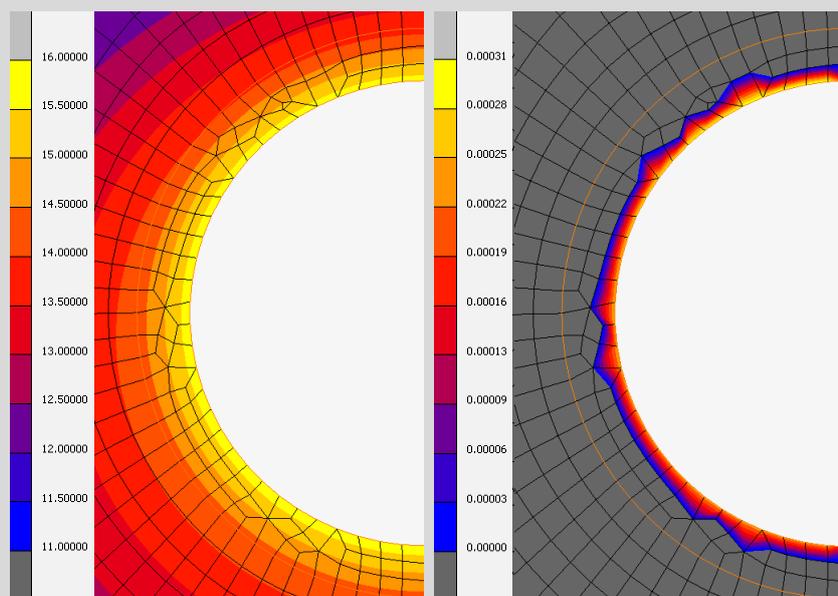


Abbildung 2: Steady State (Temperaturverteilung, Wärmestrom im Übergangsbereich)

Der Wärmestrom, welcher im eingeschwungenen Zustand vom Trägermedium in das Bauteil ab-

fließt, wird knotenweise über die Innenwandung des Rohres ausgelesen und aufsummiert. Es ergibt sich (je mm Rohrlänge):

$$\theta(T_{W,1}) = 0,017416286 [W/mm]$$

Die Gleichung für den Wärmestrom bei beliebigen Temperaturen ergibt sich somit zu:

$$\theta(T_W, T_U = -2^\circ C) = a \cdot (T_W - T_U)$$

$$a = \frac{0.017416286}{16 - (-2)} = 9,676 \cdot 10^{-4}, T_U = -2^\circ C$$

HINWEIS: Durch Ausnutzung der Symmetrie wurde lediglich ein Halbrohr abgebildet. Der aufsummierte Wärmestrom wurde daher mit „2“ multipliziert.

Der Wärmestrom θ je ΔL Rohrlänge lässt sich als in der Zeit Δt übertragene Wärmemenge Q schreiben:

$$\theta \cdot \Delta L [W] = \frac{Q [Ws]}{\Delta t [s]}$$

Diese Beziehung lässt sich nach der in der Zeit Δt übertragenen Wärmemenge Q umstellen:

$$Q = \theta \cdot \Delta t \cdot \Delta L$$

Die Wärmekapazität C eines Körpers / Mediums gibt an, wie viel thermische Energie Q er bezogen auf die Temperaturänderung ΔT_W aufnimmt oder abgibt (bzw. wieviel Energie benötigt wird, um ihn um ΔT_W zu erwärmen). Hier besteht folgender Zusammenhang:

$$C \left[\frac{Ws}{K} \right] = \frac{Q [Ws]}{\Delta T_W [K]}$$

Die auf das Volumen bezogene Wärmekapazität s eines Körpers ist definiert als

$$s = \frac{C}{V} = \frac{Q}{V \cdot \Delta T_W} \left[\frac{Ws}{mm^3 K} \right]$$

Dies lässt sich umschreiben zu:

$$\Delta T_W = - \frac{Q}{V \cdot s}$$

Das Minuszeichen wurde eingefügt, da hier die Energie betrachtet wird, welche dem Wasser entzogen wird.

Die Geschwindigkeit des Trägermediums ist definiert durch den in der Zeit Δt zurückgelegten Weg ΔL :

$$v \left[\frac{mm}{s} \right] = \frac{\Delta L [mm]}{\Delta t [s]}$$

Durch umstellen:

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{v}$$

Zur Ermittlung des Flüssigkeitsvolumens, welches den Rohrquerschnitt A_W in der Zeit Δt passiert, wird folgende Gleichung aufgestellt:

$$V \left[\frac{mm^3}{s} \right] = \frac{A_W \cdot \Delta L [mm^2 \cdot mm]}{\Delta t [s]}$$

$$V \left[\frac{mm^3}{s} \right] = A_W \cdot v \left[mm^2 \cdot \frac{mm}{s} \right]$$

Somit ergibt sich die Temperaturänderung in der Zeit Δt bei konstantem Wärmestrom zu:

$$\Delta T_W = -\frac{Q}{V \cdot s \cdot \Delta t} = -\frac{Q}{A_W \cdot v \cdot s \cdot \Delta t} = -\frac{\theta}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot \Delta L \frac{\left[\frac{W}{mm}\right]}{\left[mm^2\right] \left[\frac{mm}{s}\right] \left[\frac{Ws}{mm^3 K}\right]} [mm]$$

Die volumenspezifische Wärmekapazität des Trägermediums lässt sich aus der massenspezifischen Wärmekapazität wie folgt ableiten:

$$s = c \cdot \rho$$

mit

$$c = 4.190 \text{ [Ws/kg K]} \quad (\text{Wasser})$$

$$\rho = 1 \cdot 10^{-6} \text{ [kg/mm}^3\text{]} \quad (\text{Wasser})$$

Die zuvor aufgestellte Funktion zur Bestimmung der Temperaturänderung lässt sich in differentieller Form schreiben

$$\Delta T_W = -\frac{\theta}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot \Delta L \rightarrow \delta T_W = -\frac{\theta(x)}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot \delta x$$

wobei θ abhängig von T_W ist:

$$\theta(x) = a \cdot (T_W(x) - T_{U,1})$$

$$\delta T_W = -\frac{a \cdot T_W(x) - a \cdot T_{U,1}}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot \delta x$$

Dies lässt sich umschreiben in:

$$\frac{\delta T_W}{\delta x} + \tilde{a} \cdot T_W(x) + \tilde{b} = 0$$

mit

$$\tilde{a} = \frac{a}{A_W \cdot v \cdot s}, \tilde{b} = -\tilde{a} \cdot T_{U,1}$$

Zur Lösung dieser Differentialgleichung wird eine Randbedingung benötigt, welche durch die Vorlauf-temperatur $T_{W,V}$ gegeben ist

$$T_W(x = 0) = T_{W,V}$$

Die Lösung der DGL führt zu folgender Gleichung für die Temperatur:

$$T_W(x) = \frac{e^{-\tilde{a}x} \cdot (\tilde{b} + T_{W,V} \cdot \tilde{a}) - \tilde{b}}{\tilde{a}} \rightarrow$$

$$T_W(x) = e^{-\frac{a}{A_W \cdot v \cdot s} x} \cdot (T_{W,V} - T_{U,1}) + T_{U,1}$$

$$a = \frac{\theta(T_{W,V})}{T_{W,V} - T_{U,1}}$$

Beispiel:

Für das oben angegebene Modell wird die Wassertemperatur im eingeschwungenen Zustand für jede Position im Rohr berechnet. Folgende Randbedingungen werden zu Grunde gelegt:

- Außen- / Umgebungstemperatur $T_U = T_{U,1} = -2^\circ\text{C}$
- Temperatur des Mediums $T_{w,v} = 12^\circ\text{C}$
- Fließgeschwindigkeit des Mediums $v = 400 \text{ mm/sec}$
- spezifische Wärmekapazität $c = 4.190 \text{ Ws/kg K}$ (Wasser)
- Dichte $\rho = 1 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ (Wasser)
- Innerer Rohrdurchmesser $d_i = 20,4 \text{ mm}$
- Parameter „a“ $a = 9,676 \cdot 10^{-4}$

HINWEIS: Die Temperatur $T_{w,v}$ muss nicht mit derjenigen übereinstimmen, welche zur Ermittlung von $\Theta(T_w)$ verwendet wurde. Lediglich die Außen- / Umgebungstemperatur T_U muss den gleichen Wert aufweisen wie der zur Ermittlung von $\Theta(T_w)$ verwendete ($T_{U,1}$).

Die Fläche des Wassers ergibt sich zu:

$$A_w = \pi \cdot r_i^2 = \pi \cdot (20,4/2)^2 = 326,85 [\text{mm}^2]$$

Für die auf das Volumen bezogene Wärmekapazität s ergibt sich:

$$s = 4,19 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{Ws}}{\text{mm}^3 \text{K}} \right]$$

Somit ergibt sich folgende Temperaturgleichung:

$$T_w(x) = e^{-\frac{9,676 \cdot 10^{-4}}{326,85 \cdot 400 \cdot 4,19 \cdot 10^{-3}} x} \cdot (12 - (-2)) - 2$$

$$\rightarrow T_w(x) = 14 \cdot e^{-1,76628 \cdot 10^{-6} x} - 2$$

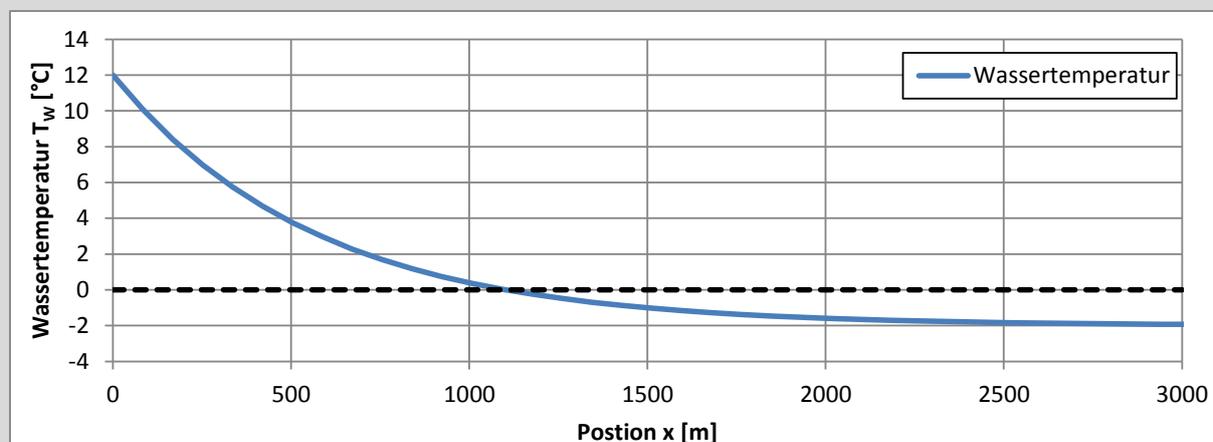


Abbildung 3: Temperaturentwicklung des Trägermediums (Wasser) über die Rohrlänge, eingeschwungener Zustand („steady state“)

3.5 Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x)$ im maßgebenden Querschnitt – eingeschwungener Zustand („steady state“), $T_U = \text{beliebig}$

Im Rahmen dieses Projektes wird vereinfacht davon ausgegangen, dass sich die Umgebungstemperaturen an unterschiedlichen Bauteilkanten (Straßenoberfläche / Brückenunterseite) nicht voneinander unterscheiden. Nur so behält die Aussage, dass bei einer Temperatur $T_{W,2} = T_{U,1}$ kein Wärmestrom stattfindet ($\Theta(T_{U,1})=0$), Gültigkeit.

Sind die Umgebungstemperaturen großemäßig beliebig verteilt, so kann ad hoc keine Temperatur für das Trägermedium angegeben werden, bei welcher kein Wärmestrom stattfindet. In diesem Fall muss die FE-Berechnung für zwei unterschiedliche Temperaturen ($T_{W,1}$, $T_{W,2}$) des Trägermediums durchgeführt und die zugehörigen Wärmeströme ($\Theta(T_{W,1})$, $\Theta(T_{W,2})$) ermittelt werden. Diese sind dann in die oben angegebene Gleichung für den Wärmestrom einzusetzen:

$$\theta(T_W) = \frac{\theta(T_{W,1}) - \theta(T_{W,2})}{T_{W,1} - T_{W,2}} \cdot T_W + \theta(T_{W,2}) - \frac{\theta(T_{W,1}) - \theta(T_{W,2})}{T_{W,1} - T_{W,2}} \cdot T_{W,2}$$

$$\theta(T_W) = a \cdot (T_W - T_{W,2}) + \theta(T_{W,2})$$

$$a = \frac{\theta(T_{W,1}) - \theta(T_{W,2})}{T_{W,1} - T_{W,2}}$$

Die Wärmestromgleichung wird erneut in die zuvor aufgestellte Funktion zur Bestimmung der Temperaturänderung (in differentieller Form) eingesetzt:

$$\delta T_W = - \frac{\theta(x)}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot \delta x$$

wobei Θ abhängig von T_W ist:

$$\theta(x) = a \cdot (T_W(x) - T_{W,2}) + \theta(T_{W,2})$$

$$\delta T_W = - \frac{a \cdot T_W(x) - a \cdot T_{W,2} + \theta(T_{W,2})}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot \delta x$$

$$a = \frac{\theta(T_{W,1}) - \theta(T_{W,2})}{T_{W,1} - T_{W,2}}$$

Dies lässt sich wie zuvor umschreiben in:

$$\frac{\delta T_W}{\delta x} + \tilde{a} \cdot T_W(x) + \tilde{b} = 0$$

mit

$$\tilde{a} = \frac{a}{A_W \cdot v \cdot s}, \tilde{b} = -\tilde{a} \cdot \left(T_{W,2} - \frac{1}{a} \cdot \theta(T_{W,2}) \right)$$

Die Lösung der DGL führt wie zuvor zu folgender Gleichung für die Temperatur, lediglich der Parameter \tilde{b} ist unterschiedlich:

$$T_W(x) = \frac{e^{-\tilde{a} \cdot x} \cdot (\tilde{b} + T_{W,V} \cdot \tilde{a}) - \tilde{b}}{\tilde{a}} \rightarrow$$

$$T_W(x) = e^{-\frac{a}{A_W \cdot v \cdot s} x} \cdot \left(T_{W,V} - T_{W,2} + \frac{\theta(T_{W,2})}{a} \right) + T_{W,2} - \frac{\theta(T_{W,2})}{a}$$

$$a = \frac{\theta(T_{W,1}) - \theta(T_{W,2})}{T_{W,1} - T_{W,2}}$$

3.6 Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x,t)$ im maßgebenden Querschnitt, $T_U=const$

Die zuvor ermittelte Gleichung $T_w(x)$ gilt für den eingeschwungenen Zustand ($t=\infty$). Diese ist nun so anzupassen, dass sie für beliebige Zeitpunkte t Gültigkeit besitzt.

Beispiel:

Für das Modell mit folgenden Randbedingungen wird der Wärmestrom in das Rohr hinein im Zeitschrittverfahren berechnet:

- Außen- / Umgebungstemperatur $T_U = -2^\circ\text{C}$
- Temperatur des Mediums $T_W = 16^\circ\text{C}$

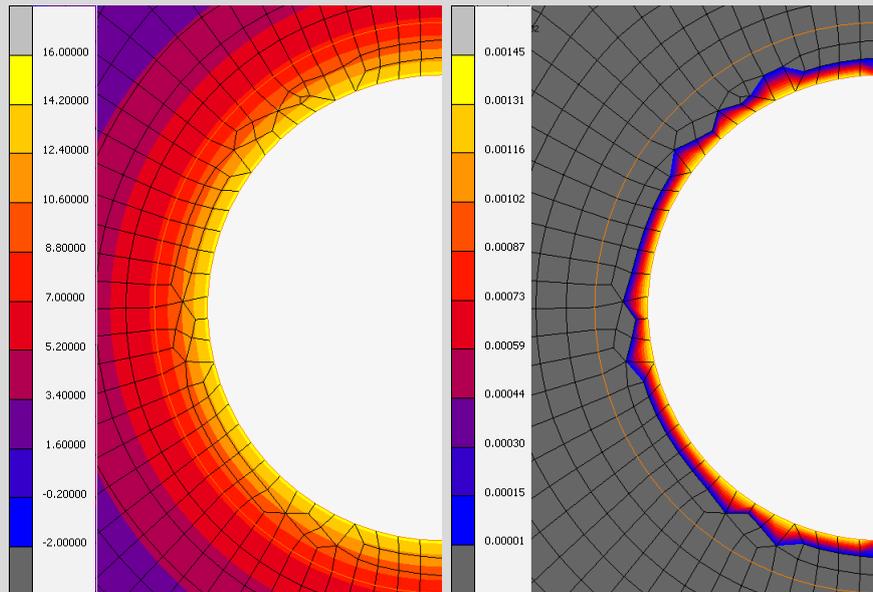


Abbildung 4: Zeitschrittberechnung $t=300$ sec (Temperaturverteilung, Wärmestrom im Übergangsbereich)

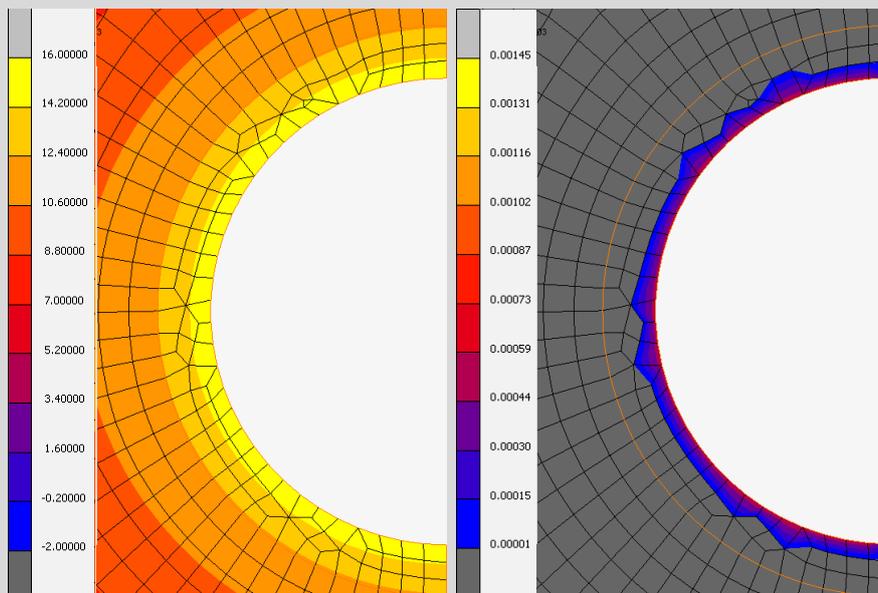


Abbildung 5: Zeitschrittberechnung $t=3600$ sec (Temperaturverteilung, Wärmestrom im Übergangsbereich)

Zu Beginn der Berechnung ($t=300$ sec) ist die Temperaturdifferenz zwischen Trägermedium und angrenzendem Bauteil noch relativ hoch, der Wärmestrom daher groß.

$$\theta(T_W, t = 300\text{sec}) = 0,093595189[\text{W}/\text{mm}]$$

Nach 3.600 sec ist die Temperaturdifferenz bereits geringer, der Wärmestrom nimmt ab:

$$\theta(T_W, t = 3.600\text{sec}) = 0,034997644 \text{ [W/mm]}$$

Nach einer gewissen Zeit strebt der Wärmestrom nach dem eingeschwungenen Zustand.

$$\theta(T_W, t = \text{steady state}) = 0,017416286 \text{ [W/mm]}$$

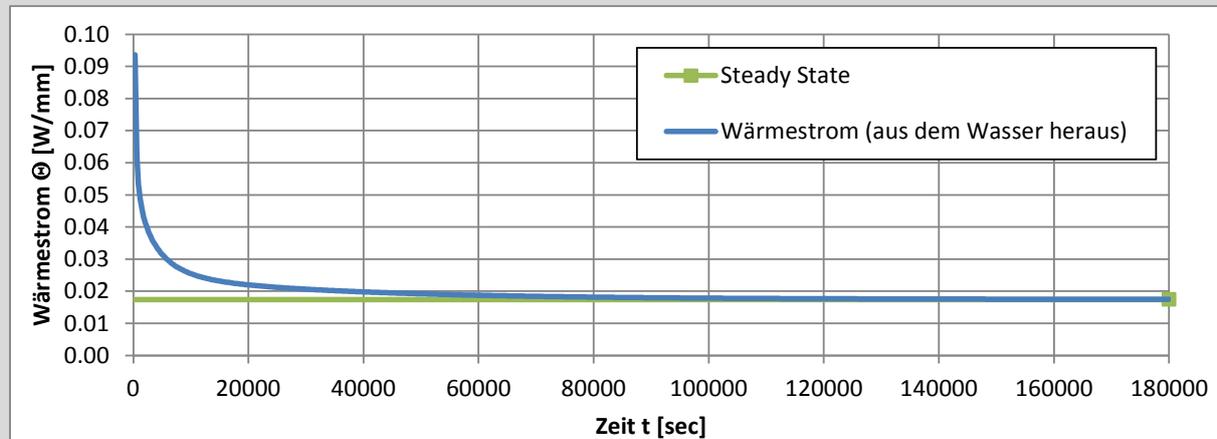


Abbildung 6: Wärmestromentwicklung über die Zeit t

Dieser sich ändernde Wärmestrom soll nun in der Gleichung $T_w(x)$ in folgender Form Berücksichtigung finden:

$$\theta(T_W, t) = a(t) \cdot (T_W - T_{U,1})$$

$$a(t) = \frac{\theta_{T_V}(t)}{T_{W,V} - T_{U,1}}$$

Hierzu wird die Wärmestromentwicklung über die Zeit (Abbildung 6) mittels einer Regressionsfunktion angenähert:

$$\theta_{T_V}(t) = n \cdot t^m + p$$

Folgende 3 Randbedingungen werden festgelegt:

- der Startwert (1. Inkrement, $t \approx 0$) soll exakt sein
- ein beliebig zu wählender Endwert ($t = \text{max}$) soll exakt sein
- die dazwischen eingehängte Regressionsfunktion soll in der Summe die kleinsten Fehlerquadrate aufweisen

Die Gleichung zur Ermittlung der Temperaturentwicklung $T_w(x, t)$ lautet demnach:

$$T_W(x, t) = e^{-\frac{a(t)}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot x} \cdot (T_{W,V} - T_{U,1}) + T_{U,1}$$

$$a(t) = \frac{n \cdot t^m + p}{T_{W,V} - T_{U,1}}$$

Beispiel:

Für die zuvor ermittelte Wärmestromentwicklung wird eine Regressionsfunktion folgender Form gesucht:

$$\theta_{TV}(t) = n \cdot t^m + p$$

Diese soll zum Zeitpunkt $t=12h$ exakt sein.

Randbedingungen:

- $\theta_{TV}(300) = \theta_{FE,TV}(300) = 0,093595189$
- $\theta_{TV}(43.200) = \theta_{FE,TV}(43.200) = 0,019569394$

Nun wird eine Zeit $300 < t_i < 43.200$, zu der die Regressionsfunktion den korrekten Wert annimmt, so gewählt, dass die Summe der Fehlerquadrate minimal wird. Hierzu wird für jedes Wertepaar $\{\theta_{TV}(t_i); \theta_{FE,TV}(t_i)\}$ ein m_i gesucht, für welches die Gleichung exakt erfüllt ist, wobei sich die beiden Konstanten n_i und p_i ergeben:

$$n_i = \frac{\theta_{TV}(t_i) - \theta_{TV}(300)}{t_i^m - 300^m}$$

$$p_i = \theta_{TV}(t_i) - n \cdot 300^m$$

Für jedes t_i wird die Summe der Fehlerquadrate gebildet:

$$R^2(t_i) = \sum_{t=300}^{43.200} \left(\theta_{TV}(t, m_i) - \theta_{FE,TV}(t, m_i) \right)^2$$

Im vorliegenden Fall stellt sich das kleinste Fehlerquadrat ein für

$$t_i = 9.600 \rightarrow R^2(t_i) = 6,05555 \cdot 10^{-5}$$

Hieraus ergeben sich für die Konstanten m , n und p die folgende Werte:

$$m = -0,576858 \quad | \quad n = 2,107476 \quad | \quad p = 0,015105$$

Die Regressionsgleichung lautet somit:

$$a(t) = \frac{\theta_{TV}(t)}{T_{W,V} - T_{U,1}} = \frac{2,107476 \cdot t^{-0,576858} + 0,015105}{16 - (-2)}$$

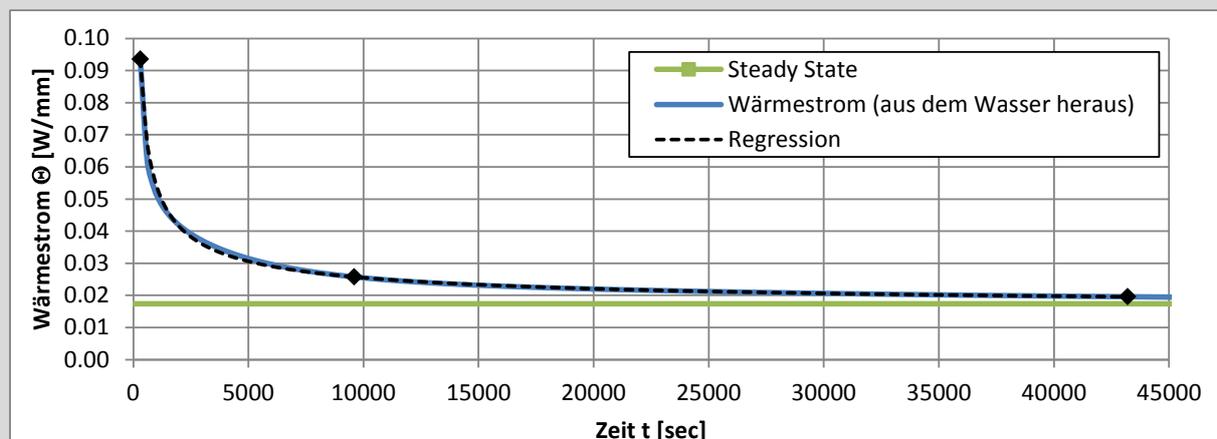


Abbildung 7: Wärmestromentwicklung über die Zeit t , Regression mit 3 Stützstellen

Die Gleichung zur Ermittlung der Temperatur des Trägermediums zu jeder beliebigen Zeit an jeder beliebigen Position des Rohres lautet:

$$T_W(x, t) = 14 \cdot e^{-\frac{a(t)}{547,80} \cdot x} - 2$$

$$a(t) = \frac{2,107476 \cdot t^{-0,576858} + 0,015105}{18}$$

(für $T_U = -2^\circ\text{C}$, $T_{w,v} = 12^\circ\text{C}$, $v = 400 \text{ mm/sec}$)

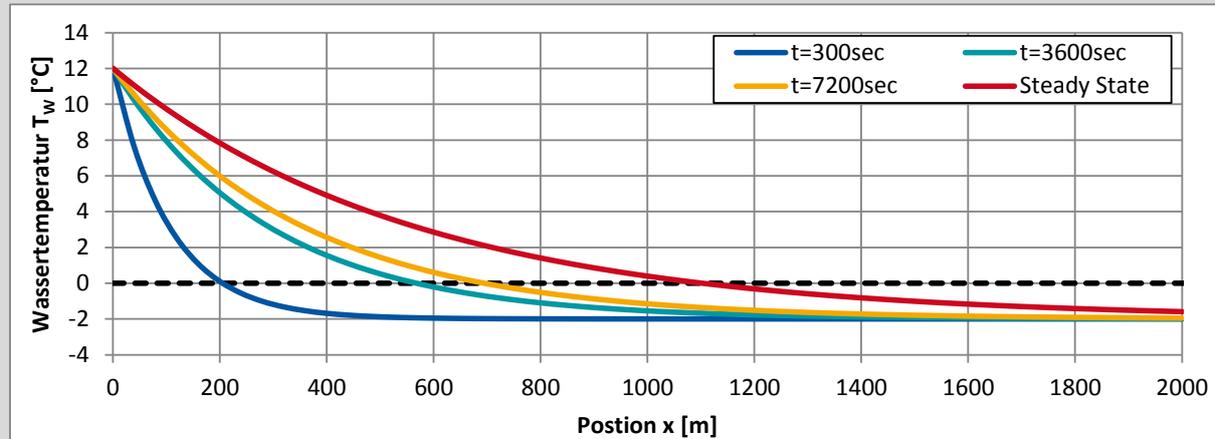


Abbildung 8: Entwicklung der Temperatur des Trägermediums (Wasser) entlang des Rohres (Position x) zu unterschiedlichen Zeitpunkten t

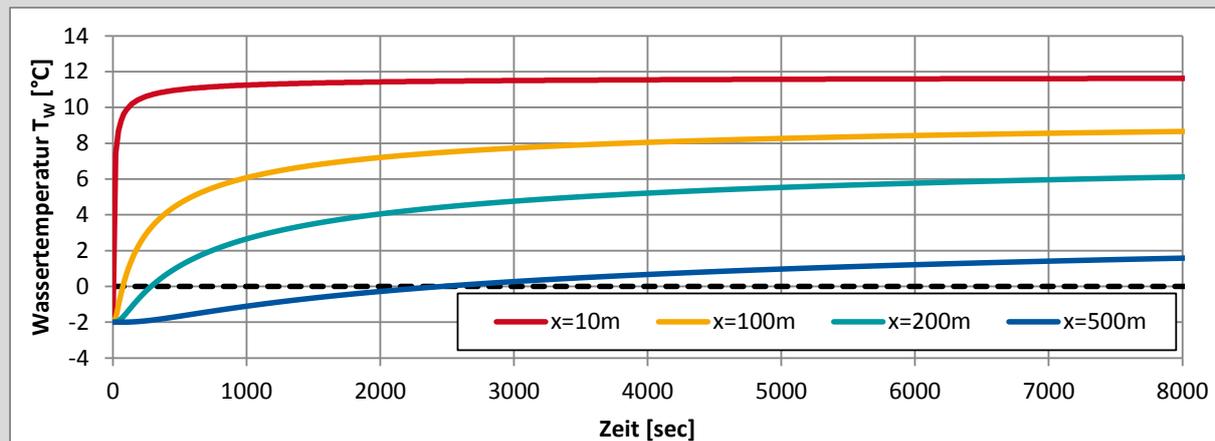


Abbildung 9: Entwicklung der Temperatur des Trägermediums (Wasser) über die Zeit t an unterschiedlichen Positionen x des Rohres

3.7 Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x,t)$ im maßgebenden Querschnitt, $T_U=beliebig$

Das im vorherigen Kapitel beschriebene Vorgehen kann unter Zuhilfenahme der nach Kapitel 0 ermittelten Gleichung für die Temperaturentwicklung $T_w(x)$ auf Bauwerke mit größtmäßig beliebig verteilten Umgebungstemperaturen angepasst werden.

Für ein Bauteil mit identischen Umgebungstemperaturen an der Bauteilperipherie ($T_U=const$) konnte festgehalten werden, dass bei einer Temperatur $T_{w,2} = T_{U,1}$ kein Wärmestrom stattfindet ($\Theta(T_{U,1})=0$), und dies unabhängig von der Zeit t .

Im Falle von nicht-konstanten Umgebungstemperaturen tritt dieser Fall nicht ein. Hier ist nun eine Temperatur $T_{w,s}$ zu ermitteln, bei welcher unabhängig von der Zeit t stets der gleiche Wärmestrom ($\Theta(T_{w,s},t)=\Theta_s$) vorherrscht. Hierzu werden die Wärmestromgleichungen für den eingeschwungenen Zustand (steady state) sowie für einen weiteren, beliebigen (transienten) Zeitpunkt t_p aufgestellt und geschnitten.

$$\theta_{steady}(T_w) = a_{steady} \cdot T_w + b_{steady}$$

$$a_{steady} = \frac{\theta_{steady}(T_{W,1}) - \theta_{steady}(T_{W,2})}{T_{W,1} - T_{W,2}}$$

$$b_{steady} = \theta_{steady}(T_{W,2}) - a_{steady} \cdot T_{W,2}$$

und

$$\theta_{trans}(T_W) = a_{trans} \cdot T_W + b_{trans}$$

$$a_{trans} = \frac{\theta_{trans}(T_{W,1}) - \theta_{trans}(T_{W,2})}{T_{W,1} - T_{W,2}}$$

$$b_{trans} = \theta_{trans}(T_{W,2}) - a_{trans} \cdot T_{W,2}$$

Schnittpunkt:

$$T_S = \frac{b_{trans} - b_{steady}}{a_{steady} - a_{trans}}$$

$$\theta_S = a_{trans} \cdot T_S + b_{trans}$$

Somit lässt sich aufstellen:

$$\theta(T_S, t) = a(t) \cdot T_W + b(t) = \theta_S \rightarrow$$

$$b(t) = \theta_S - a(t) \cdot T_W$$

Hierdurch lässt sich die ursprüngliche Wärmestromgleichung vereinfachen zu:

$$\theta(T_W, t) = a(t) \cdot T_W - a(t) \cdot T_S + \theta_S$$

$$\theta(T_W, t) = a(t) \cdot (T_W - T_S) + \theta_S$$

$$a(t) = \frac{\theta_{T_V}(t) - \theta_S}{T_{W,V} - T_S}$$

Hierzu wird wiederum die Wärmestromentwicklung über die Zeit mittels einer Regressionsfunktion angenähert:

$$\theta_{T_V}(t) = n \cdot t^m + p$$

Folgende 3 Randbedingungen werden festgelegt:

- der Startwert (1. Inkrement, $t \approx 0$) soll exakt sein
- ein beliebig zu wählender Endwert ($t = max$) soll exakt sein
- die dazwischen eingehängte Regressionsfunktion soll in der Summe die kleinsten Fehlerquadrate aufweisen

Die Gleichung zur Ermittlung der Temperaturentwicklung $T_w(x, t)$ lautet demnach:

$$T_W(x, t) = e^{-\frac{a(t)}{A_W \cdot v \cdot s} x} \cdot \left(T_{W,V} - T_S + \frac{\theta_S}{a(t)} \right) + T_S - \frac{\theta_S}{a(t)}$$

$$a(t) = \frac{n \cdot t^m + p - \theta_S}{T_{W,V} - T_S}$$

3.8 Ermittlung der Oberflächentemperatur T_O zum Zeitpunkt t basierend auf der Temperaturentwicklung $T_w(x, t)$

Mit Hilfe der aufgestellten Gleichung $T_w(x, t)$ kann die Temperatur des Trägermediums zu beliebigen Zeitpunkten an beliebigen Positionen des Rohres ermittelt werden. Von Interesse ist jedoch vor allem die Oberflächentemperatur (Fahrbahnoberkante). Diese verändert sich zeitversetzt zur Temperatur des Mediums, da zunächst eine Systemerwärmung stattfindet (d.h. ein Teil der aufgebrachten Ener-

gie wird im System gespeichert). Erst zu dem Zeitpunkt, zu dem sich das System eingeschwungen hat (steady state), entspricht die abgegebene Energie (über die Oberflächen) je Zeiteinheit der zugeführten Energie (über das Rohr) je Zeiteinheit.

Zur Ermittlung der Oberflächentemperaturen $T_o(x,t)$ zu beliebigen Zeitpunkten an beliebigen Positionen wird der Wassertemperaturverlauf bis zum Zeitpunkt t an der Position x ermittelt (vgl. Abbildung 9) und als Randbedingung auf das FE-Modell aufgebracht. Die Transiente Analyse (Zeitschrittverfahren) liefert dann die Verteilung der Oberflächentemperatur zum Zeitpunkt t , deren Mittelwert im Diagramm als einzelner Punkt $T_o(x_i,t_i)$ aufgetragen werden kann.

Beispiel:

Für die zuvor ermittelte Temperaturentwicklung des Trägermediums an unterschiedlichen Positionen x zu verschiedenen Zeitpunkten t wird durch die zugehörigen Oberflächentemperaturen ergänzt. Dies wird hier beispielhaft durchgeführt für:

- Position $x = 100m$
- Zeitpunkt $t = 7200sec$

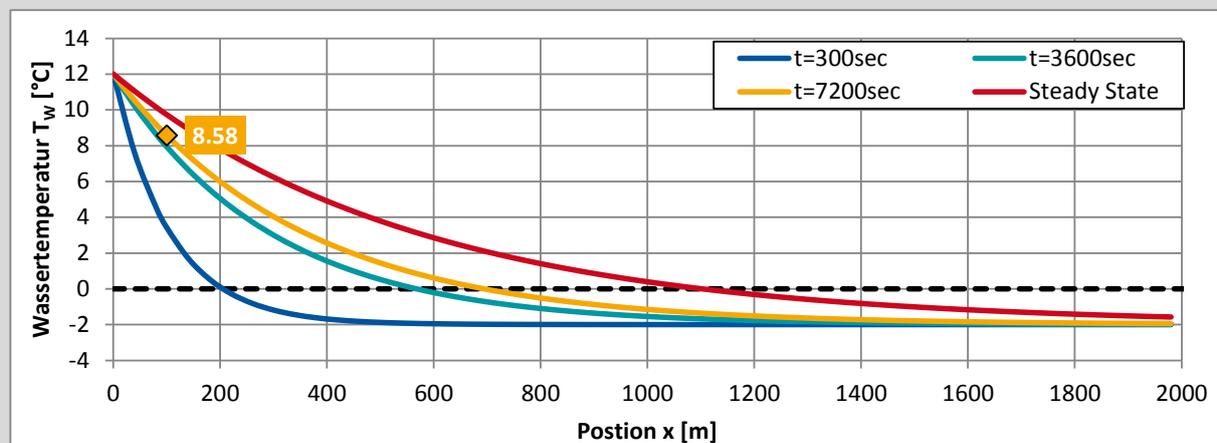


Abbildung 10: Entwicklung der Temperatur des Trägermediums (Wasser) entlang des Rohres (Position x) zu unterschiedlichen Zeitpunkten t

Die zugehörige Temperaturentwicklung (an der Stelle $x = 200m$ bis zum Zeitpunkt $t = 7200sec$) ist in Abbildung 11 dargestellt und wird als Randbedingung auf das FE-Modell aufgebracht.

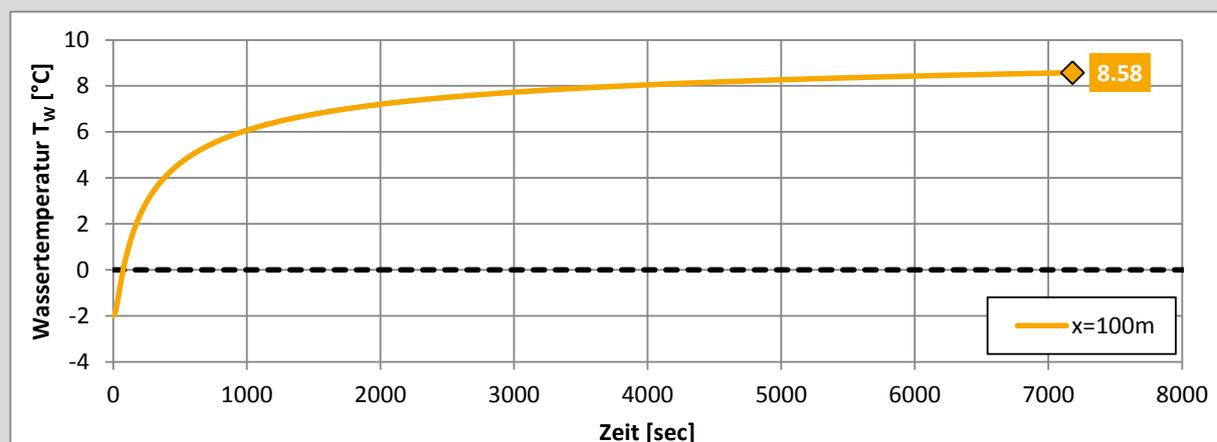


Abbildung 11: Entwicklung der Temperatur des Trägermediums (Wasser) entlang des Rohres (Position $x=100m$) zu unterschiedlichen Zeitpunkten t

Die Auswertung der Temperaturen an den Oberflächenknoten des Modells ergibt im Mittel den in dargestellten Verlauf der Oberflächentemperaturen.

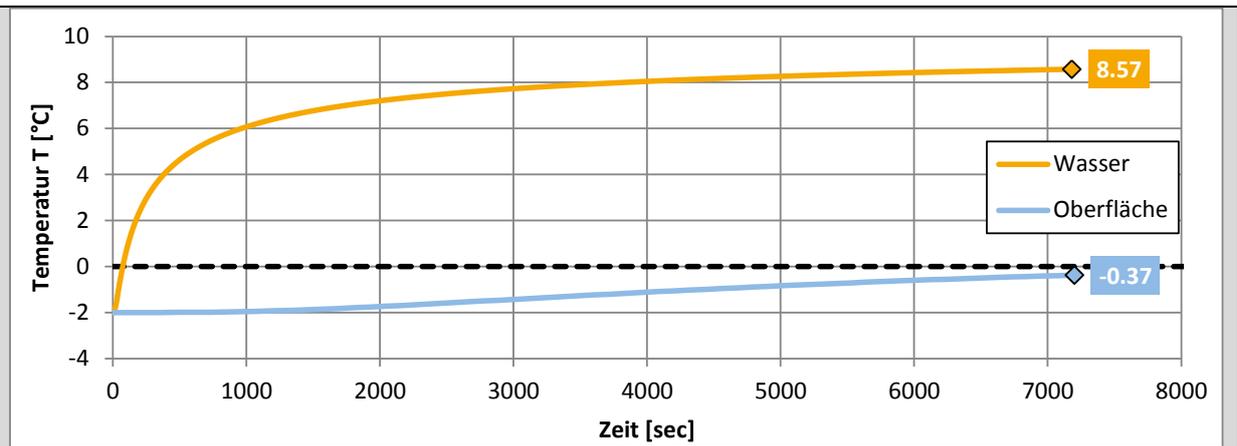


Abbildung 12: Entwicklung der Temperatur des Trägermediums (Wasser) sowie der Oberflächentemperatur entlang des Rohres (Position $x=100m$) zu unterschiedlichen Zeitpunkten t

Diese Berechnung kann nun für die relevanten Zeitpunkte ($t=7.200sec$, $t=14.400sec$) sowie eine endliche Anzahl an Stützstellen ($x=\{0,20,40,60,80,100,120\}m$) durchgeführt werden.

Hierbei sei jedoch erwähnt, dass die Temperatur an Fahrbahnoberfläche direkt über dem Rohr (Rohrlage: $y=50mm$) höher, zwischen den Rohren geringer ist (vgl. Abbildung 13).

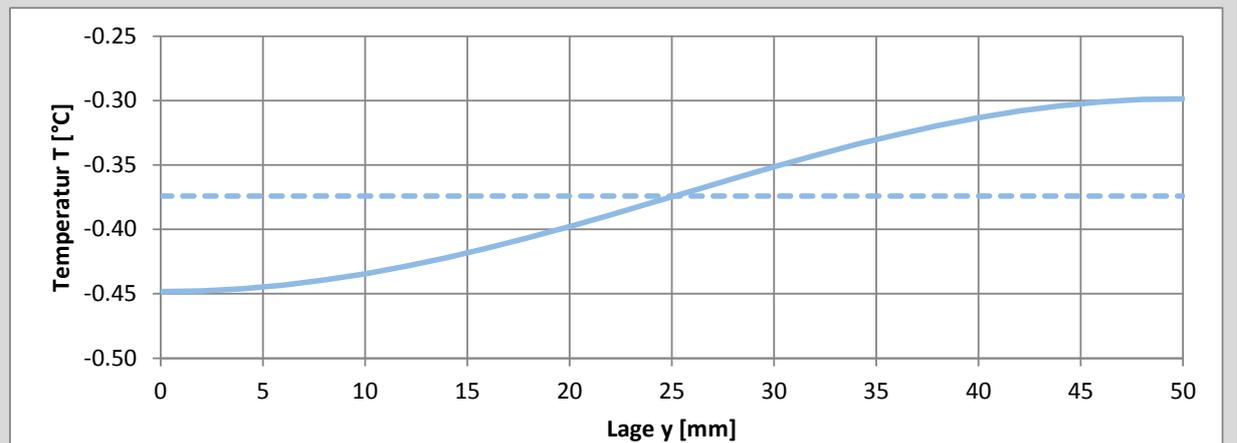


Abbildung 13: Temperaturverteilung an der Oberfläche ($y=0mm$: zwischen zwei Rohren, $y=50mm$: über einem Rohr)

4 Beschreibung des verwendeten Finite Elemente (FE) Modells

Zur Ermittlung des Wärmestroms im eingeschwungenen Zustand, der Wärmestromentwicklung sowie der Temperatur an Fahrbahnoberfläche wird ein 2D Finite Elemente (FE) Modell erstellt.

4.1 FE-Modell Betonfahrbahn

Unter Ausnutzung der Symmetrie wird nur ein halbes Modell abgebildet (Abbildung 14). Die Ergebnisse (Wärmestrom) sind mit „2“ zu multiplizieren.

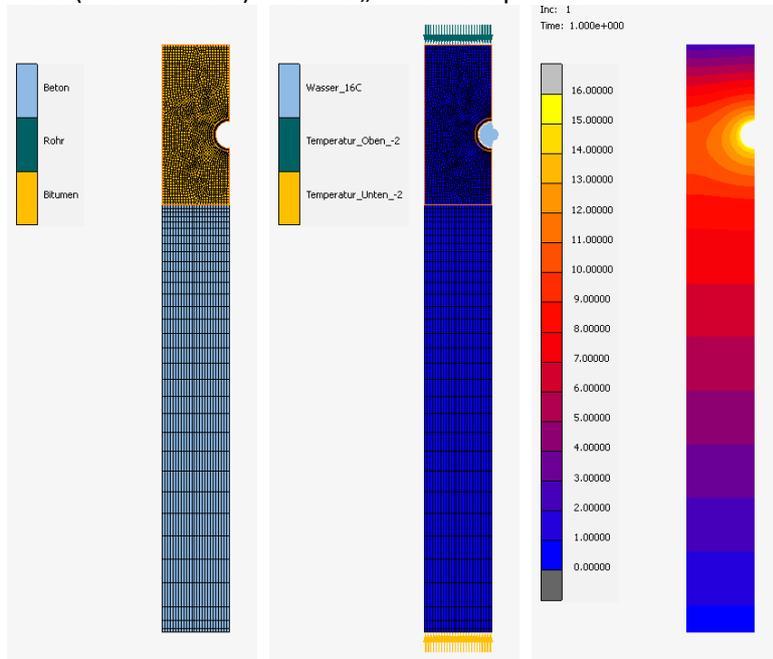


Abbildung 14: FE-Modell „Beton“ (Materialzuweisung / Randbedingungen / Temperaturverteilung)

Tabelle 2: Materialparameter FE „Beton“

Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spezifische Wärmekapazität c [J/(kg K)]	Dichte ρ [kg/m ³]
Beton	2,5	1.000	2.500
Rohr	0,35	900	800
Gussasphalt	0,7	1.000	2.100

Tabelle 3: Randbedingungen „Beton“

Name	Belastungstyp	Temperatur T_w [°C]	Wärmeübergangskoeffizient α [W/(m ² K)]
Wasser	„edge film“	16	125 (100l/h, laminar) 285 (200l/h, turbulent) 1.143 (400l/h, turbulent)
Außentemperatur	„edge film“	-6 -4 -2 0 2	25*
Anfangsbedingung	„temperature“	-6 -4 -2 0 2	-

*Wärmestrom: aus dem Bauteil heraus, entspricht $R_{se} = 0,04$ [(m²K)/W]

4.2 FE-Modell Stahlfahrbahn

Unter Ausnutzung der Symmetrie wird nur eine halbe Rippe abgebildet (Abbildung 15). Die Ergebnisse (Wärmestrom) sind durch „3“ zu dividieren.

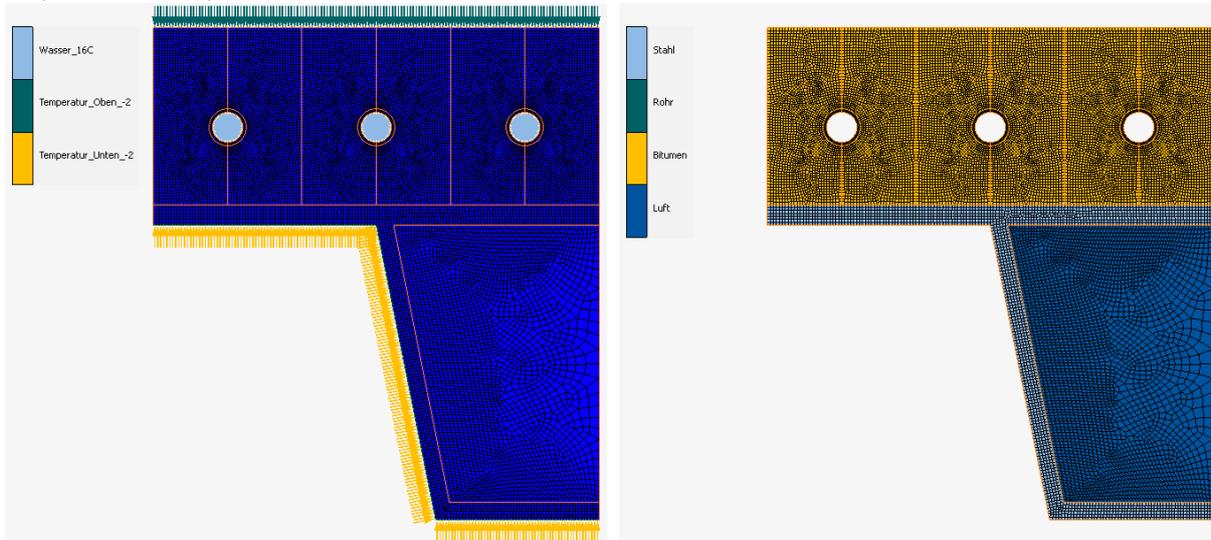


Abbildung 15: FE-Modell „Stahl“ (Materialzuweisung / Randbedingungen)

Tabelle 4: Materialparameter FE „Stahl“

Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spezifische Wärmekapazität c [J/(kg K)]	Dichte ρ [kg/m ³]
Stahl	50,0	450	7.850
Rohr	0,35	900	800
Gussasphalt	0,7	1.000	2.100
Luft (Rippe)	0,2	1.000	1,29

Tabelle 5: Randbedingungen „Stahl“

Name	Belastungstyp	Temperatur T_w [°C]	Wärmeübergangskoeffizient α [W/(m ² K)]
Wasser	„edge film“	16	125 (100l/h, laminar) 285 (200l/h, turbulent) 1.143 (400l/h, turbulent)
Außentemperatur	„edge film“	-6 -4 -2 0 2	25*
Anfangsbedingung	„temperature“	-6 -4 -2 0 2	-

*Wärmestrom: aus dem Bauteil heraus, entspricht $R_{se} = 0,04$ [(m²K)/W]

4.3 Wärmeübergangskoeffizient Wasser - Rohr

Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Trägermedium (Wasser) und Rohrwandung wird für jede Fließgeschwindigkeit separat nach [4] ermittelt.

Ermittlung der Reynoldszahl:

$$Re = \frac{w \cdot d_h}{\nu}$$

$$d_h = d_i$$

mit

d_h	hydraulischer Durchmesser [m]	
d_i	Rohrinnendurchmesser [m]	
w	mittlere Geschwindigkeit [m/s]	
ν	kinematische Viskosität [m ² /s]	(abhängig von T_w)

Laminare Strömung ($Re < 2320$) [4]

$$Nu = \left[49,028 + 4,173 \cdot Re \cdot Pr \cdot \frac{d_h}{L} \right]^{0,333}, d_h = d_i$$

$$\alpha_K = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_h}$$

mit

α_K	Wärmeübergangskoeffizient [W/m ² K]	
Re	Reynoldszahl	
Nu	Nußeltzahl	
Pr	Prandtlzahl	(abhängig von T_w)
d_h	hydraulischer Durchmesser [m]	
d_i	Rohrinnendurchmesser [m]	
L	Rohrlänge [m]	
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	(abhängig von T_w)

Beispiel:

Für eine Durchflussmenge von $V = 100 \text{ l/h}$ wird der Wärmeübergangskoeffizient α_K bestimmt.

- Temperatur des Mediums	$T_w = 12^\circ\text{C}$
- Durchflussmenge	$V = 100 \text{ l/h}$
- innerer Rohrdurchmesser	$d_i = 20,4 \text{ mm}$
- kinematische Viskosität	$\nu(T_w = 12^\circ\text{C}) = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Prandtlzahl	$Pr(T_w = 12^\circ\text{C}) = 8,916$
- Wärmeleitfähigkeit (Wasser)	$\lambda(T_w = 12^\circ\text{C}) = 0,585 \text{ W/mK}$

Fließgeschwindigkeit:

$$A_w = \pi \cdot r_i^2 = \pi \cdot (20,4/2)^2 = 326,85 [\text{mm}^2]$$

$$V = 100 [\text{l/h}] = 100 \cdot 100^3 [\text{mm}^3/\text{h}]$$

$$w = \frac{V}{A_w} = \frac{100 \cdot 100^3 / 3600 [\text{mm}^3/\text{sec}]}{326,85 [\text{mm}^2]} \approx 85 \left[\frac{\text{mm}}{\text{sec}} \right] = 0,085 \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right]$$

Ermittlung der Reynoldszahl:

$$Re = \frac{0,085 \cdot 0,0204}{1,24 \cdot 10^{-6}} = 1.398 < 2.320 \rightarrow \text{laminar}$$

Ermittlung der Nußeltzahl für unterschiedliche Rohrlängen:

$$Nu(L = 6m) = \left[49,028 + 4,173 \cdot 1.398 \cdot 8,916 \cdot \frac{0,0204}{6} \right]^{0,333} = 6,079$$

$$Nu(L = 30m) = \left[49,028 + 4,173 \cdot 1.398 \cdot 8,916 \cdot \frac{0,0204}{30} \right]^{0,333} = 4,380$$

$$Nu(L = 100m) = \left[49,028 + 4,173 \cdot 1.398 \cdot 8,916 \cdot \frac{0,0204}{100} \right]^{0,333} = 3,902$$

Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten:

$$\alpha_K(L = 6m) = \frac{6,079 \cdot 0,585}{0,0204} \approx 175 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

$$\alpha_K(L = 30m) = \frac{4,380 \cdot 0,585}{0,0204} \approx 125 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

$$\alpha_K(L = 100m) = \frac{4,356 \cdot 0,585}{0,0204} \approx 115 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wird mit einem einheitlichen Wärmeübergangskoeffizienten (unabhängig von der Rohrlänge L) gerechnet. Auf der sicheren Seite wurde $\alpha_K = 125 \text{ [W/m}^2\text{K]}$ gewählt.

Turbulente Strömung ($Re > 2320$) [4]

$$Nu = \frac{B \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot B^{0,5} \cdot (Pr^{0,667} - 1)} \cdot K_L$$

$$K_L = 1 + \left(\frac{d_h}{L} \right)^{0,667} \quad \text{mit } d_h = d_i, \quad B = \frac{1}{(5,15 \cdot \lg(Re) - 4,64)^2}$$

$$\alpha_K = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_h}$$

mit

α_K	Wärmeübergangskoeffizient [W/m ² K]
Re	Reynoldszahl
Nu	Nußeltzahl
Pr	Prandtlzahl (abhängig von T_w)
K_L	Korrekturfaktor
B	modifizierte Rohrreibungszahl
d_h	hydraulischer Durchmesser [m]
d_i	Rohrinnendurchmesser [m]
L	Rohrlänge [m]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/mK] (abhängig von T_w)

Da in Rohren bzw. Rohrregistern der Umschlag zwischen laminarer und turbulenter Strömungsform nicht bei einer fest definierten Reynoldszahl erfolgt, sollten nach Gnielinski die Nußeltzahlen für $Re = 2.300$ ($\alpha_{K,laminar}$) und für $Re = 10.000$ ($\alpha_{K,turbulent}$) linear interpoliert werden [4]:

$$Nu = Nu_{laminar} + \frac{Nu_{turbulent} - Nu_{laminar}}{10.000 - 2.300} \cdot (Re - 2.300)$$

Beispiel:

Für eine Durchflussmenge von $V = 400 \text{ l/h}$ wird der Wärmeübergangskoeffizient α_K bestimmt.

- Temperatur des Mediums $T_w = 12^\circ\text{C}$
- Durchflussmenge $V = 400 \text{ l/h}$

- innerer Rohrdurchmesser $d_i = 20,4 \text{ mm}$
- kinematische Viskosität $\nu(T_w = 12^\circ\text{C}) = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Prandtlzahl $Pr(T_w = 12^\circ\text{C}) = 8,916$
- Wärmeleitfähigkeit (Wasser) $\lambda(T_w = 12^\circ\text{C}) = 0,585 \text{ W/mK}$

Fließgeschwindigkeit:

$$A_w = \pi \cdot r_i^2 = \pi \cdot (20,4/2)^2 = 326,85 [\text{mm}^2]$$

$$V = 400 [\text{l/h}] = 400 \cdot 100^3 [\text{mm}^3/\text{h}]$$

$$w = \frac{V}{A_w} = \frac{400 \cdot 100^3 / 3600 [\text{mm}^3/\text{sec}]}{326,85 [\text{mm}^2]} \approx 340 \left[\frac{\text{mm}}{\text{sec}} \right] = 0,34 \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right]$$

Ermittlung der Reynoldszahl:

$$Re = \frac{0,34 \cdot 0,0204}{1,24 \cdot 10^{-6}} = 5.594 > 2.320 \rightarrow \text{turbulent}$$

Ermittlung der modifizierten Rohrreibungszahl:

$$B = \frac{1}{(5,15 \cdot \lg(5.594) - 4,64)^2} = 4,653 \cdot 10^{-3}$$

Ermittlung des Korrekturfaktors für unterschiedliche Rohrlängen:

$$K_L(L = 6\text{m}) = 1 + \left(\frac{0,0204}{6} \right)^{0,667} = 1,0226$$

$$K_L(L = 30\text{m}) = 1 + \left(\frac{0,0204}{30} \right)^{0,667} = 1,0077$$

$$K_L(L = 100\text{m}) = 1 + \left(\frac{0,0204}{100} \right)^{0,667} = 1,0035$$

Ermittlung der Nußeltzahl für unterschiedliche Rohrlängen:

$$Nu(L = 6\text{m}) = \frac{4,653 \cdot 10^{-3} \cdot (5.594 - 1000) \cdot 8,916}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{4,653 \cdot 10^{-3} \cdot (8,916^{0,667} - 1)}} \cdot 1,0226 = 50,47$$

$$Nu(L = 30\text{m}) = \frac{4,653 \cdot 10^{-3} \cdot (5.594 - 1000) \cdot 8,916}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{4,653 \cdot 10^{-3} \cdot (8,916^{0,667} - 1)}} \cdot 1,0077 = 49,74$$

$$Nu(L = 100\text{m}) = \frac{4,653 \cdot 10^{-3} \cdot (5.594 - 1000) \cdot 8,916}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{4,653 \cdot 10^{-3} \cdot (8,916^{0,667} - 1)}} \cdot 1,0035 = 49,53$$

Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten:

$$\alpha_K(L = 6\text{m}) = \frac{50,47 \cdot 0,585}{0,0204} \approx 1.447 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

$$\alpha_K(L = 30\text{m}) = \frac{49,74 \cdot 0,585}{0,0204} \approx 1.426 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

$$\alpha_K(L = 100\text{m}) = \frac{49,53 \cdot 0,585}{0,0204} \approx 1.420 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

Interpolation nach Gnielinski:

Laminar:

$$Re = 2.300 \rightarrow \text{laminar}$$

$$Nu_{\text{laminar}}(L = 30\text{m}) = \left[49,028 + 4,173 \cdot 2.300 \cdot 8,916 \cdot \frac{0,0204}{30} \right]^{0,333} = 4,743$$

Turbulent:

$$Re = 10.000 \rightarrow \text{turbulent}$$

$$B = \frac{1}{(5,15 \cdot \lg(10.000) - 4,64)^2} = 3,926 \cdot 10^{-3}$$

5 Ermittlung des Einflusses benachbarter Rohre sowie unterschiedlicher Rohrkonfigurationen („Rohrbögen“)

Zunächst wird die gegenseitige Beeinflussung benachbarter Rohre untersucht; von diesem Ergebnis wird auf den Einfluss von Rohrbögen auf die Temperierungseigenschaften geschlossen.

Beispiel:

Als Grundlage für die folgende „Steady State“ – Berechnung dient das in Abbildung 14 dargestellte System (Beton). Es wird so erweitert, dass es ein Gesamtsystem mit 15 Rohren (Abstand = 10 cm) darstellt. Die Länge der jeweiligen Segmente beträgt 10m.

- Außen- / Umgebungstemperatur $T_U = T_{U,1} = -6^\circ\text{C}$
- Temperatur des Mediums $T_{W,V} = 12^\circ\text{C}$
- Fließgeschwindigkeit des Mediums $v = 400 \text{ mm/sec}$

Die Wassertemperaturen in den 15 Rohren werden basierend auf der in Kapitel 3.4 hergeleiteten Temperaturgleichung für den eingeschwungenen Zustand ermittelt:

$$T_W(x) = e^{-\frac{a}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot x} \cdot (T_{W,V} - T_{U,1}) + T_{U,1}, \quad a = \frac{\theta(T_{W,V})}{T_{W,V} - T_{U,1}}$$

Die sich ergebenden Temperaturen sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 6: Wassertemperaturen in den einzelnen Rohren, 1. Iterationsschritt (Handrechnung)

Rohr	Position	$T_W(x)$	Rohr	Position	$T_W(x)$	Position	Position	$T_W(x)$
[-]	[m]	[°C]	[-]	[m]	[°C]	[-]	[m]	[°C]
1	0	12,0000	6	50	10,2237	11	100	8,6227
2	10	11,6298	7	60	9,8901	12	110	8,3220
3	20	11,2673	8	70	9,5633	13	120	8,0274
4	30	10,9122	9	80	9,2432	14	130	7,7390
5	40	10,5644	10	90	8,9297	15	140	7,4564

Die Temperaturen werden auf das FE-Modell aufgebracht, der resultierende Wärmestrom im eingeschwungenen Zustand wird für jedes Rohr ausgelesen (Abbildung 16).

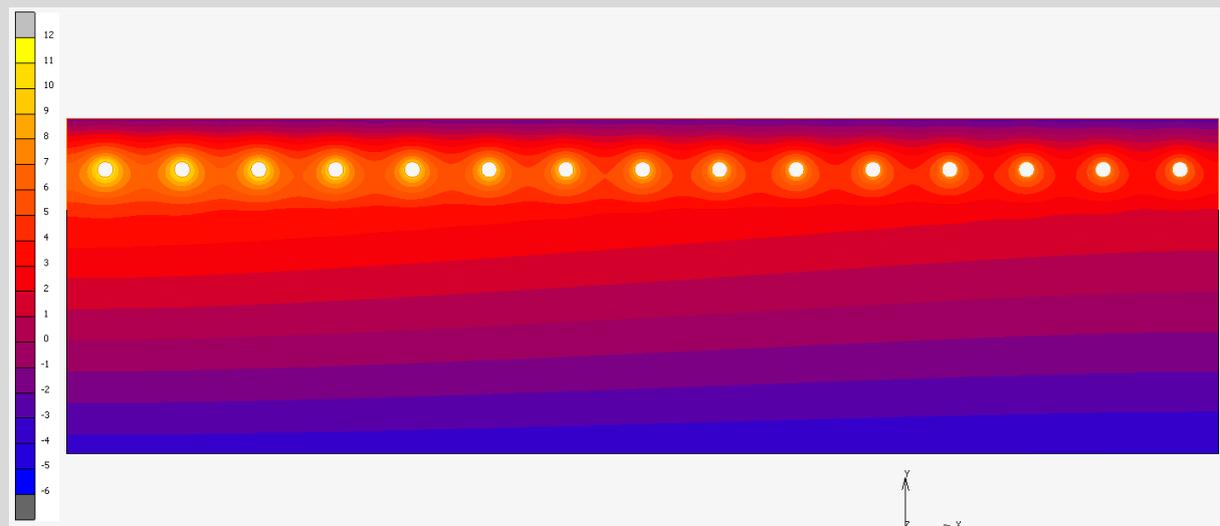


Abbildung 16: Temperaturverteilung (Steady State) am Gesamtsystem im 2. Iterationsschritt (unter Berücksichtigung der Interaktion zwischen den benachbarten Rohren)

Dieser unter Berücksichtigung der Interaktion zwischen den Rohren ermittelte Wärmestrom wird dem mittels Handrechnung bestimmten Wärmestrom gegenübergestellt (Tabelle 7). Zur Ermittlung der Wärmeströme bei gegebenen Wassertemperaturen (Handrechnung) wird die Wärmestromglei-

chung nach Kapitel 3.4 herangezogen:

$$\theta(T_W) = a \cdot (T_W - T_{U,1})$$

$$a = \frac{\theta(T_{W,1})}{T_{W,1} - T_{U,1}}$$

Tabelle 7: Wärmeströme in den Rohren, Handrechnung (ohne Interaktion), FE (mit Interaktion)

Rohr	Handrechnung	FE-Berechnung	Abweichung
[-]	[W/mm]	[W/mm]	[%]
1	0,017416	0,017700	-1,63%
2	0,017058	0,017168	-0,65%
3	0,016707	0,016762	-0,33%
4	0,016364	0,016390	-0,16%
5	0,016027	0,016037	-0,06%
6	0,015698	0,015698	-0,01%
7	0,015375	0,015370	0,03%
8	0,015059	0,015050	0,06%
9	0,014749	0,014736	0,09%
10	0,014446	0,014428	0,12%
11	0,014148	0,014124	0,17%
12	0,013858	0,013821	0,26%
13	0,013573	0,013515	0,42%
14	0,013293	0,013195	0,74%
15	0,013020	0,012795	1,73%

Aus den Berechnungen lässt sich schlussfolgern, dass sich die einzelnen Rohre zwar untereinander beeinflussen, dies jedoch im Rahmen der Dimensionierung nicht weiter ins Gewicht fällt. Die Wärmestromgleichung wird im Mittel erfüllt, die Temperatur in den einzelnen Rohren kann mittels der dargestellten Methode über eine FE-gestützte Handrechnung bestimmt werden.

Gleiches gilt auch für die Rohrbögen. Hier werden die im Inneren des Rohrbogens liegenden Flächen „doppelt“ beheizt; der sich daraus ergebende geringere Temperaturunterschied zwischen Bauteil und Trägermedium führt jedoch dazu, dass ein größerer Wärmestrom an die äußeren Bereiche abgegeben wird, welche theoretisch lediglich „zur Hälfte“ beheizt werden. Somit sind die Rohrbögen im Rahmen der Vordimensionierung zu vernachlässigen.

6 Grenzbetrachtungen / Aufzeigen der Systemgrenzen

6.1 Stahlbrücke / Verbundbrücke

Zunächst soll auf die Unterschiede zwischen den System „Verbundbrücke“ und „Stahlbrücke“ eingegangen werden.

Beispiel:

Für eine Durchflussmenge von $V = 400 \text{ l/h}$ wird die Oberflächentemperatur an der Position $x=20\text{m}$ nach 4 Stunden bestimmt.

- Temperatur des Mediums $T_W = 12^\circ\text{C}$
- Temperatur des Umgebung $T_U = -2^\circ\text{C}$
- Durchflussmenge $V = 400 \text{ l/h}$

Ermittlung des Wärmestroms nach einer Stunde ($t=3.600\text{sec}$):

$$\theta_{\text{Beton},t=3.600\text{sec}} = 0,0350[\text{W}/\text{mm}]$$

$$\theta_{\text{Stahl},t=3.600\text{sec}} = 0,0348[\text{W}/\text{mm}]$$

Ermittlung des Wärmestroms im eingeschwungenen Zustand:

$$\theta_{\text{Beton},\text{steady}} = 0,0174[\text{W}/\text{mm}]$$

$$\theta_{\text{Stahl},\text{steady}} = 0,0226[\text{W}/\text{mm}]$$

Im FE-Modell wird mit einer Wassertemperatur von $T_W = 16^\circ\text{C}$ gerechnet.

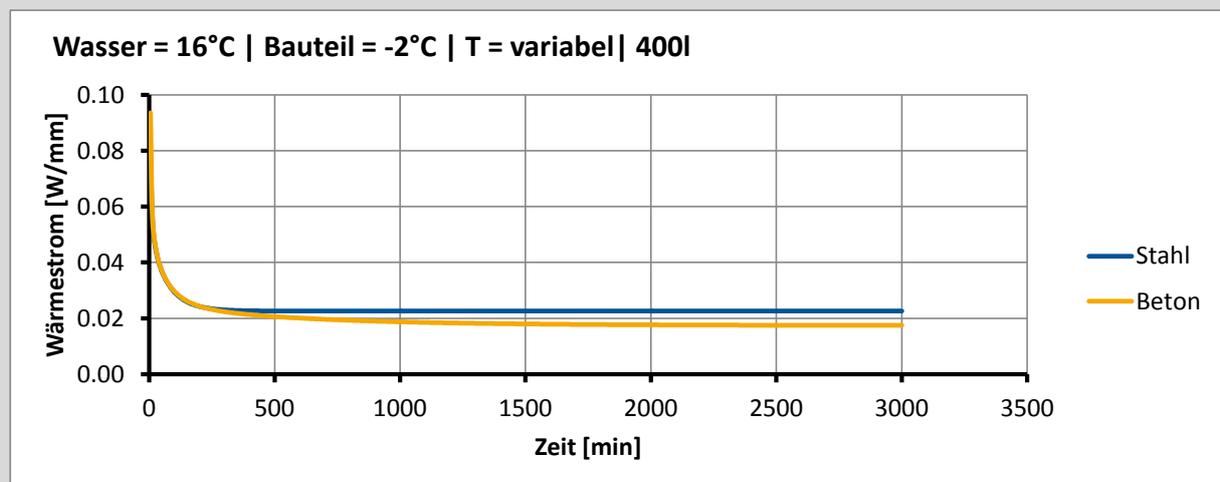


Abbildung 17: Wärmestromentwicklung aus dem Trägermedium (Wasser) in das Rohr hinein über die Zeit

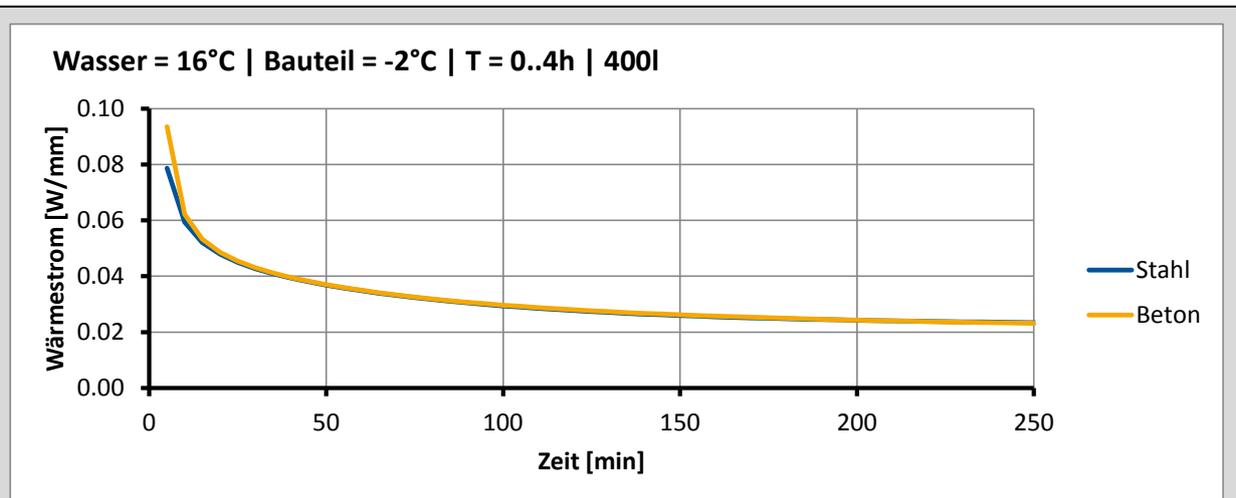


Abbildung 18: Wärmestromentwicklung aus dem Trägermedium (Wasser) in das Rohr hinein über die Zeit, Ausschnitt: 4 Stunden

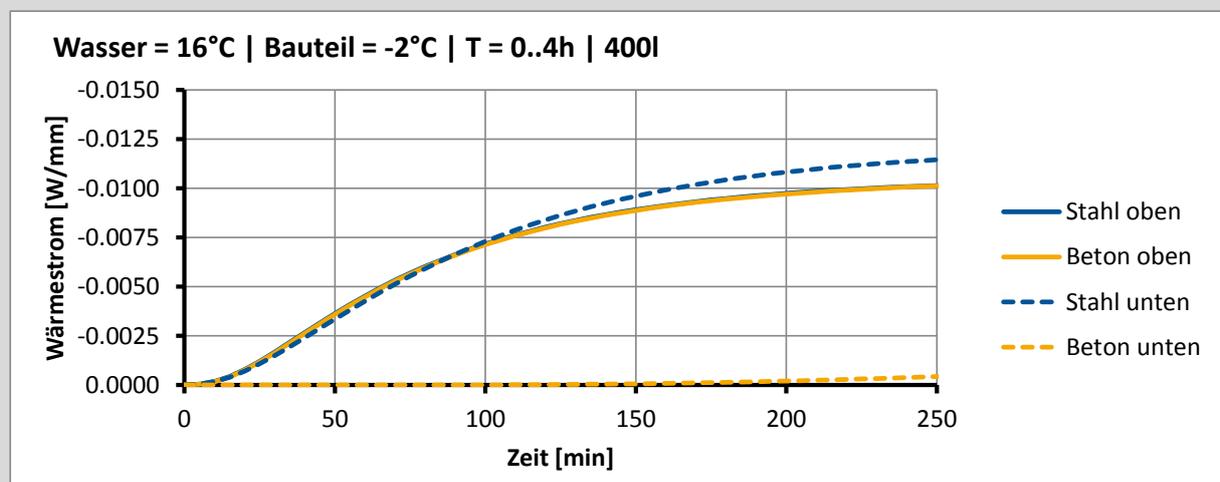


Abbildung 19: Wärmestromentwicklung aus dem Bauteil heraus über die Zeit, Ausschnitt: 4 Stunden (Kurve „Stahl oben“ deckungsgleich mit Kurve „Beton oben“)

Aus der Betrachtung der Wärmestromentwicklung innerhalb der ersten 4 Stunden (Abbildung 18) lässt sich schließen, dass die Betonbrücke und die Stahlbrücke in Bezug auf den Energieeintrag in das Bauwerk hinein innerhalb der ersten 4 Stunden keine nennenswerten Unterschiede aufweisen. Erst im eingeschwungenen Zustand wird dem Heizungssystem der Stahlbrücke mehr Energie entzogen als dem der Betonbrücke, da die Stahlbrücke eine größere Oberfläche aufweist. Dies ist jedoch für die hier gemachten Betrachtungen irrelevant, da eine Divergenz der Kurven erst ab einem Zeitpunkt von $t > 4$ Stunden zu beobachten ist. Weiterhin lässt sich feststellen, dass der Wärmestrom aus dem Bauwerk heraus (Fahrbahnoberfläche) unabhängig vom gewählten System ist.

Die Wärmeströme sowie die Wärmestromentwicklung werden genutzt, um die vollständige Temperaturgleichung aufzustellen, mit deren Hilfe die Entwicklung der Wassertemperatur über die Zeit im betrachteten Abschnitt ($x=20m$) bestimmt wird.

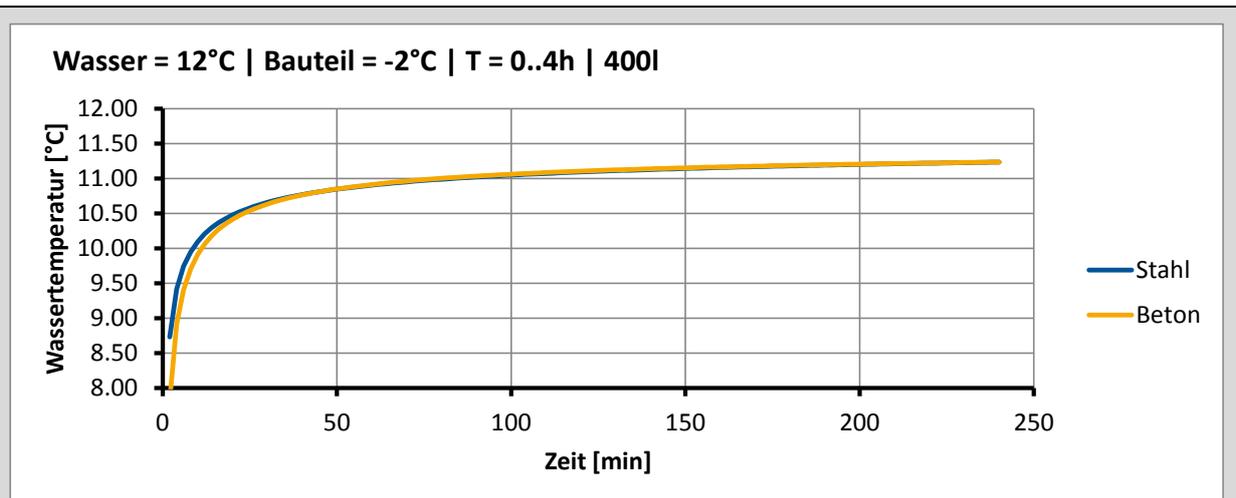


Abbildung 20: Temperaturentwicklung des Trägermediums (Wasser) an der Position $x=20m$ über die Zeit

Aufgrund der nahezu affinen Wärmestromverläufe ergeben sich auch bei den Temperaturverläufen keine großen Abweichungen (Abbildung 20).

Die so ermittelten Temperaturverläufe werden im Rahmen einer Zeitschrittanalyse als äußere Lasten auf die jeweiligen FE-Modelle aufgebracht, um so die Oberflächentemperatur zu ermitteln.

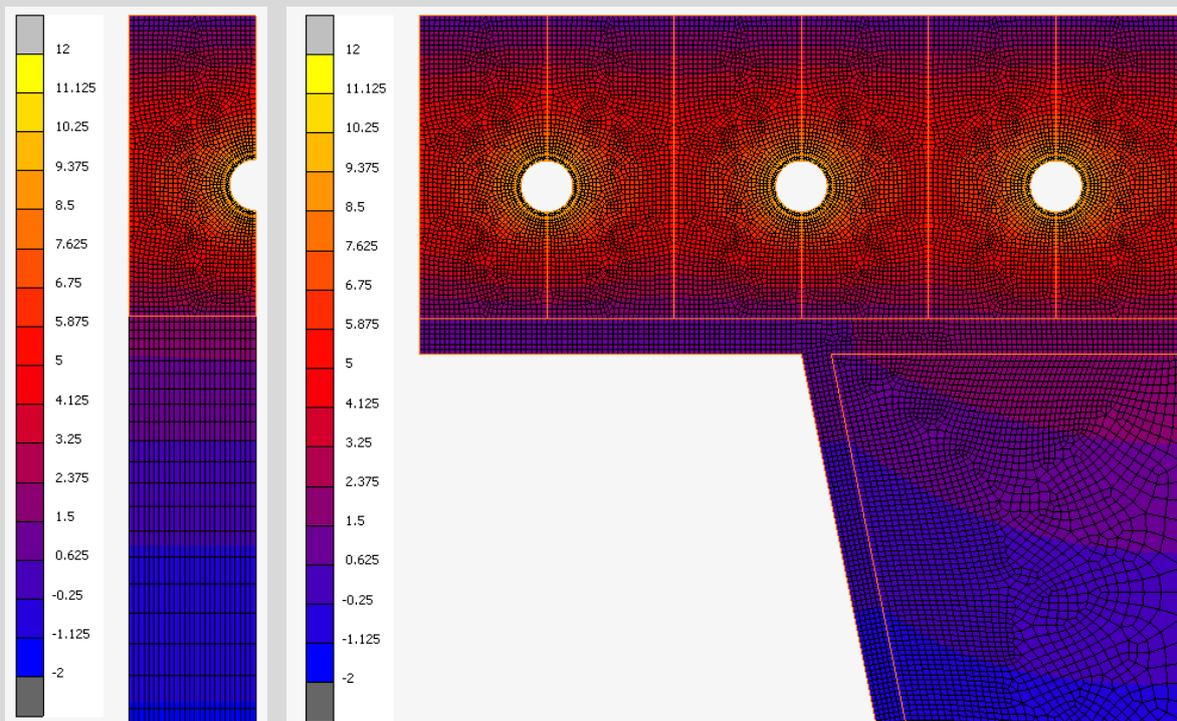


Abbildung 21: Temperatur im Bauteil an der Position $x=20m$ nach $t=4h$

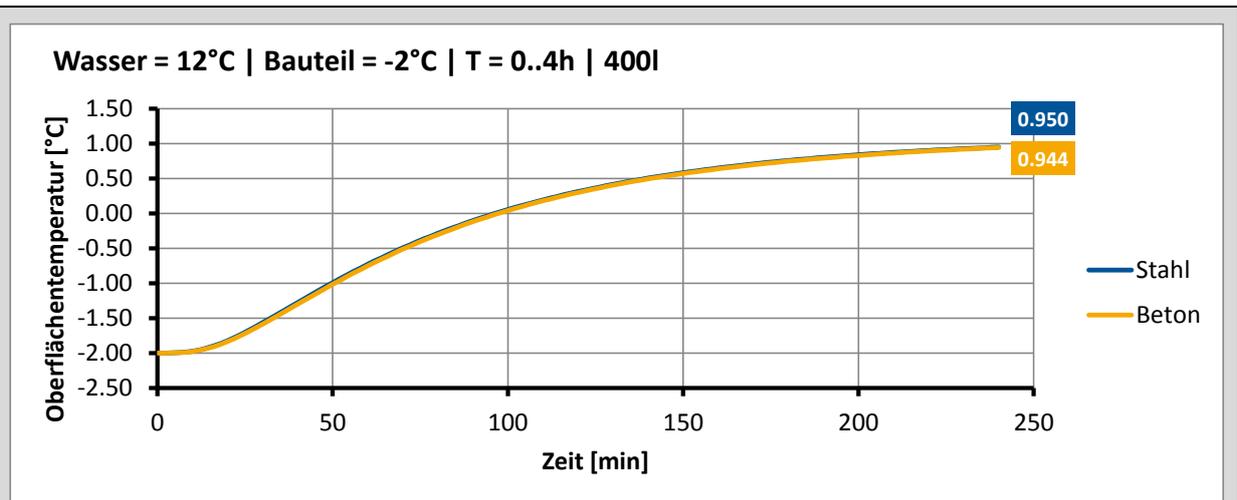


Abbildung 22: Temperaturentwicklung der Fahrbahnoberfläche an der Position $x=20m$ über die Zeit, mittlere Temperatur

Auch die ermittelten Temperaturverläufe für die Oberflächentemperatur sind bei beiden Systemen (Beton und Stahl) zumindest bis zum Zeitpunkt $t=4h$ affin. Ausgewertet wurde stets die mittlere Oberflächentemperatur (Abbildung 23).

$$T_{O,Beton,t=4h} = 0,944[°C]$$

$$T_{O,Stahl,t=4h} = 0,950[°C]$$

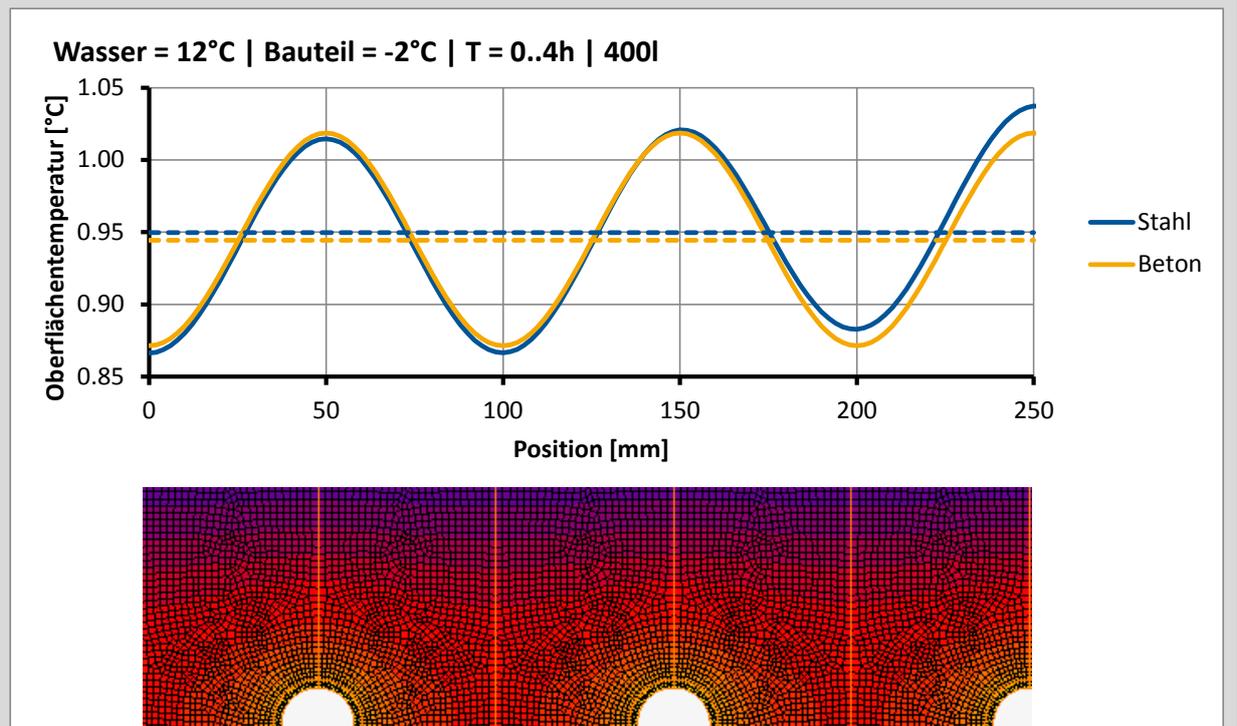


Abbildung 23: Oberflächentemperatur an der Position $x=20m$ nach $t=4h$ (Abbildung: Stahlbrücke)

Dies führt dazu, dass die Vorbemessungstabellen für die Verbundbrücke (Beton) und die Stahlbrücke identisch ausfallen. Im folgenden Vergleich wird daher lediglich die Stahlbrücke betrachtet, die Schlussfolgerungen gelten analog für die Betonbrücke.

6.2 Bauwerkstemperatur / Außentemperatur („Starttemperatur“)

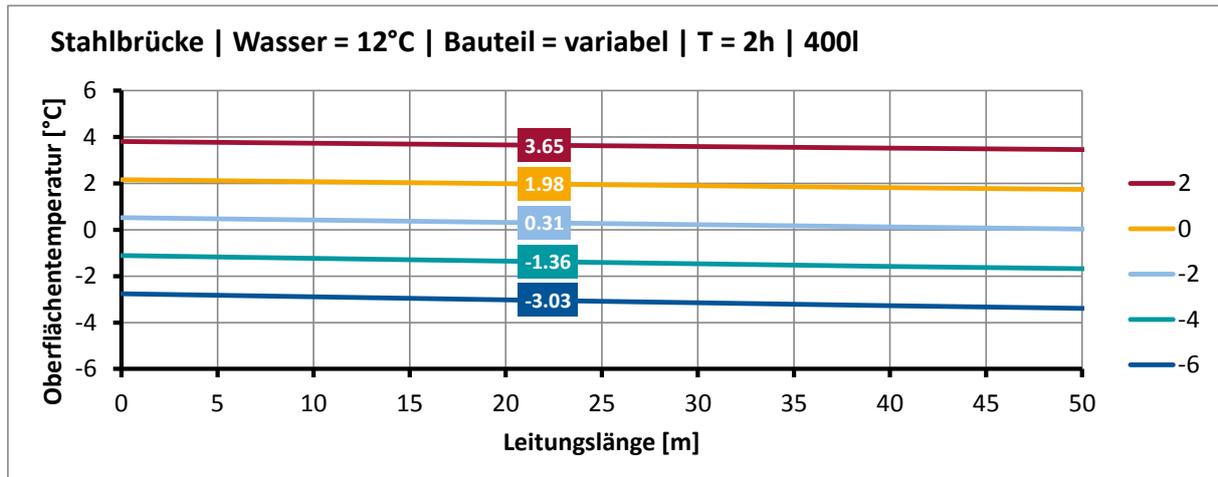


Abbildung 24: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 2 Stunden, $v=400\text{l/h}$, 12°C Wassertemperatur bei unterschiedlichen Bauwerkstemperaturen („Starttemperatur“) (Wert bei $x=20\text{m}$)

Die Bauwerkstemperatur zu Beginn des Heizvorganges hat einen linearen Einfluss auf die Oberflächentemperatur nach einer definierten Zeit T (Reaktionszeit, hier: 2 Stunden). So wird bei einer um 2°C geringeren „Starttemperatur“ bei den hier betrachteten Randbedingungen nach 2 Stunden Heizbetrieb an der Position $x=20\text{m}$ jeweils eine um 1,67°C geringere Oberflächentemperatur erreicht (Abbildung 24). Nach 4 Stunden beträgt die Differenz noch 1,58°C (Abbildung 25).

6.3 Vorlaufzeit

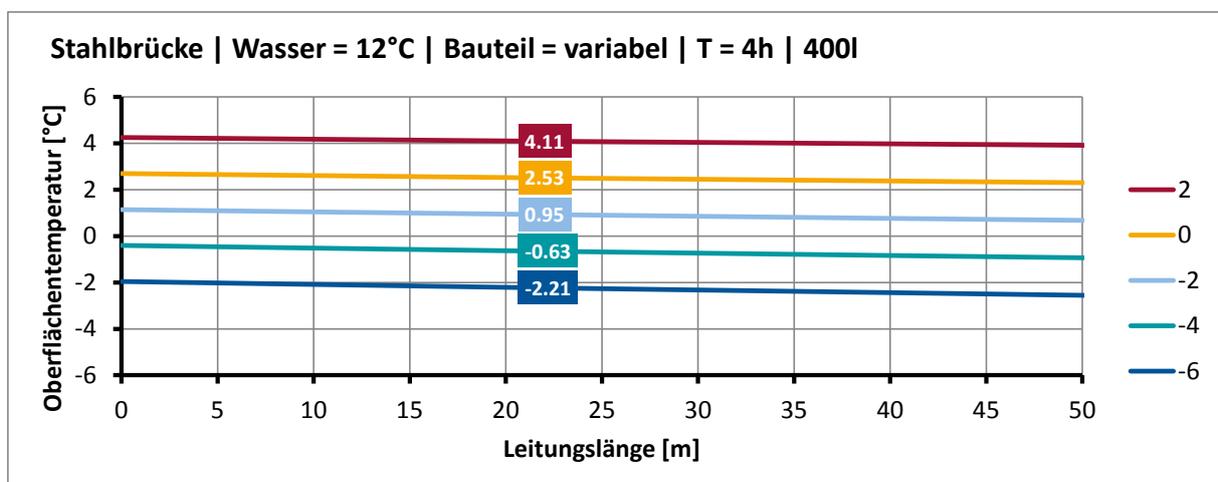


Abbildung 25: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 4 Stunden, $v=400\text{l/h}$, 12°C Wassertemperatur bei unterschiedlichen Bauwerkstemperaturen („Starttemperatur“) (Wert bei $x=20\text{m}$)

Bei größer werdender Temperaturspreizung (Wassertemperatur - Außentemperatur) wird der Einfluss der Vorlaufzeit größer, d.h. bei niedriger „Starttemperatur“ ist der zusätzliche Temperaturgewinn durch eine längere Heizdauer größer. Die folgende Tabelle soll dies verdeutlichen:

Tabelle 8: Einfluss von Bauwerks- / Starttemperatur und Vorlaufzeit auf die Oberflächentemperatur

Starttemperatur	2h	4h	Differenz
2°C	3,65°C	4,11°C	0,46°C
0°C	1,98°C	2,53°C	0,55°C
-2°C	0,31°C	0,95°C	0,64°C
-4°C	-1,36°C	-0,63°C	0,73°C
-6°C	-3,03°C	-2,11°C	0,92°C

6.4 Fließgeschwindigkeit

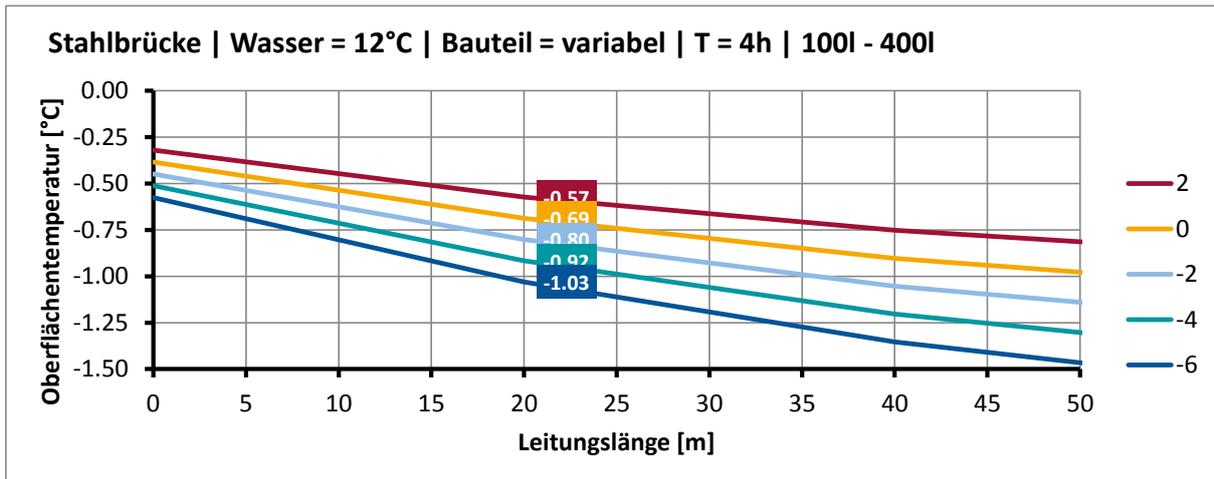


Abbildung 26: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 4 Stunden, v=100l/h – v=400l/h, 12°C Wassertemperatur bei unterschiedlichen Bauwerkstemperaturen („Starttemperatur“) (Wert bei x=20m)

In Abbildung 26 ist der Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf die Oberflächentemperatur dargestellt. Hierzu wird die Differenz aus Oberflächentemperatur bei einer Fließgeschwindigkeit von 100l/h und einer Fließgeschwindigkeit von 400l/h aufgetragen. Hieraus wird deutlich, dass die Bedeutung der Fließgeschwindigkeit auf die Oberflächentemperatur bei zunehmender Leitungslänge zunimmt.

6.5 Möglicher Einsatz des Systems ohne Wärmepumpe

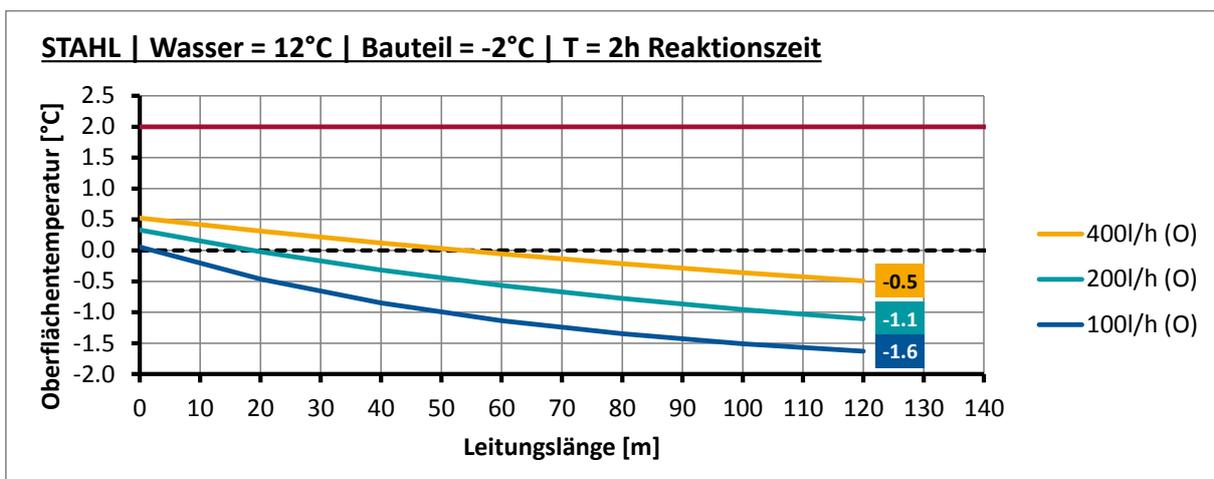


Abbildung 27: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 2 Stunden, 12°C Wassertemperatur, Bauteiltemperatur: -2°C

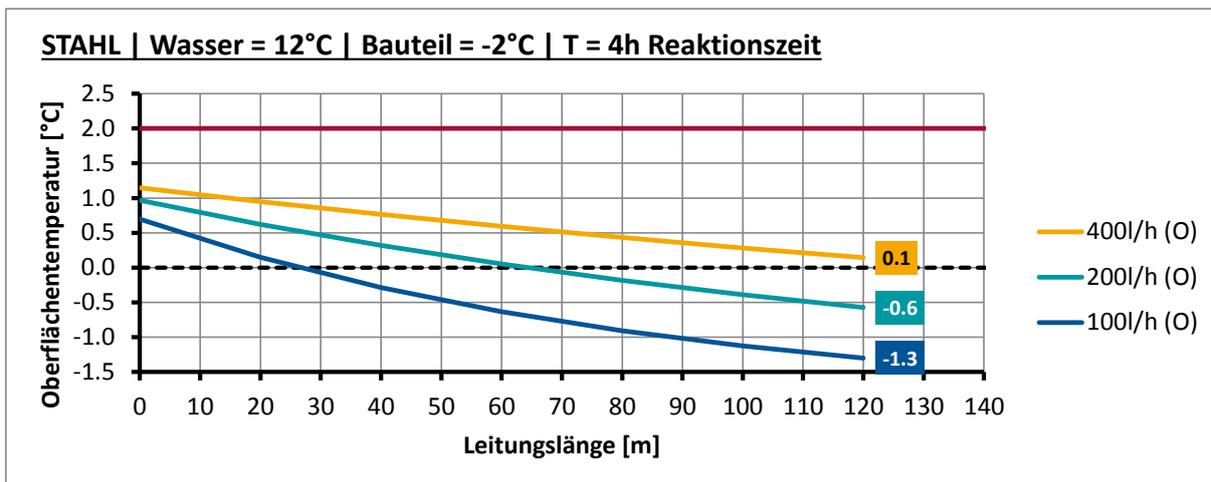


Abbildung 28: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 4 Stunden, 12°C Wassertemperatur, Bauteiltemperatur: -2°C

Aus den Vorbemessungsdiagrammen (Abbildung 27) und (Abbildung 28) geht hervor, dass bei einer Bauwerkstemperatur („Starttemperatur“) von -2°C eine Eisfreiheit der Fahrbahnoberfläche weder nach 2 noch nach 4 Stunden sichergestellt werden kann.

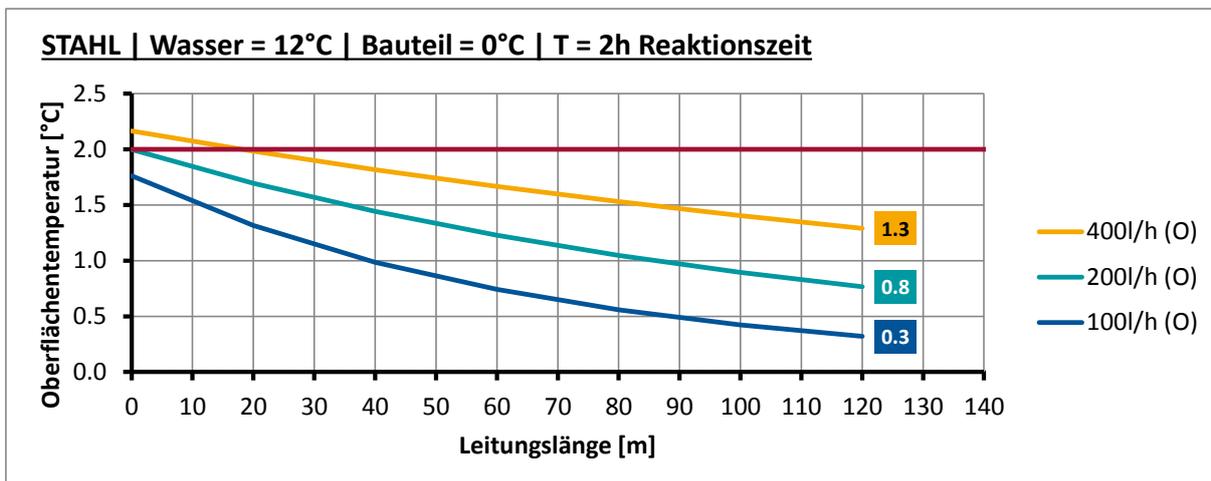


Abbildung 29: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 2 Stunden, 12°C Wassertemperatur, Bauteiltemperatur: 0°C

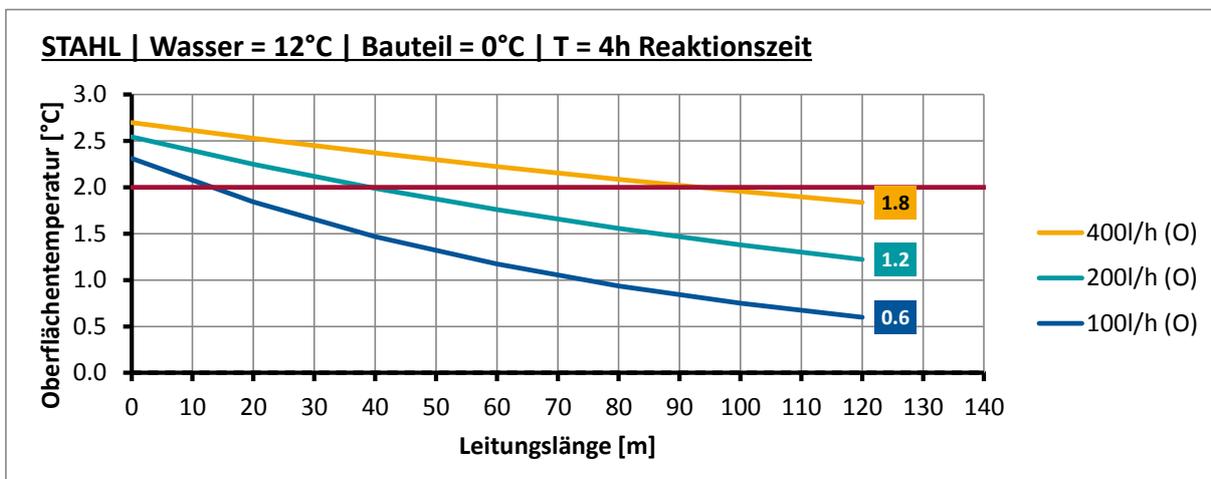


Abbildung 30: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 4 Stunden, 12°C Wassertemperatur, Bauteiltemperatur: 0°C

Erst ab einer Bauwerkstemperatur („Starttemperatur“) von 0°C kann die Oberflächentemperatur auf über 2°C angehoben werden (Abbildung 29, Abbildung 30). Bei einer Reaktionszeit von 2 Stunden und einer Wassertemperatur von 12°C ist dies jedoch nur bei einer hohen Fließgeschwindigkeit (400l/h) möglich, und dann auch nur bis zu Leitungslängen von ca. 15m (Abbildung 29). Wird die Reaktionszeit auf 4 Stunden angehoben, so kann die Fahrbahnoberfläche auch schon bei geringeren Fließgeschwindigkeiten eisfrei gehalten werden (Abbildung 30). In diesem Fall ist der Einfluss der Fließgeschwindigkeit als groß einzustufen.

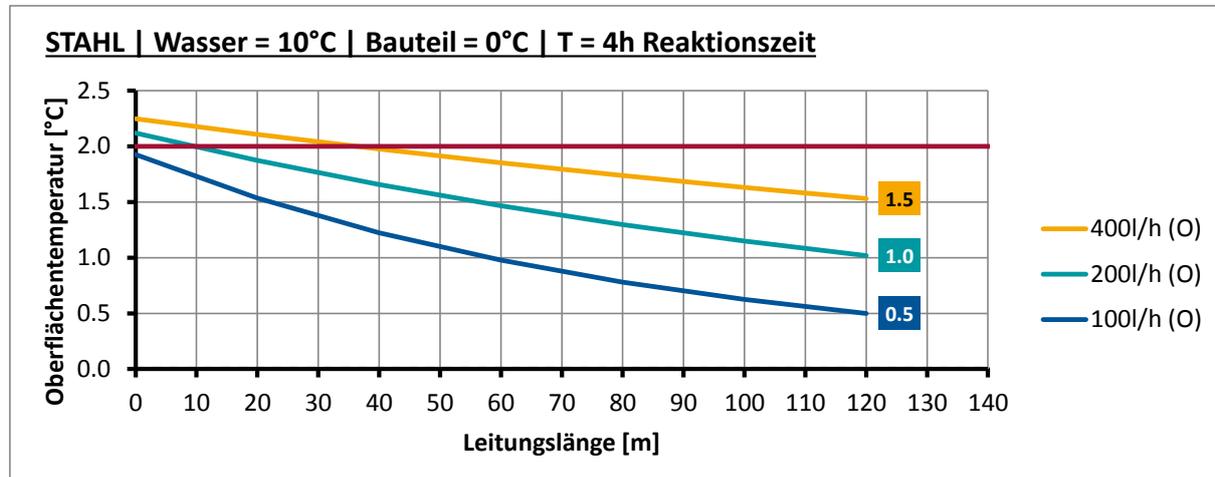


Abbildung 31: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 4 Stunden, 10°C Wassertemperatur, Bauteiltemperatur: 0°C

Sinkt die Wassertemperatur von 12°C auf 10°C ab, schränken sich die Einsatzmöglichkeiten einer Brückenheizung ohne Wärmepumpe wiederum ein (Abbildung 31). In diesem Fall sind bei einer Fließgeschwindigkeit von $v=200l/h$ und einer Reaktionszeit von 4 Stunden noch Rohrlängen bis 10m realisierbar. Nimmt die Wassertemperatur zu (14°C), so kann das System selbst bei einer Reaktionszeit von 2 Stunden und einer Fließgeschwindigkeit von $v=200l/h$ noch bei Rohrlängen bis 20m zum Einsatz kommen (Abbildung 32).

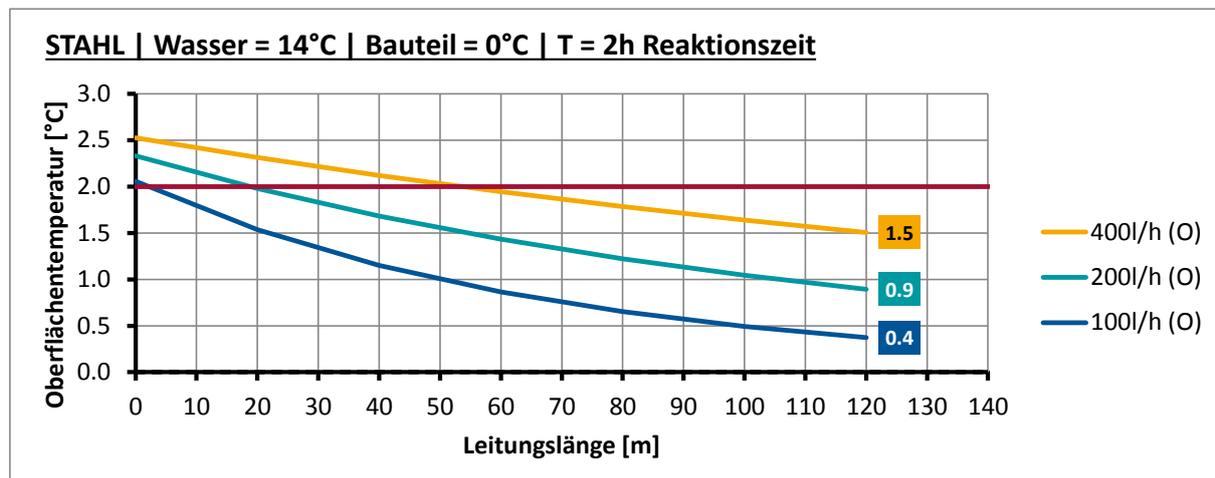


Abbildung 32: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 2 Stunden, 14°C Wassertemperatur, Bauteiltemperatur: 0°C

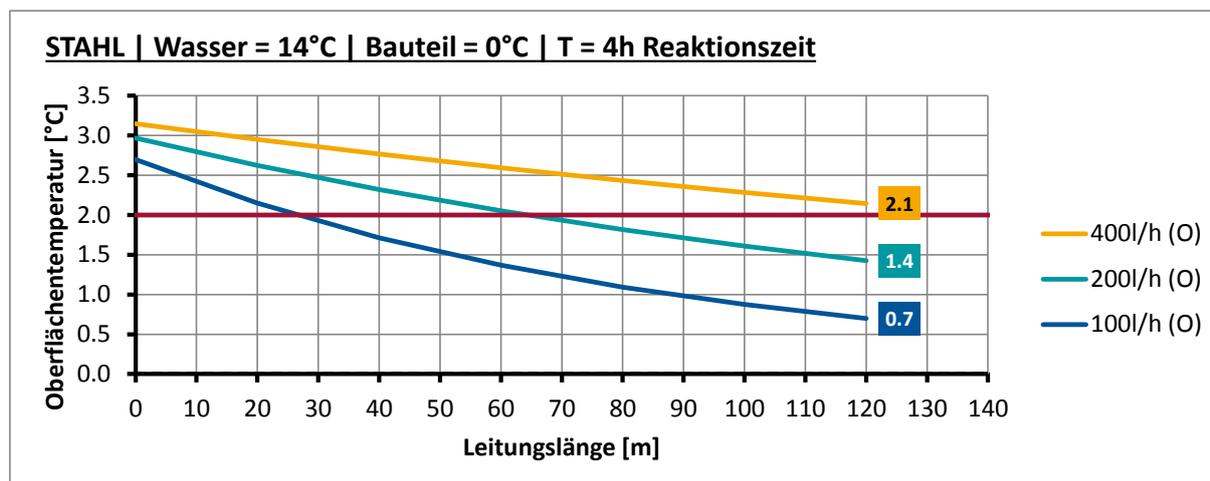


Abbildung 33: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 4 Stunden, 14°C Wassertemperatur, Bauteiltemperatur: 0°C

7 Schlussfolgerungen

Der Einsatz einer Brückenheizung ohne Zuhilfenahme einer Wärmepumpe gestaltet sich als schwierig. Sinkt die Bauwerkstemperatur unter -2°C ab, so ist eine Erwärmung der Oberfläche auf 2°C selbst innerhalb von 4 Stunden nicht möglich. Wird die Brückenheizung (12°C) bei Temperaturen von 0°C eingeschaltet, so ist eine Erwärmung der Oberfläche auf 2°C innerhalb von 2 Stunden zwar möglich; allerdings nur dann, wenn die Fließgeschwindigkeit (400l/h) hoch und die Leitungslänge kurz ($<15\text{m}$) ist. Bei einer Wassertemperatur von 14°C ist eine Erwärmung der Oberfläche auf 2°C auch schon bei geringeren Fließgeschwindigkeiten möglich (200l/h). Bei hohen Fließgeschwindigkeiten kann die Leitungslänge in diesem Fall bis auf 50m erhöht werden. Innerhalb der ersten 4 Stunden sind keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Aufheizverhalten der Betonbrücke und der Stahlbrücke identifiziert worden, da die Energie zunächst lediglich in die Asphaltsschichten abgegeben wird. Werden die Umgebungstemperaturen als variabel angesetzt, so kann jedoch die höhere Wärmespeicherkapazität des Betons zu abweichenden Ergebnissen (in beide Richtungen) führen.

Bei einer gewünschten Reaktionszeit von einer Stunde ist das System ohne Wärmepumpe nicht zum effektiven Erwärmen der Fahrbahnoberfläche einsetzbar. Hier kann die Heizung lediglich unterstützend wirken, um eventuell bei sinkenden Temperaturen die vorherrschende Oberflächentemperatur zu halten. Hierzu sind jedoch weitere Untersuchungen mit variierenden Umgebungstemperaturen erforderlich.

Es soll abschließend noch einmal darauf hingewiesen werden, dass allen Berechnungen die Annahme zu Grunde liegt, dass die Bauwerkstemperatur im Moment des Einschaltens der Brückenheizung homogen ist und der Umgebungstemperatur entspricht. Weiterhin wurde die Umgebungstemperatur im Zuge der Berechnungen als konstant angesetzt. Aufgrund der verwendeten Materialparameter (Gussasphalt, hohe Wärmeleitfähigkeit) sind die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf Bauwerke / Straßen mit anderen Asphaltarten übertragbar.

8 Literaturverweise und Dokumente

- [1] Feldmann, M. et.al, Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie, BASt-Bericht B 87, Carl Schünemann Verlag GmbH, Bremen, 2012
- [2] Mackert, K.-U., Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn, Expertengespräch Stahlbrückenbau, Bergisch Gladbach 27.09.2011
- [3] REHAU AG + Co, REHAU Geothermisches Brückenheizungssystem Objekt Info: Schluss mit Eis und Schnee auf der Elbe-Lübeck-Kanal-Brücke in Berkenthin, Produktinformation, 05/2010
- [4] Recknagel, H., Sprenger, E., Schramek, E.-R., Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik (07/08), Oldenbourg Industrieverlag, München, 2007

Anhang A Validierung der Berechnungsergebnisse an einem Versuch im Deckenprüfstand

Anhang A.1 Messungen am Deckenprüfstand

Zur Validierung des zuvor aufgestellten Konzeptes wurden Messungen an einem Deckenprüfstand (Abbildung 34) durchgeführt.

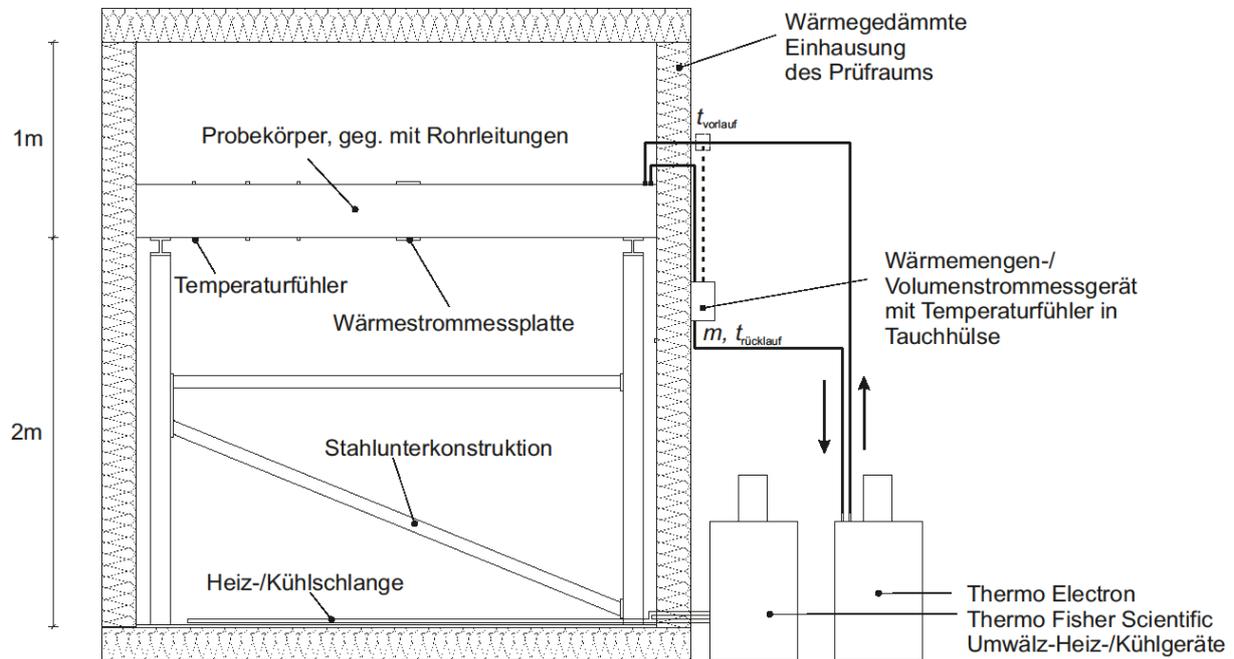


Abbildung 34: Schematischer Aufbau des Deckenprüfstandes zur Leistungsermittlung von thermisch aktivierten Decken am Institut für Stahlbau

Bei dem untersuchten Probekörper handelt es sich um eine Verbunddeckenplatte, die aus einem Betongurt mit Betonkerntemperierung und Stahlprofilen mit Stegöffnungen für die Gebäudetechnik besteht (Abbildung 36). Als Leitung der Betonkerntemperierung wird der Typ Rautherm S der Firma Rehau in der Größe 20 x 2 mm verwendet. Die Rohre besitzen eine Manteldicke von 2 mm und einen Gesamtdurchmesser von 20 mm. Verlegt werden sie schlaufenartig in einem Abstand von 15 cm.

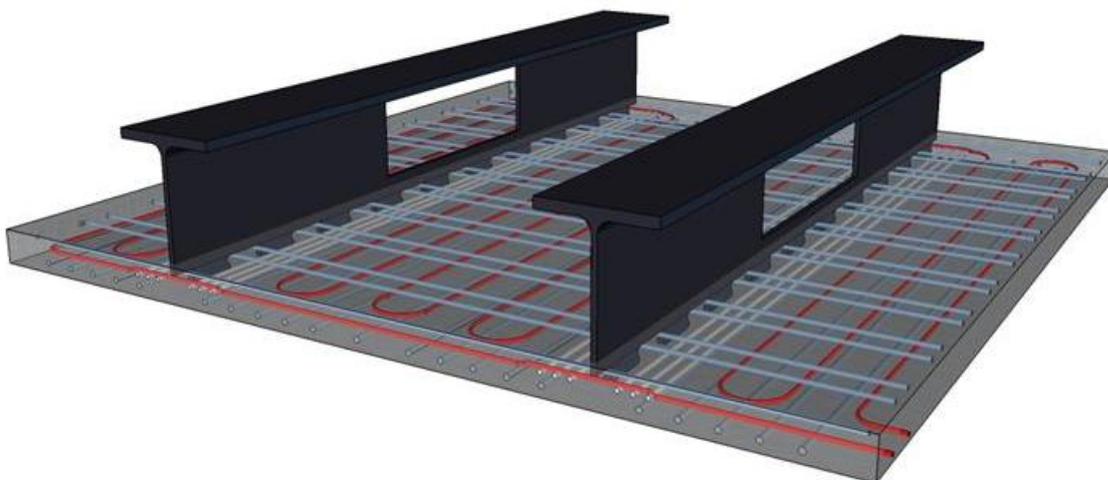
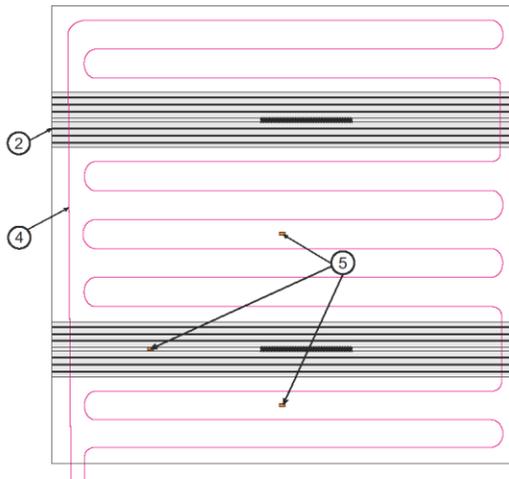


Abbildung 35: 3D-Zeichnung des Probekörpers zur Validierung der Temperaturgleichungen

Betonkerntemperierung (Var. A)



Legende:

- Position 1: In jede Puzzeausnehmung werden 2 Stück Stabstahl d12 eingelegt. Das bedeutet 2x d12 alle 25 cm
- Position 2: Beidseitig des Steges werden in die Platte jeweils auf einer Breite von 15 cm Spannlitzen St 1570/1770, 0,5" (d=1,25cm) eingelegt. Vorspannung muss **nicht** aufgebracht werden.
- Position 3: Schlaffstahlbewehrung 20 Stäbe d16
- Position 4: RAUTHERM S 20x2 mm schlaufenartig in einem Abstand von 15 cm verlegt
- Position 5: Temperaturfühler Pt100

Querschnitt auf Höhe der Stegöffnungen (Var A)

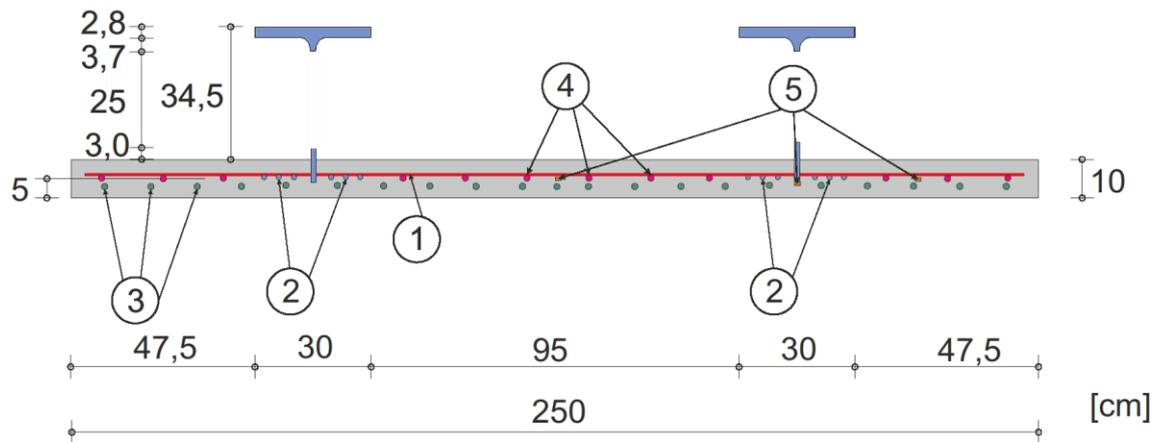


Abbildung 36: Probekörper zur Validierung der Temperaturgleichungen

Es wurden folgende Randbedingungen gewählt:

Das Erwärmen des Prüfraums erfolgte über elektrisch beheizte Kühllast-Simulatoren, die auf dem Fußboden im Prüfraum angeordnet waren. Die Erwärmung des Prüfraumes führte nach ca. 72 Stunden zu einer verharrenden Temperaturverteilung über den gesamten Prüfstand („Steady State“). Während des Aufheizvorgangs wurde die Decke nicht aktiv temperiert. Die Temperaturmessungen an den Oberflächen der Decke ergaben Werte von ca.

- $T_{oben} = 34^{\circ}C$
- $T_{unten} = 38,5^{\circ}C$

Nach „Einschwingen“ der Decke wurde mit der aktiven Temperierung begonnen, wobei sowohl Vorlauf- als auch Rücklauftemperatur gemessen wurden:

- $T_{Vorlauf} = 12^{\circ}C$
- $v = 350 \text{ l/h}$

Die Messungen am Temperierungssystem des Deckenprüfstandes ergaben folgende Werte für den Volumenstrom (Abbildung 37) sowie für Vorlauf- und Rücklauftemperatur (Abbildung 38):

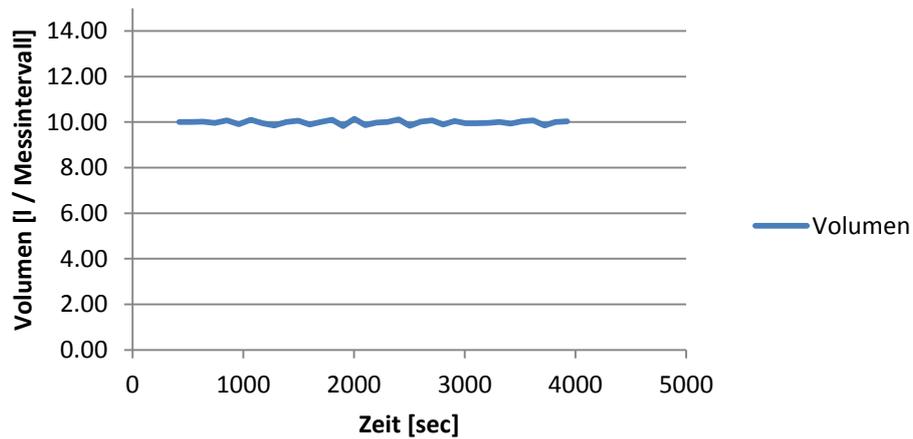


Abbildung 37: Volumenstrom Wasser über die Zeit (Messintervall: ca. 105 sec)

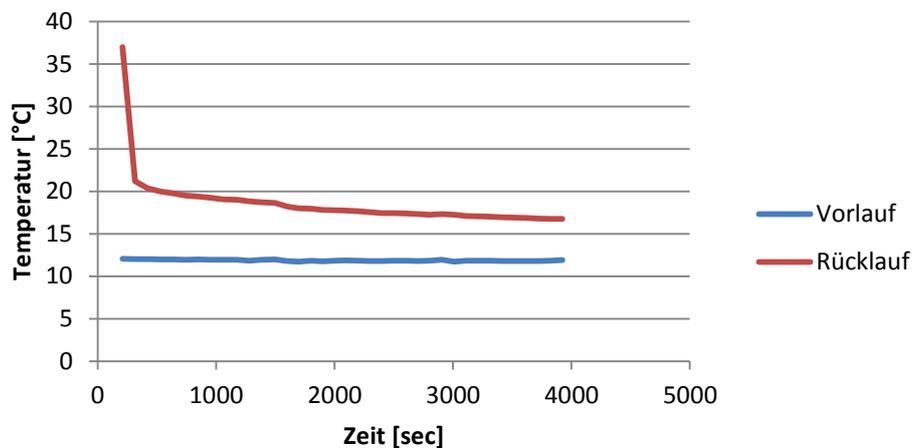


Abbildung 38: Wassertemperatur Vorlauf / Rücklauf

Anhang A.2 Handrechenergebnisse, basierend auf FE-Untersuchungen

Mit Hilfe der FEM wurde ein Segmentmodell der Deckenplatte erstellt und mit folgenden Randbedingungen beaufschlagt:

- $T_{oben} = 34^{\circ}C$
- $T_{unten} = 38,5^{\circ}C$
- $T_{Wasser,1} = 10^{\circ}C$
- $T_{Wasser,2} = 25^{\circ}C$

Der Wärmeübergangskoeffizient (Wasser - Rohrwandung) wurde basierend auf der Wassertemperatur, dem hydraulischen Durchmesser des Rohres sowie der Fließgeschwindigkeit nach Kapitel 4.3 bestimmt zu:

$$a_K = 1500 \text{ W/m}^2\text{K}$$

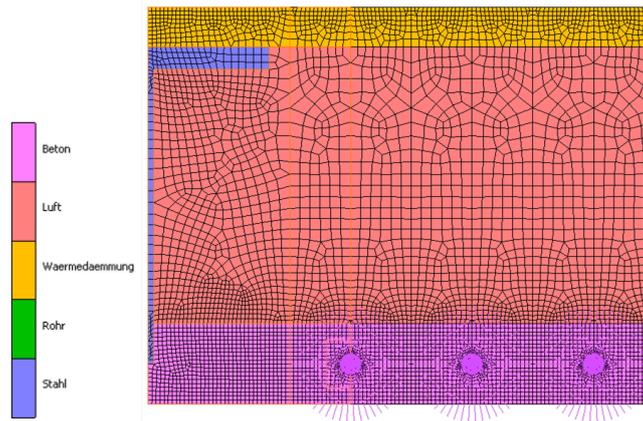


Abbildung 39: FE-Modell mit Randbedingung „Wassertemperatur“

Folgende Wärmeströme wurden im eingeschwungenen Zustand ausgelesen:

- $\Theta_{steady} (T_{Wasser} = 10^\circ C) = -0,03523808 [W/mm]$
- $\Theta_{steady} (T_{Wasser} = 25^\circ C) = -0,01661222 [W/mm]$

Darauf basierend ergibt sich die Temperaturgleichung für den eingeschwungenen Zustand („Steady State“) zu:

$$T_W(x) = e^{-\frac{a}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot x} \cdot \frac{(b + a \cdot T_0) - b}{a}$$

mit

- $a = 0,0012417$
- $b = -0,0476553$
- $v = 460 [mm/s]$
- $s A_W = 0,8424 [Ws/mmK]$

Im vorliegenden Fall liefert dies (für $T_0 = 10^\circ C$):

$$T_W(x) = 28,3784 \cdot e^{-3,20423 \cdot 10^{-6} \cdot x} + 38,378$$

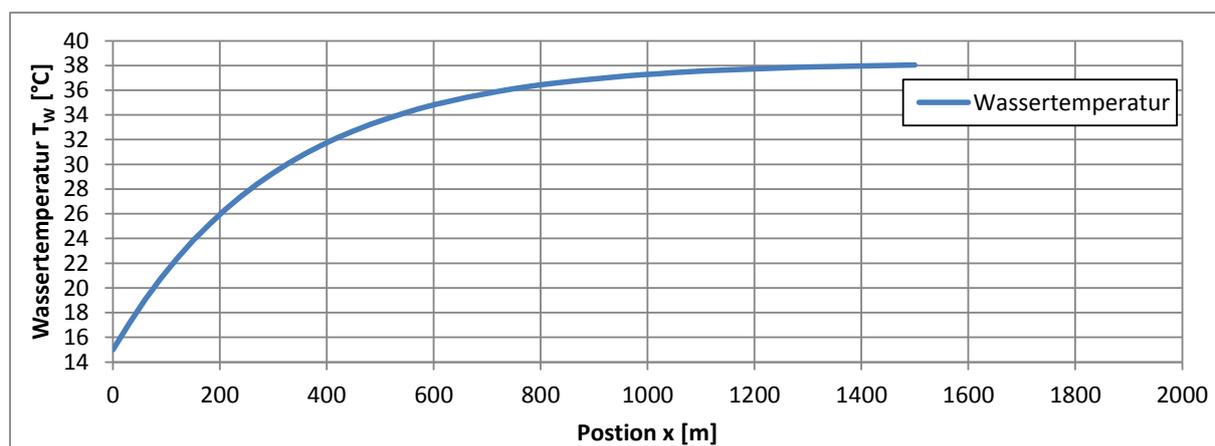


Abbildung 40: Temperaturzunahme im Rohr über die Rohrlänge

Folgende Wärmeströme wurden im Rahmen der transienten Analyse ausgelesen:

- $\Theta_{steady} (T_{Wasser} = 10^\circ C) = -0,05131558 [W/mm]$ ($t = 192.000 \text{ sec}$) (je Rohr)
 - $\Theta_{steady} (T_{Wasser} = 25^\circ C) = -0,02416221 [W/mm]$ ($t = 192.000 \text{ sec}$) (je Rohr)
 - $\Theta_{steady} (T_{Wasser} = 10^\circ C) = x,xxxxxxx [W/mm]$ ($t = 0..39.600$) (je Rohr)
- (Abbildung 41)

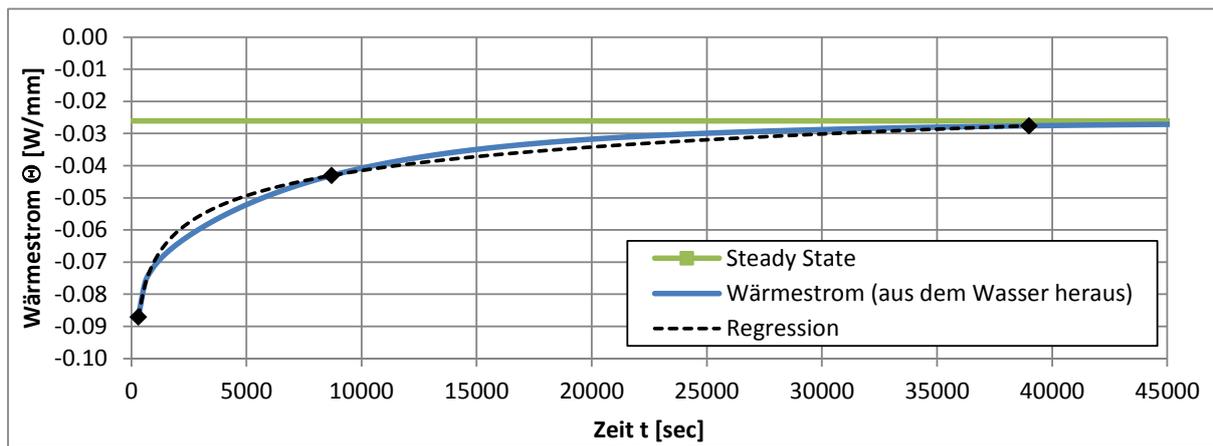


Abbildung 41 : Wärmestrom „Transient“ über die Zeit t (FE, $T_{\text{Wasser}} = 10^{\circ}\text{C}$), Regressionsgerade

Die Wärmestromgerade (Abbildung 41) wird durch folgende Gleichung angenähert:

$$\theta_{T_0}(t) = n \cdot t^m + p$$

mit:

$$\begin{aligned} m &= -0,027214746 \\ n &= -1,328966802 \\ p &= 0,978393052 \end{aligned}$$

wobei der Zeitraum zwischen $T = 300 \text{ sec}$ und $T = 10.200 \text{ sec}$ berücksichtigt wird (Abbildung 41).

Daraus ergibt sich die Temperaturgleichung zu:

$$T_W(x, t) = e^{-\frac{a(t)}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot x} \cdot \frac{(r(t) - T_0 \cdot a(t)) + r(t)}{a(t)}$$

mit

$$\begin{aligned} m &= -0,027214746 \\ n &= -1,328966802 \\ p &= 0,978393052 \\ s A_W &= 0,8424 [\text{Ws/mmK}] \end{aligned}$$

Beispielhafte Wassertemperaturen sind in Abbildung 42 über die Rohrlänge aufgetragen.

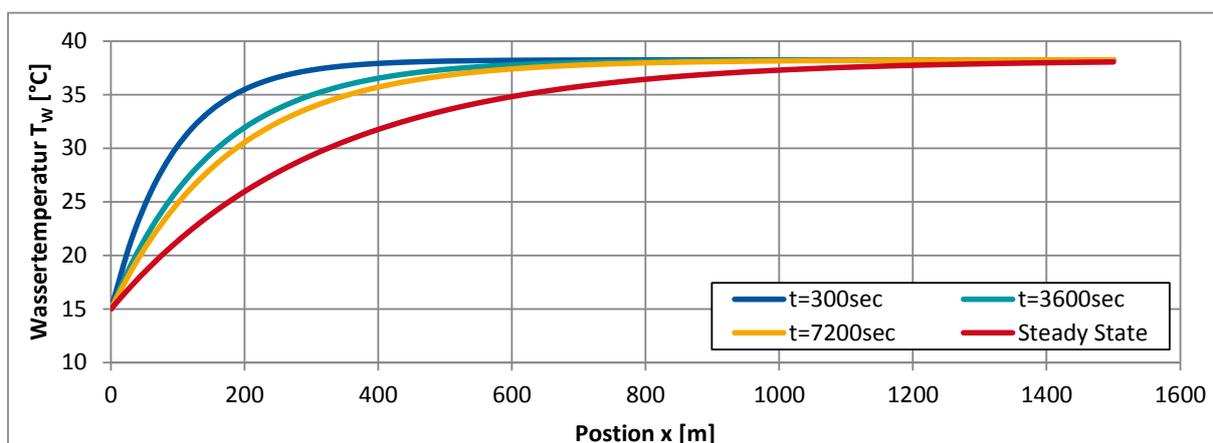


Abbildung 42 : Temperaturabfall zu unterschiedlichen Zeitpunkten T, $\alpha = 1500$

Der Vergleich der so ermittelten Rücklauftemperaturen mit den gemessenen Rücklauftemperaturen ist in Abbildung 43 über die Zeit aufgetragen.

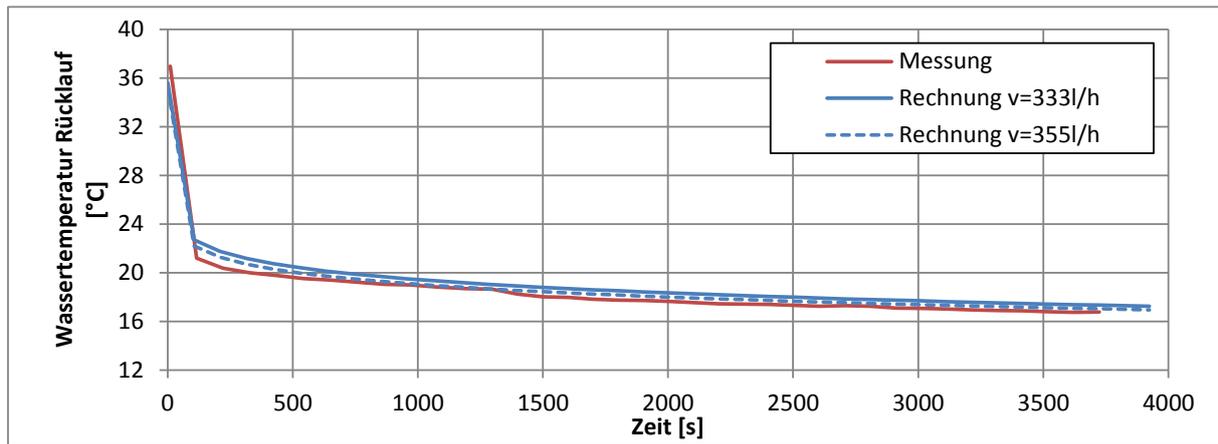


Abbildung 43 : Vergleich der Rücklauftemperatur (Messwerte / berechnete Werte)

Anhang B Vorbemessungstafeln (Verbundbrücke)

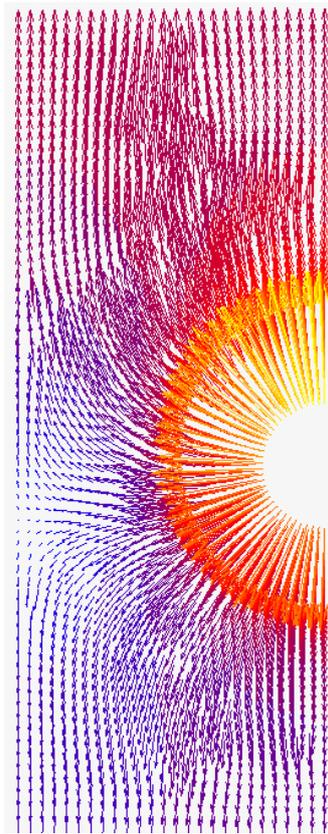


Abbildung 44 : Wärmestrom „Verbundbrücke“

Tabelle 9: Materialparameter FE „Verbundbrücke“

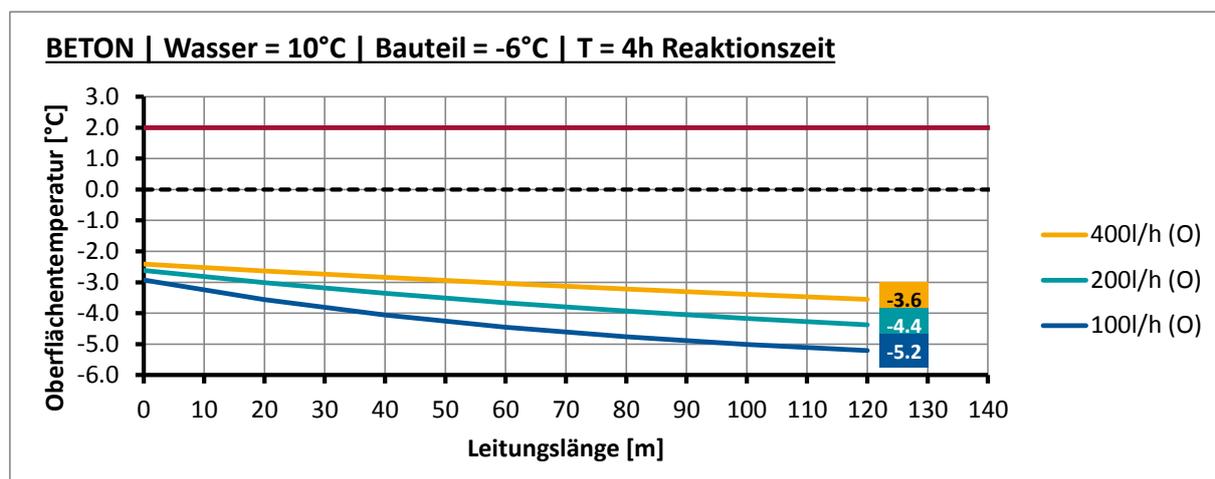
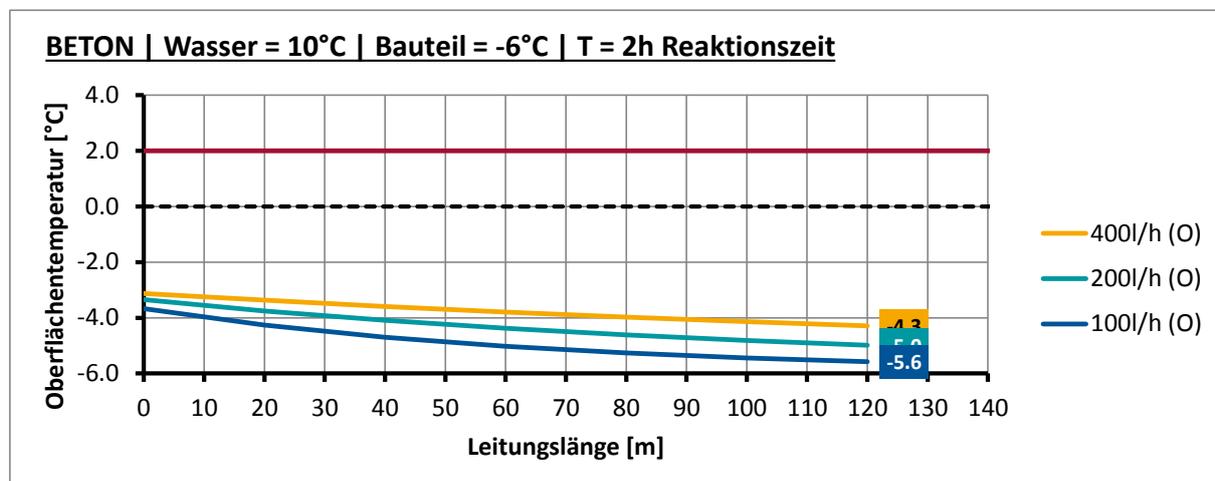
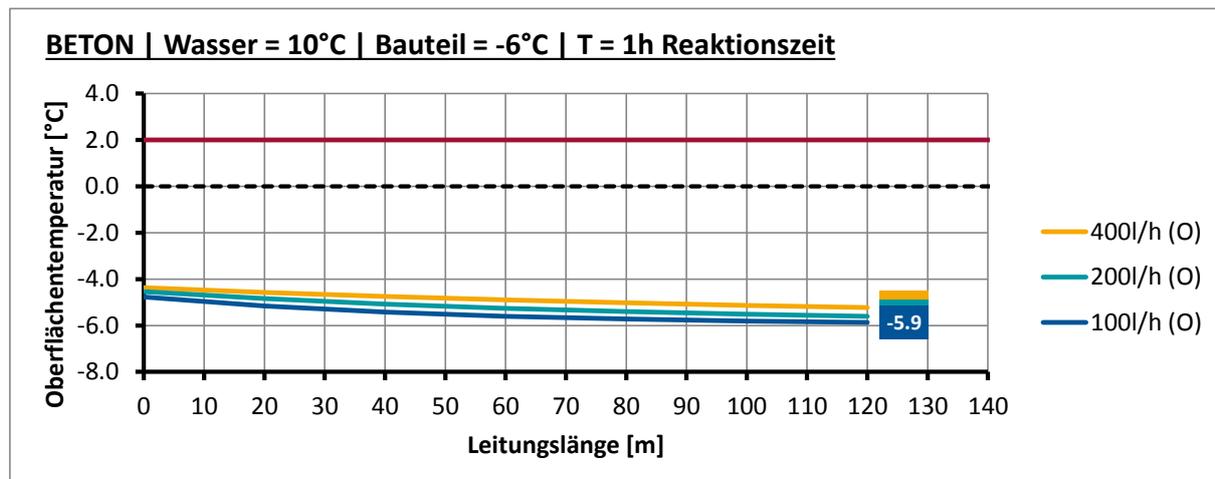
Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spezifische Wärmekapazität c [J/(kg K)]	Dichte ρ [kg/m ³]
Beton	2,5	1.000	2.500
Rohr	0,35	900	800
Gussasphalt	0,7	1.000	2.100

Die Oberflächentemperatur $T_o(T,x)$ wurde basierend auf der Wassertemperatur im Rohr $T_w(T,x)$ ermittelt (vgl. Kapitel 3.8). Hierzu wurden die Stellen ($x=0m, 20m, 40m, 60m, 80m, 100m, 120m$) ausgewertet.

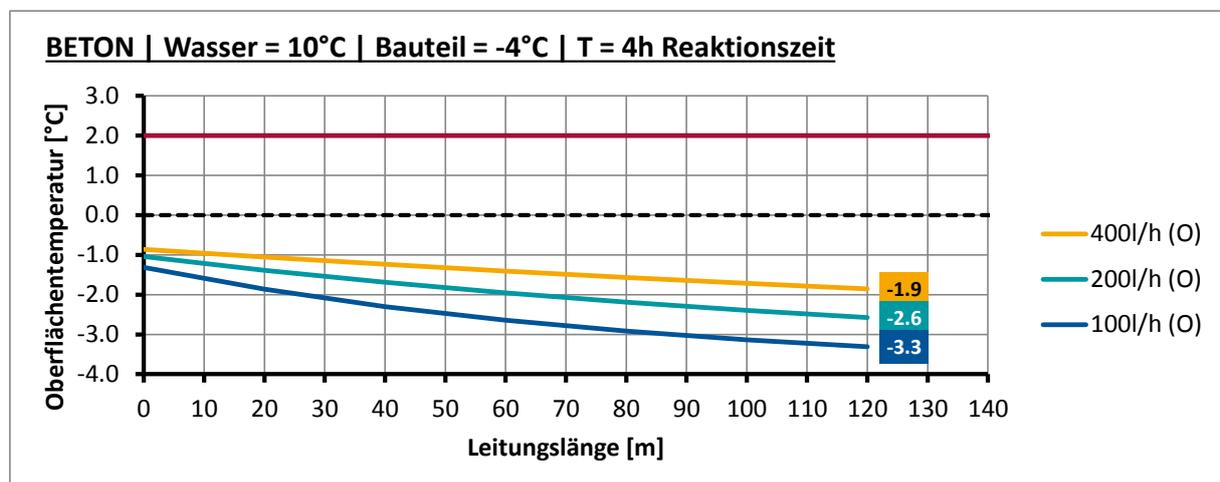
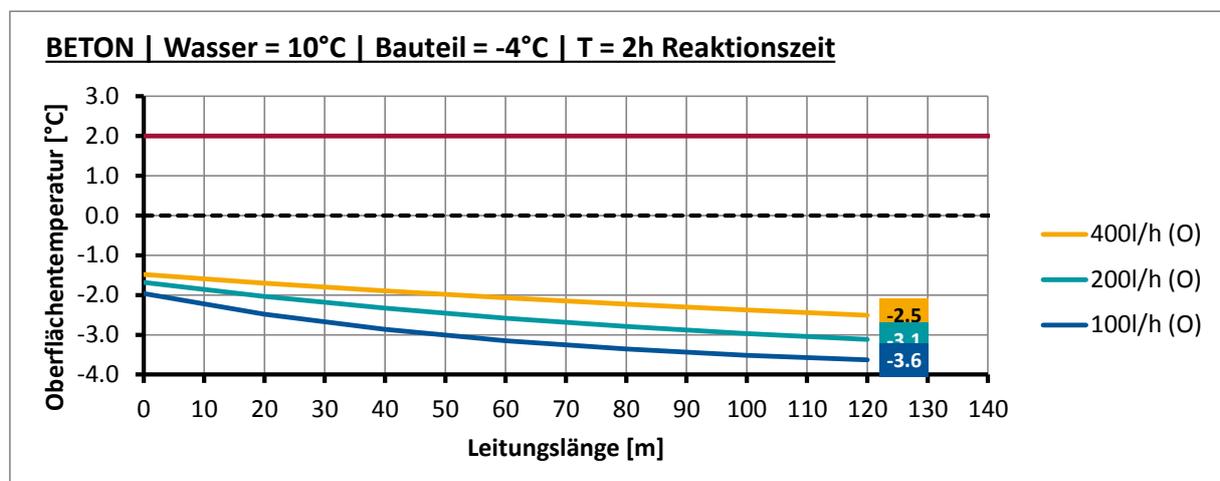
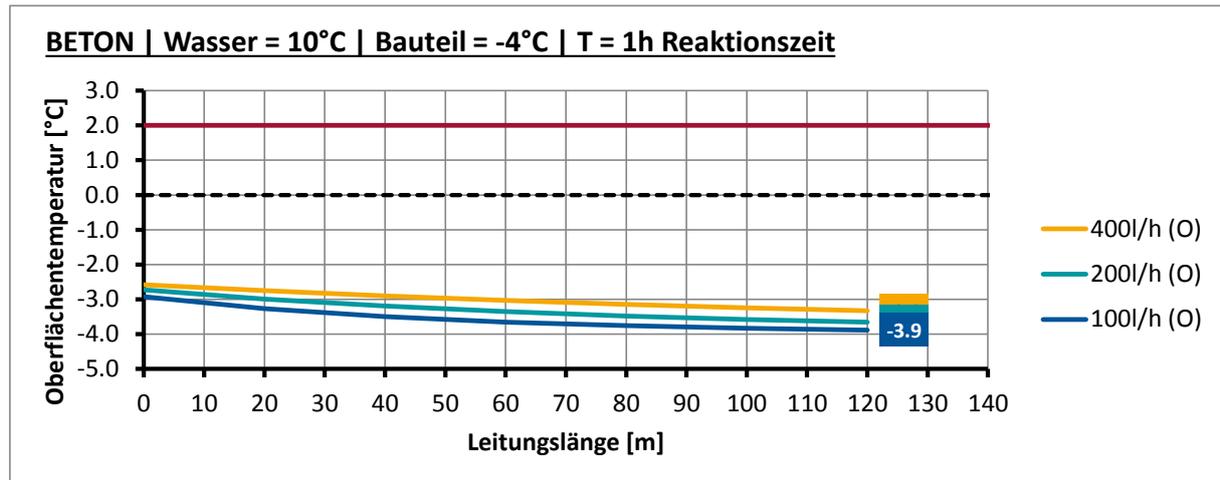
Den Berechnungen liegt der in Kapitel 3.2 beschriebene Fahrbahnaufbau zu Grunde. Die Berechnungen gelten lediglich für die in Tabelle 9 aufgeführten Materialien bzw. Materialparameter. Hier sei darauf hingewiesen, dass insbesondere eine Änderung des Asphalts zu anderen Ergebnissen führen wird. Es ist davon auszugehen, dass ein konventioneller Asphalt (welcher aufgrund der Porosität eine geringere Wärmeleitfähigkeit aufweist) die Funktionsweise des Temperierungssystems negativ beeinflussen wird.

Anhang B.1 Verbundbrücke, $T_w=10^\circ\text{C}$

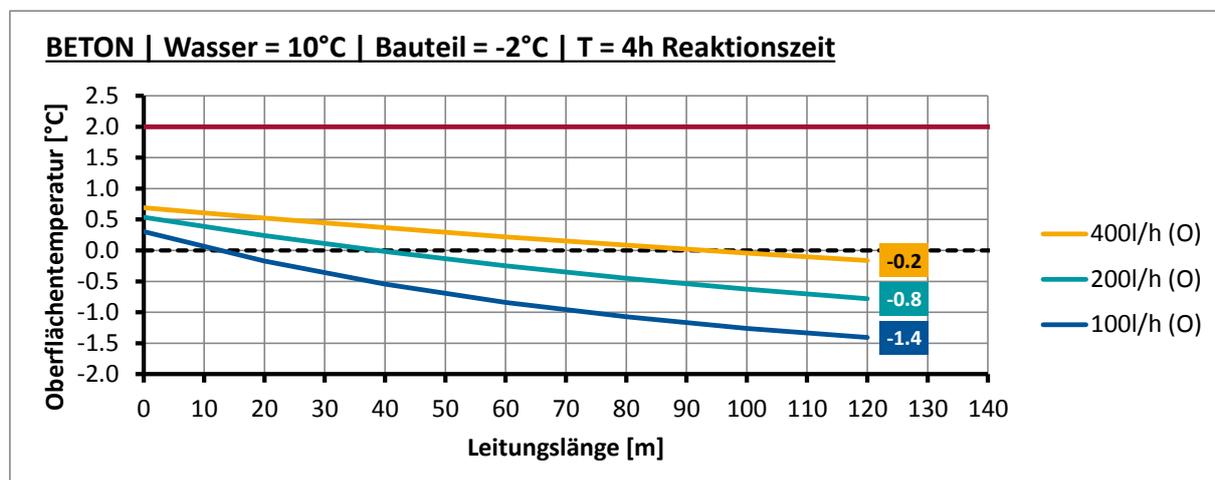
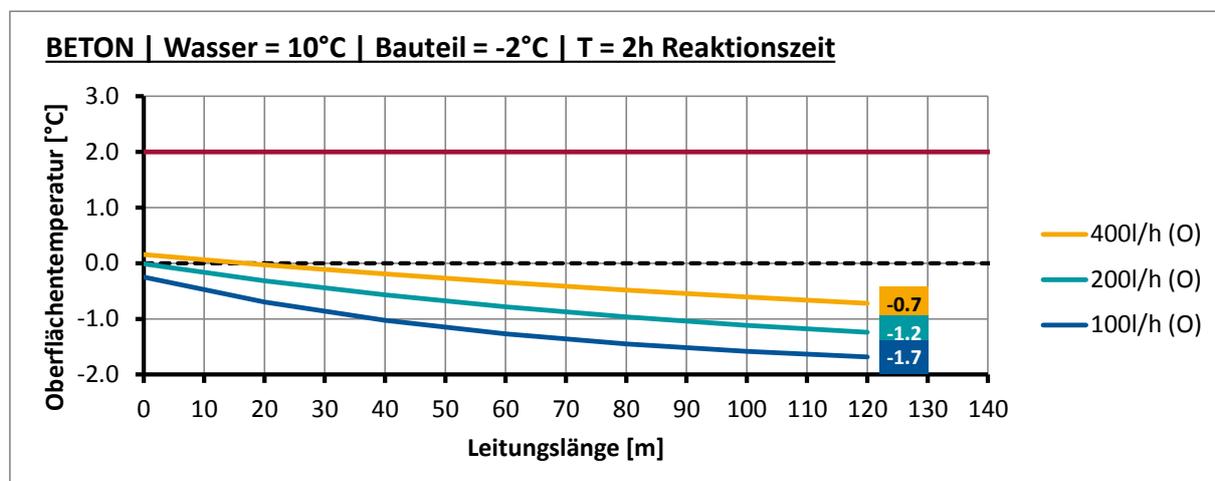
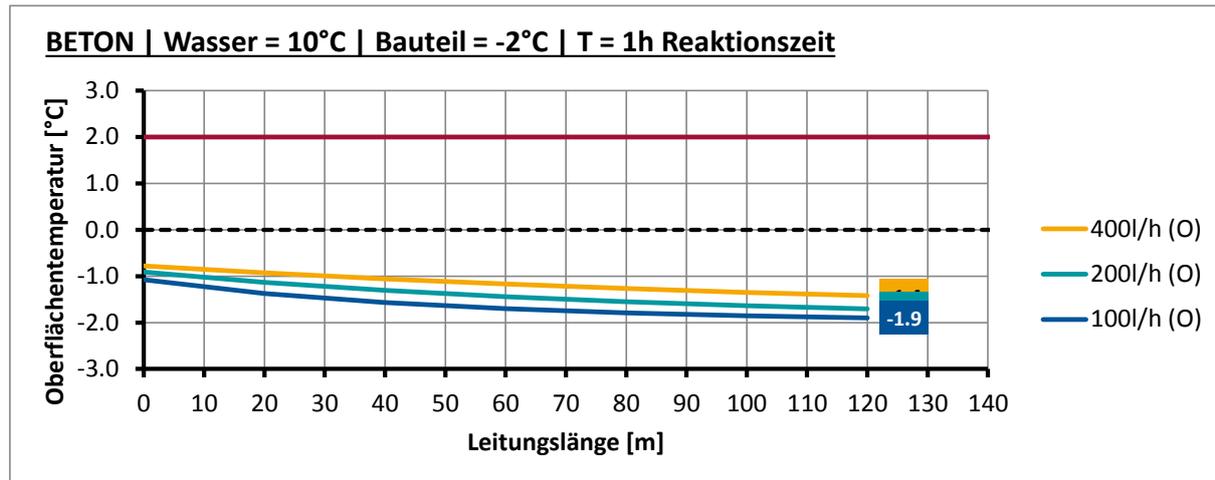
Anhang B.1.1 Verbundbrücke, $T_w=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-6^\circ\text{C}$



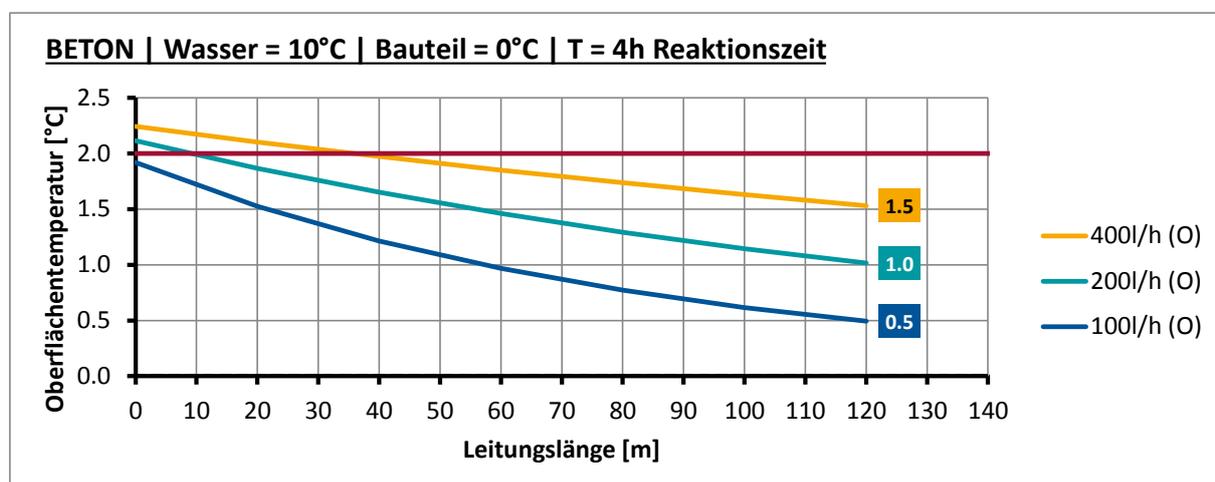
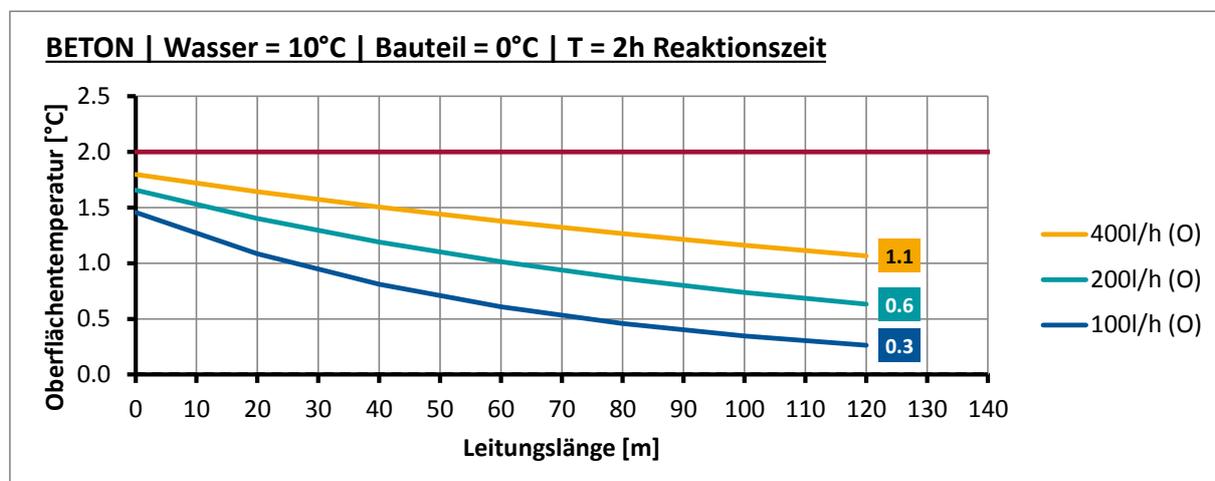
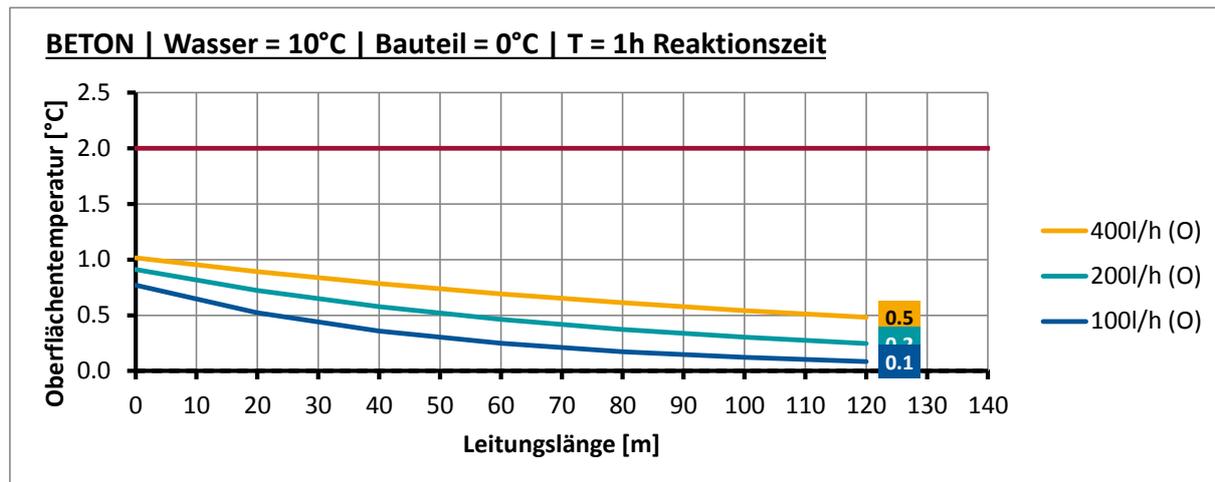
Anhang B.1.2 Verbundbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-4^\circ\text{C}$



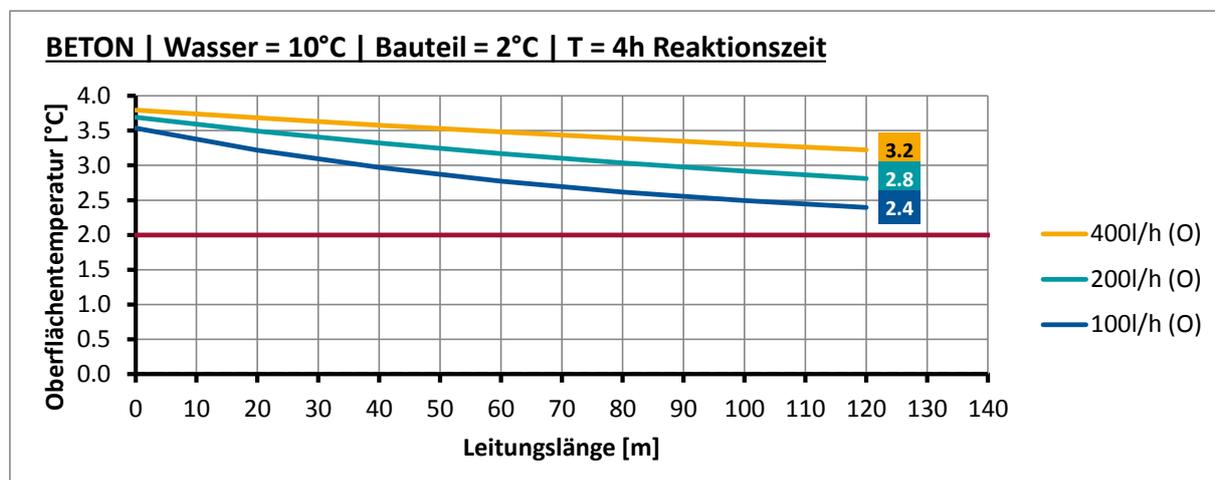
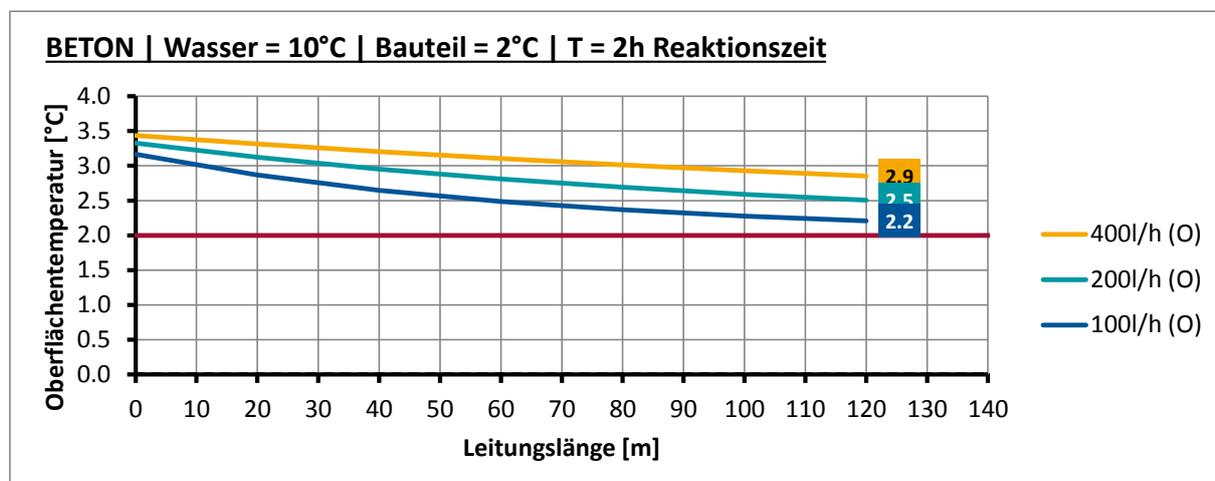
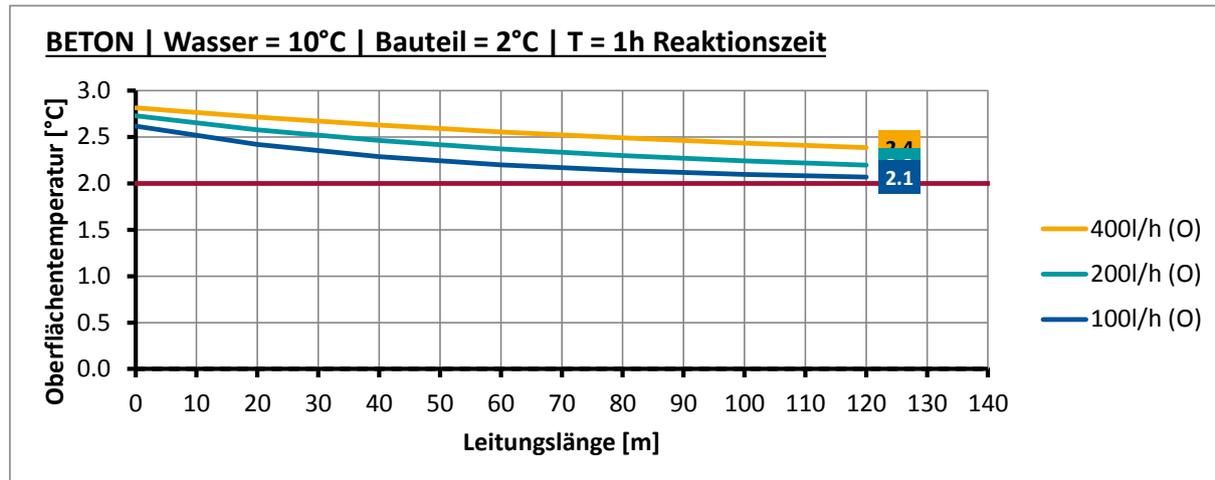
Anhang B.1.3 Verbundbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-2^\circ\text{C}$



Anhang B.1.4 Verbundbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=0^\circ\text{C}$

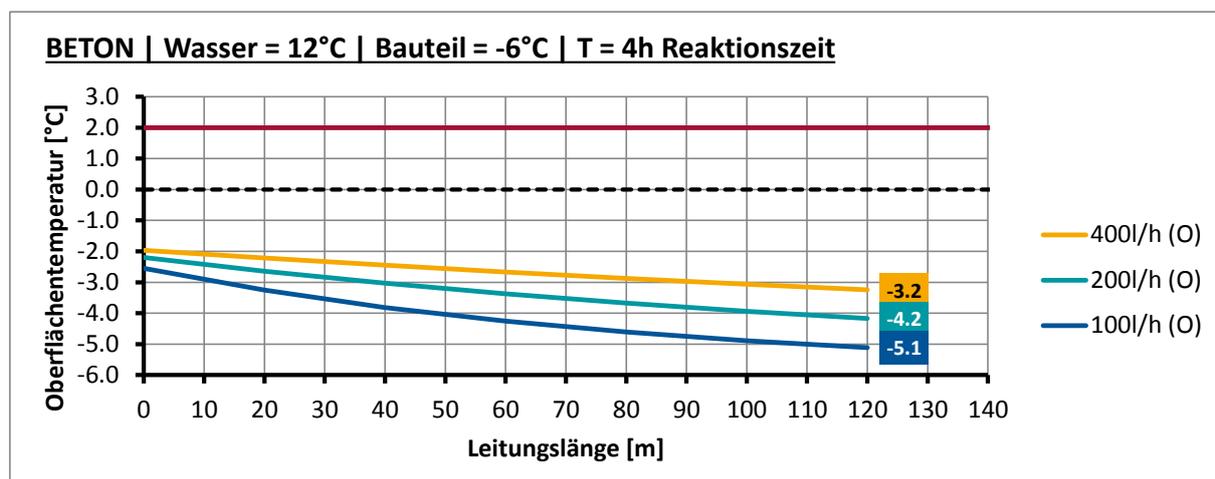
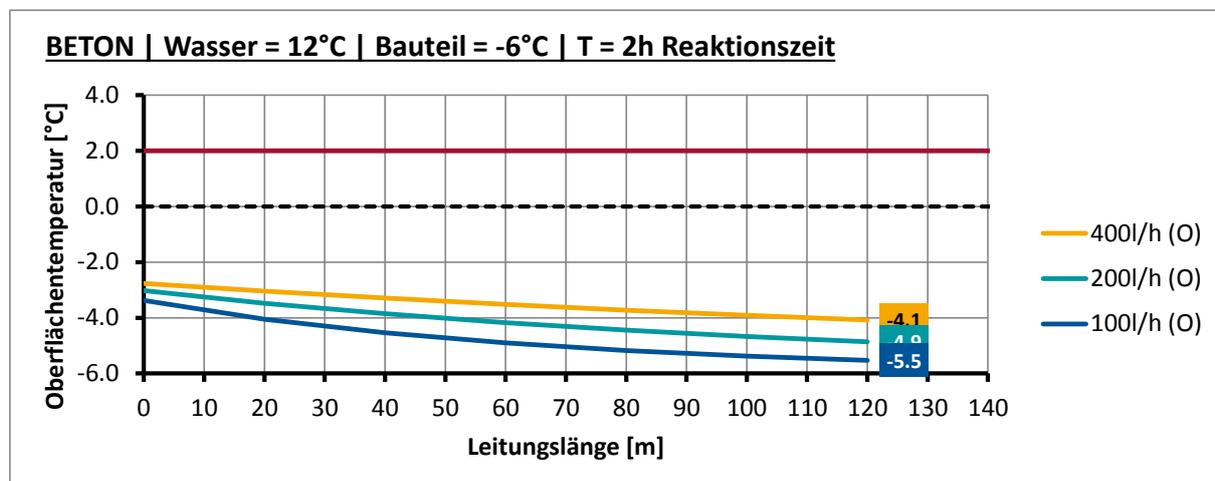
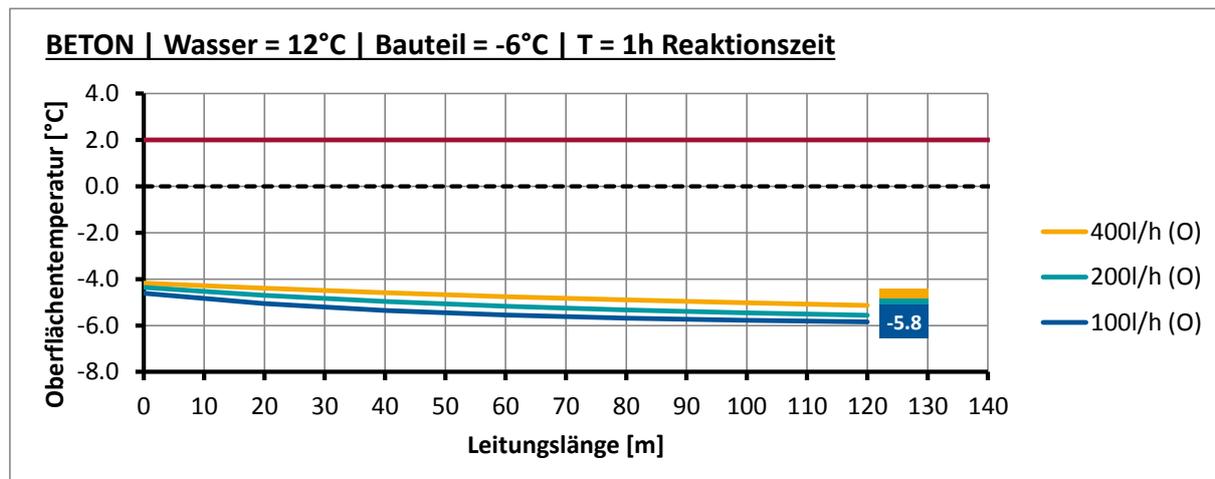


Anhang B.1.5 Verbundbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=2^\circ\text{C}$

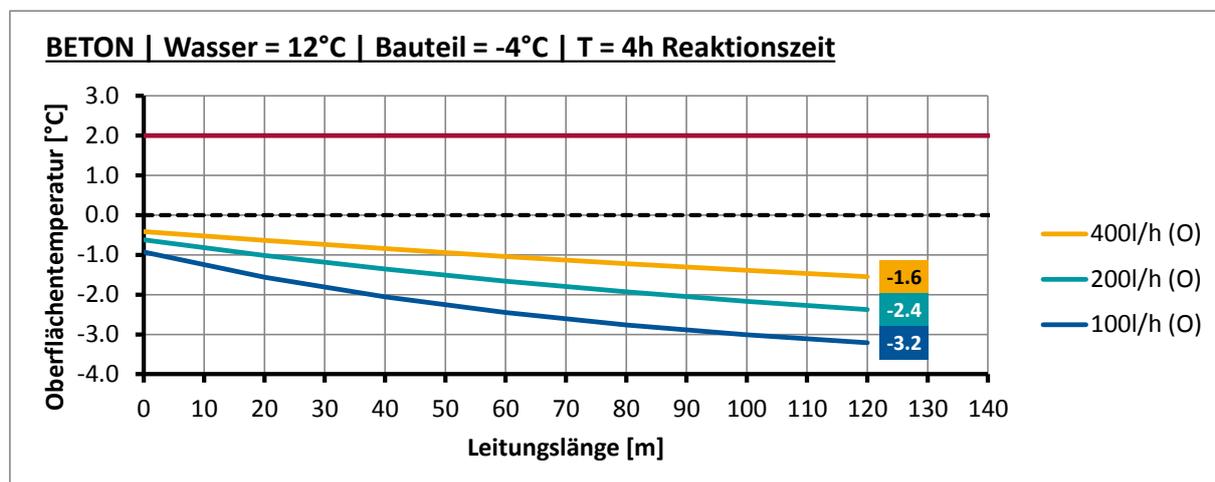
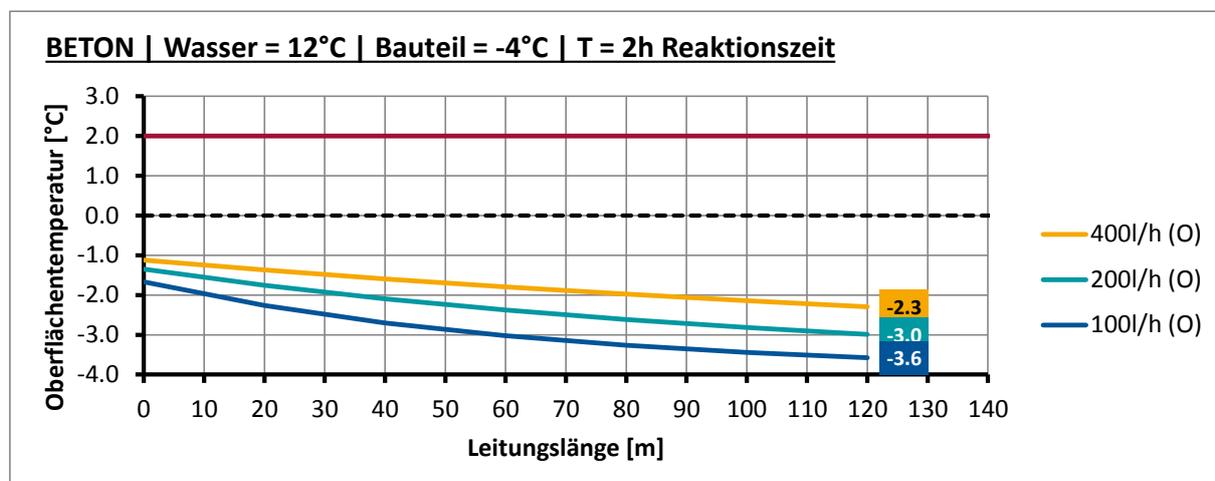
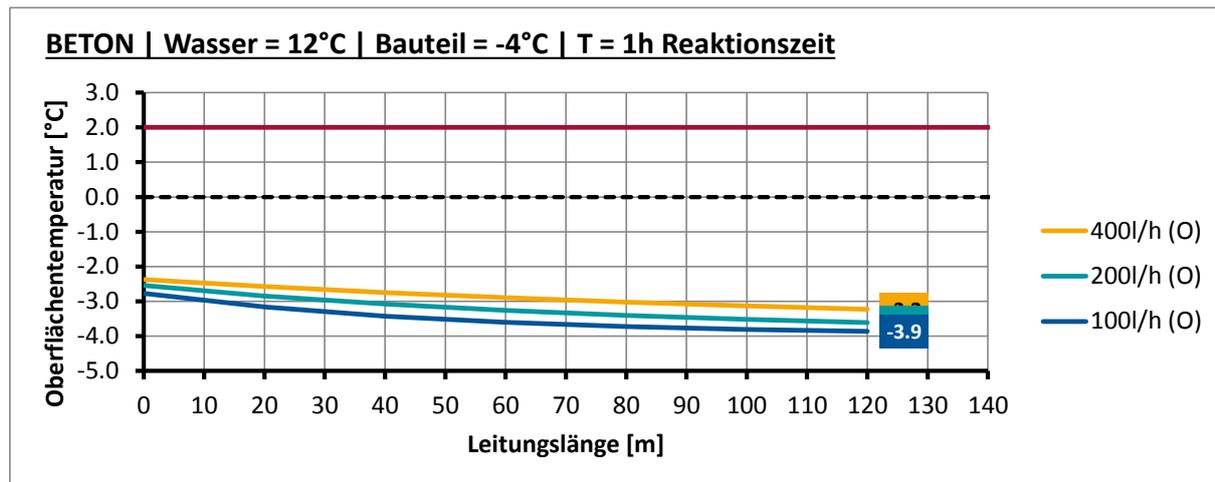


Anhang B.2 Verbundbrücke, $T_w=12^\circ\text{C}$

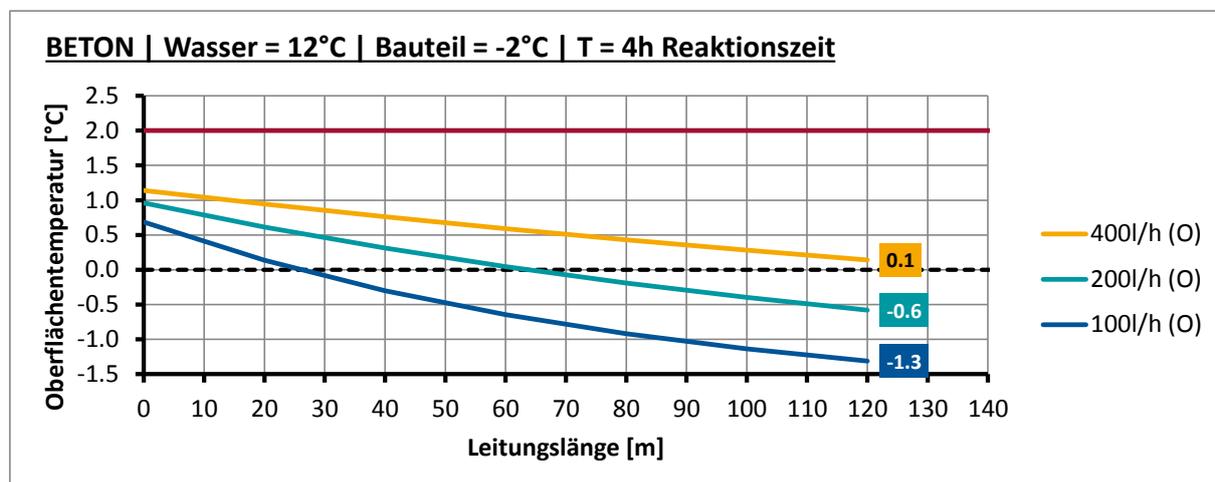
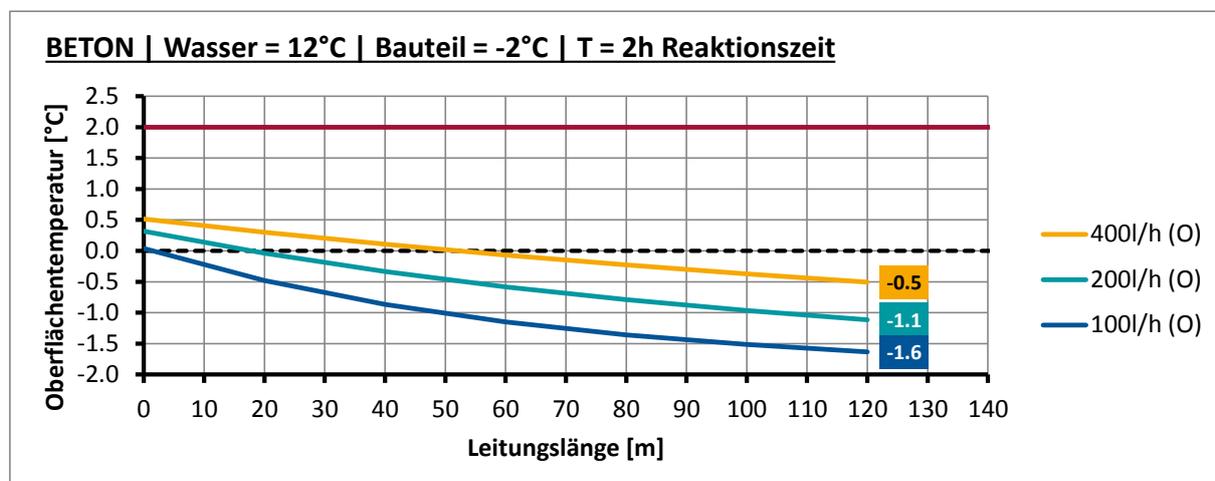
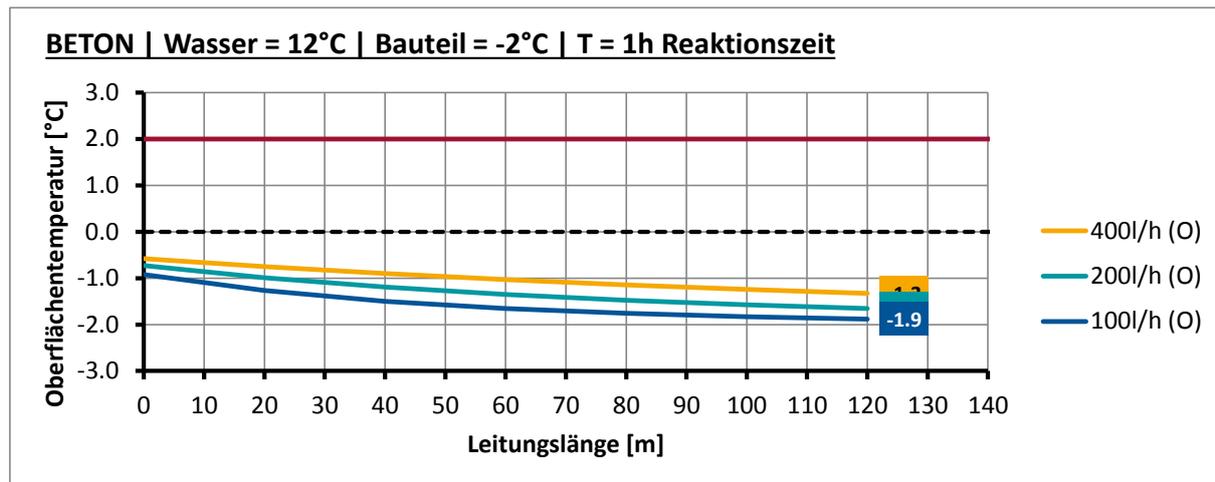
Anhang B.2.1 Verbundbrücke, $T_w=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-6^\circ\text{C}$



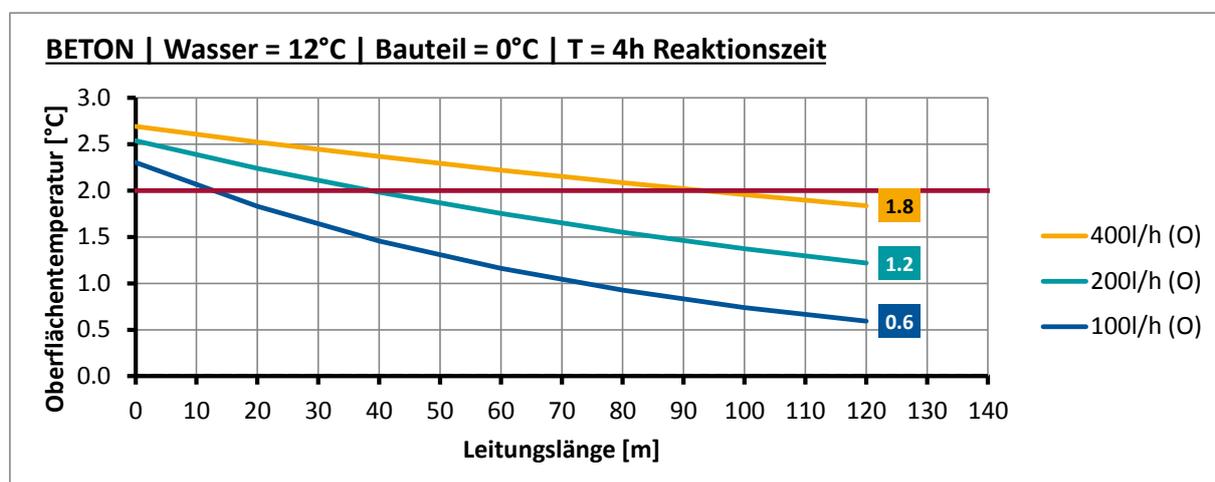
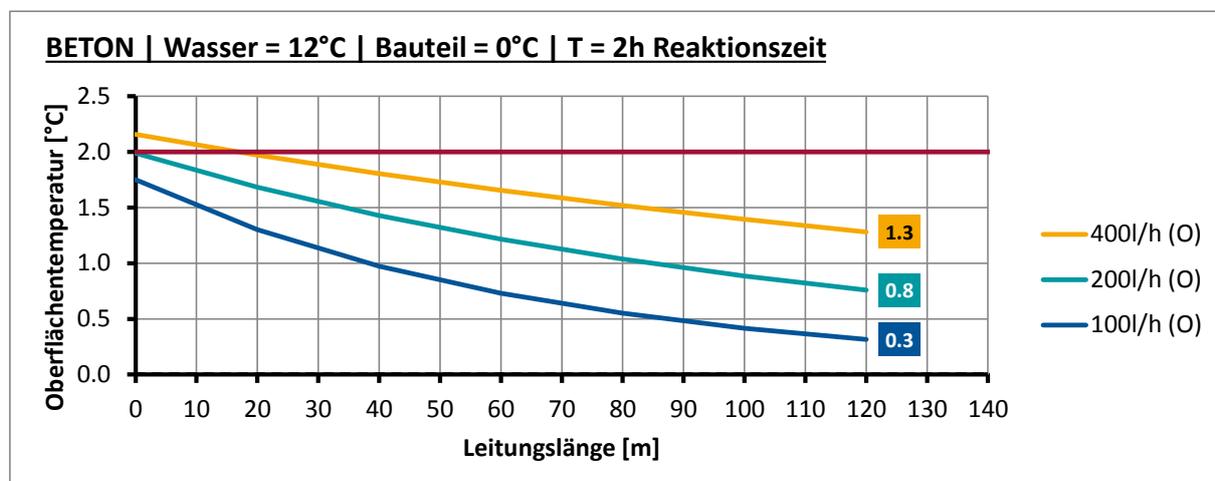
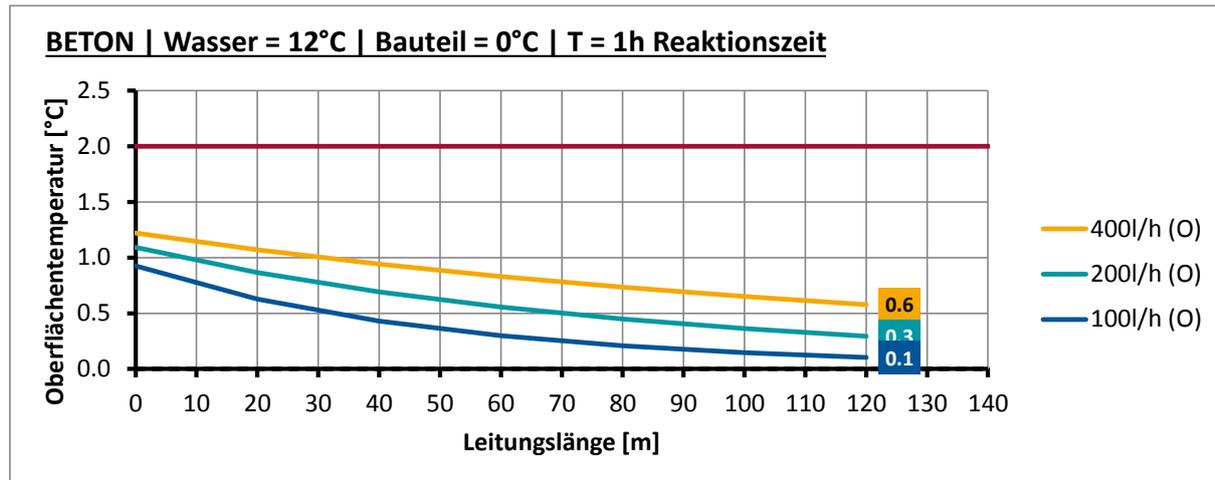
Anhang B.2.2 Verbundbrücke, $T_W=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-4^\circ\text{C}$



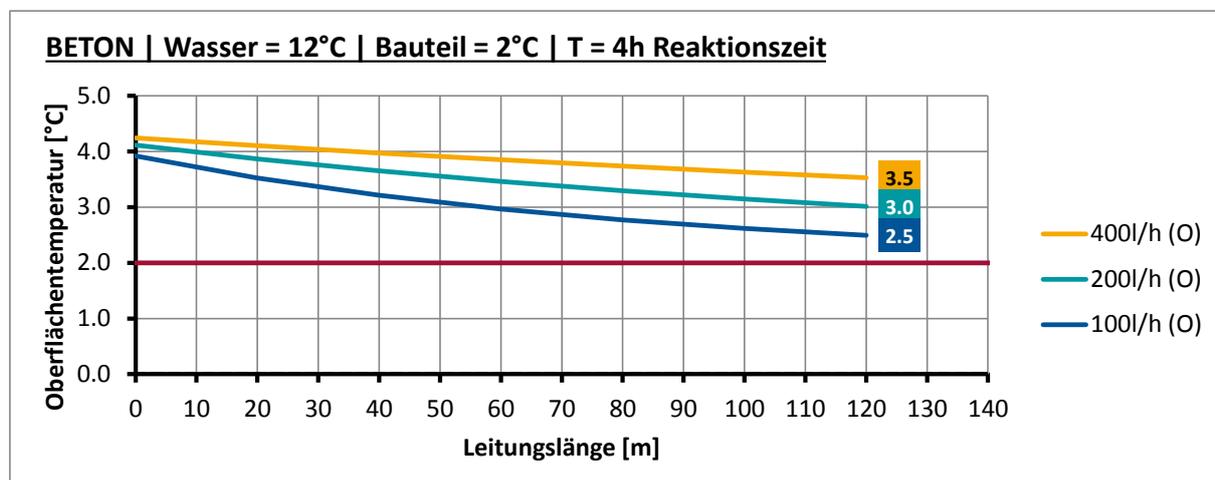
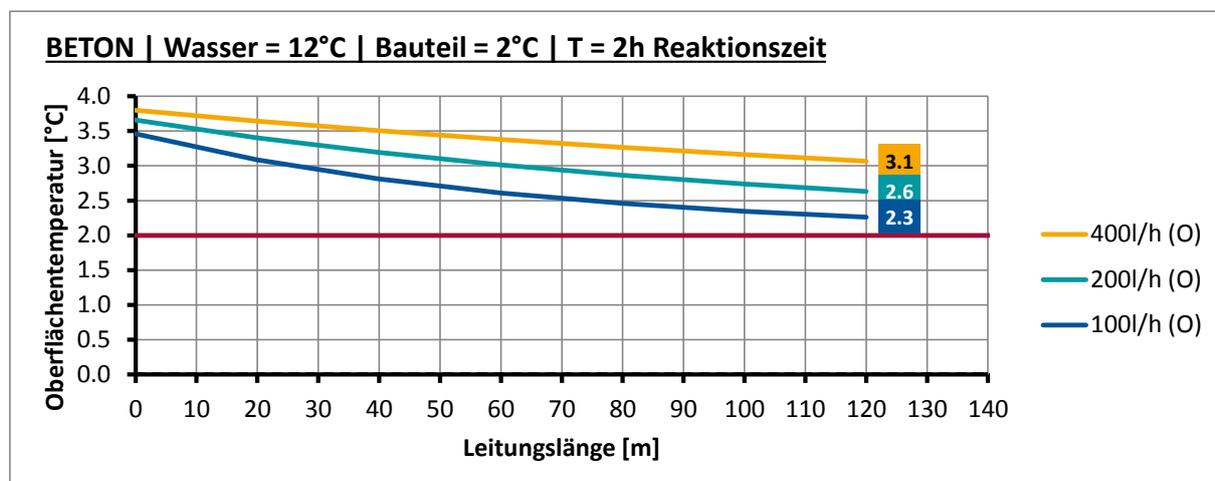
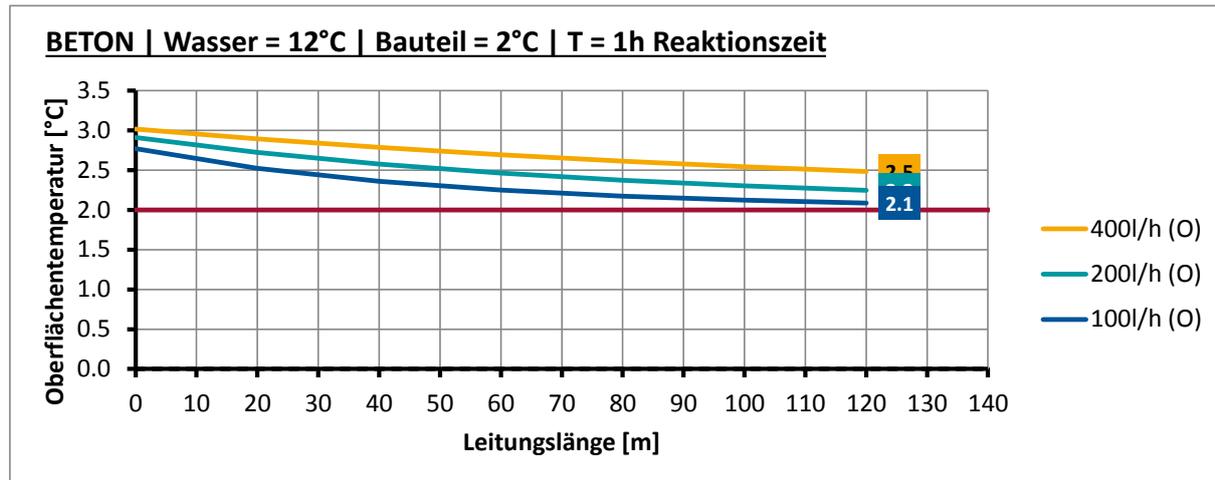
Anhang B.2.3 Verbundbrücke, $T_W=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-2^\circ\text{C}$



Anhang B.2.4 Verbundbrücke, $T_W=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=0^\circ\text{C}$

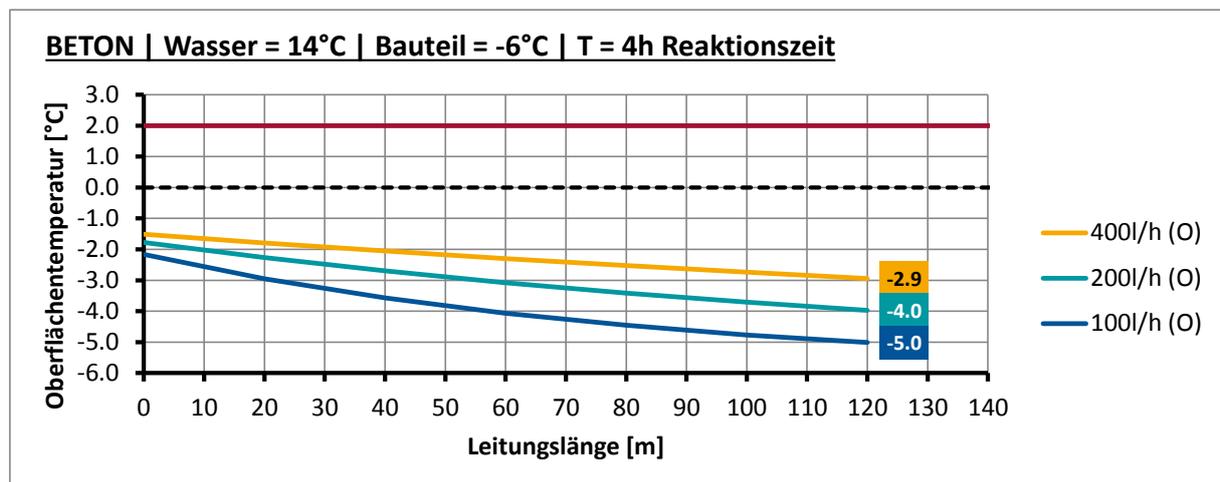
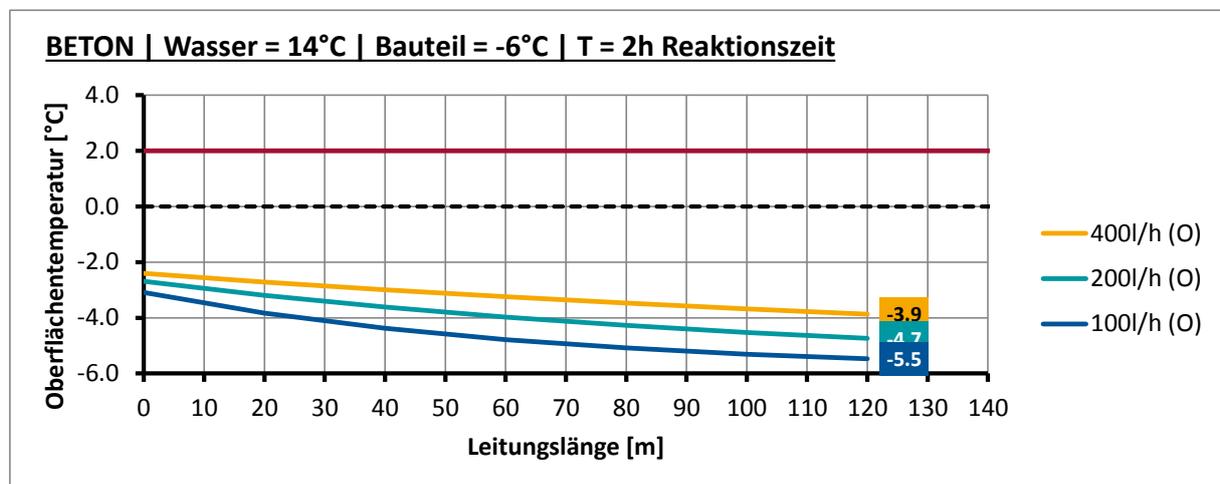
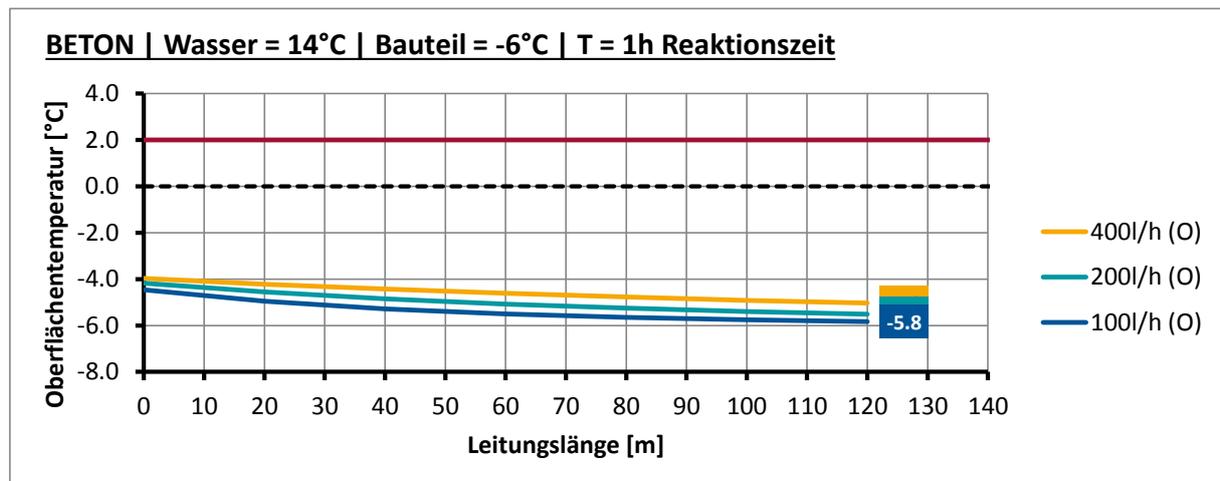


Anhang B.2.5 Verbundbrücke, $T_W=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=2^\circ\text{C}$

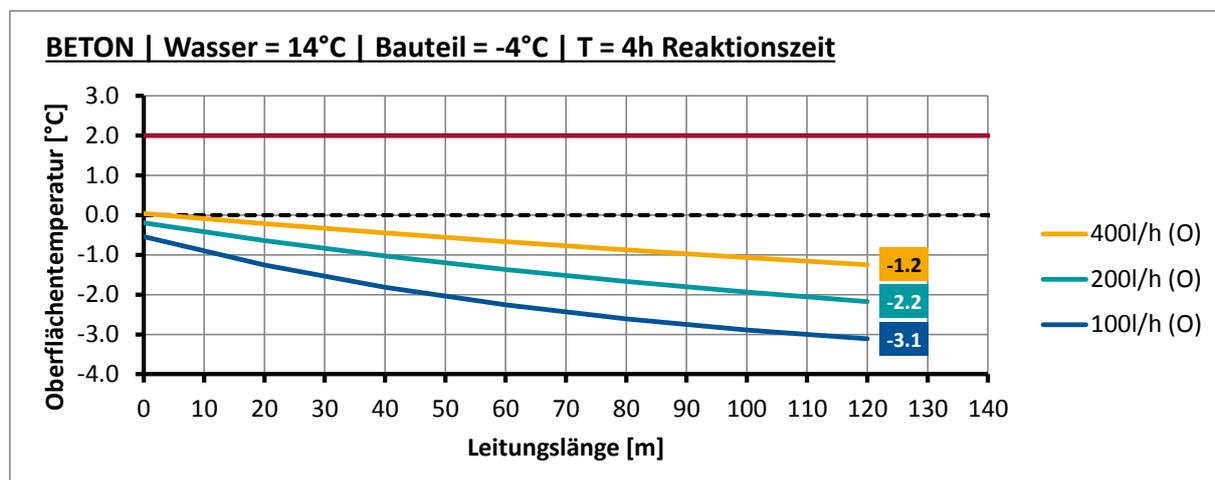
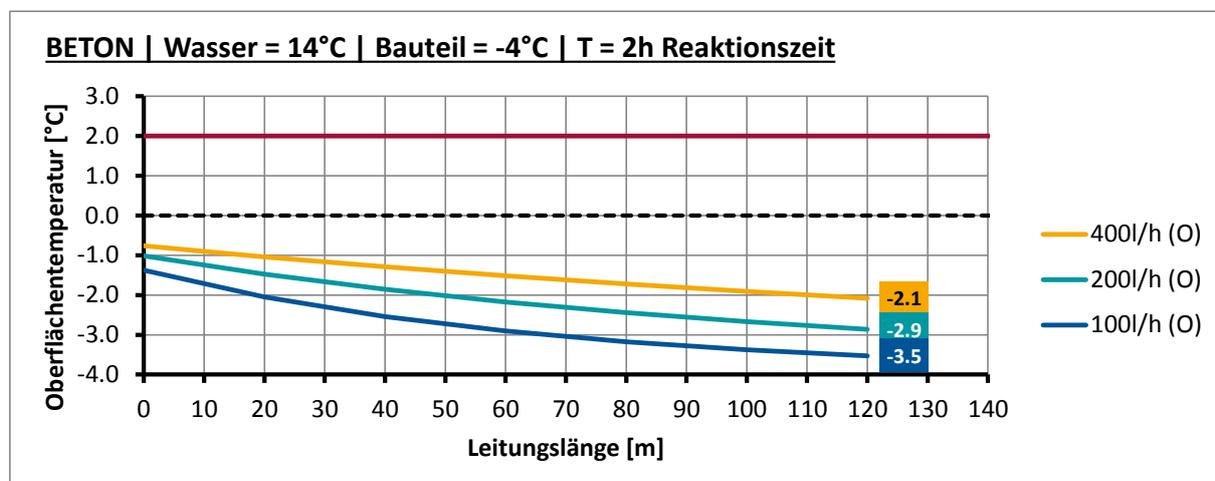
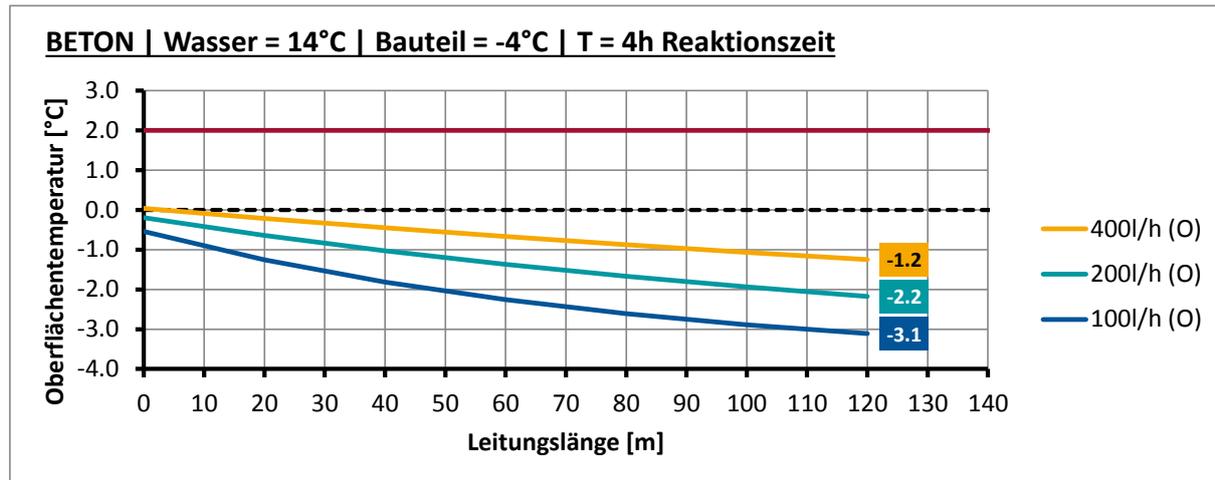


Anhang B.3 Verbundbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$

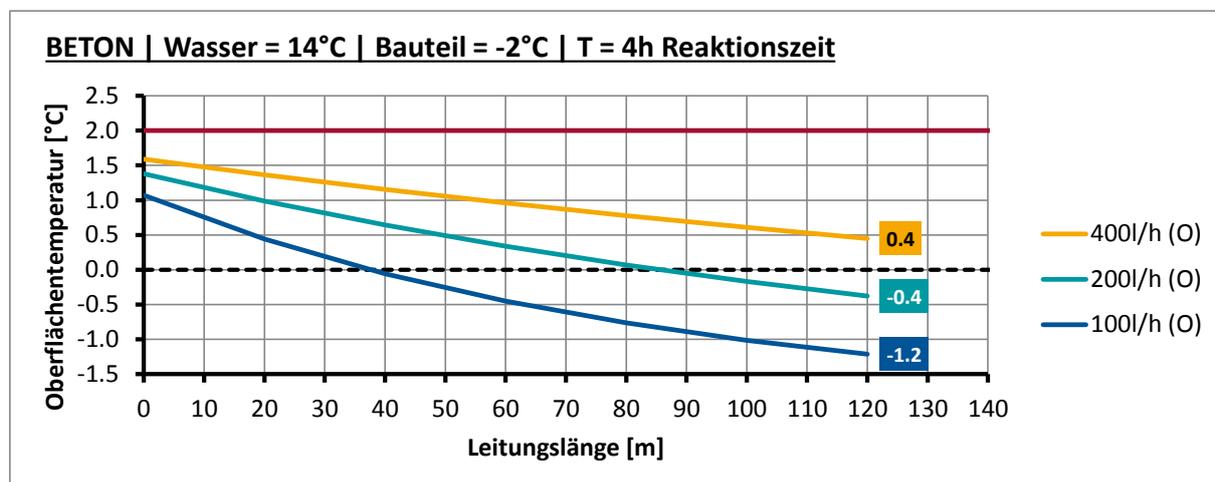
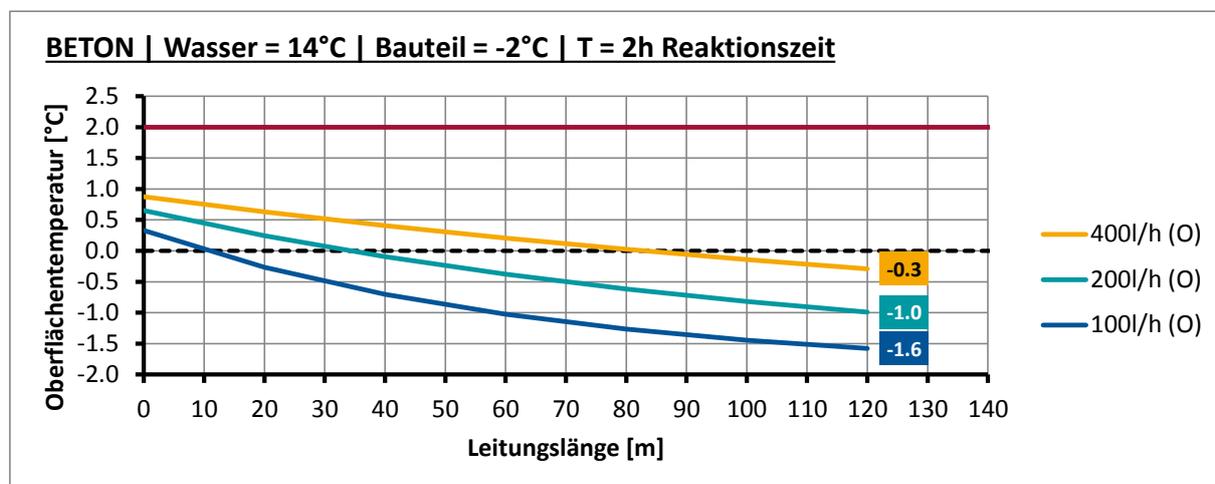
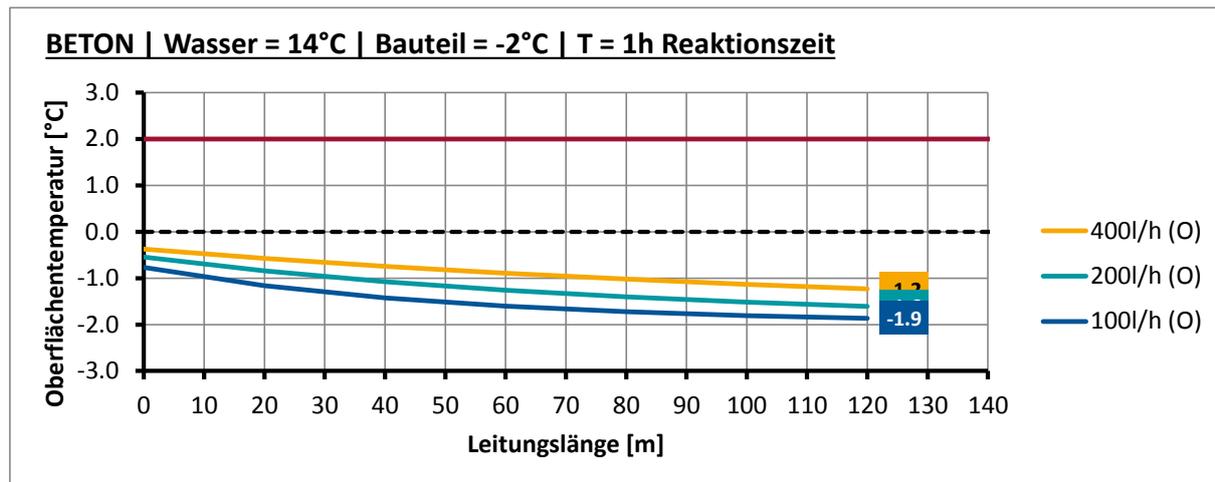
Anhang B.3.1 Verbundbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-6^\circ\text{C}$



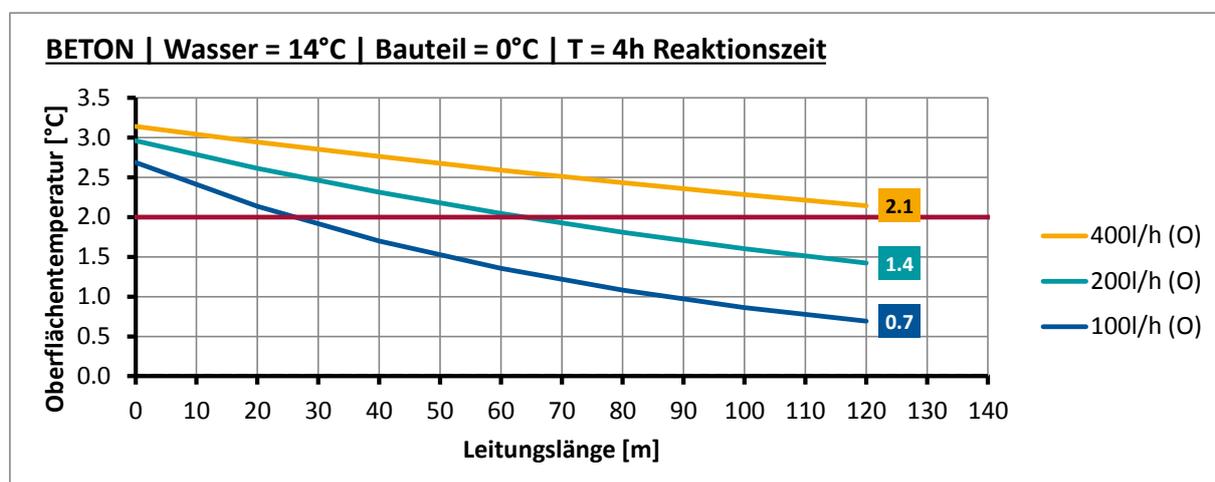
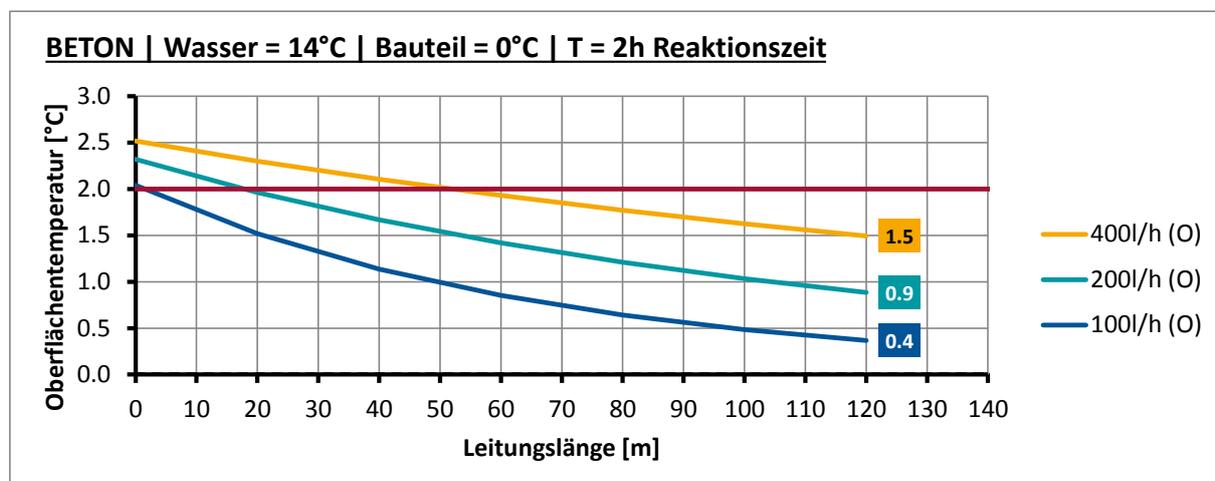
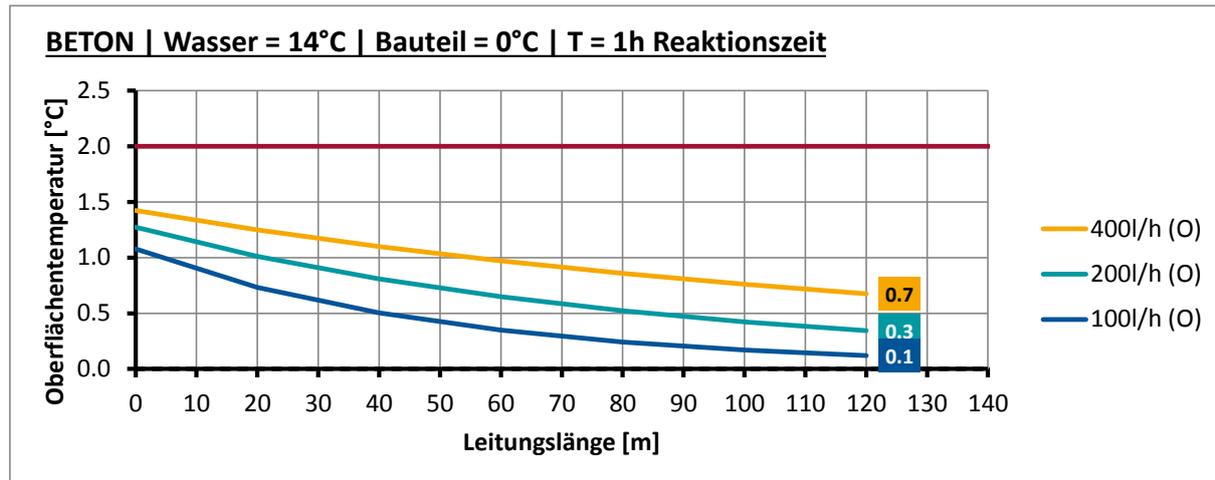
Anhang B.3.2 Verbundbrücke, $T_W=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-4^\circ\text{C}$



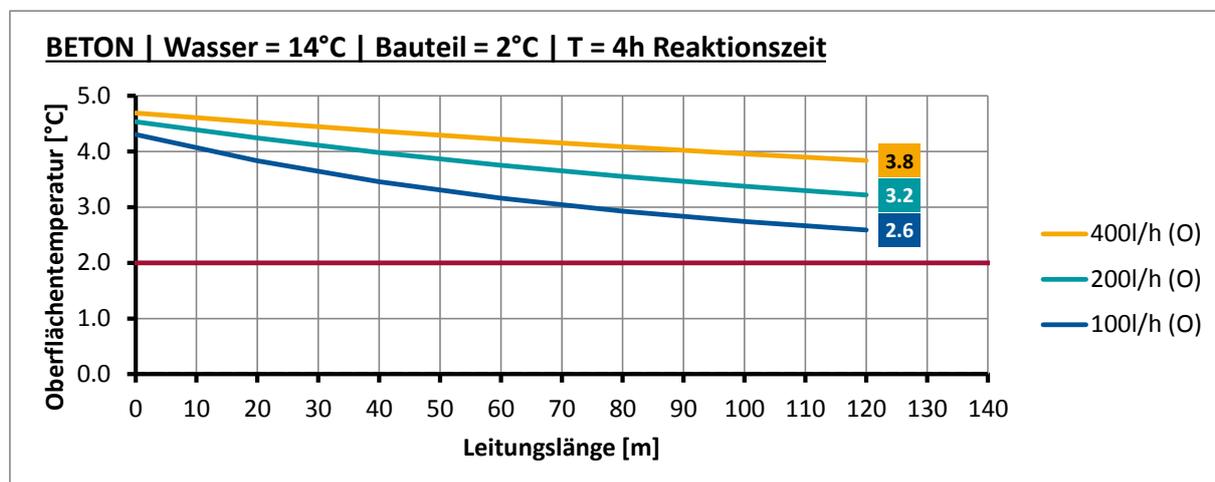
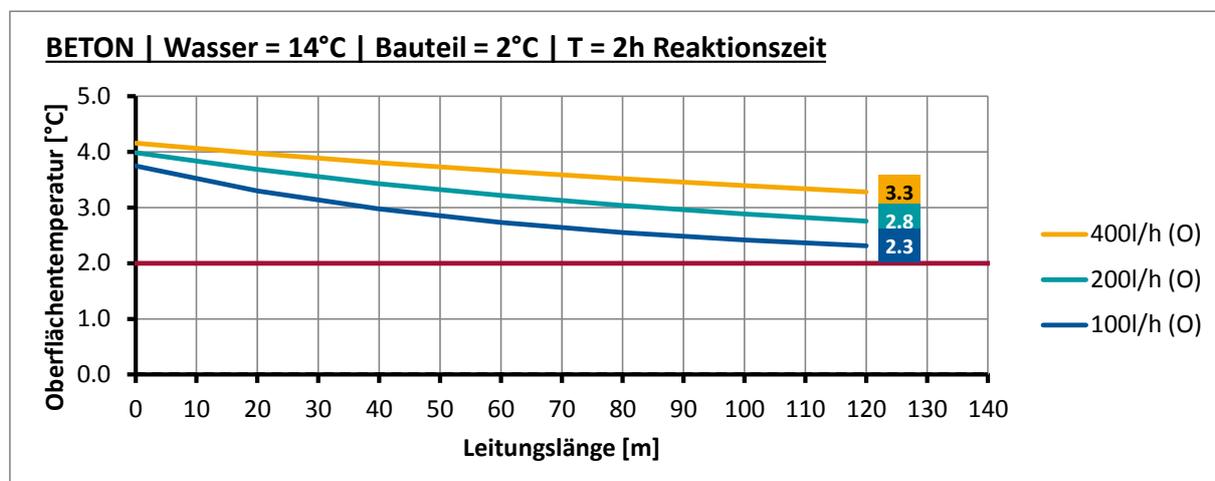
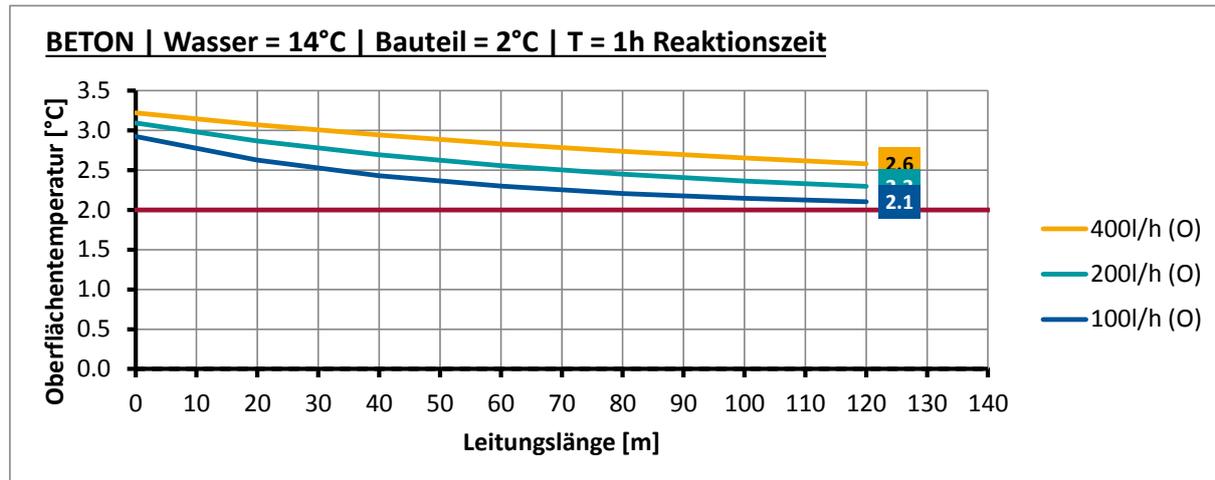
Anhang B.3.3 Verbundbrücke, $T_W=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-2^\circ\text{C}$



Anhang B.3.4 Verbundbrücke, $T_W=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=0^\circ\text{C}$



Anhang B.3.5 Verbundbrücke, $T_W=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=2^\circ\text{C}$



Anhang C Vorbemessungstafeln (Stahlbrücke)

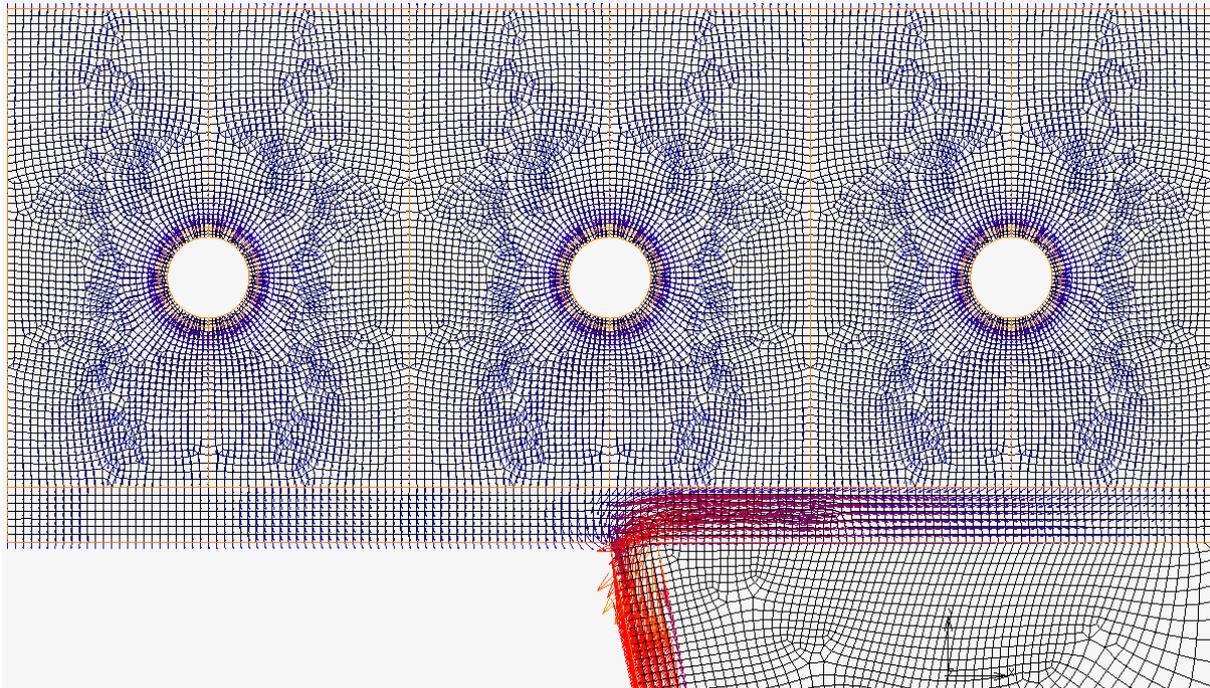


Abbildung 45 : Wärmestrom „Stahlbrücke“

Tabelle 10: Materialparameter FE „Stahlbrücke“

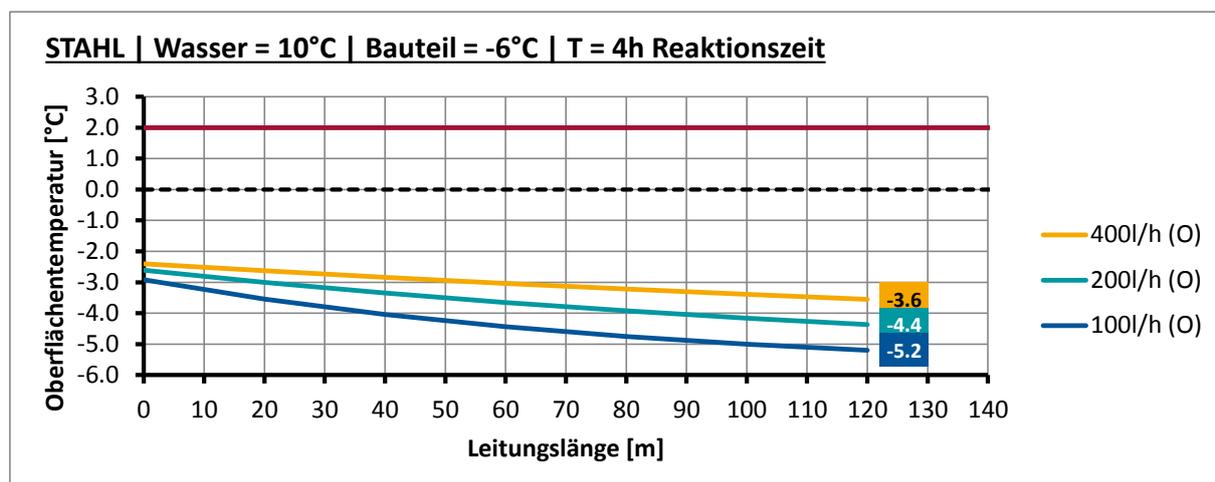
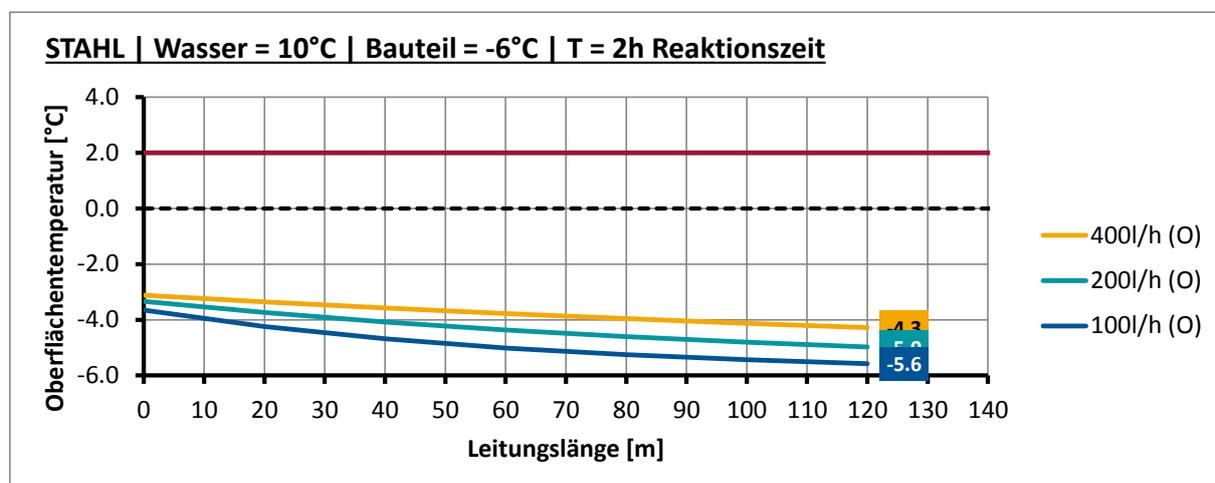
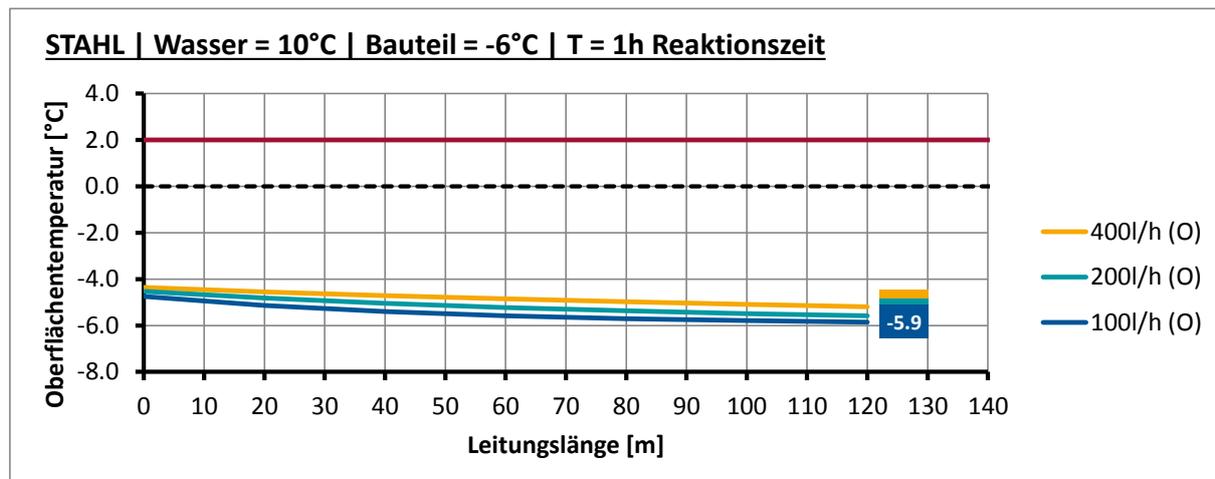
Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spezifische Wärmekapazität c [J/(kg K)]	Dichte ρ [kg/m ³]
Stahl	50,0	450	7.850
Rohr	0,35	900	800
Gussasphalt	0,7	1.000	2.100
Luft (Rippe)	0,2	1.000	1,29

Die Oberflächentemperatur $T_o(T,x)$ wurde basierend auf der Wassertemperatur im Rohr $T_w(T,x)$ ermittelt (vgl. Kapitel 3.8). Hierzu wurden die Stellen ($x=0m, 20m, 40m, 60m, 80m, 100m, 120m$) ausgewertet.

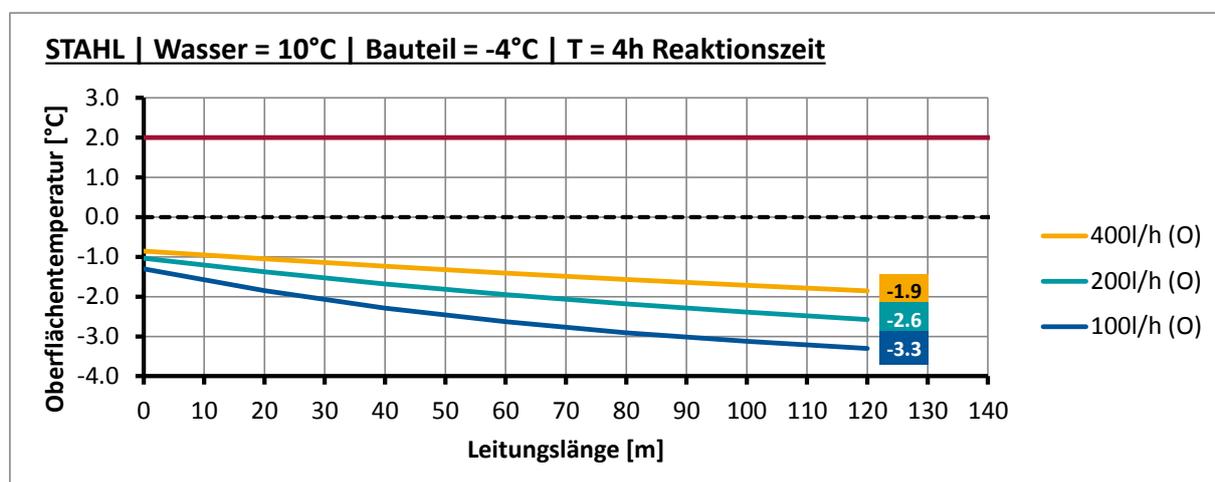
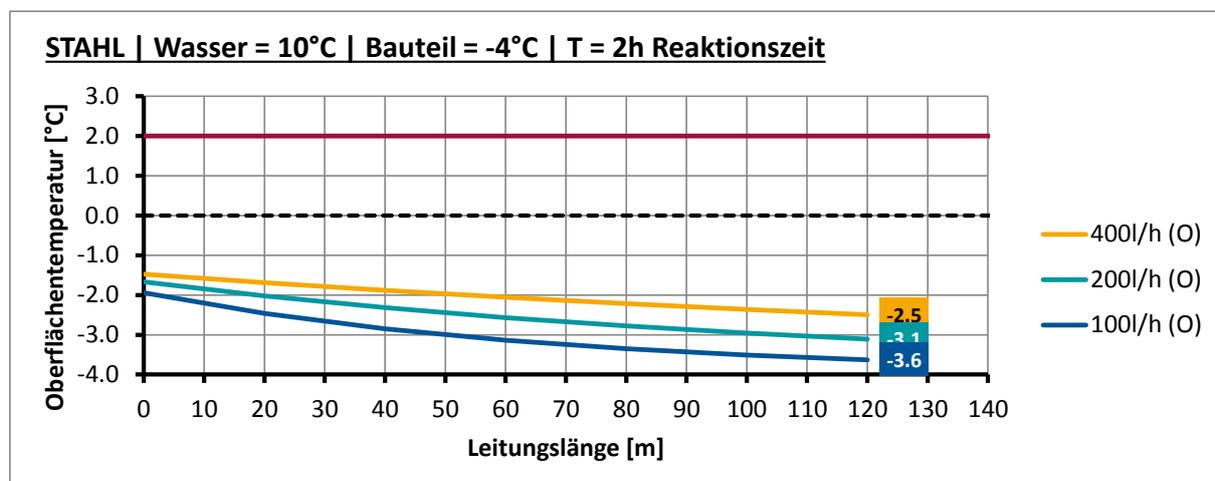
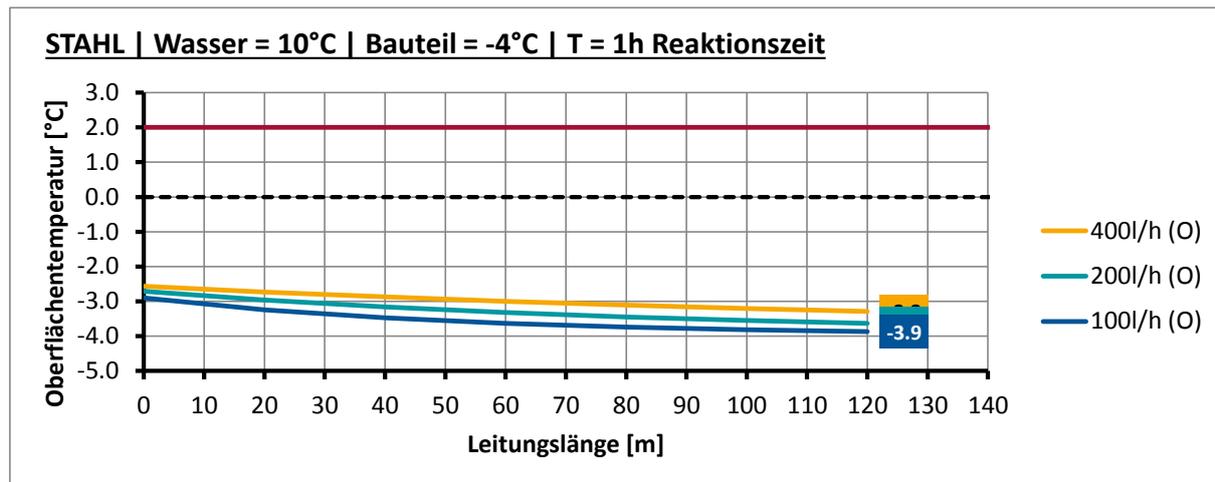
Den Berechnungen liegt der in Kapitel 3.2 beschriebene Fahrbahnaufbau zu Grunde. Die Berechnungen gelten lediglich für die in Tabelle 10 aufgeführten Materialien bzw. Materialparameter. Hier sei darauf hingewiesen, dass insbesondere eine Änderung des Asphalts zu anderen Ergebnissen führen wird. Es ist davon auszugehen, dass ein konventioneller Asphalt (welcher aufgrund der Porosität eine geringere Wärmeleitfähigkeit aufweist) die Funktionsweise des Temperierungssystems negativ beeinflussen wird.

Anhang C.1 Stahlbrücke, $T_w=10^\circ\text{C}$

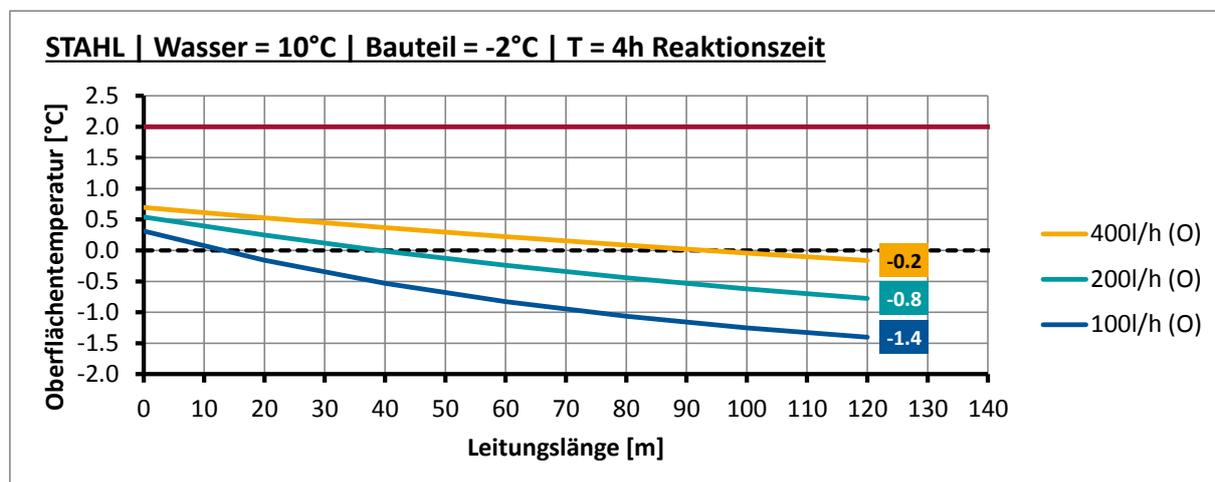
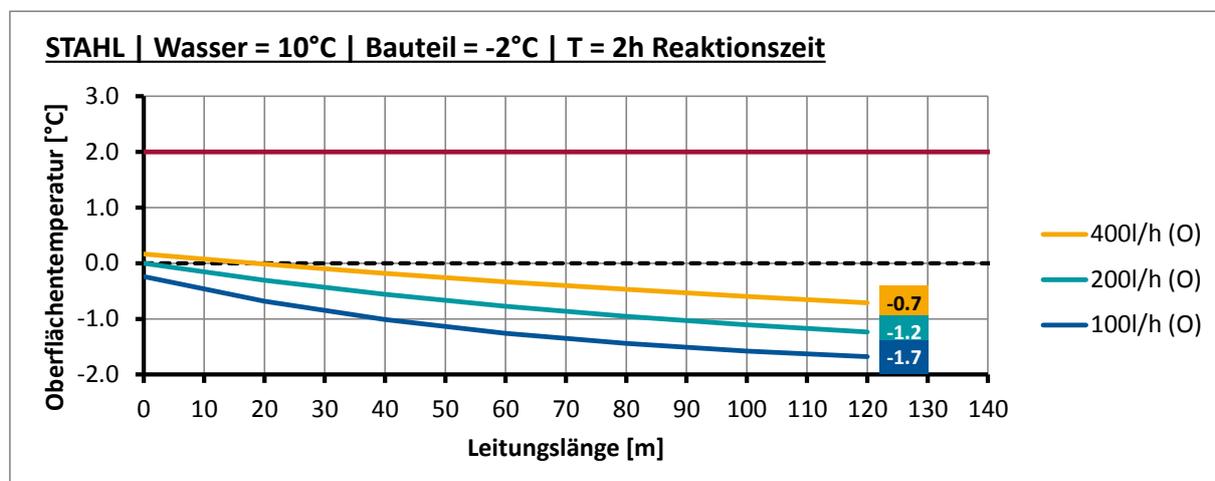
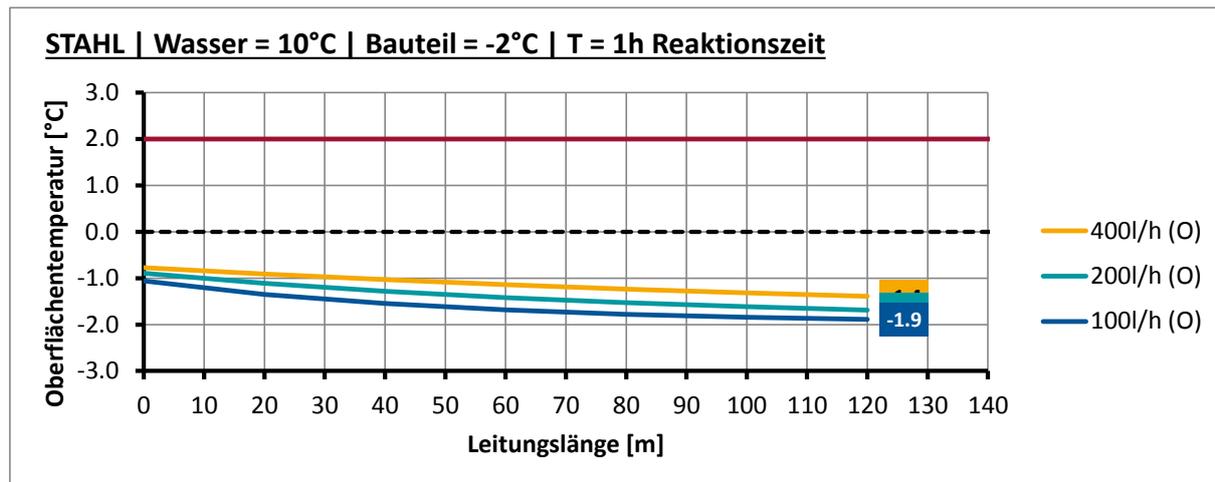
Anhang C.1.1 Stahlbrücke, $T_w=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_u=-6^\circ\text{C}$



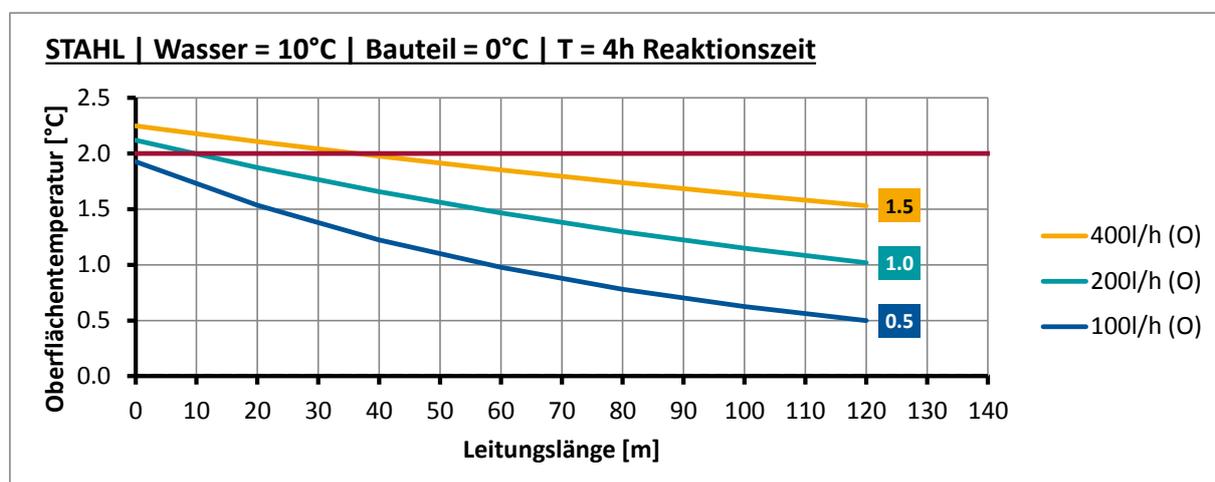
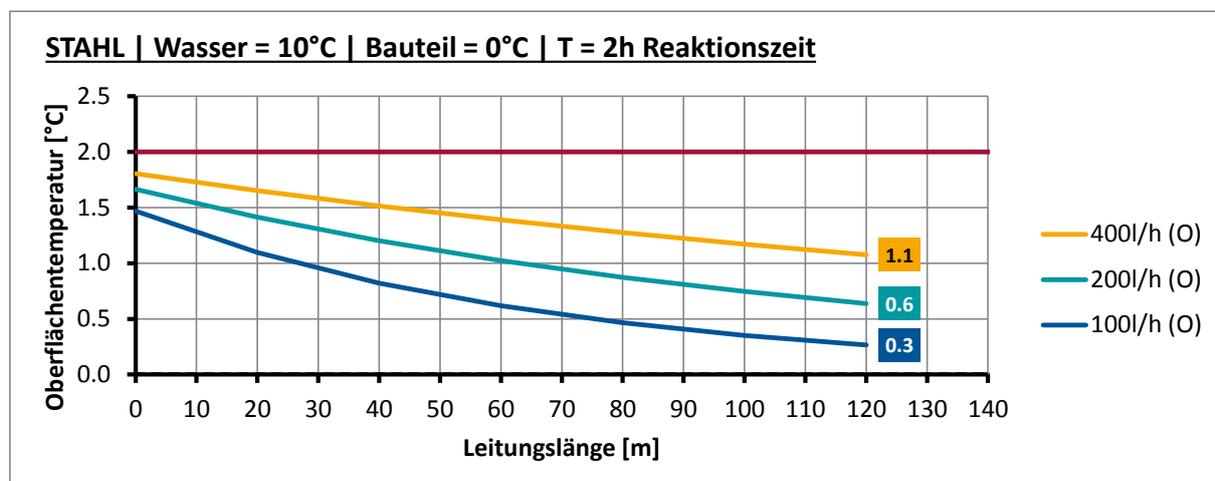
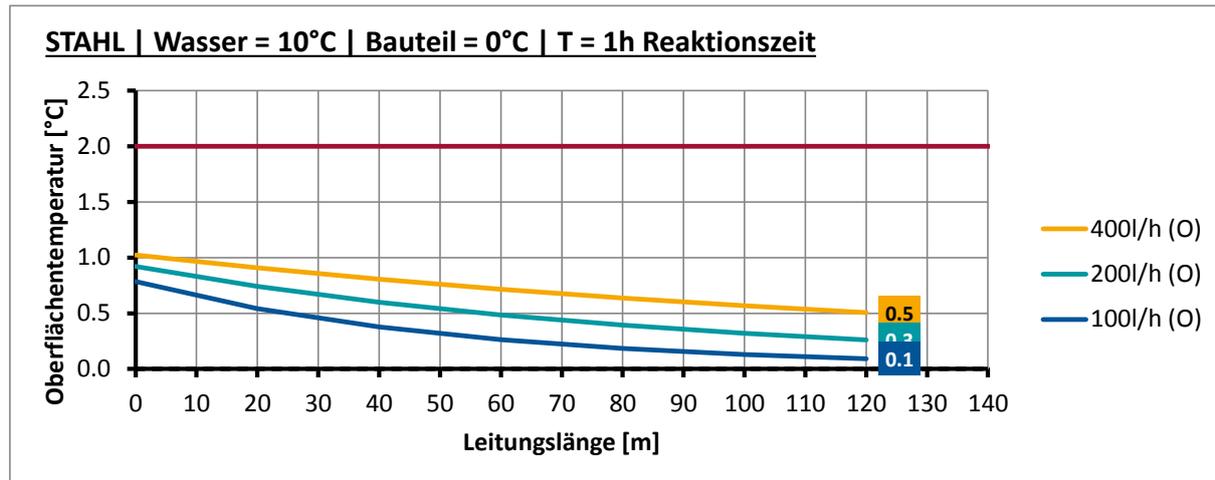
Anhang C.1.2 Stahlbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-4^\circ\text{C}$



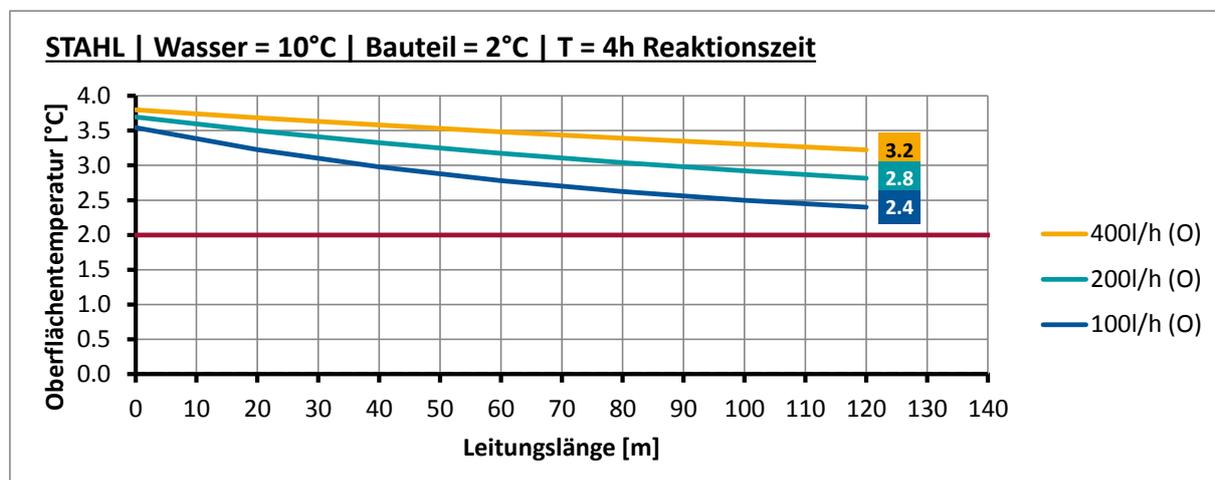
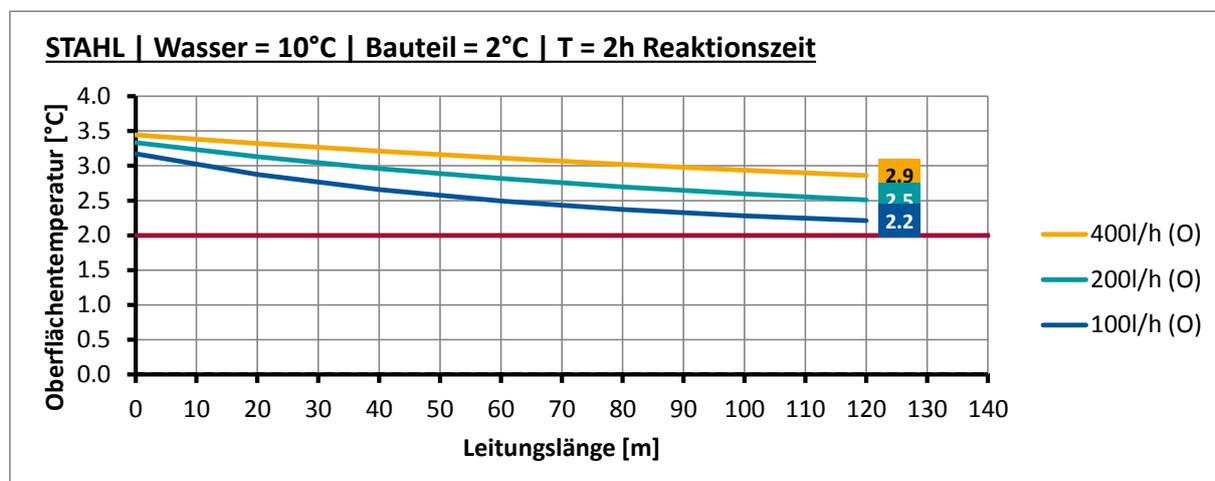
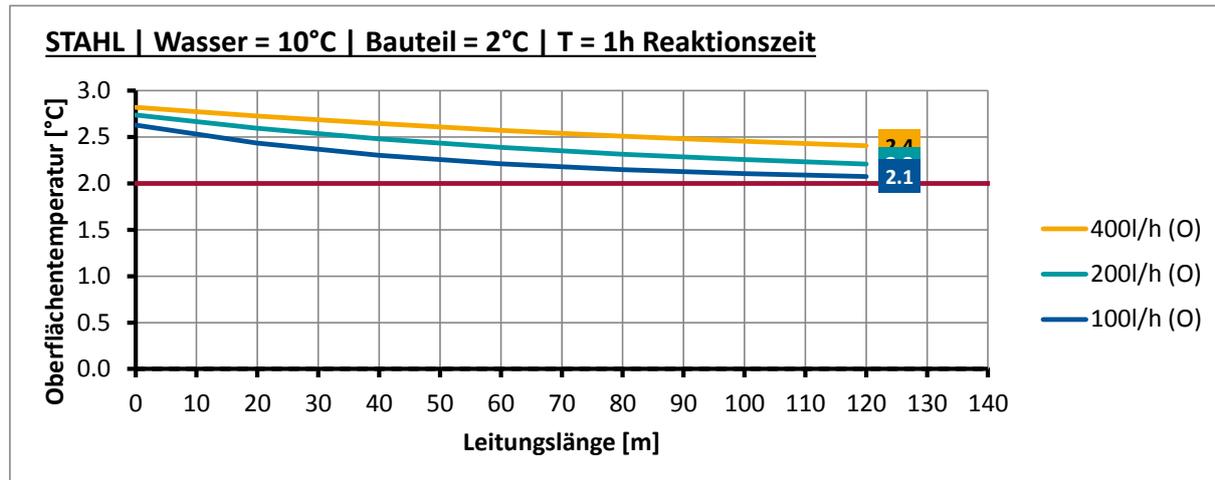
Anhang C.1.3 Stahlbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-2^\circ\text{C}$



Anhang C.1.4 Stahlbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=0^\circ\text{C}$

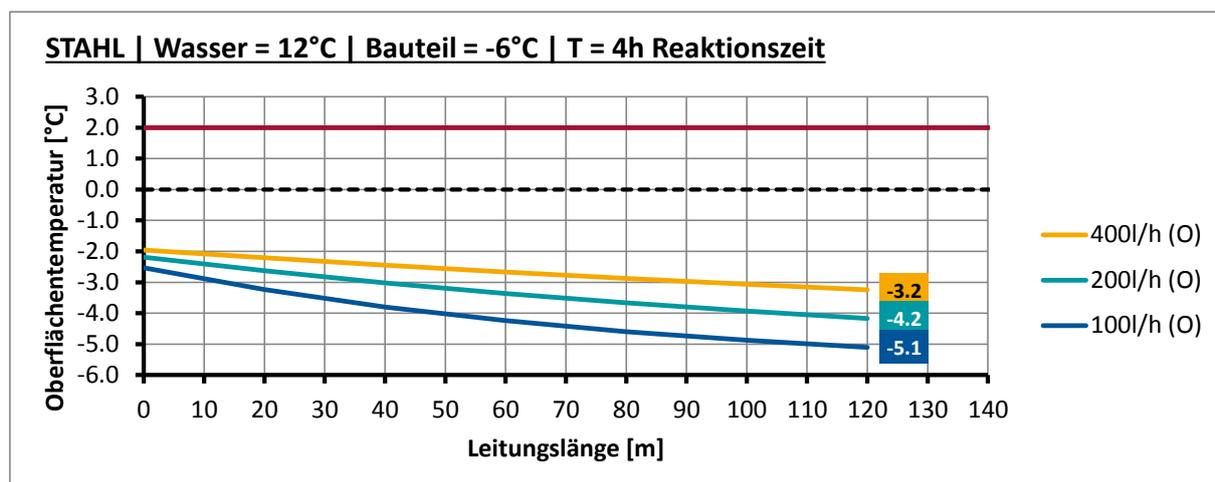
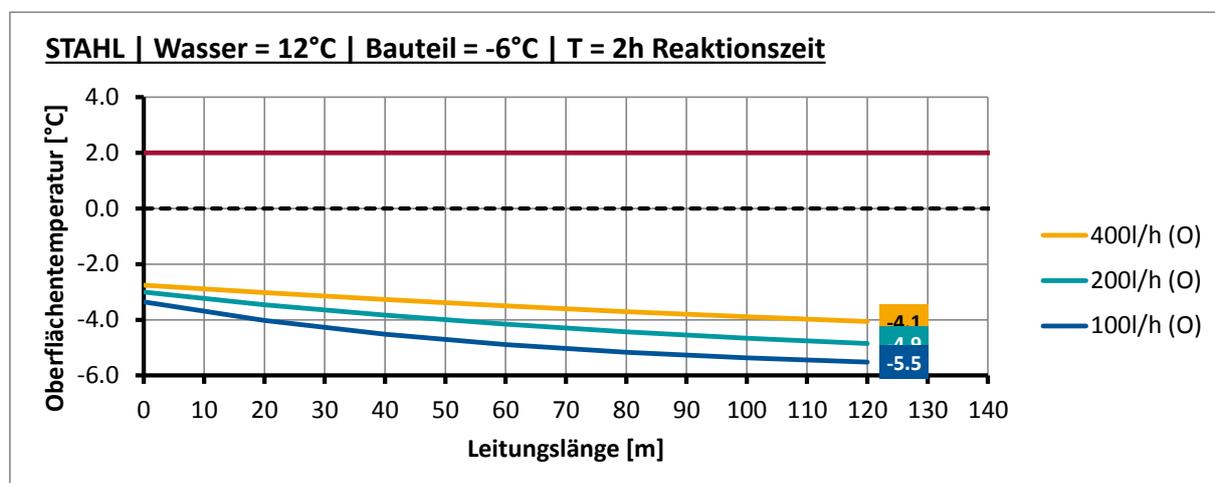
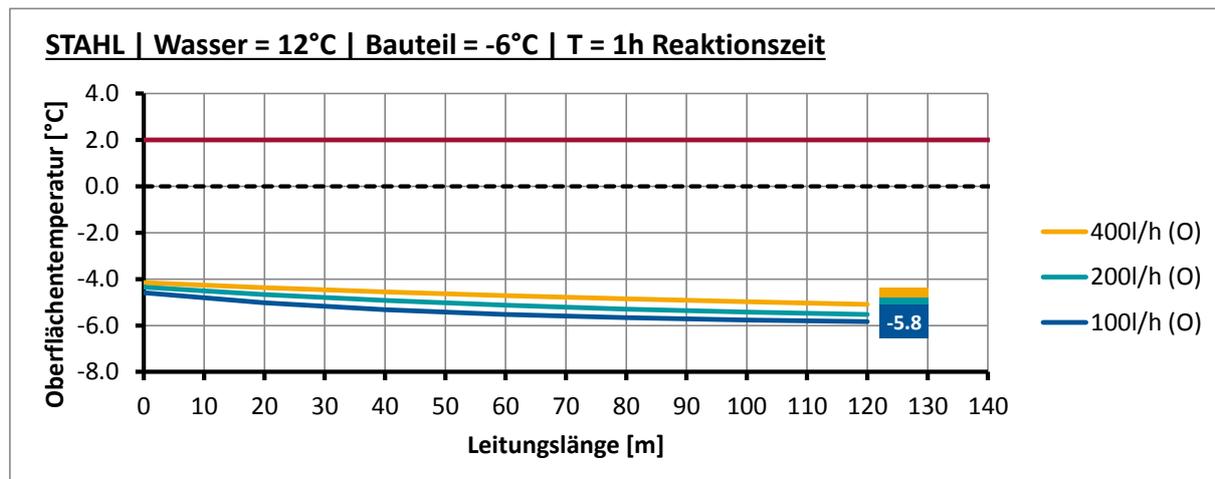


Anhang C.1.5 Stahlbrücke, $T_w=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_u=2^\circ\text{C}$

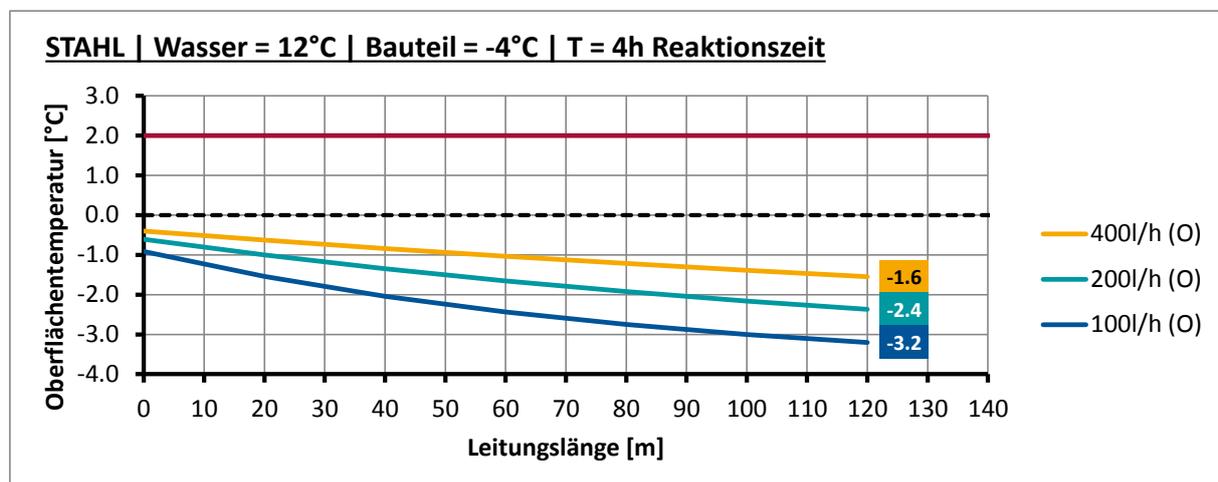
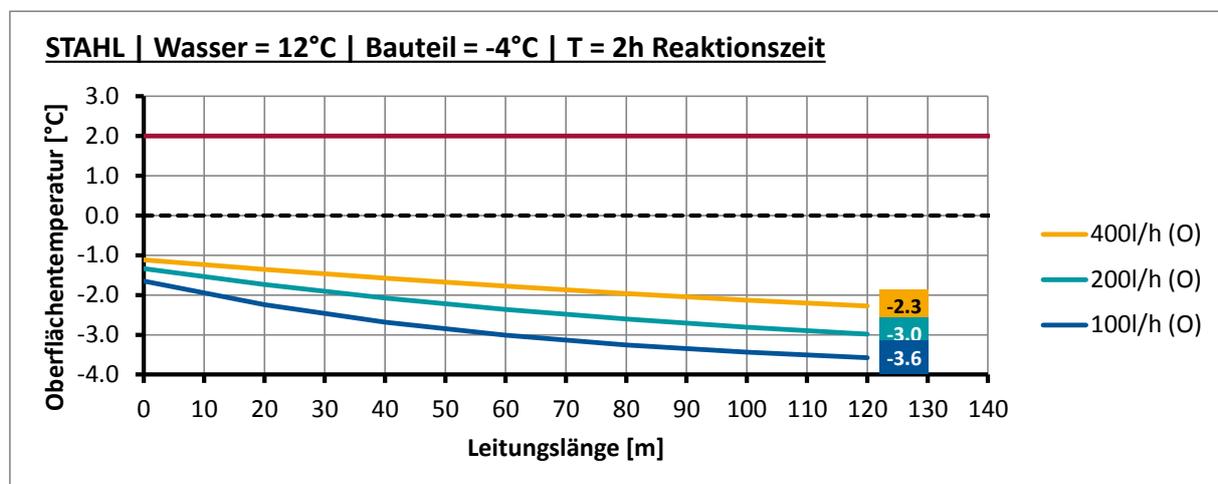
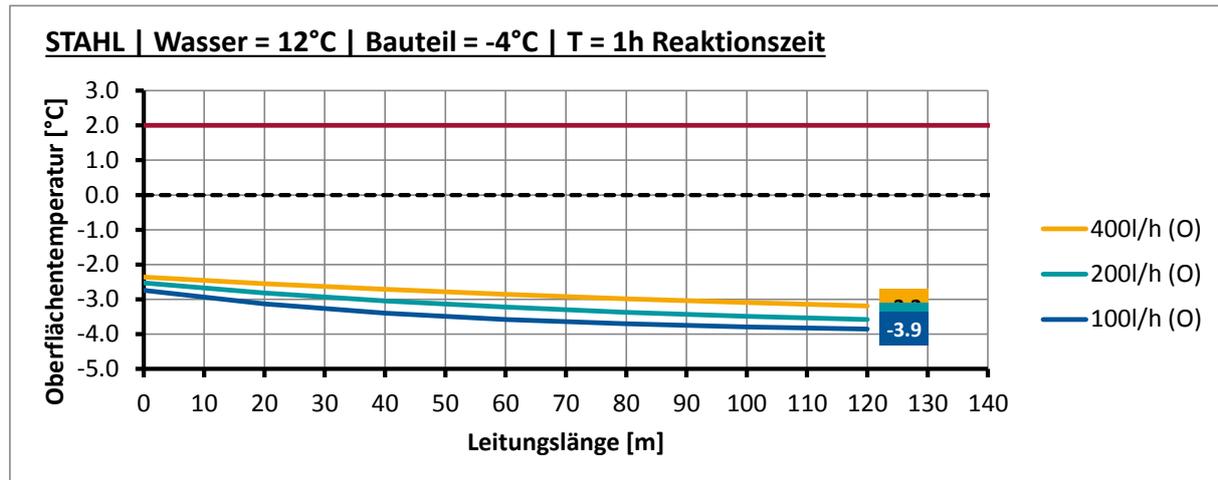


Anhang C.2 Stahlbrücke, $T_w=12^\circ\text{C}$

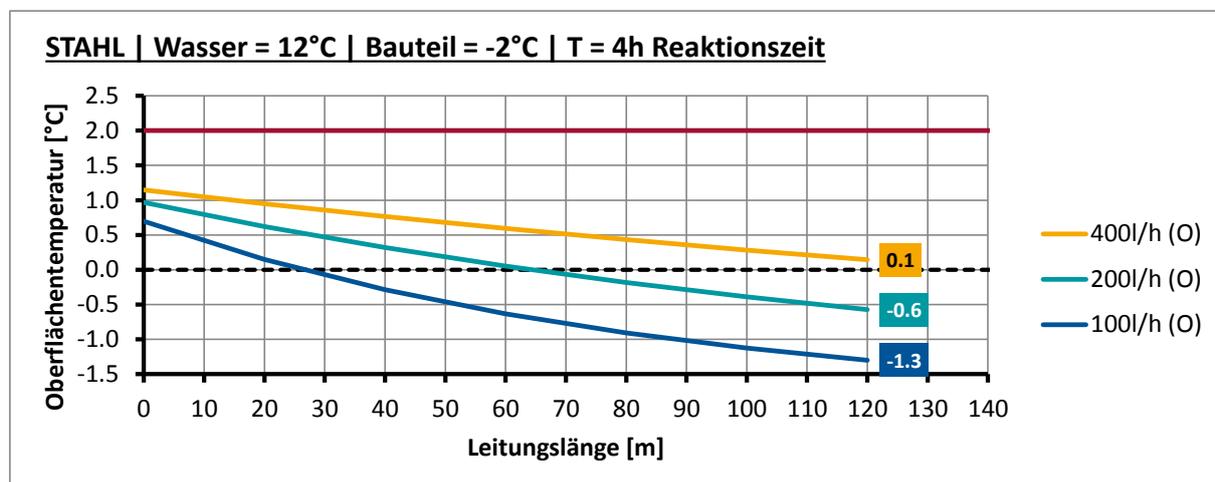
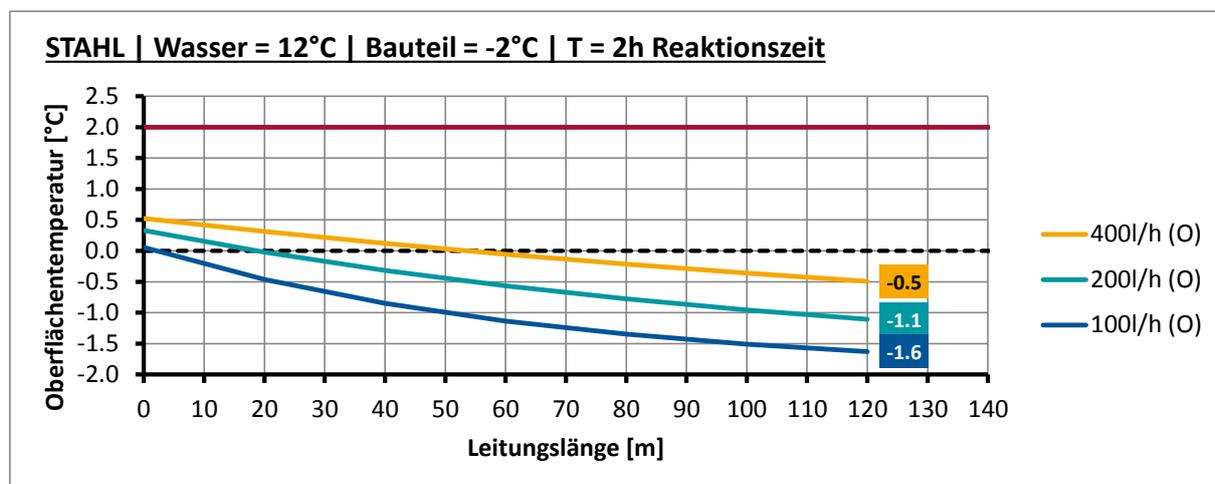
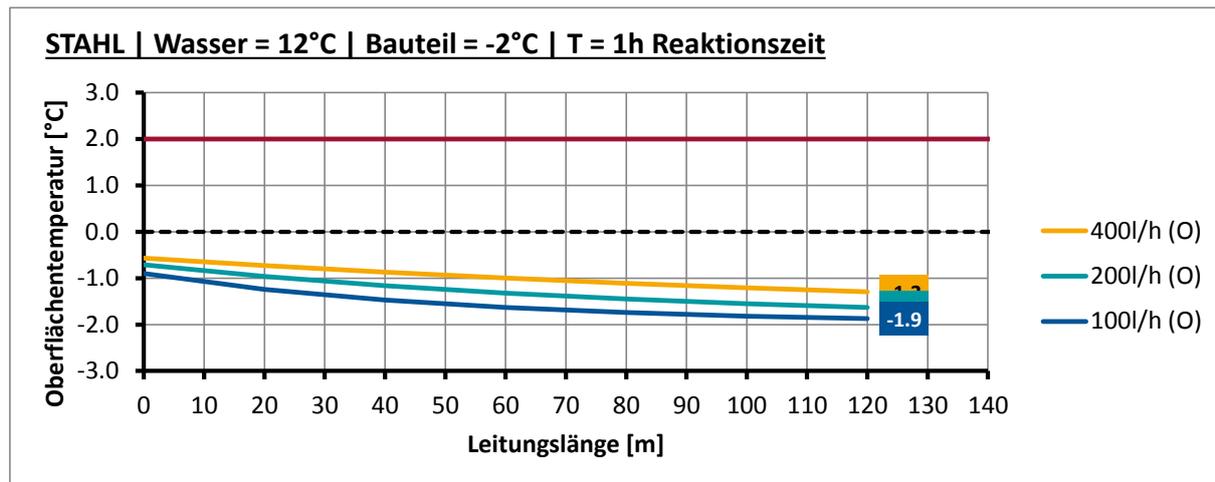
Anhang C.2.1 Stahlbrücke, $T_w=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_u=-6^\circ\text{C}$



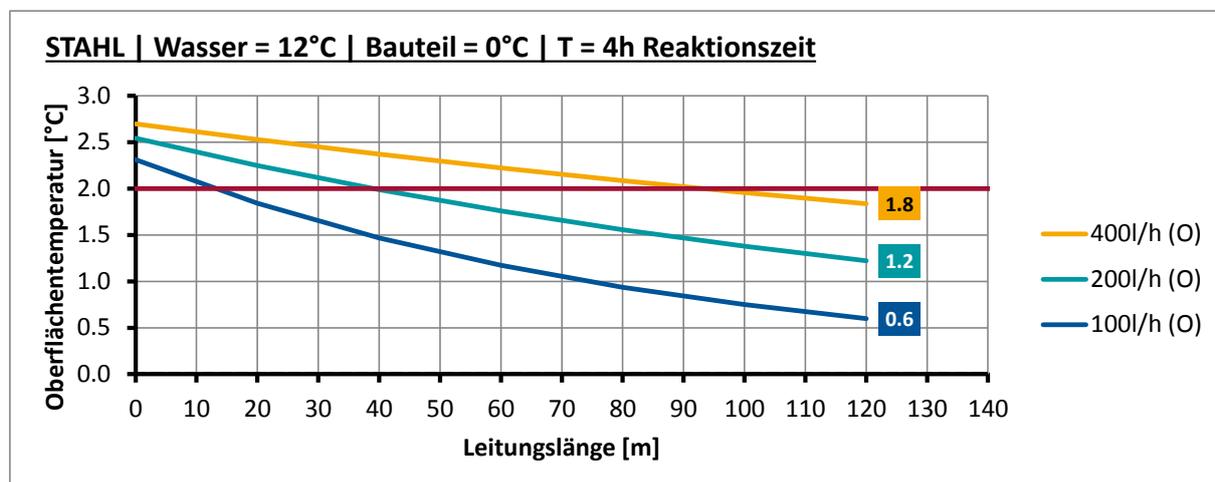
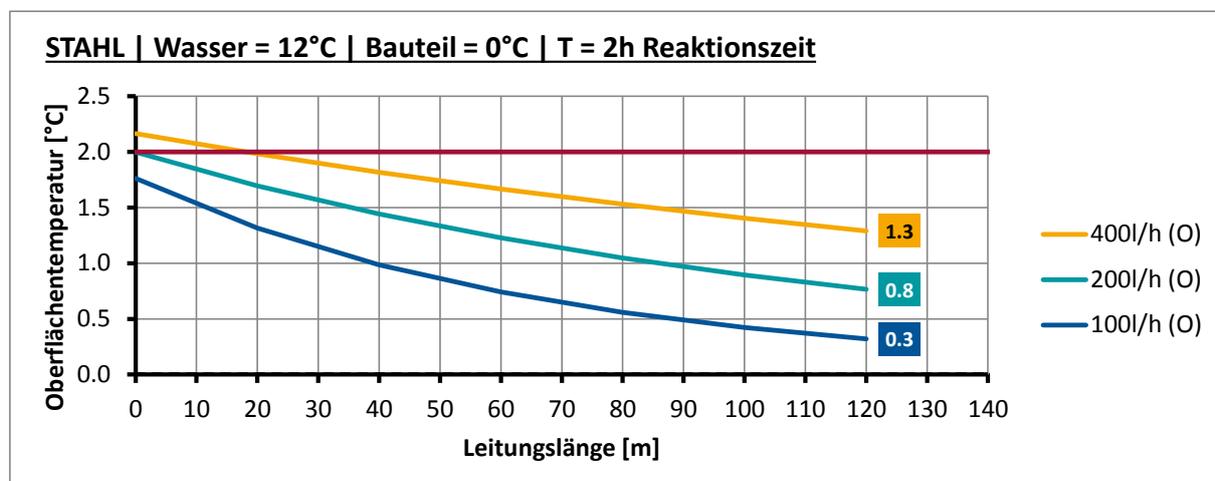
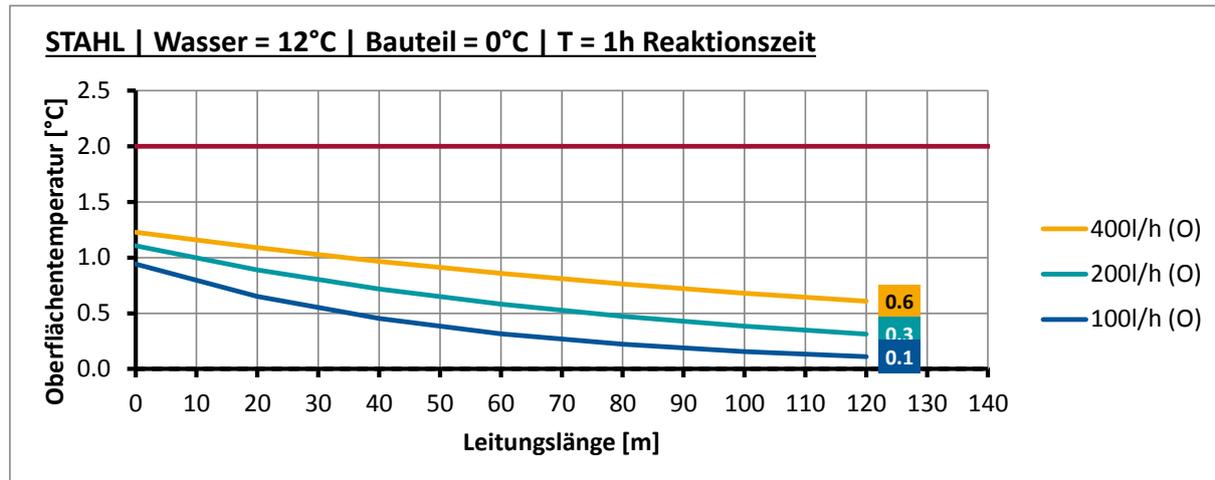
Anhang C.2.2 Stahlbrücke, $T_W=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-4^\circ\text{C}$



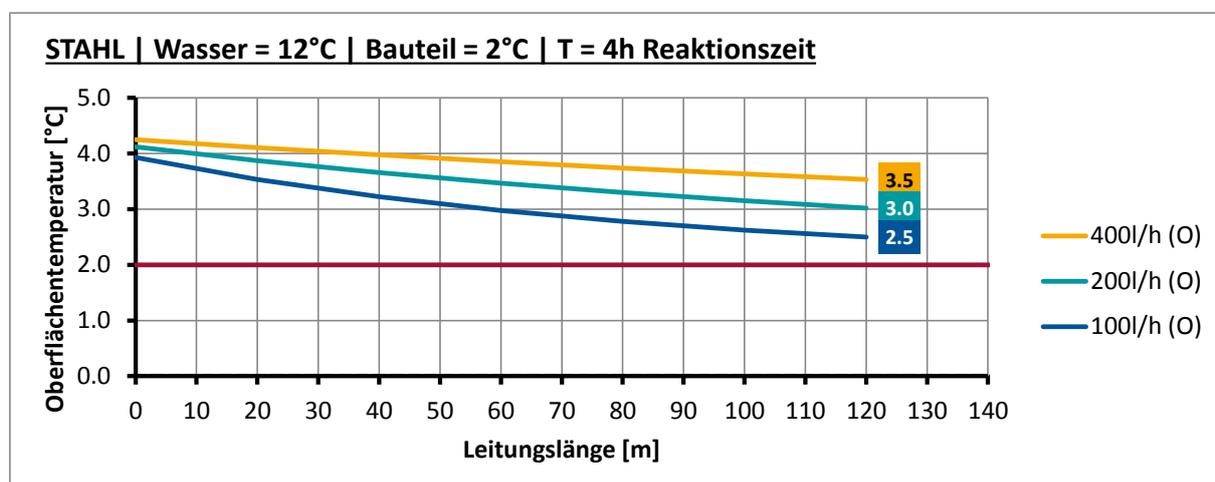
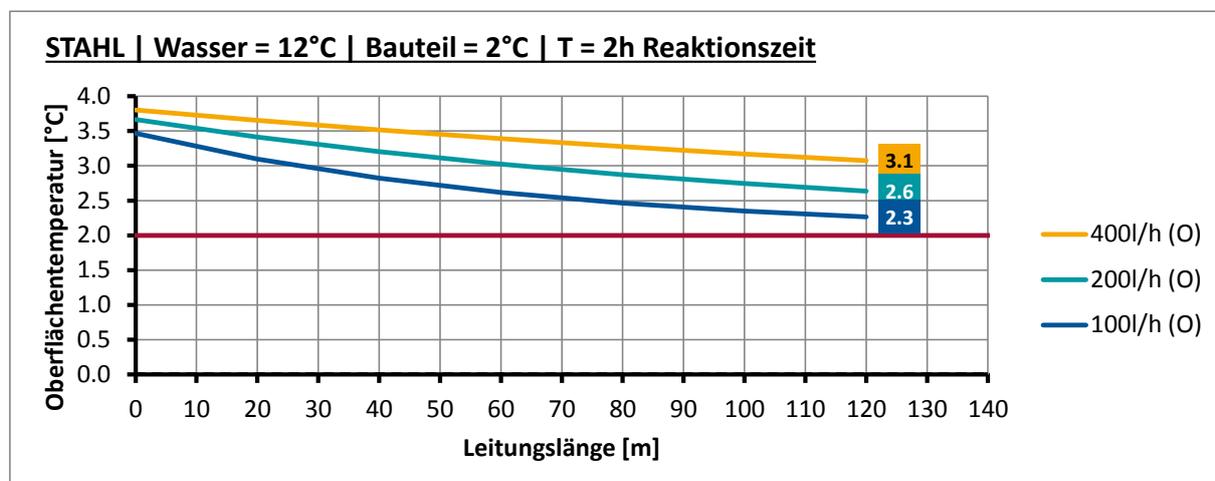
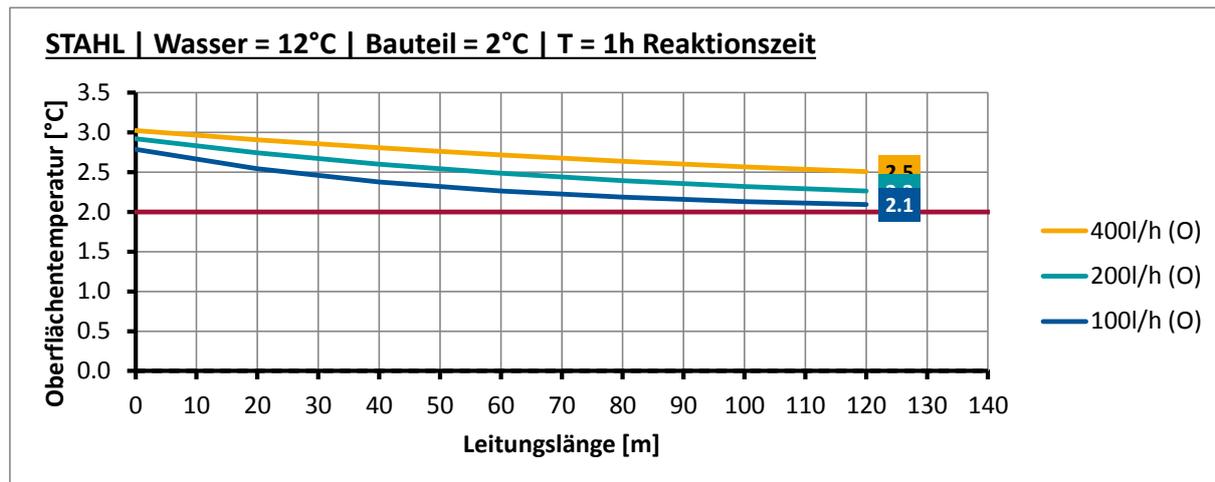
Anhang C.2.3 Stahlbrücke, $T_W=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-2^\circ\text{C}$



Anhang C.2.4 Stahlbrücke, $T_W=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=0^\circ\text{C}$

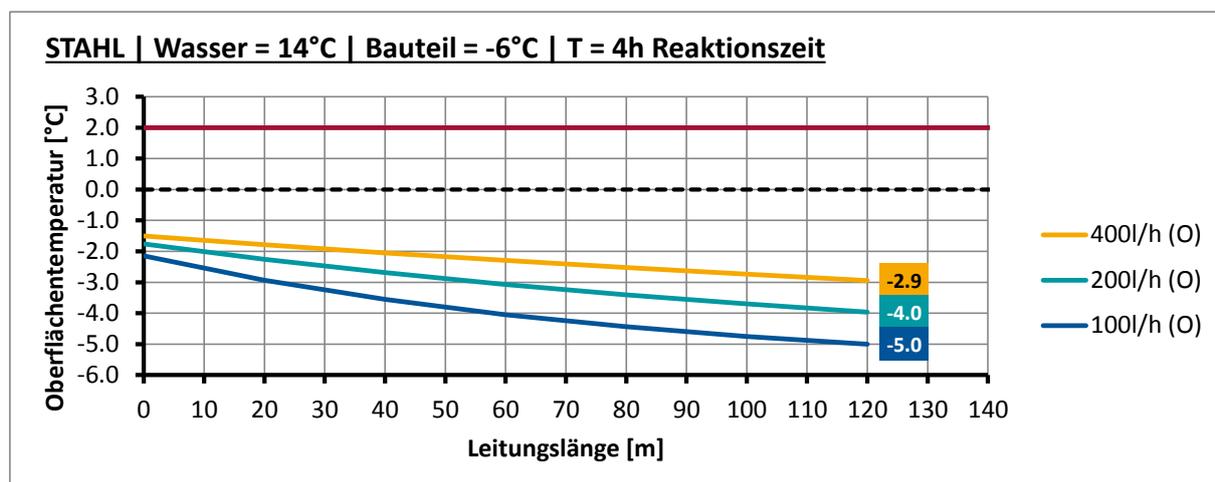
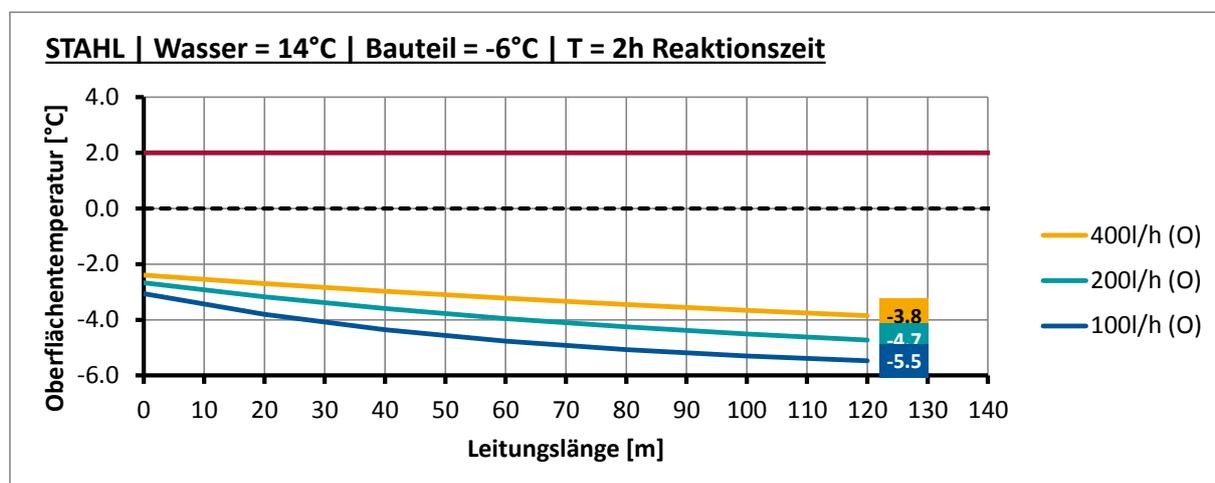
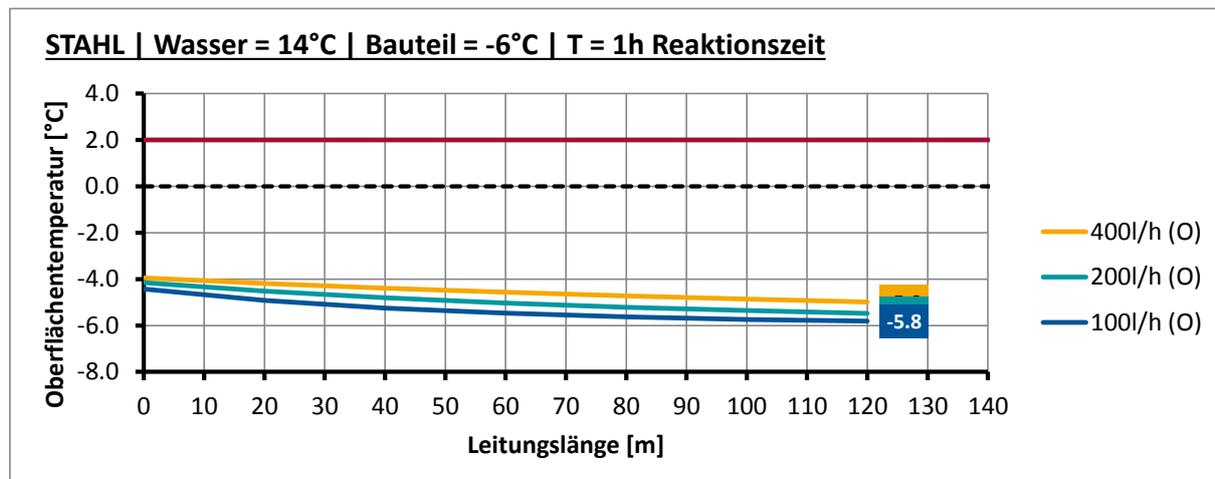


Anhang C.2.5 Stahlbrücke, $T_w=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=2^\circ\text{C}$

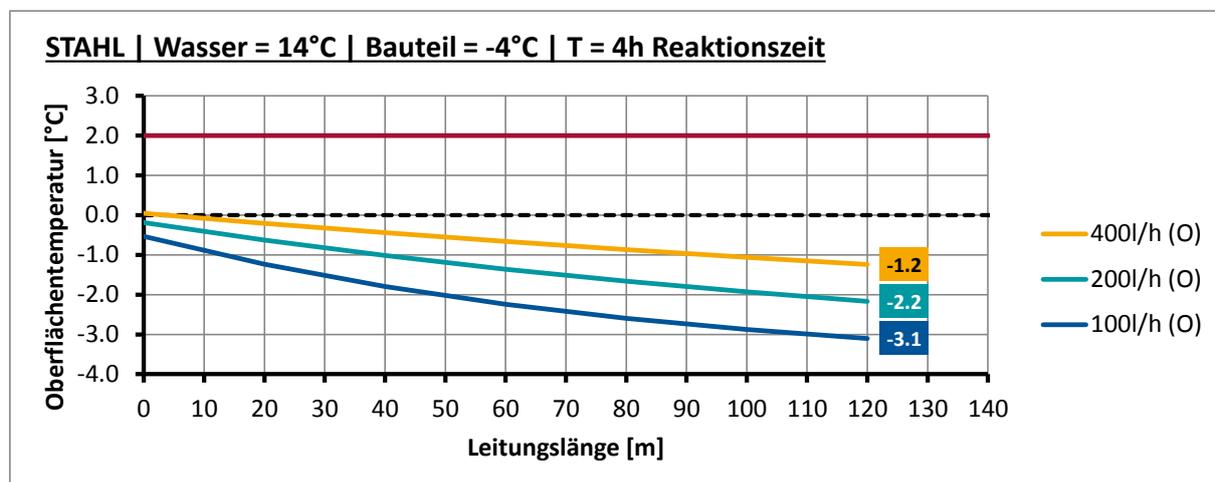
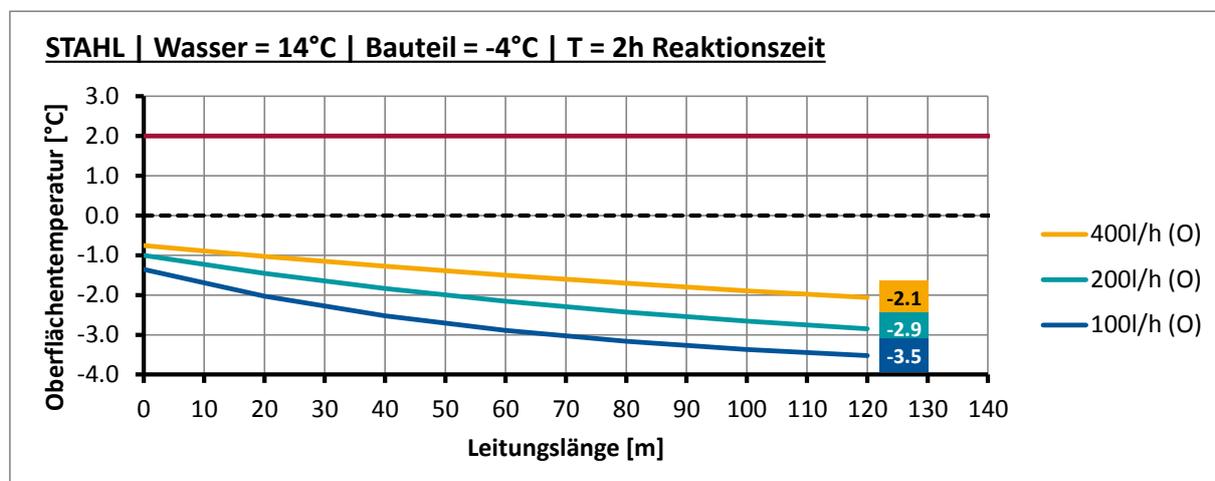
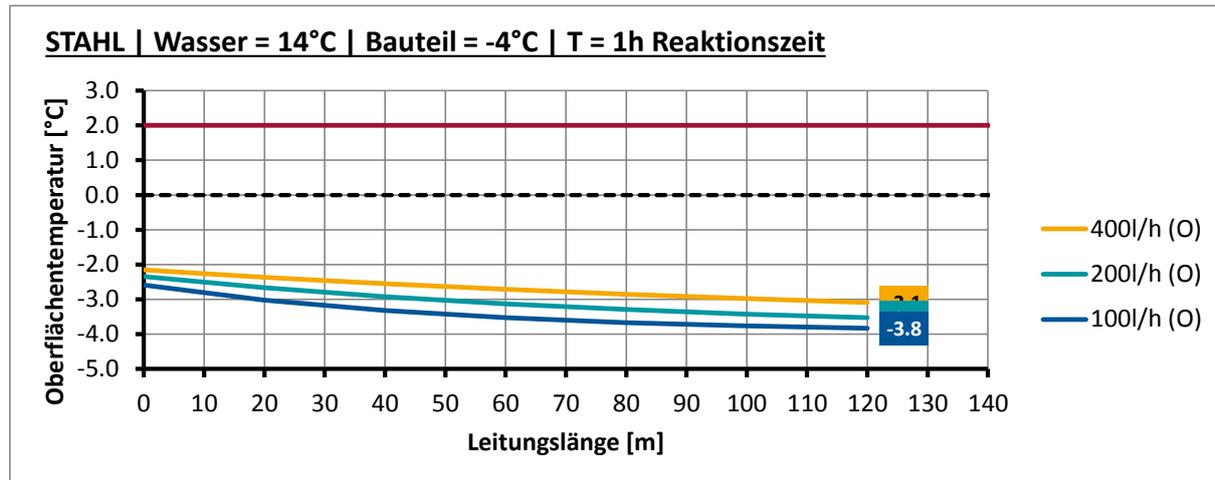


Anhang C.3 Stahlbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$

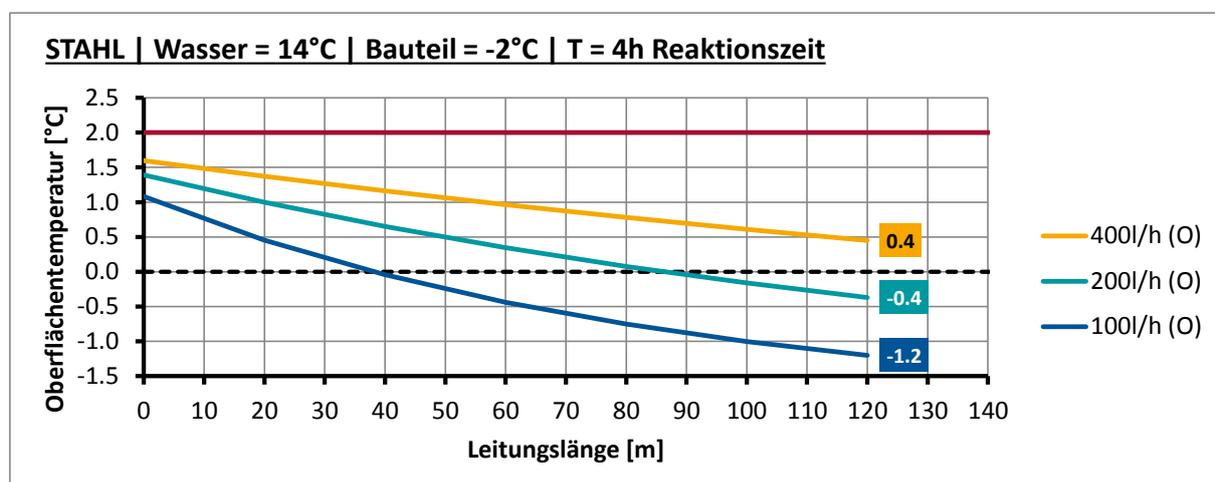
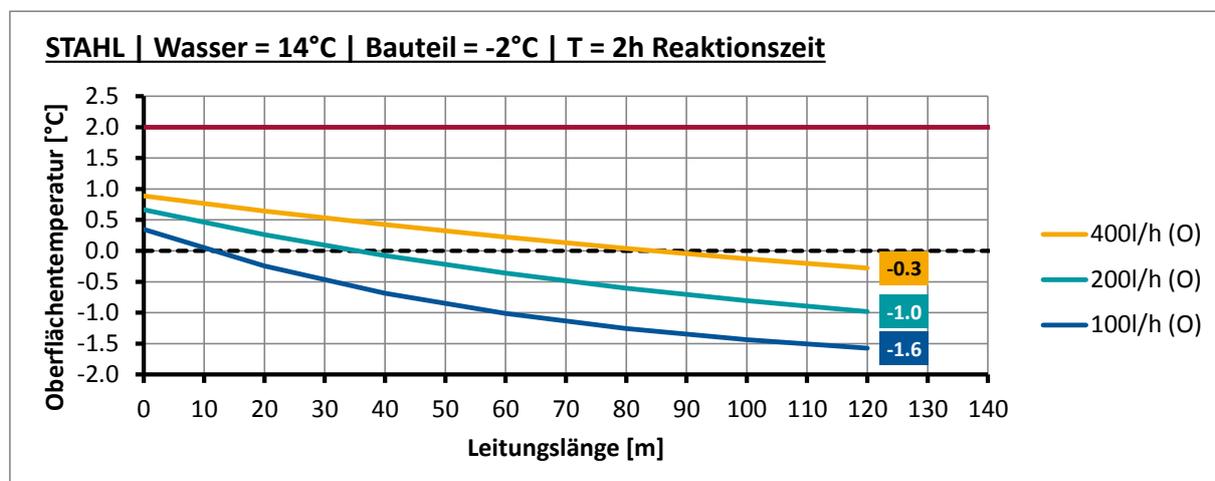
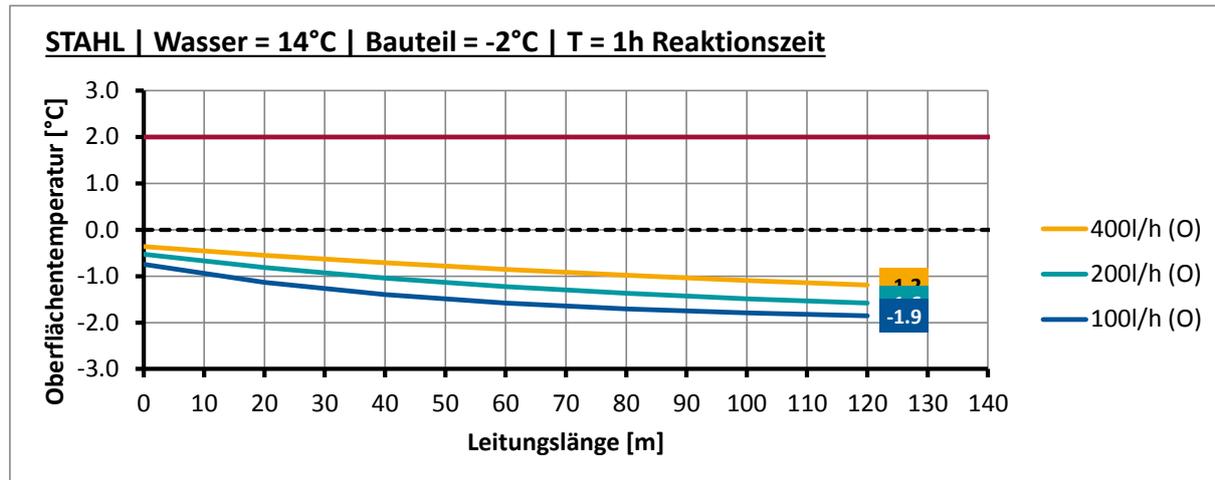
Anhang C.3.1 Stahlbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_u=-6^\circ\text{C}$



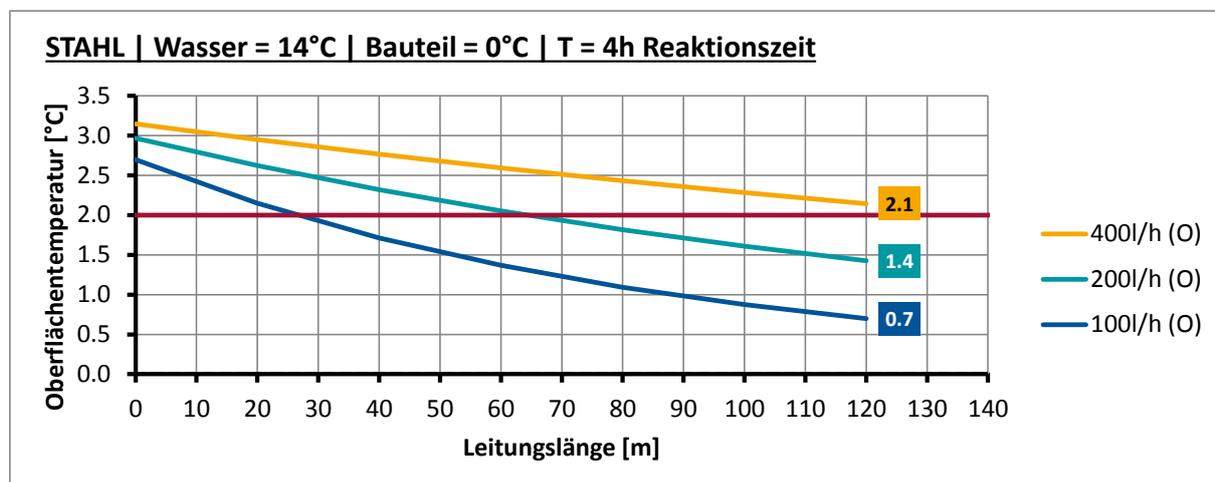
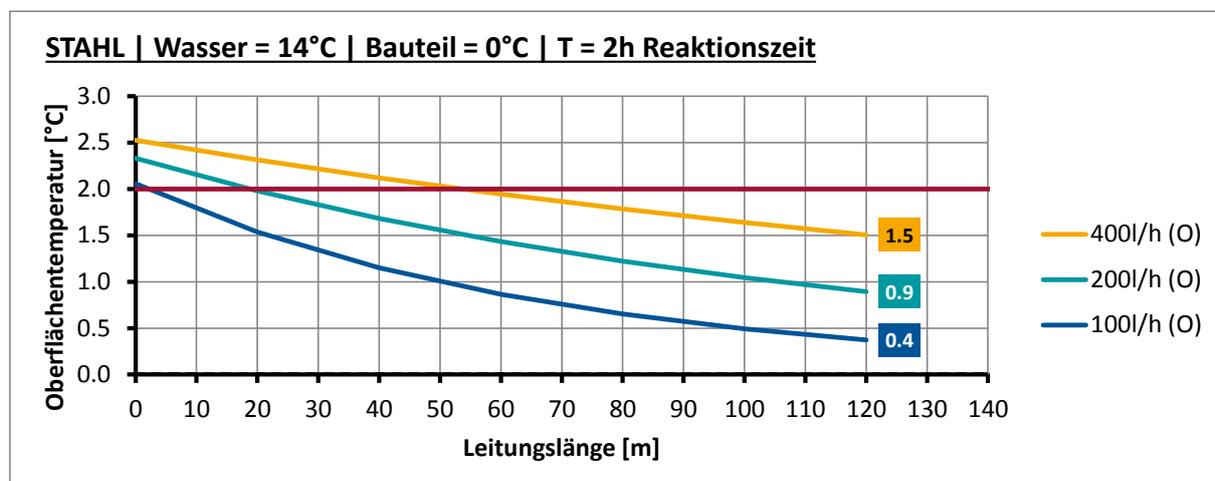
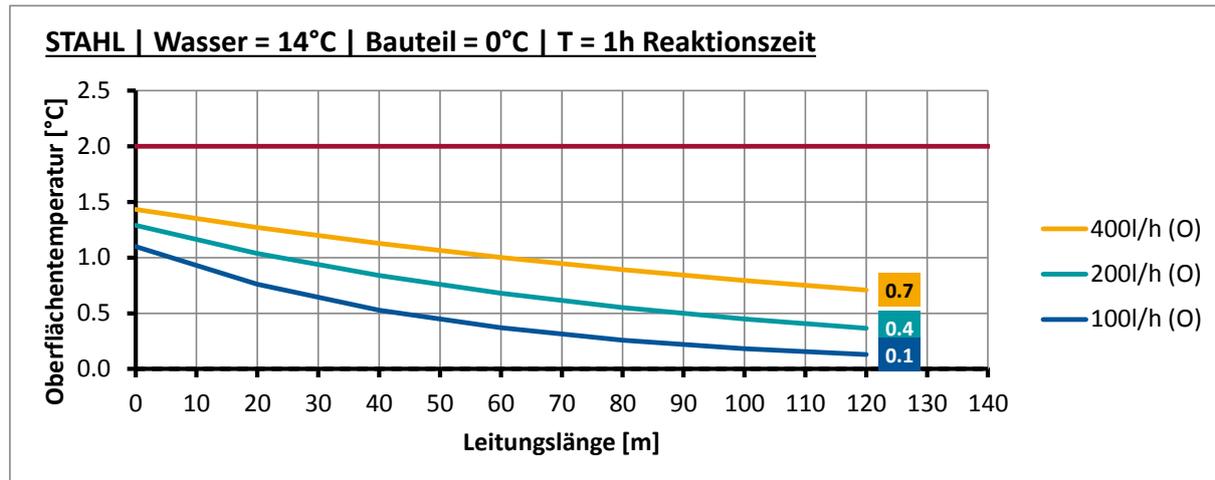
Anhang C.3.2 Stahlbrücke, $T_W=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-4^\circ\text{C}$



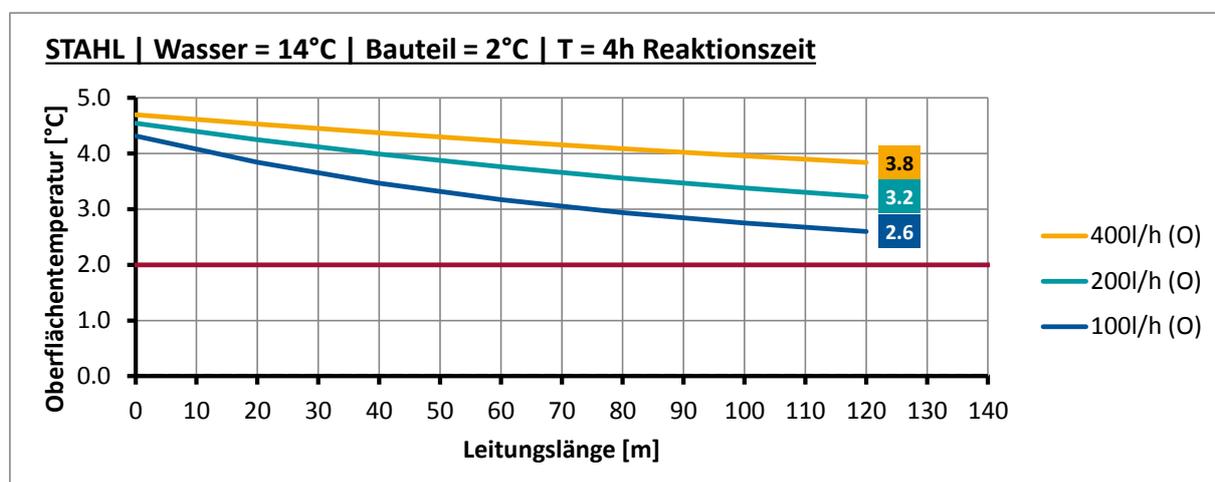
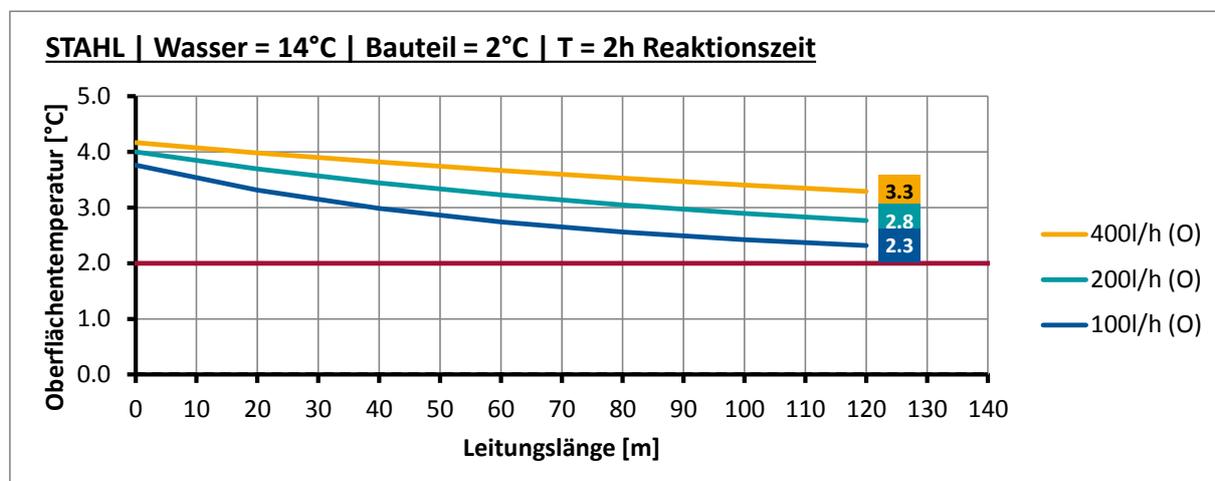
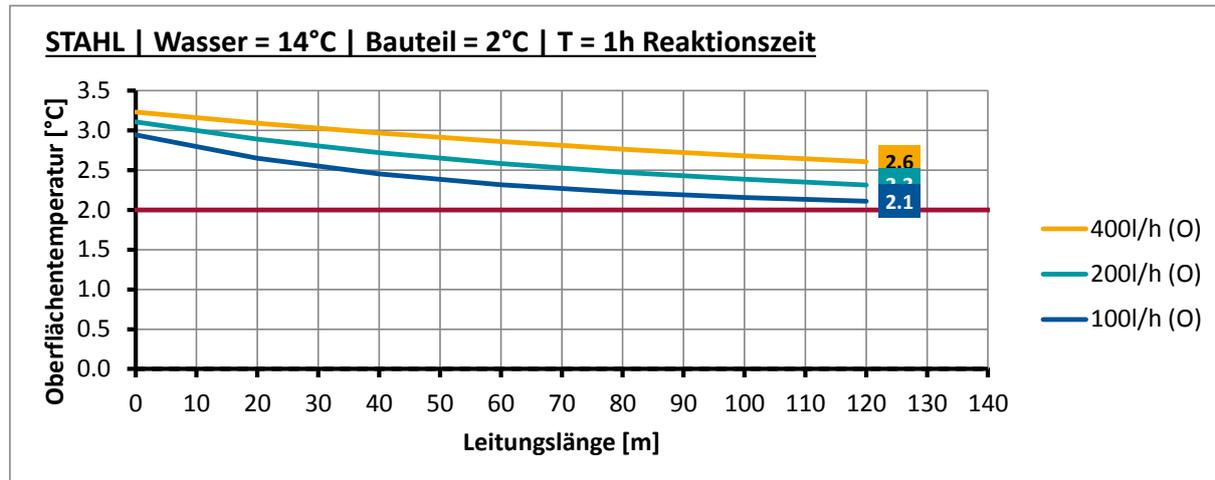
Anhang C.3.3 Stahlbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-2^\circ\text{C}$



Anhang C.3.4 Stahlbrücke, $T_W=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=0^\circ\text{C}$



Anhang C.3.5 Stahlbrücke, $T_W=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=2^\circ\text{C}$



**Gutachterliche Stellungnahme zum thermischen Verhalten von
beheizten Fahrbahnplatten und deren Temperierungssystemen
auf Brücken**

- Schlussbericht –

Untersuchungen für das
Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS),
vertreten durch die
Bundesanstalt für Straßenwesen

FE-Nr.: 89.0285/2013

Aachen, 28. Februar 2014

Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Dr. Ing. Daniel Pak
Dipl.-Ing. Dominik Pyschny

75 Seiten einschließlich Deckblatt

Inhalt:

1	Anlass	5
2	Aufgabenstellung und Vorgehen	6
3	Technische Angaben	8
3.1	Zugrunde gelegte Unterlagen	8
3.2	Temperierungssysteme auf Brücken – Geometrie, Material, Belastung	8
3.3	Vorgehensweise	9
3.4	Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x)$ im maßgebenden Querschnitt – eingeschwungener Zustand („steady state“), $T_U = const$	10
3.5	Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x)$ im maßgebenden Querschnitt – eingeschwungener Zustand („steady state“), $T_U = beliebig$	14
3.6	Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x,t)$ im maßgebenden Querschnitt, $T_U = const$	15
3.7	Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x,t)$ im maßgebenden Querschnitt, $T_U = beliebig$	18
3.8	Ermittlung der Oberflächentemperatur T_O zum Zeitpunkt t basierend auf der Temperaturentwicklung $T_w(x,t)$	19
4	Beschreibung des verwendeten Finite Elemente (FE) Modells	22
4.1	FE-Modell Betonfahrbahn	22
4.2	FE-Modell Stahlfahrbahn	23
4.3	Wärmeübergangskoeffizient Wasser - Rohr	24
5	Ermittlung des Einflusses benachbarter Rohre sowie unterschiedlicher Rohrkonfigurationen („Rohrbögen“)	27
6	Grenzbetrachtungen / Aufzeigen der Systemgrenzen	29
6.1	Stahlbrücke / Verbundbrücke	29
6.2	Bauwerkstemperatur / Außentemperatur („Starttemperatur“)	33
6.3	Vorlaufzeit	33
6.4	Fließgeschwindigkeit	34
6.5	Möglicher Einsatz des Systems ohne Wärmepumpe	34
7	Schlussfolgerungen	37
8	Literaturverweise und Dokumente	37
Anhang A Validierung der Berechnungsergebnisse an einem Versuch im Deckenprüfstand		38
Anhang A.1	Messungen am Deckenprüfstand	38
Anhang A.2	Handrechenergebnisse, basierend auf FE-Untersuchungen	40
Anhang B Vorbemessungstafeln (Verbundbrücke)		44
Anhang B.1	Verbundbrücke, $T_w = 10^\circ\text{C}$	45
Anhang B.2	Verbundbrücke, $T_w = 12^\circ\text{C}$	50

Anhang B.3	Verbundbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$	55
Anhang C	Vorbemessungstafeln (Stahlbrücke).....	60
Anhang C.1	Stahlbrücke, $T_w=10^\circ\text{C}$	61
Anhang C.2	Stahlbrücke, $T_w=12^\circ\text{C}$	66
Anhang C.3	Stahlbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$	71

1 Anlass

Im Rahmen des Forschungsprojektes FE 15.401/2004/ARB wurden vom Institut für Stahlbau der RWTH Aachen umfangreiche Untersuchungen zu beheizten Fahrbahnplatten und deren Temperierungssystemen auf Brücken vorgenommen.

Die konstruktiven sowie thermischen Fragestellungen das neue System betreffend wurden geklärt und ermöglichten u.a. die Ausstattung der Kanalbrücke Berkenthin mit dem neuartigen Temperierungssystem. Eine Dimensionierungshilfe, welche eine Optimierung des Systems in der Planungsphase erleichtert, ist jedoch nicht vorhanden. Diese wird im Rahmen des Projektes „Gutachterliche Stellungnahme zum Thermischen Verhalten von beheizten Fahrbahnplatten und deren Temperierungssysteme auf Brücken“ entwickelt.

2 Aufgabenstellung und Vorgehen

Zur Entwicklung der Dimensionierungshilfe sind folgende Schritte erforderlich:

1. Aufstellen einer Temperaturgleichung $T_w(x)$ für den eingeschwungenen Zustand („Steady State“) über die Rohrlänge
 - a. unter gleichen Randbedingungen (Temperatur Oberkante Bauwerk = Temperatur Unterkante Bauwerk) ([Kapitel 3.4](#))
 - b. unter beliebigen Randbedingungen ([Kapitel 0](#))

Als Eingangsparameter dienen:

- Wärmestrom „Q“ über den Rohrumfang in einem beliebigen Schnitt [W/mm] im eingeschwungenen Zustand (mittels der Finite Elemente Methode, FE, 2D)
- Volumenspezifische Wärmekapazität „c“ des Trägermediums
- Fläche des Rohrquerschnitts „A_w“
- Fließgeschwindigkeit „v“
- Vorlauftemperatur „T₀“

Die Lösung der Differentialgleichung liefert eine Temperaturgleichung, welche es ermöglicht, die Temperatur des Trägermediums im eingeschwungenen Zustand an jeder beliebigen Stelle des Rohres zu ermitteln (-> Rücklauftemperatur). Liegen Randbedingungen wie unter b) beschrieben vor, ist die Ermittlung des Wärmestroms zu zwei Zeitpunkten erforderlich (z.B. T₁=600 sec, T₂=eingeschwungen).

2. Aufstellen der Temperaturgleichung $T_w(x,t)$ für den nicht eingeschwungenen Zustand („Transient State“) über die Rohrlänge

Die Temperaturgleichung $T_w(x,t)$ erweitert die unter 1.a) ([Kapitel 3.6](#)) bzw. 1.b) ([Kapitel 3.7](#)) ermittelte Gleichung $T_w(x)$. Hierzu wird der mittels FE bestimmte Wärmestrom „Q“ für eine gegebene Vorlauftemperatur über die Zeit aufgetragen und durch eine Regressionsanalyse approximiert.

3. Ermittlung des Einflusses „Interaktion zwischen benachbarten Rohren“ ([Kapitel 5](#))

Der Einfluss unterschiedlicher Temperaturen in benachbarten Rohren wird mit Hilfe eines FE-Modells (2D, „Steady State“) ermittelt; die Ergebnisse fließen (soweit erforderlich) über einen Korrekturfaktor in die Gleichung ($T_w(x,t)$, siehe 2.) ein.

4. Ermittlung des Einflusses unterschiedlicher Rohrkonfigurationen („Rohrbögen“) ([Kapitel 5](#))

Der Einfluss der Rohrbögen auf den abgegebenen Wärmestrom „Q“ wird anhand eines 3D-FE Modells ermittelt:

- Ermittlung des Gesamtwärmestroms „Q“ unter Konfiguration „A“ (Rohrregister längs zur Fahrbahn) (T₁=600 sec, T₂=eingeschwungen)
- Ermittlung des Gesamtwärmestroms „Q“ unter Konfiguration „B“ (Rohrregister quer zur Fahrbahn) (T₁=600 sec, T₂=eingeschwungen)
- Vergleich der Ergebnisse, falls nötig Ermittlung eines Korrekturfaktors für Temperaturgleichung ($T_w(x,t)$, siehe 2.)

5. Validierung der Berechnungsergebnisse an einem Versuch im Deckenprüfstand ([Anhang A](#))

Ermittlung der Rücklauftemperaturen über die Zeit, Vergleich mit berechneten Ergebnissen (Probekörper: Stahl-Verbunddecke mit Rohrsystem)

6. Erstellung eines Formelwerkes zur Dimensionierung der Rohrregister ([Anhang B](#), [Anhang C](#))

- Temperaturgleichung $T_w(x,t)$ wie unter (2.) ermittelt und unter (5.) validiert
- Korrekturfaktoren für Bögen (4.) sowie Interaktion zwischen den Rohren (3.) (soweit Einfluss vorhanden)
- Eingangsparameter für die Temperaturgleichung für unterschiedliche Brückenkonfigurationen (zu ermitteln mittels FE, wie unter 1. und 2. beschrieben)

- Variation: Brückenaufbau: Betonfahrbahnplatte einer Verbundbrücke / orthotrope Fahrbahnplatte
- Variation: Reaktionszeit / Vorlaufzeit: 1h, 2h, 4h
- Variation: Fahrbahn- bzw. Brückentemperaturen: -6°C, -4°C, -2°C, 0°C, 2°C,
- Variation: Wassertemperatur (Vorlaufzeittemperatur): 10°C, 12°C, 14°C
- Variation: Fließgeschwindigkeit / Fördervolumen: 100l/h, 200l/h, 400l/h
- konstant: Rohrabstand (10cm), Rohrmaterial (PE-Xa) und -durchmesser (20mm), Rohrlage, Schichtdicken (Schutz- und Deckschicht)

Einen Hauptteil der Dimensionierungshilfe stellen Diagramme dar, um dem Anwender einen schnellen Überblick über die Gesamtzusammenhänge zu geben.

7. Erstellung eines Excel-Tools zur Dimensionierung der Rohrregister

Zur Dimensionierung des Temperierungssystems auch über die gewählten Parametergrenzen hinaus wird ein Excel-Tool erstellt. Dieses wird dem Anwender auf geeignete Weise zugänglich gemacht.

8. Grenzbetrachtungen / Aufzeigen der Systemgrenzen (Kapitel 6)

Durch Grenzwertbetrachtungen werden realistische Systemgrenzen aufgezeigt (Rohrlänge, Anzahl der Windungen, Pumpenkapazität, Vor- und Rücklauftemperaturen). Die Parameter werden basierend auf einem Grundsystem variiert, um deren Einfluss auf das System identifizieren zu können.

Im Rahmen der Untersuchungen (Schritt 6. und 7.) werden folgende Systeme betrachtet:

Tabelle 1: Zu variierte Parameter im Rahmen der Arbeitsschritte (6.) und (8.)

		Vorlaufzeit 1h									Vorlaufzeit 2h									Vorlaufzeit 4h									
		Temperatur Wasser									Temperatur Wasser									Temperatur Wasser									
		10°C			12°C			14°C			10°C			12°C			14°C			10°C			12°C			14°C			
		Fördervolumen									Fördervolumen									Fördervolumen									
		A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	
Verbundbrücke	Brückentemperatur	-6°C																											
		-4°C																											
		-2°C																											
		0°C																											
		2°C																											
orthotrope Platte	Brückentemperatur	-6°C																											
		-4°C																											
		-2°C																											
		0°C																											
		2°C																											

jeweils ein Diagramm

3 Technische Angaben

Die technischen Angaben wurden vom Auftraggeber „Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS)“, vertreten durch die „Bundesanstalt für Straßenwesen“, bereitgestellt.

3.1 Zugrunde gelegte Unterlagen

Folgende Unterlagen wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt:

- [1] BAST-Bericht B 87, Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie

Darüber hinaus wurden für die Untersuchungen weitere Dokumente und Richtlinien verwendet:

- [2] Mackert, K.-U., Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn
- [3] Rehau Produktinformation RAUGEO stabil Rohr
- [4] Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik

3.2 Temperierungssysteme auf Brücken – Geometrie, Material, Belastung

Die den Untersuchungen zu Grunde gelegten Brückenquerschnitte (inkl. Schutz- und Deckschicht sowie Temperierungssystem) weisen folgende Spezifikationen auf:

1. Betonfahrbahntafel einer Verbundbrücke (System A, „Verbundbrücke“):
 - a. Aufbau:
 - Deckschicht: $h = 35\text{mm}$ (Abbildung 1, [2])
 - Zwischenschicht: $h = 45\text{mm}$ (Abbildung 1, [2])
 - Schutzschicht: $h = 30\text{mm}$ (Abbildung 1, [2])
 - Dichtungsschicht: $h = 10\text{mm}$ (Abbildung 1, [2])
 - Betonfahrbahntafel: $h = 320\text{mm}$ (Abbildung 1, [2])
 - Rohrregister (Lage): auf der Schutzschicht
 - b. Rohrregister:
 - Material: PE-Xa mit Aluminiumummantelung [3]
 - Rohrabmessungen: $d = 25\text{mm}$ (Außendurchmesser), $t = 2,3\text{mm}$
 - Rohrabstand: $b = 100\text{mm}$
 - c. Belastung:
 - Temperatur: -6°C , -4°C , -2°C , 0°C , 2°C
2. Orthotrope Fahrbahnplatte (System B, „Stahlbrücke“):
 - a. Aufbau:
 - entspricht dem Aufbau aus System A, jedoch anstelle der Betonfahrbahntafel:
 - orthotrope Platte: $a = 300\text{mm}$
 $e = 300\text{mm}$
 $t_{\text{Dbl}} = 14\text{mm}$
 $h_{\text{Rippe}} = 200\text{mm}$
 $t_{\text{Rippe}} = 12\text{mm}$
 - b. Rohrregister:
 - entspricht dem Aufbau aus System A
 - c. Belastung:
 - entspricht den Belastungen aus System A

Die geometrischen Abmessungen des Überbaus sind gemäß diesen Angaben in Abbildung 1 dargestellt.

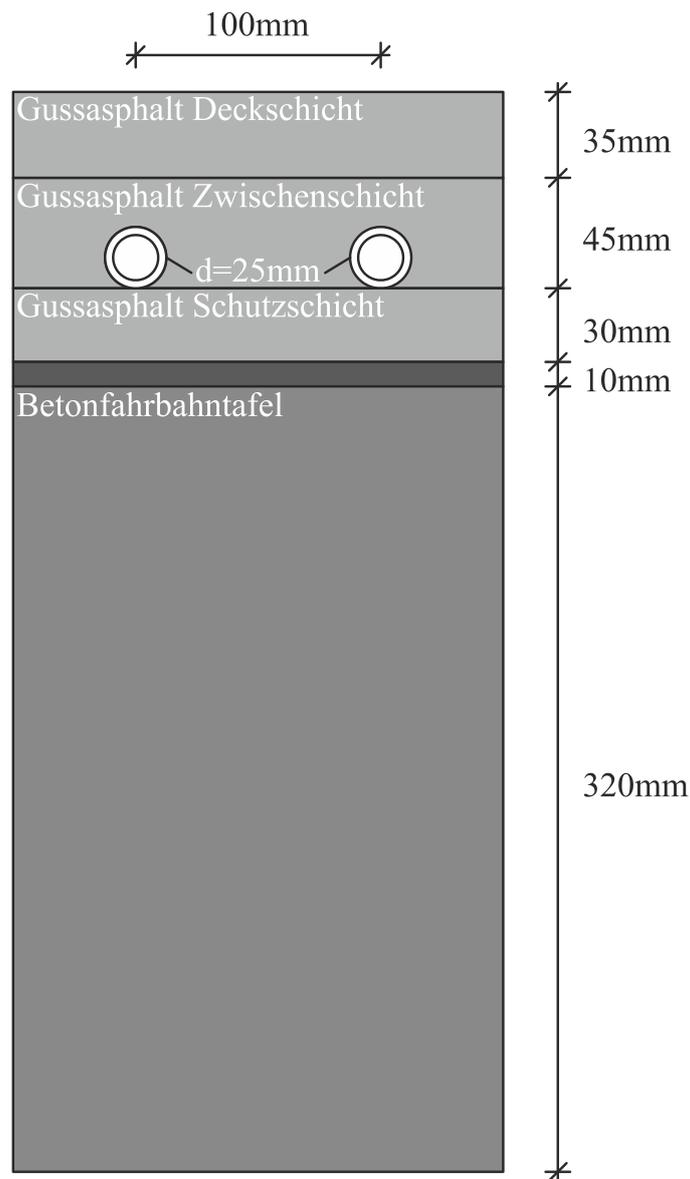


Abbildung 1: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn, Fahrbahnaufbau

3.3 Vorgehensweise

Die Temperatur auf Fahrbahnoberfläche T_O hängt von folgenden Parametern ab:

- Aufbau des Fahrbahnsystems (inkl. Lage und Abstand der Rohre)
- Außen- / Umgebungstemperatur T_U
- Temperatur des Mediums (z.B. Wasser) $T_{w,v}$ (Vorlauftemperatur)
- Fließgeschwindigkeit des Kühlmediums v
- Position des betrachteten Querschnitts / Rohrlänge L
- Vorlaufzeit T (Reaktionszeit)

Die Ermittlung der Temperatur T_O erfolgt in zwei konsekutiven Schritten:

- Ermittlung der Temperaturentwicklung $T_w(x,t)$ im maßgebenden Querschnitt (Rücklauftemperatur) bis zum Zeitpunkt T (Reaktionszeit)
- Ermittlung der Oberflächentemperatur T_O zum Zeitpunkt T basierend auf der Temperaturentwicklung $T_w(x,t)$

3.4 Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x)$ im maßgebenden Querschnitt – eingeschwungener Zustand („steady state“), $T_U = const$

Die Temperatur des Mediums T_w nimmt über die Länge des Rohres ab, da diesem aufgrund des vorherrschenden Temperaturgefälles Wärme entzogen wird. Der Wärmestrom steigt hierbei linear zum Temperaturgefälle an, im Gleichgewichtszustand ($T_w = T_{Bauteil}$) findet kein Wärmetransport statt.

Mit Hilfe einer Finite-Elemente-Berechnung wird zunächst für den eingeschwungenen Zustand der Wärmestrom für ein frei gewähltes Temperaturgefälle ($T_{w,1} - T_{u,1} < 0$) ermittelt. Dieser ermöglicht die Ermittlung des Wärmestroms für beliebige Temperaturgefälle bzw. beliebige Temperaturen T_w :

$$\theta(T_w) = \frac{\theta(T_{w,1}) - \theta(T_{w,2})}{T_{w,1} - T_{w,2}} \cdot T_w + \theta(T_{w,2}) - \frac{\theta(T_{w,1}) - \theta(T_{w,2})}{T_{w,1} - T_{w,2}} \cdot T_{w,2}$$

Sind die Umgebungstemperaturen an der Bauteilperipherie überall identisch ($T_U = const$), so findet bei einer Temperatur $T_{w,2} = T_{u,1}$ kein Wärmestrom statt ($\theta(T_{u,1}) = 0$), die Gleichung kann wie folgt vereinfacht werden:

$$\theta(T_w, T_U) = \frac{\theta(T_{w,1})}{T_{w,1} - T_{u,1}} \cdot (T_w - T_{u,1})$$

bzw.

$$\theta(T_w) = a \cdot (T_w - T_{u,1})$$

$$a = \frac{\theta(T_{w,1})}{T_{w,1} - T_{u,1}}$$

Somit kann nun für jede beliebige Temperatur T_w im Rohr der resultierende Wärmestrom ermittelt werden.

Beispiel:

Für das Modell mit folgenden Randbedingungen wird der Wärmestrom in das Rohr hinein im eingeschwungenen Zustand („steady state“, $t = \infty$) berechnet:

- Außen- / Umgebungstemperatur $T_U = -2^\circ\text{C}$
- Temperatur des Mediums $T_w = 16^\circ\text{C}$

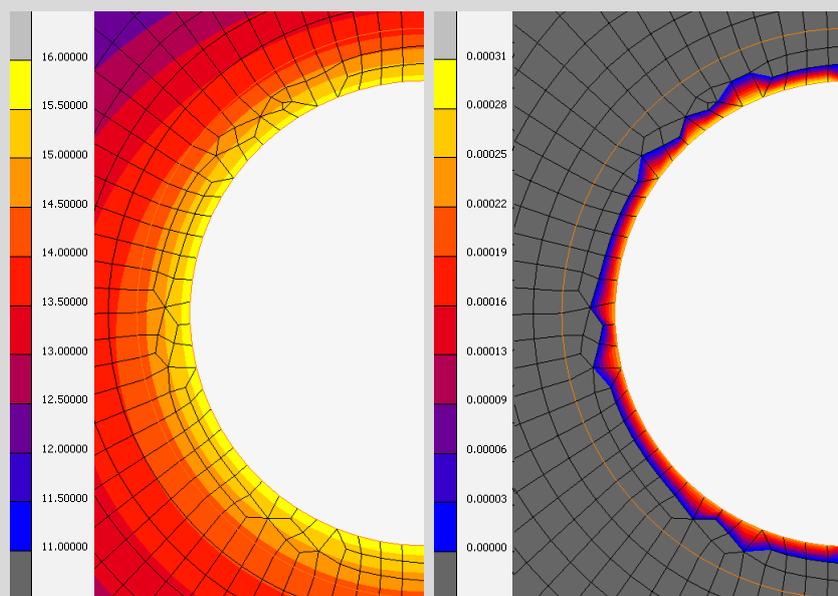


Abbildung 2: Steady State (Temperaturverteilung, Wärmestrom im Übergangsbereich)

Der Wärmestrom, welcher im eingeschwungenen Zustand vom Trägermedium in das Bauteil ab-

fließt, wird knotenweise über die Innenwandung des Rohres ausgelesen und aufsummiert. Es ergibt sich (je mm Rohrlänge):

$$\theta(T_{W,1}) = 0,017416286 [W/mm]$$

Die Gleichung für den Wärmestrom bei beliebigen Temperaturen ergibt sich somit zu:

$$\theta(T_W, T_U = -2^\circ C) = a \cdot (T_W - T_U)$$

$$a = \frac{0.017416286}{16 - (-2)} = 9,676 \cdot 10^{-4}, T_U = -2^\circ C$$

HINWEIS: Durch Ausnutzung der Symmetrie wurde lediglich ein Halbrohr abgebildet. Der aufsummierte Wärmestrom wurde daher mit „2“ multipliziert.

Der Wärmestrom θ je ΔL Rohrlänge lässt sich als in der Zeit Δt übertragene Wärmemenge Q schreiben:

$$\theta \cdot \Delta L [W] = \frac{Q [Ws]}{\Delta t [s]}$$

Diese Beziehung lässt sich nach der in der Zeit Δt übertragenen Wärmemenge Q umstellen:

$$Q = \theta \cdot \Delta t \cdot \Delta L$$

Die Wärmekapazität C eines Körpers / Mediums gibt an, wie viel thermische Energie Q er bezogen auf die Temperaturänderung ΔT_W aufnimmt oder abgibt (bzw. wieviel Energie benötigt wird, um ihn um ΔT_W zu erwärmen). Hier besteht folgender Zusammenhang:

$$C \left[\frac{Ws}{K} \right] = \frac{Q [Ws]}{\Delta T_W [K]}$$

Die auf das Volumen bezogene Wärmekapazität s eines Körpers ist definiert als

$$s = \frac{C}{V} = \frac{Q}{V \cdot \Delta T_W} \left[\frac{Ws}{mm^3 K} \right]$$

Dies lässt sich umschreiben zu:

$$\Delta T_W = - \frac{Q}{V \cdot s}$$

Das Minuszeichen wurde eingefügt, da hier die Energie betrachtet wird, welche dem Wasser entzogen wird.

Die Geschwindigkeit des Trägermediums ist definiert durch den in der Zeit Δt zurückgelegten Weg ΔL :

$$v \left[\frac{mm}{s} \right] = \frac{\Delta L [mm]}{\Delta t [s]}$$

Durch umstellen:

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{v}$$

Zur Ermittlung des Flüssigkeitsvolumens, welches den Rohrquerschnitt A_W in der Zeit Δt passiert, wird folgende Gleichung aufgestellt:

$$V \left[\frac{mm^3}{s} \right] = \frac{A_W \cdot \Delta L [mm^2 \cdot mm]}{\Delta t [s]}$$

$$V \left[\frac{mm^3}{s} \right] = A_W \cdot v \left[mm^2 \cdot \frac{mm}{s} \right]$$

Somit ergibt sich die Temperaturänderung in der Zeit Δt bei konstantem Wärmestrom zu:

$$\Delta T_W = -\frac{Q}{V \cdot s \cdot \Delta t} = -\frac{Q}{A_W \cdot v \cdot s \cdot \Delta t} = -\frac{\theta}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot \Delta L \frac{\left[\frac{W}{mm}\right]}{[mm^2] \left[\frac{mm}{s}\right] \left[\frac{Ws}{mm^3 K}\right]} [mm]$$

Die volumenspezifische Wärmekapazität des Trägermediums lässt sich aus der massenspezifischen Wärmekapazität wie folgt ableiten:

$$s = c \cdot \rho$$

mit

$$c = 4.190 \text{ [Ws/kg K]} \quad (\text{Wasser})$$

$$\rho = 1 \cdot 10^{-6} \text{ [kg/mm}^3\text{]} \quad (\text{Wasser})$$

Die zuvor aufgestellte Funktion zur Bestimmung der Temperaturänderung lässt sich in differentieller Form schreiben

$$\Delta T_W = -\frac{\theta}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot \Delta L \rightarrow \delta T_W = -\frac{\theta(x)}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot \delta x$$

wobei θ abhängig von T_W ist:

$$\theta(x) = a \cdot (T_W(x) - T_{U,1})$$

$$\delta T_W = -\frac{a \cdot T_W(x) - a \cdot T_{U,1}}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot \delta x$$

Dies lässt sich umschreiben in:

$$\frac{\delta T_W}{\delta x} + \tilde{a} \cdot T_W(x) + \tilde{b} = 0$$

mit

$$\tilde{a} = \frac{a}{A_W \cdot v \cdot s}, \tilde{b} = -\tilde{a} \cdot T_{U,1}$$

Zur Lösung dieser Differentialgleichung wird eine Randbedingung benötigt, welche durch die Vorlauf-temperatur $T_{W,V}$ gegeben ist

$$T_W(x = 0) = T_{W,V}$$

Die Lösung der DGL führt zu folgender Gleichung für die Temperatur:

$$T_W(x) = \frac{e^{-\tilde{a}x} \cdot (\tilde{b} + T_{W,V} \cdot \tilde{a}) - \tilde{b}}{\tilde{a}} \rightarrow$$

$$T_W(x) = e^{-\frac{a}{A_W \cdot v \cdot s} x} \cdot (T_{W,V} - T_{U,1}) + T_{U,1}$$

$$a = \frac{\theta(T_{W,V})}{T_{W,V} - T_{U,1}}$$

Beispiel:

Für das oben angegebene Modell wird die Wassertemperatur im eingeschwungenen Zustand für jede Position im Rohr berechnet. Folgende Randbedingungen werden zu Grunde gelegt:

- Außen- / Umgebungstemperatur $T_U = T_{U,1} = -2^\circ\text{C}$
- Temperatur des Mediums $T_{w,v} = 12^\circ\text{C}$
- Fließgeschwindigkeit des Mediums $v = 400 \text{ mm/sec}$
- spezifische Wärmekapazität $c = 4.190 \text{ Ws/kg K}$ (Wasser)
- Dichte $\rho = 1 \cdot 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ (Wasser)
- Innerer Rohrdurchmesser $d_i = 20,4 \text{ mm}$
- Parameter „a“ $a = 9,676 \cdot 10^{-4}$

HINWEIS: Die Temperatur $T_{w,v}$ muss nicht mit derjenigen übereinstimmen, welche zur Ermittlung von $\Theta(T_w)$ verwendet wurde. Lediglich die Außen- / Umgebungstemperatur T_U muss den gleichen Wert aufweisen wie der zur Ermittlung von $\Theta(T_w)$ verwendete ($T_{U,1}$).

Die Fläche des Wassers ergibt sich zu:

$$A_w = \pi \cdot r_i^2 = \pi \cdot (20,4/2)^2 = 326,85 [\text{mm}^2]$$

Für die auf das Volumen bezogene Wärmekapazität s ergibt sich:

$$s = 4,19 \cdot 10^{-3} \left[\frac{\text{Ws}}{\text{mm}^3 \text{K}} \right]$$

Somit ergibt sich folgende Temperaturgleichung:

$$T_w(x) = e^{-\frac{9,676 \cdot 10^{-4}}{326,85 \cdot 400 \cdot 4,19 \cdot 10^{-3}} x} \cdot (12 - (-2)) - 2$$

$$\rightarrow T_w(x) = 14 \cdot e^{-1,76628 \cdot 10^{-6} x} - 2$$

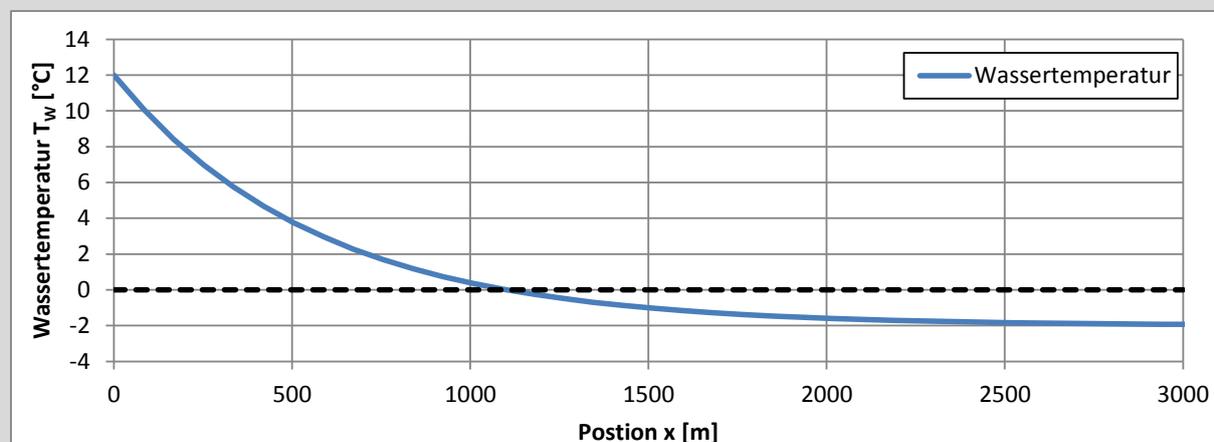


Abbildung 3: Temperaturentwicklung des Trägermediums (Wasser) über die Rohrlänge, eingeschwungener Zustand („steady state“)

3.5 Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x)$ im maßgebenden Querschnitt – eingeschwungener Zustand („steady state“), $T_U=beliebig$

Im Rahmen dieses Projektes wird vereinfacht davon ausgegangen, dass sich die Umgebungstemperaturen an unterschiedlichen Bauteilkanten (Straßenoberfläche / Brückenunterseite) nicht voneinander unterscheiden. Nur so behält die Aussage, dass bei einer Temperatur $T_{W,2} = T_{U,1}$ kein Wärmestrom stattfindet ($\Theta(T_{U,1})=0$), Gültigkeit.

Sind die Umgebungstemperaturen großemäßig beliebig verteilt, so kann ad hoc keine Temperatur für das Trägermedium angegeben werden, bei welcher kein Wärmestrom stattfindet. In diesem Fall muss die FE-Berechnung für zwei unterschiedliche Temperaturen ($T_{W,1}$, $T_{W,2}$) des Trägermediums durchgeführt und die zugehörigen Wärmeströme ($\Theta(T_{W,1})$, $\Theta(T_{W,2})$) ermittelt werden. Diese sind dann in die oben angegebene Gleichung für den Wärmestrom einzusetzen:

$$\theta(T_W) = \frac{\theta(T_{W,1}) - \theta(T_{W,2})}{T_{W,1} - T_{W,2}} \cdot T_W + \theta(T_{W,2}) - \frac{\theta(T_{W,1}) - \theta(T_{W,2})}{T_{W,1} - T_{W,2}} \cdot T_{W,2}$$

$$\theta(T_W) = a \cdot (T_W - T_{W,2}) + \theta(T_{W,2})$$

$$a = \frac{\theta(T_{W,1}) - \theta(T_{W,2})}{T_{W,1} - T_{W,2}}$$

Die Wärmestromgleichung wird erneut in die zuvor aufgestellte Funktion zur Bestimmung der Temperaturänderung (in differentieller Form) eingesetzt:

$$\delta T_W = -\frac{\theta(x)}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot \delta x$$

wobei Θ abhängig von T_W ist:

$$\theta(x) = a \cdot (T_W(x) - T_{W,2}) + \theta(T_{W,2})$$

$$\delta T_W = -\frac{a \cdot T_W(x) - a \cdot T_{W,2} + \theta(T_{W,2})}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot \delta x$$

$$a = \frac{\theta(T_{W,1}) - \theta(T_{W,2})}{T_{W,1} - T_{W,2}}$$

Dies lässt sich wie zuvor umschreiben in:

$$\frac{\delta T_W}{\delta x} + \tilde{a} \cdot T_W(x) + \tilde{b} = 0$$

mit

$$\tilde{a} = \frac{a}{A_W \cdot v \cdot s}, \tilde{b} = -\tilde{a} \cdot \left(T_{W,2} - \frac{1}{a} \cdot \theta(T_{W,2}) \right)$$

Die Lösung der DGL führt wie zuvor zu folgender Gleichung für die Temperatur, lediglich der Parameter \tilde{b} ist unterschiedlich:

$$T_W(x) = \frac{e^{-\tilde{a} \cdot x} \cdot (\tilde{b} + T_{W,V} \cdot \tilde{a}) - \tilde{b}}{\tilde{a}} \rightarrow$$

$$T_W(x) = e^{-\frac{a}{A_W \cdot v \cdot s} x} \cdot \left(T_{W,V} - T_{W,2} + \frac{\theta(T_{W,2})}{a} \right) + T_{W,2} - \frac{\theta(T_{W,2})}{a}$$

$$a = \frac{\theta(T_{W,1}) - \theta(T_{W,2})}{T_{W,1} - T_{W,2}}$$

3.6 Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x,t)$ im maßgebenden Querschnitt, $T_U=const$

Die zuvor ermittelte Gleichung $T_w(x)$ gilt für den eingeschwungenen Zustand ($t=\infty$). Diese ist nun so anzupassen, dass sie für beliebige Zeitpunkte t Gültigkeit besitzt.

Beispiel:

Für das Modell mit folgenden Randbedingungen wird der Wärmestrom in das Rohr hinein im Zeitschrittverfahren berechnet:

- Außen- / Umgebungstemperatur $T_U = -2^\circ\text{C}$
- Temperatur des Mediums $T_W = 16^\circ\text{C}$

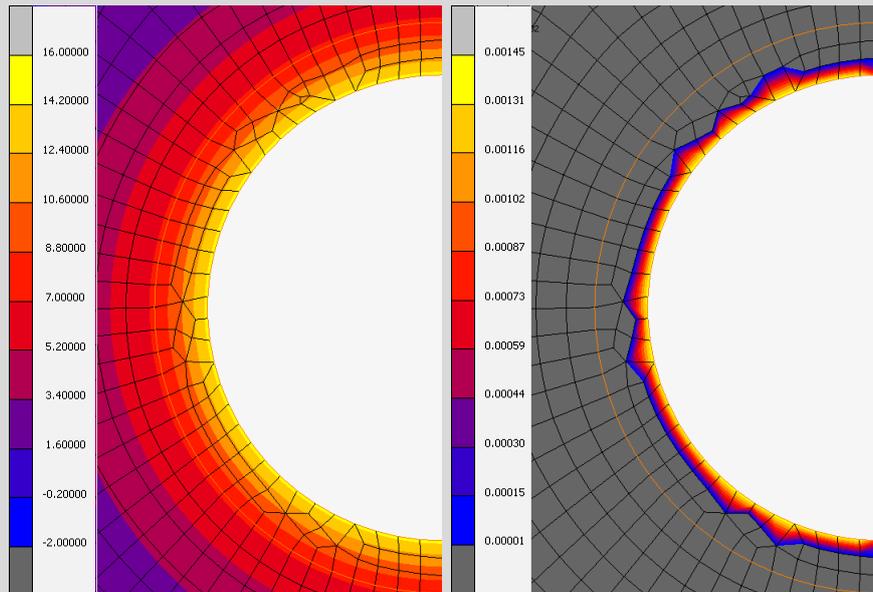


Abbildung 4: Zeitschrittberechnung $t=300$ sec (Temperaturverteilung, Wärmestrom im Übergangsbereich)

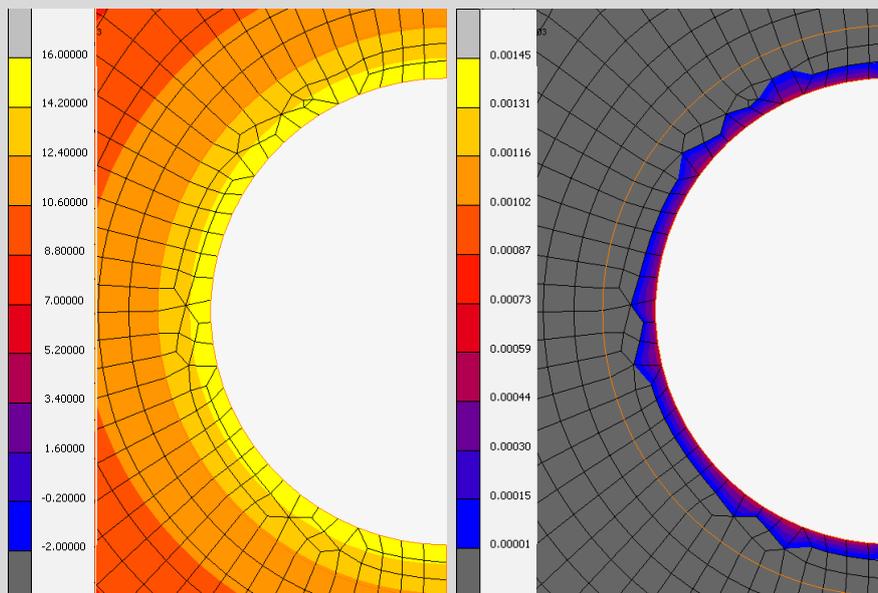


Abbildung 5: Zeitschrittberechnung $t=3600$ sec (Temperaturverteilung, Wärmestrom im Übergangsbereich)

Zu Beginn der Berechnung ($t=300$ sec) ist die Temperaturdifferenz zwischen Trägermedium und angrenzendem Bauteil noch relativ hoch, der Wärmestrom daher groß.

$$\theta(T_W, t = 300\text{sec}) = 0,093595189[\text{W}/\text{mm}]$$

Nach 3.600 sec ist die Temperaturdifferenz bereits geringer, der Wärmestrom nimmt ab:

$$\theta(T_W, t = 3.600\text{sec}) = 0,034997644 \text{ [W/mm]}$$

Nach einer gewissen Zeit strebt der Wärmestrom nach dem eingeschwungenen Zustand.

$$\theta(T_W, t = \text{steady state}) = 0,017416286 \text{ [W/mm]}$$

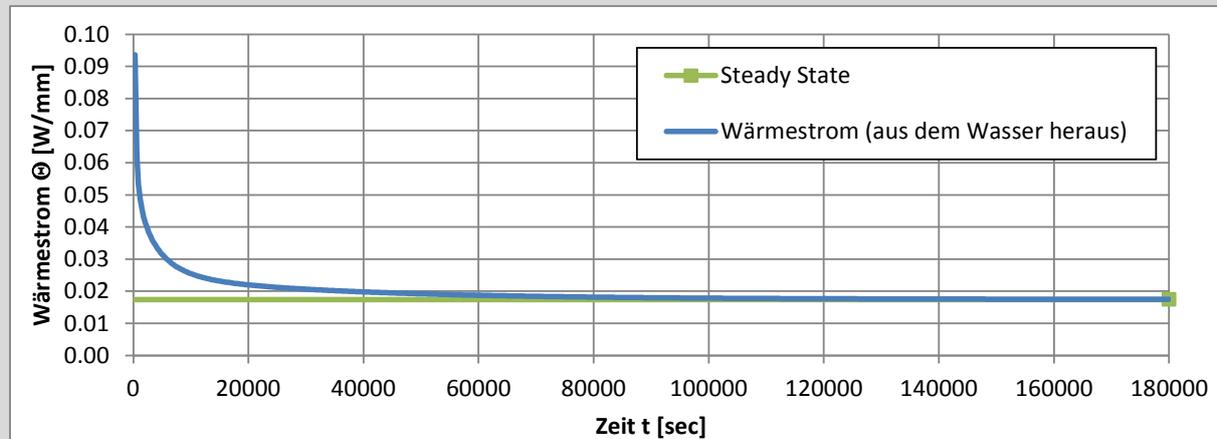


Abbildung 6: Wärmestromentwicklung über die Zeit t

Dieser sich ändernde Wärmestrom soll nun in der Gleichung $T_w(x)$ in folgender Form Berücksichtigung finden:

$$\theta(T_W, t) = a(t) \cdot (T_W - T_{U,1})$$

$$a(t) = \frac{\theta_{T_V}(t)}{T_{W,V} - T_{U,1}}$$

Hierzu wird die Wärmestromentwicklung über die Zeit (Abbildung 6) mittels einer Regressionsfunktion angenähert:

$$\theta_{T_V}(t) = n \cdot t^m + p$$

Folgende 3 Randbedingungen werden festgelegt:

- der Startwert (1. Inkrement, $t \approx 0$) soll exakt sein
- ein beliebig zu wählender Endwert ($t = \text{max}$) soll exakt sein
- die dazwischen eingehängte Regressionsfunktion soll in der Summe die kleinsten Fehlerquadrate aufweisen

Die Gleichung zur Ermittlung der Temperaturentwicklung $T_w(x, t)$ lautet demnach:

$$T_W(x, t) = e^{-\frac{a(t)}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot x} \cdot (T_{W,V} - T_{U,1}) + T_{U,1}$$

$$a(t) = \frac{n \cdot t^m + p}{T_{W,V} - T_{U,1}}$$

Beispiel:

Für die zuvor ermittelte Wärmestromentwicklung wird eine Regressionsfunktion folgender Form gesucht:

$$\theta_{TV}(t) = n \cdot t^m + p$$

Diese soll zum Zeitpunkt $t=12h$ exakt sein.

Randbedingungen:

- $\theta_{TV}(300) = \theta_{FE,TV}(300) = 0,093595189$
- $\theta_{TV}(43.200) = \theta_{FE,TV}(43.200) = 0,019569394$

Nun wird eine Zeit $300 < t_i < 43.200$, zu der die Regressionsfunktion den korrekten Wert annimmt, so gewählt, dass die Summe der Fehlerquadrate minimal wird. Hierzu wird für jedes Wertepaar $\{\theta_{TV}(t_i); \theta_{FE,TV}(t_i)\}$ ein m_i gesucht, für welches die Gleichung exakt erfüllt ist, wobei sich die beiden Konstanten n_i und p_i ergeben:

$$n_i = \frac{\theta_{TV}(t_i) - \theta_{TV}(300)}{t_i^m - 300^m}$$

$$p_i = \theta_{TV}(t_i) - n \cdot 300^m$$

Für jedes t_i wird die Summe der Fehlerquadrate gebildet:

$$R^2(t_i) = \sum_{t=300}^{43.200} \left(\theta_{TV}(t, m_i) - \theta_{FE,TV}(t, m_i) \right)^2$$

Im vorliegenden Fall stellt sich das kleinste Fehlerquadrat ein für

$$t_i = 9.600 \rightarrow R^2(t_i) = 6,05555 \cdot 10^{-5}$$

Hieraus ergeben sich für die Konstanten m , n und p die folgende Werte:

$$m = -0,576858 \quad | \quad n = 2,107476 \quad | \quad p = 0,015105$$

Die Regressionsgleichung lautet somit:

$$a(t) = \frac{\theta_{TV}(t)}{T_{W,V} - T_{U,1}} = \frac{2,107476 \cdot t^{-0,576858} + 0,015105}{16 - (-2)}$$

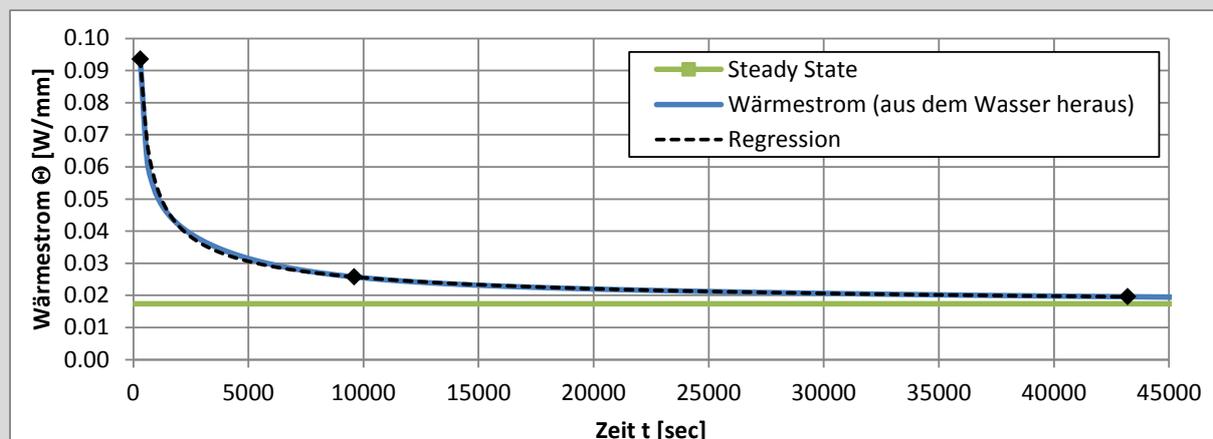


Abbildung 7: Wärmestromentwicklung über die Zeit t , Regression mit 3 Stützstellen

Die Gleichung zur Ermittlung der Temperatur des Trägermediums zu jeder beliebigen Zeit an jeder beliebigen Position des Rohres lautet:

$$T_W(x, t) = 14 \cdot e^{-\frac{a(t)}{547,80} \cdot x} - 2$$

$$a(t) = \frac{2,107476 \cdot t^{-0,576858} + 0,015105}{18}$$

(für $T_U = -2^\circ\text{C}$, $T_{W,V} = 12^\circ\text{C}$, $v = 400 \text{ mm/sec}$)

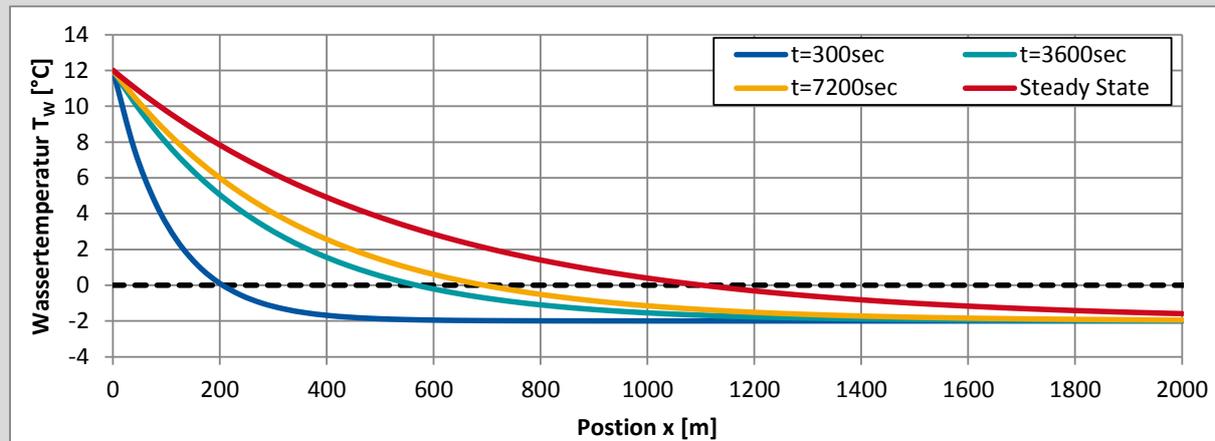


Abbildung 8: Entwicklung der Temperatur des Trägermediums (Wasser) entlang des Rohres (Position x) zu unterschiedlichen Zeitpunkten t

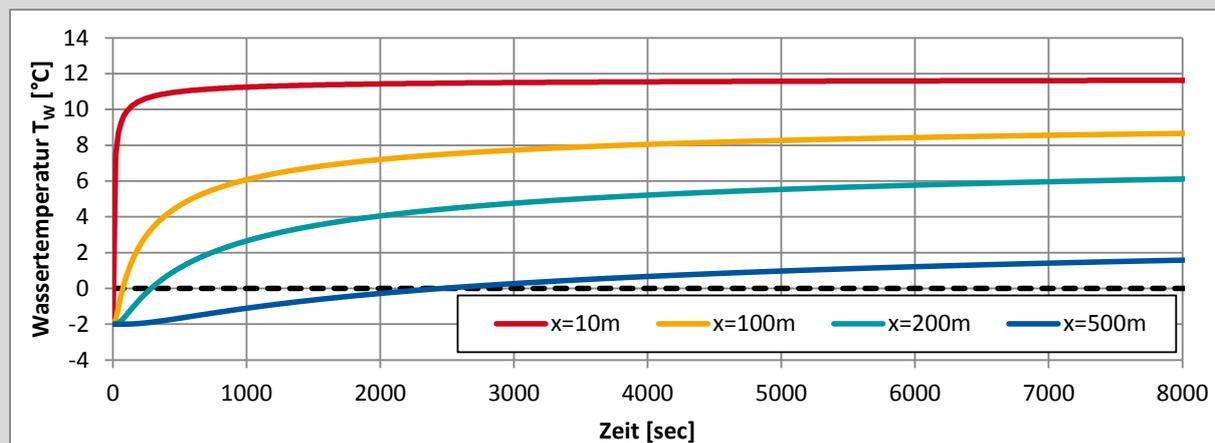


Abbildung 9: Entwicklung der Temperatur des Trägermediums (Wasser) über die Zeit t an unterschiedlichen Positionen x des Rohres

3.7 Temperaturentwicklung des Trägermediums $T_w(x,t)$ im maßgebenden Querschnitt, $T_U=beliebig$

Das im vorherigen Kapitel beschriebene Vorgehen kann unter Zuhilfenahme der nach Kapitel 0 ermittelten Gleichung für die Temperaturentwicklung $T_w(x)$ auf Bauwerke mit größtmäßig beliebig verteilten Umgebungstemperaturen angepasst werden.

Für ein Bauteil mit identischen Umgebungstemperaturen an der Bauteilperipherie ($T_U=const$) konnte festgehalten werden, dass bei einer Temperatur $T_{W,2} = T_{U,1}$ kein Wärmestrom stattfindet ($\Theta(T_{U,1})=0$), und dies unabhängig von der Zeit t .

Im Falle von nicht-konstanten Umgebungstemperaturen tritt dieser Fall nicht ein. Hier ist nun eine Temperatur $T_{W,s}$ zu ermitteln, bei welcher unabhängig von der Zeit t stets der gleiche Wärmestrom ($\Theta(T_{W,s},t)=\Theta_s$) vorherrscht. Hierzu werden die Wärmestromgleichungen für den eingeschwungenen Zustand (steady state) sowie für einen weiteren, beliebigen (transienten) Zeitpunkt t_p aufgestellt und geschnitten.

$$\theta_{steady}(T_W) = a_{steady} \cdot T_W + b_{steady}$$

$$a_{steady} = \frac{\theta_{steady}(T_{W,1}) - \theta_{steady}(T_{W,2})}{T_{W,1} - T_{W,2}}$$

$$b_{steady} = \theta_{steady}(T_{W,2}) - a_{steady} \cdot T_{W,2}$$

und

$$\theta_{trans}(T_W) = a_{trans} \cdot T_W + b_{trans}$$

$$a_{trans} = \frac{\theta_{trans}(T_{W,1}) - \theta_{trans}(T_{W,2})}{T_{W,1} - T_{W,2}}$$

$$b_{trans} = \theta_{trans}(T_{W,2}) - a_{trans} \cdot T_{W,2}$$

Schnittpunkt:

$$T_S = \frac{b_{trans} - b_{steady}}{a_{steady} - a_{trans}}$$

$$\theta_S = a_{trans} \cdot T_S + b_{trans}$$

Somit lässt sich aufstellen:

$$\theta(T_S, t) = a(t) \cdot T_W + b(t) = \theta_S \rightarrow$$

$$b(t) = \theta_S - a(t) \cdot T_W$$

Hierdurch lässt sich die ursprüngliche Wärmestromgleichung vereinfachen zu:

$$\theta(T_W, t) = a(t) \cdot T_W - a(t) \cdot T_S + \theta_S$$

$$\theta(T_W, t) = a(t) \cdot (T_W - T_S) + \theta_S$$

$$a(t) = \frac{\theta_{T_V}(t) - \theta_S}{T_{W,V} - T_S}$$

Hierzu wird wiederum die Wärmestromentwicklung über die Zeit mittels einer Regressionsfunktion angenähert:

$$\theta_{T_V}(t) = n \cdot t^m + p$$

Folgende 3 Randbedingungen werden festgelegt:

- der Startwert (1. Inkrement, $t \approx 0$) soll exakt sein
- ein beliebig zu wählender Endwert ($t = max$) soll exakt sein
- die dazwischen eingehängte Regressionsfunktion soll in der Summe die kleinsten Fehlerquadrate aufweisen

Die Gleichung zur Ermittlung der Temperaturentwicklung $T_w(x, t)$ lautet demnach:

$$T_W(x, t) = e^{-\frac{a(t)}{A_W \cdot v \cdot s} x} \cdot \left(T_{W,V} - T_S + \frac{\theta_S}{a(t)} \right) + T_S - \frac{\theta_S}{a(t)}$$

$$a(t) = \frac{n \cdot t^m + p - \theta_S}{T_{W,V} - T_S}$$

3.8 Ermittlung der Oberflächentemperatur T_O zum Zeitpunkt t basierend auf der Temperaturentwicklung $T_w(x, t)$

Mit Hilfe der aufgestellten Gleichung $T_w(x, t)$ kann die Temperatur des Trägermediums zu beliebigen Zeitpunkten an beliebigen Positionen des Rohres ermittelt werden. Von Interesse ist jedoch vor allem die Oberflächentemperatur (Fahrbahnoberkante). Diese verändert sich zeitversetzt zur Temperatur des Mediums, da zunächst eine Systemerwärmung stattfindet (d.h. ein Teil der aufgebrachten Ener-

gie wird im System gespeichert). Erst zu dem Zeitpunkt, zu dem sich das System eingeschwungen hat (steady state), entspricht die abgegebene Energie (über die Oberflächen) je Zeiteinheit der zugeführten Energie (über das Rohr) je Zeiteinheit.

Zur Ermittlung der Oberflächentemperaturen $T_o(x,t)$ zu beliebigen Zeitpunkten an beliebigen Positionen wird der Wassertemperaturverlauf bis zum Zeitpunkt t an der Position x ermittelt (vgl. Abbildung 9) und als Randbedingung auf das FE-Modell aufgebracht. Die Transiente Analyse (Zeitschrittverfahren) liefert dann die Verteilung der Oberflächentemperatur zum Zeitpunkt t , deren Mittelwert im Diagramm als einzelner Punkt $T_o(x_i,t_i)$ aufgetragen werden kann.

Beispiel:

Für die zuvor ermittelte Temperaturentwicklung des Trägermediums an unterschiedlichen Positionen x zu verschiedenen Zeitpunkten t wird durch die zugehörigen Oberflächentemperaturen ergänzt. Dies wird hier beispielhaft durchgeführt für:

- Position $x = 100m$
- Zeitpunkt $t = 7200sec$

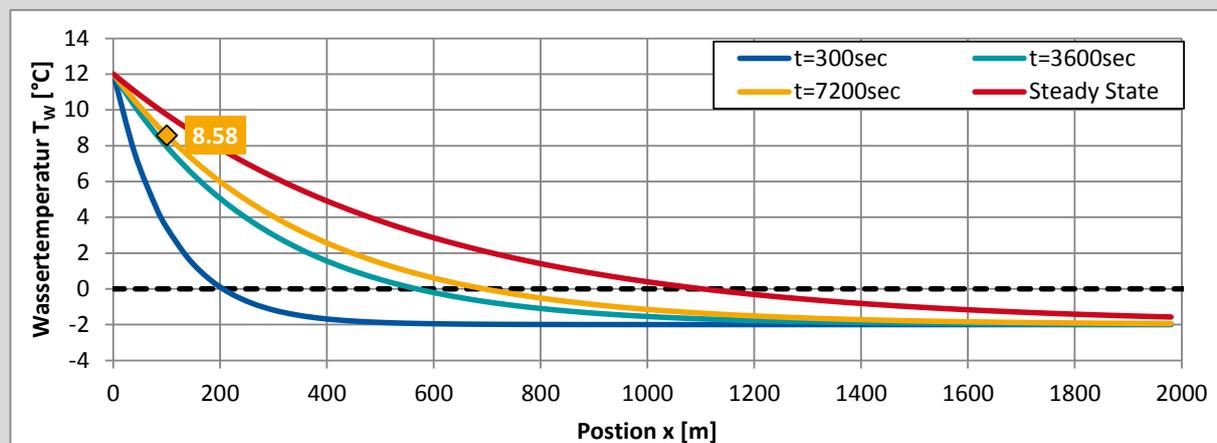


Abbildung 10: Entwicklung der Temperatur des Trägermediums (Wasser) entlang des Rohres (Position x) zu unterschiedlichen Zeitpunkten t

Die zugehörige Temperaturentwicklung (an der Stelle $x = 200m$ bis zum Zeitpunkt $t = 7200sec$) ist in Abbildung 11 dargestellt und wird als Randbedingung auf das FE-Modell aufgebracht.

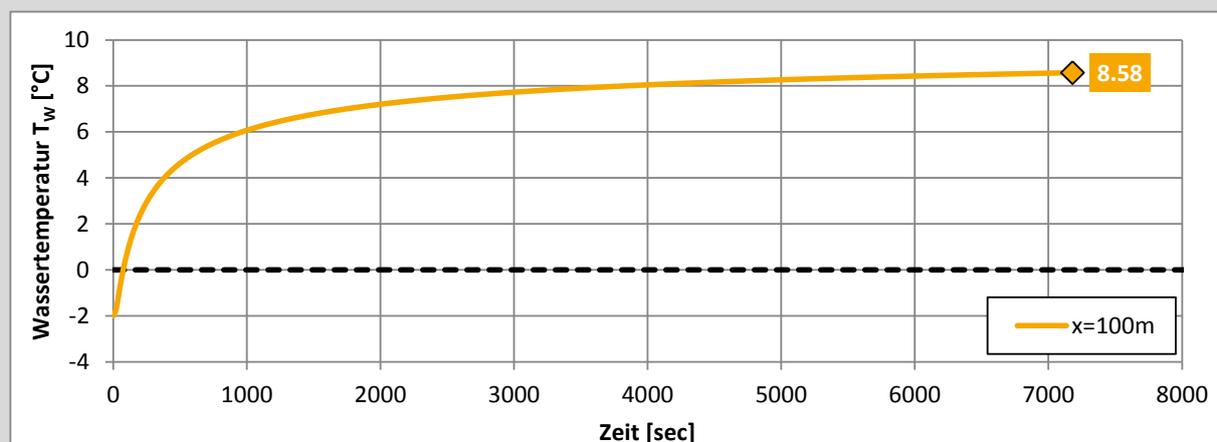


Abbildung 11: Entwicklung der Temperatur des Trägermediums (Wasser) entlang des Rohres (Position $x=100m$) zu unterschiedlichen Zeitpunkten t

Die Auswertung der Temperaturen an den Oberflächenknoten des Modells ergibt im Mittel den in dargestellten Verlauf der Oberflächentemperaturen.

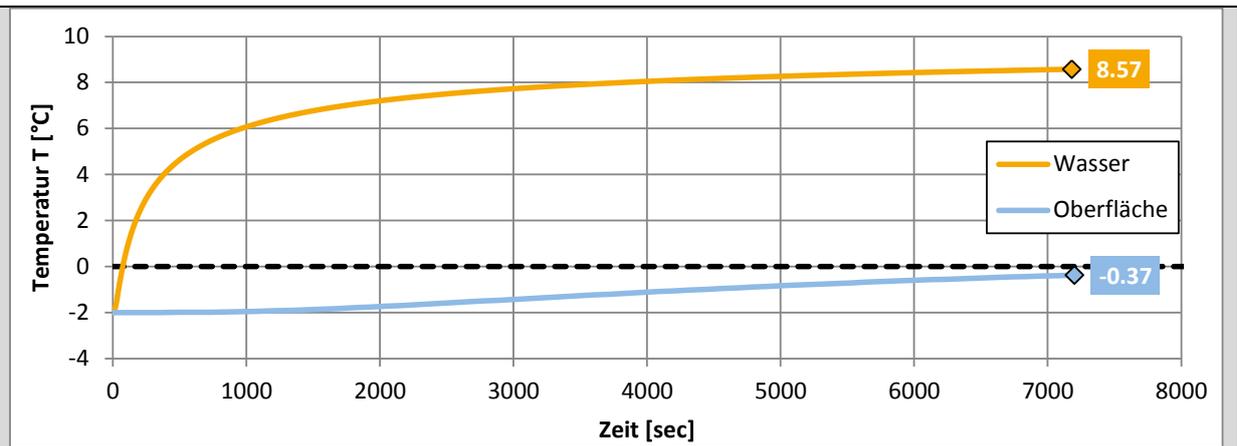


Abbildung 12: Entwicklung der Temperatur des Trägermediums (Wasser) sowie der Oberflächentemperatur entlang des Rohres (Position $x=100m$) zu unterschiedlichen Zeitpunkten t

Diese Berechnung kann nun für die relevanten Zeitpunkte ($t=7.200sec, t=14.400sec$) sowie eine endliche Anzahl an Stützstellen ($x=\{0,20,40,60,80,100,120\}m$) durchgeführt werden.

Hierbei sei jedoch erwähnt, dass die Temperatur an Fahrbahnoberfläche direkt über dem Rohr (Rohrlage: $y=50mm$) höher, zwischen den Rohren geringer ist (vgl. Abbildung 13).

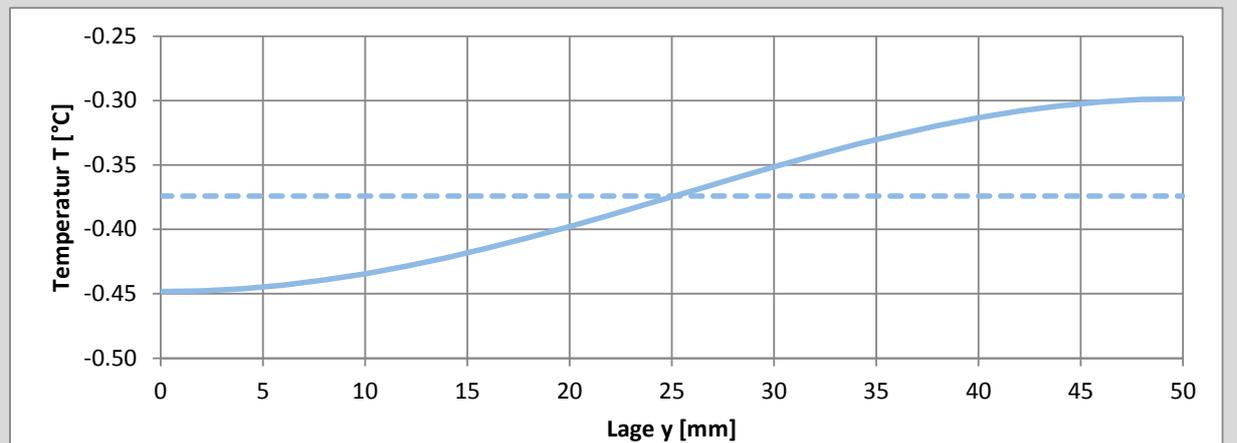


Abbildung 13: Temperaturverteilung an der Oberfläche ($y=0mm$: zwischen zwei Rohren, $y=50mm$: über einem Rohr)

4 Beschreibung des verwendeten Finite Elemente (FE) Modells

Zur Ermittlung des Wärmestroms im eingeschwungenen Zustand, der Wärmestromentwicklung sowie der Temperatur an Fahrbahnoberfläche wird ein 2D Finite Elemente (FE) Modell erstellt.

4.1 FE-Modell Betonfahrbahn

Unter Ausnutzung der Symmetrie wird nur ein halbes Modell abgebildet (Abbildung 14). Die Ergebnisse (Wärmestrom) sind mit „2“ zu multiplizieren.

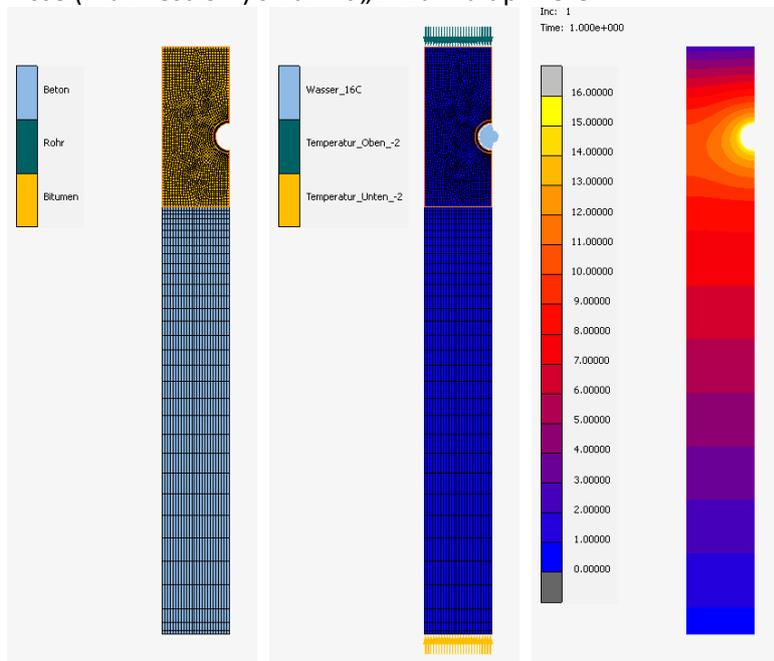


Abbildung 14: FE-Modell „Beton“ (Materialzuweisung / Randbedingungen / Temperaturverteilung)

Tabelle 2: Materialparameter FE „Beton“

Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spezifische Wärmekapazität c [J/(kg K)]	Dichte ρ [kg/m ³]
Beton	2,5	1.000	2.500
Rohr	0,35	900	800
Gussasphalt	0,7	1.000	2.100

Tabelle 3: Randbedingungen „Beton“

Name	Belastungstyp	Temperatur T_w [°C]	Wärmeübergangskoeffizient α [W/(m ² K)]
Wasser	„edge film“	16	125 (100l/h, laminar) 285 (200l/h, turbulent) 1.143 (400l/h, turbulent)
Außentemperatur	„edge film“	-6 -4 -2 0 2	25*
Anfangsbedingung	„temperature“	-6 -4 -2 0 2	-

*Wärmestrom: aus dem Bauteil heraus, entspricht $R_{se} = 0,04$ [(m²K)/W]

4.2 FE-Modell Stahlfahrbahn

Unter Ausnutzung der Symmetrie wird nur eine halbe Rippe abgebildet (Abbildung 15). Die Ergebnisse (Wärmestrom) sind durch „3“ zu dividieren.

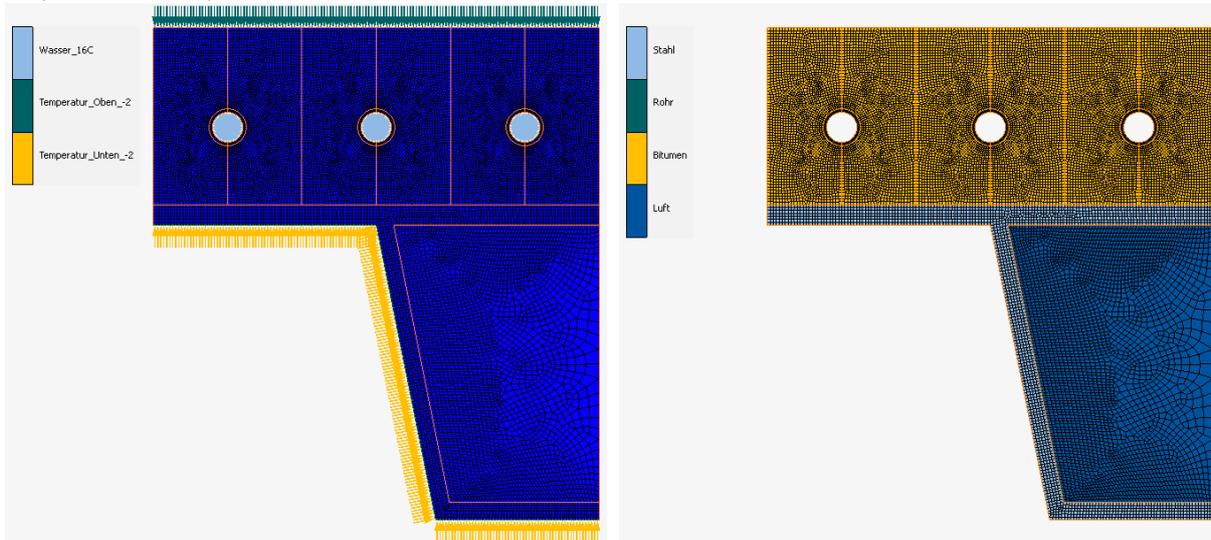


Abbildung 15: FE-Modell „Stahl“ (Materialzuweisung / Randbedingungen)

Tabelle 4: Materialparameter FE „Stahl“

Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spezifische Wärmekapazität c [J/(kg K)]	Dichte ρ [kg/m ³]
Stahl	50,0	450	7.850
Rohr	0,35	900	800
Gussasphalt	0,7	1.000	2.100
Luft (Rippe)	0,2	1.000	1,29

Tabelle 5: Randbedingungen „Stahl“

Name	Belastungstyp	Temperatur T_w [°C]	Wärmeübergangskoeffizient α [W/(m ² K)]
Wasser	„edge film“	16	125 (100l/h, laminar) 285 (200l/h, turbulent) 1.143 (400l/h, turbulent)
Außentemperatur	„edge film“	-6 -4 -2 0 2	25*
Anfangsbedingung	„temperature“	-6 -4 -2 0 2	-

*Wärmestrom: aus dem Bauteil heraus, entspricht $R_{se} = 0,04$ [(m²K)/W]

4.3 Wärmeübergangskoeffizient Wasser - Rohr

Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Trägermedium (Wasser) und Rohrwandung wird für jede Fließgeschwindigkeit separat nach [4] ermittelt.

Ermittlung der Reynoldszahl:

$$Re = \frac{w \cdot d_h}{\nu}$$

$$d_h = d_i$$

mit

d_h	hydraulischer Durchmesser [m]	
d_i	Rohrinnendurchmesser [m]	
w	mittlere Geschwindigkeit [m/s]	
ν	kinematische Viskosität [m ² /s]	(abhängig von T_w)

Laminare Strömung ($Re < 2320$) [4]

$$Nu = \left[49,028 + 4,173 \cdot Re \cdot Pr \cdot \frac{d_h}{L} \right]^{0,333}, d_h = d_i$$

$$\alpha_K = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_h}$$

mit

α_K	Wärmeübergangskoeffizient [W/m ² K]	
Re	Reynoldszahl	
Nu	Nußeltzahl	
Pr	Prandtlzahl	(abhängig von T_w)
d_h	hydraulischer Durchmesser [m]	
d_i	Rohrinnendurchmesser [m]	
L	Rohrlänge [m]	
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	(abhängig von T_w)

Beispiel:

Für eine Durchflussmenge von $V = 100 \text{ l/h}$ wird der Wärmeübergangskoeffizient α_K bestimmt.

- Temperatur des Mediums	$T_w = 12^\circ\text{C}$
- Durchflussmenge	$V = 100 \text{ l/h}$
- innerer Rohrdurchmesser	$d_i = 20,4 \text{ mm}$
- kinematische Viskosität	$\nu(T_w = 12^\circ\text{C}) = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Prandtlzahl	$Pr(T_w = 12^\circ\text{C}) = 8,916$
- Wärmeleitfähigkeit (Wasser)	$\lambda(T_w = 12^\circ\text{C}) = 0,585 \text{ W/mK}$

Fließgeschwindigkeit:

$$A_w = \pi \cdot r_i^2 = \pi \cdot (20,4/2)^2 = 326,85 [\text{mm}^2]$$

$$V = 100 [\text{l/h}] = 100 \cdot 100^3 [\text{mm}^3/\text{h}]$$

$$w = \frac{V}{A_w} = \frac{100 \cdot 100^3 / 3600 [\text{mm}^3/\text{sec}]}{326,85 [\text{mm}^2]} \approx 85 \left[\frac{\text{mm}}{\text{sec}} \right] = 0,085 \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right]$$

Ermittlung der Reynoldszahl:

$$Re = \frac{0,085 \cdot 0,0204}{1,24 \cdot 10^{-6}} = 1.398 < 2.320 \rightarrow \text{laminar}$$

Ermittlung der Nußeltzahl für unterschiedliche Rohrlängen:

$$Nu(L = 6m) = \left[49,028 + 4,173 \cdot 1.398 \cdot 8,916 \cdot \frac{0,0204}{6} \right]^{0,333} = 6,079$$

$$Nu(L = 30m) = \left[49,028 + 4,173 \cdot 1.398 \cdot 8,916 \cdot \frac{0,0204}{30} \right]^{0,333} = 4,380$$

$$Nu(L = 100m) = \left[49,028 + 4,173 \cdot 1.398 \cdot 8,916 \cdot \frac{0,0204}{100} \right]^{0,333} = 3,902$$

Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten:

$$\alpha_K(L = 6m) = \frac{6,079 \cdot 0,585}{0,0204} \approx 175 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

$$\alpha_K(L = 30m) = \frac{4,380 \cdot 0,585}{0,0204} \approx 125 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

$$\alpha_K(L = 100m) = \frac{4,356 \cdot 0,585}{0,0204} \approx 115 \left[\frac{W}{m^2K} \right]$$

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wird mit einem einheitlichen Wärmeübergangskoeffizienten (unabhängig von der Rohrlänge L) gerechnet. Auf der sicheren Seite wurde $\alpha_K=125$ [W/m²K] gewählt.

Turbulente Strömung (Re > 2320) [4]

$$Nu = \frac{B \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot B^{0,5} \cdot (Pr^{0,667} - 1)} \cdot K_L$$

$$K_L = 1 + \left(\frac{d_h}{L} \right)^{0,667} \quad \text{mit } d_h = d_i, \quad B = \frac{1}{(5,15 \cdot \lg(Re) - 4,64)^2}$$

$$\alpha_K = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_h}$$

mit

α_K	Wärmeübergangskoeffizient [W/m ² K]
Re	Reynoldszahl
Nu	Nußeltzahl
Pr	Prandtlzahl (abhängig von T_w)
K_L	Korrekturfaktor
B	modifizierte Rohrreibungszahl
d_h	hydraulischer Durchmesser [m]
d_i	Rohrinnendurchmesser [m]
L	Rohrlänge [m]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/mK] (abhängig von T_w)

Da in Rohren bzw. Rohrregistern der Umschlag zwischen laminarer und turbulenter Strömungsform nicht bei einer fest definierten Reynoldszahl erfolgt, sollten nach Gnielinski die Nußeltzahlen für $Re = 2.300$ ($\alpha_{K,laminar}$) und für $Re = 10.000$ ($\alpha_{K,turbulent}$) linear interpoliert werden [4]:

$$Nu = Nu_{laminar} + \frac{Nu_{turbulent} - Nu_{laminar}}{10.000 - 2.300} \cdot (Re - 2.300)$$

Beispiel:

Für eine Durchflussmenge von $V = 400$ l/h wird der Wärmeübergangskoeffizient α_K bestimmt.

- Temperatur des Mediums $T_w = 12^\circ C$
- Durchflussmenge $V = 400$ l/h

- innerer Rohrdurchmesser $d_i = 20,4 \text{ mm}$
- kinematische Viskosität $\nu(T_w = 12^\circ\text{C}) = 1,24 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Prandtlzahl $Pr(T_w = 12^\circ\text{C}) = 8,916$
- Wärmeleitfähigkeit (Wasser) $\lambda(T_w = 12^\circ\text{C}) = 0,585 \text{ W/mK}$

Fließgeschwindigkeit:

$$A_w = \pi \cdot r_i^2 = \pi \cdot (20,4/2)^2 = 326,85 [\text{mm}^2]$$

$$V = 400 [\text{l/h}] = 400 \cdot 100^3 [\text{mm}^3/\text{h}]$$

$$w = \frac{V}{A_w} = \frac{400 \cdot 100^3 / 3600 [\text{mm}^3/\text{sec}]}{326,85 [\text{mm}^2]} \approx 340 \left[\frac{\text{mm}}{\text{sec}} \right] = 0,34 \left[\frac{\text{m}}{\text{sec}} \right]$$

Ermittlung der Reynoldszahl:

$$Re = \frac{0,34 \cdot 0,0204}{1,24 \cdot 10^{-6}} = 5.594 > 2.320 \rightarrow \text{turbulent}$$

Ermittlung der modifizierten Rohrreibungszahl:

$$B = \frac{1}{(5,15 \cdot \lg(5.594) - 4,64)^2} = 4,653 \cdot 10^{-3}$$

Ermittlung des Korrekturfaktors für unterschiedliche Rohrlängen:

$$K_L(L = 6\text{m}) = 1 + \left(\frac{0,0204}{6} \right)^{0,667} = 1,0226$$

$$K_L(L = 30\text{m}) = 1 + \left(\frac{0,0204}{30} \right)^{0,667} = 1,0077$$

$$K_L(L = 100\text{m}) = 1 + \left(\frac{0,0204}{100} \right)^{0,667} = 1,0035$$

Ermittlung der Nußeltzahl für unterschiedliche Rohrlängen:

$$Nu(L = 6\text{m}) = \frac{4,653 \cdot 10^{-3} \cdot (5.594 - 1000) \cdot 8,916}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{4,653 \cdot 10^{-3} \cdot (8,916^{0,667} - 1)}} \cdot 1,0226 = 50,47$$

$$Nu(L = 30\text{m}) = \frac{4,653 \cdot 10^{-3} \cdot (5.594 - 1000) \cdot 8,916}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{4,653 \cdot 10^{-3} \cdot (8,916^{0,667} - 1)}} \cdot 1,0077 = 49,74$$

$$Nu(L = 100\text{m}) = \frac{4,653 \cdot 10^{-3} \cdot (5.594 - 1000) \cdot 8,916}{1 + 12,7 \cdot \sqrt{4,653 \cdot 10^{-3} \cdot (8,916^{0,667} - 1)}} \cdot 1,0035 = 49,53$$

Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten:

$$\alpha_K(L = 6\text{m}) = \frac{50,47 \cdot 0,585}{0,0204} \approx 1.447 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

$$\alpha_K(L = 30\text{m}) = \frac{49,74 \cdot 0,585}{0,0204} \approx 1.426 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

$$\alpha_K(L = 100\text{m}) = \frac{49,53 \cdot 0,585}{0,0204} \approx 1.420 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$$

Interpolation nach Gnielinski:

Laminar:

$$Re = 2.300 \rightarrow \text{laminar}$$

$$Nu_{\text{laminar}}(L = 30\text{m}) = \left[49,028 + 4,173 \cdot 2.300 \cdot 8,916 \cdot \frac{0,0204}{30} \right]^{0,333} = 4,743$$

Turbulent:

$$Re = 10.000 \rightarrow \text{turbulent}$$

$$B = \frac{1}{(5,15 \cdot \lg(10.000) - 4,64)^2} = 3,926 \cdot 10^{-3}$$

5 Ermittlung des Einflusses benachbarter Rohre sowie unterschiedlicher Rohrkonfigurationen („Rohrbögen“)

Zunächst wird die gegenseitige Beeinflussung benachbarter Rohre untersucht; von diesem Ergebnis wird auf den Einfluss von Rohrbögen auf die Temperierungseigenschaften geschlossen.

Beispiel:

Als Grundlage für die folgende „Steady State“ – Berechnung dient das in Abbildung 14 dargestellte System (Beton). Es wird so erweitert, dass es ein Gesamtsystem mit 15 Rohren (Abstand = 10 cm) darstellt. Die Länge der jeweiligen Segmente beträgt 10m.

- Außen- / Umgebungstemperatur $T_U = T_{U,1} = -6^\circ\text{C}$
- Temperatur des Mediums $T_{W,V} = 12^\circ\text{C}$
- Fließgeschwindigkeit des Mediums $v = 400 \text{ mm/sec}$

Die Wassertemperaturen in den 15 Rohren werden basierend auf der in Kapitel 3.4 hergeleiteten Temperaturgleichung für den eingeschwungenen Zustand ermittelt:

$$T_W(x) = e^{-\frac{a}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot x} \cdot (T_{W,V} - T_{U,1}) + T_{U,1}, \quad a = \frac{\theta(T_{W,V})}{T_{W,V} - T_{U,1}}$$

Die sich ergebenden Temperaturen sind in Tabelle 6 zusammengestellt.

Tabelle 6: Wassertemperaturen in den einzelnen Rohren, 1. Iterationsschritt (Handrechnung)

Rohr	Position	$T_W(x)$	Rohr	Position	$T_W(x)$	Position	Position	$T_W(x)$
[-]	[m]	[°C]	[-]	[m]	[°C]	[-]	[m]	[°C]
1	0	12,0000	6	50	10,2237	11	100	8,6227
2	10	11,6298	7	60	9,8901	12	110	8,3220
3	20	11,2673	8	70	9,5633	13	120	8,0274
4	30	10,9122	9	80	9,2432	14	130	7,7390
5	40	10,5644	10	90	8,9297	15	140	7,4564

Die Temperaturen werden auf das FE-Modell aufgebracht, der resultierende Wärmestrom im eingeschwungenen Zustand wird für jedes Rohr ausgelesen (Abbildung 16).

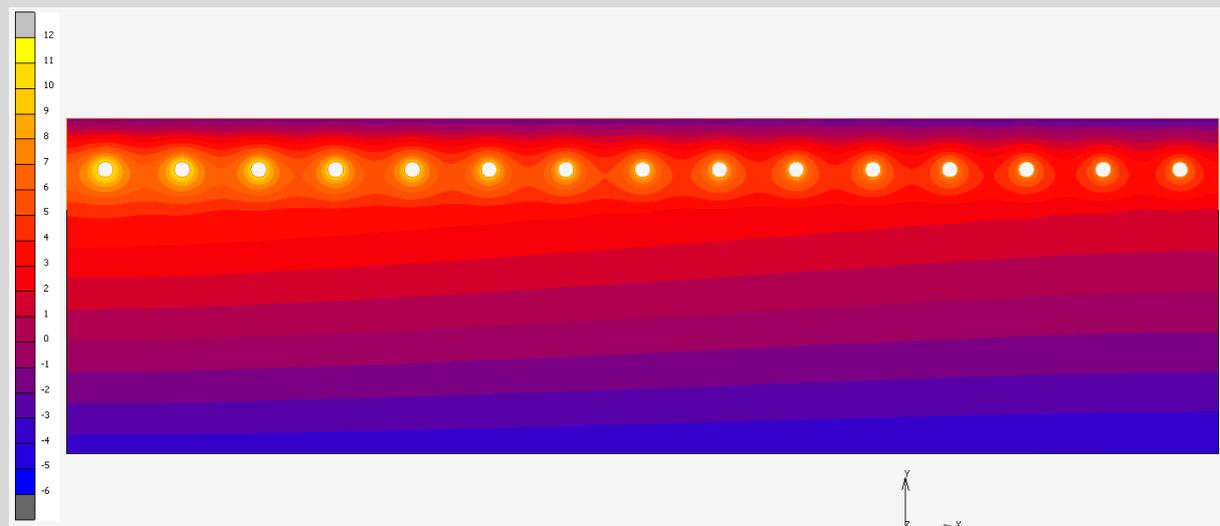


Abbildung 16: Temperaturverteilung (Steady State) am Gesamtsystem im 2. Iterationsschritt (unter Berücksichtigung der Interaktion zwischen den benachbarten Rohren)

Dieser unter Berücksichtigung der Interaktion zwischen den Rohren ermittelte Wärmestrom wird dem mittels Handrechnung bestimmten Wärmestrom gegenübergestellt (Tabelle 7). Zur Ermittlung der Wärmeströme bei gegebenen Wassertemperaturen (Handrechnung) wird die Wärmestromglei-

chung nach Kapitel 3.4 herangezogen:

$$\theta(T_W) = a \cdot (T_W - T_{U,1})$$

$$a = \frac{\theta(T_{W,1})}{T_{W,1} - T_{U,1}}$$

Tabelle 7: Wärmeströme in den Rohren, Handrechnung (ohne Interaktion), FE (mit Interaktion)

Rohr	Handrechnung	FE-Berechnung	Abweichung
[-]	[W/mm]	[W/mm]	[%]
1	0,017416	0,017700	-1,63%
2	0,017058	0,017168	-0,65%
3	0,016707	0,016762	-0,33%
4	0,016364	0,016390	-0,16%
5	0,016027	0,016037	-0,06%
6	0,015698	0,015698	-0,01%
7	0,015375	0,015370	0,03%
8	0,015059	0,015050	0,06%
9	0,014749	0,014736	0,09%
10	0,014446	0,014428	0,12%
11	0,014148	0,014124	0,17%
12	0,013858	0,013821	0,26%
13	0,013573	0,013515	0,42%
14	0,013293	0,013195	0,74%
15	0,013020	0,012795	1,73%

Aus den Berechnungen lässt sich schlussfolgern, dass sich die einzelnen Rohre zwar untereinander beeinflussen, dies jedoch im Rahmen der Dimensionierung nicht weiter ins Gewicht fällt. Die Wärmestromgleichung wird im Mittel erfüllt, die Temperatur in den einzelnen Rohren kann mittels der dargestellten Methode über eine FE-gestützte Handrechnung bestimmt werden.

Gleiches gilt auch für die Rohrbögen. Hier werden die im Inneren des Rohrbogens liegenden Flächen „doppelt“ beheizt; der sich daraus ergebende geringere Temperaturunterschied zwischen Bauteil und Trägermedium führt jedoch dazu, dass ein größerer Wärmestrom an die äußeren Bereiche abgegeben wird, welche theoretisch lediglich „zur Hälfte“ beheizt werden. Somit sind die Rohrbögen im Rahmen der Vordimensionierung zu vernachlässigen.

6 Grenzbetrachtungen / Aufzeigen der Systemgrenzen

6.1 Stahlbrücke / Verbundbrücke

Zunächst soll auf die Unterschiede zwischen den System „Verbundbrücke“ und „Stahlbrücke“ eingegangen werden.

Beispiel:

Für eine Durchflussmenge von $V = 400 \text{ l/h}$ wird die Oberflächentemperatur an der Position $x=20\text{m}$ nach 4 Stunden bestimmt.

- Temperatur des Mediums $T_W = 12^\circ\text{C}$
- Temperatur des Umgebung $T_W = -2^\circ\text{C}$
- Durchflussmenge $V = 400 \text{ l/h}$

Ermittlung des Wärmestroms nach einer Stunde ($t=3.600\text{sec}$):

$$\theta_{\text{Beton},t=3.600\text{sec}} = 0,0350[\text{W}/\text{mm}]$$

$$\theta_{\text{Stahl},t=3.600\text{sec}} = 0,0348[\text{W}/\text{mm}]$$

Ermittlung des Wärmestroms im eingeschwungenen Zustand:

$$\theta_{\text{Beton},\text{steady}} = 0,0174[\text{W}/\text{mm}]$$

$$\theta_{\text{Stahl},\text{steady}} = 0,0226[\text{W}/\text{mm}]$$

Im FE-Modell wird mit einer Wassertemperatur von $T_W = 16^\circ\text{C}$ gerechnet.

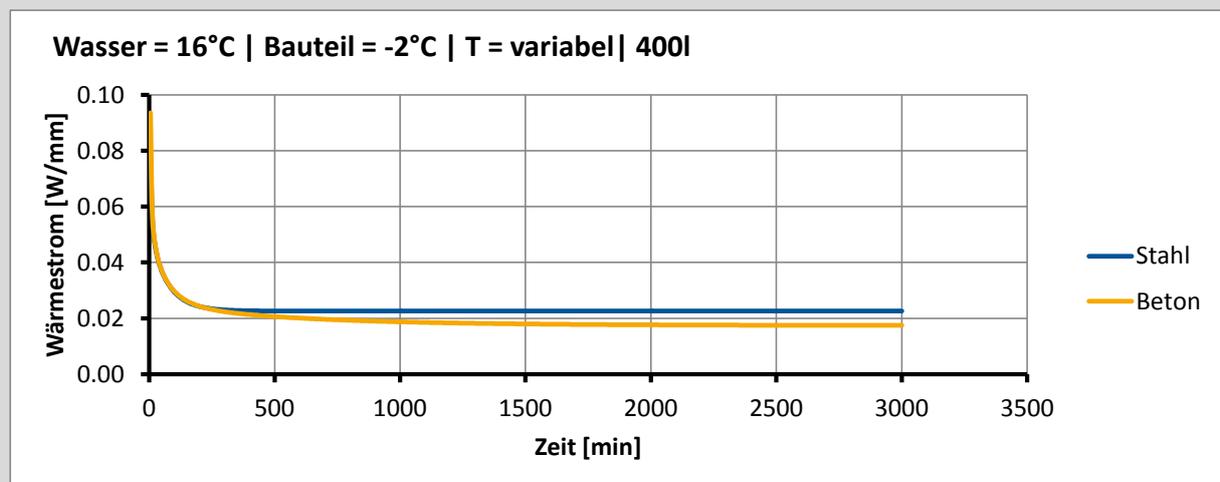


Abbildung 17: Wärmestromentwicklung aus dem Trägermedium (Wasser) in das Rohr hinein über die Zeit

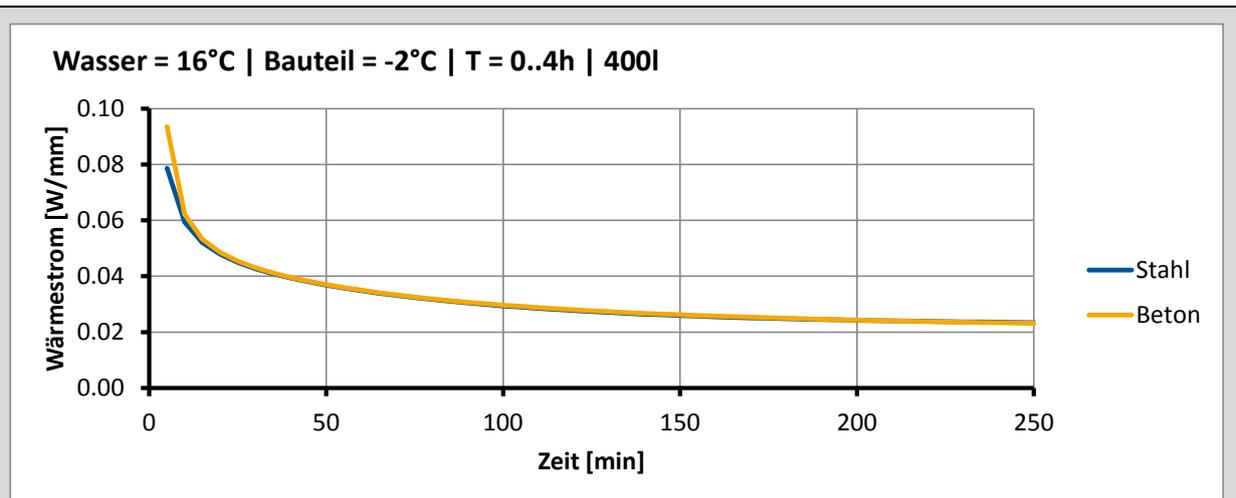


Abbildung 18: Wärmestromentwicklung aus dem Trägermedium (Wasser) in das Rohr hinein über die Zeit, Ausschnitt: 4 Stunden

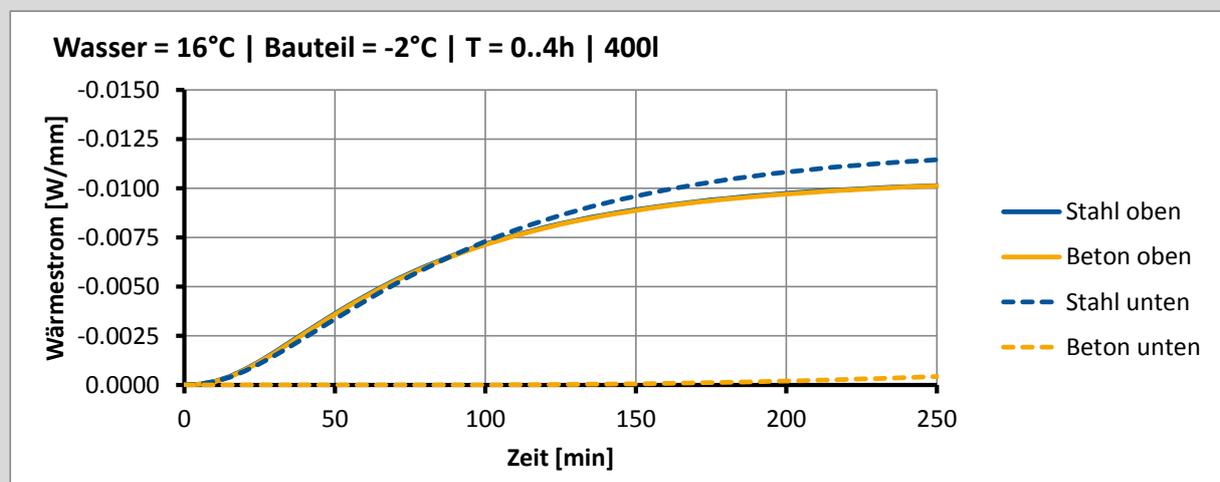


Abbildung 19: Wärmestromentwicklung aus dem Bauteil heraus über die Zeit, Ausschnitt: 4 Stunden (Kurve „Stahl oben“ deckungsgleich mit Kurve „Beton oben“)

Aus der Betrachtung der Wärmestromentwicklung innerhalb der ersten 4 Stunden (Abbildung 18) lässt sich schließen, dass die Betonbrücke und die Stahlbrücke in Bezug auf den Energieeintrag in das Bauwerk hinein innerhalb der ersten 4 Stunden keine nennenswerten Unterschiede aufweisen. Erst im eingeschwungenen Zustand wird dem Heizungssystem der Stahlbrücke mehr Energie entzogen als dem der Betonbrücke, da die Stahlbrücke eine größere Oberfläche aufweist. Dies ist jedoch für die hier gemachten Betrachtungen irrelevant, da eine Divergenz der Kurven erst ab einem Zeitpunkt von $t > 4$ Stunden zu beobachten ist. Weiterhin lässt sich feststellen, dass der Wärmestrom aus dem Bauwerk heraus (Fahrbahnoberfläche) unabhängig vom gewählten System ist.

Die Wärmeströme sowie die Wärmestromentwicklung werden genutzt, um die vollständige Temperaturgleichung aufzustellen, mit deren Hilfe die Entwicklung der Wassertemperatur über die Zeit im betrachteten Abschnitt ($x=20m$) bestimmt wird.

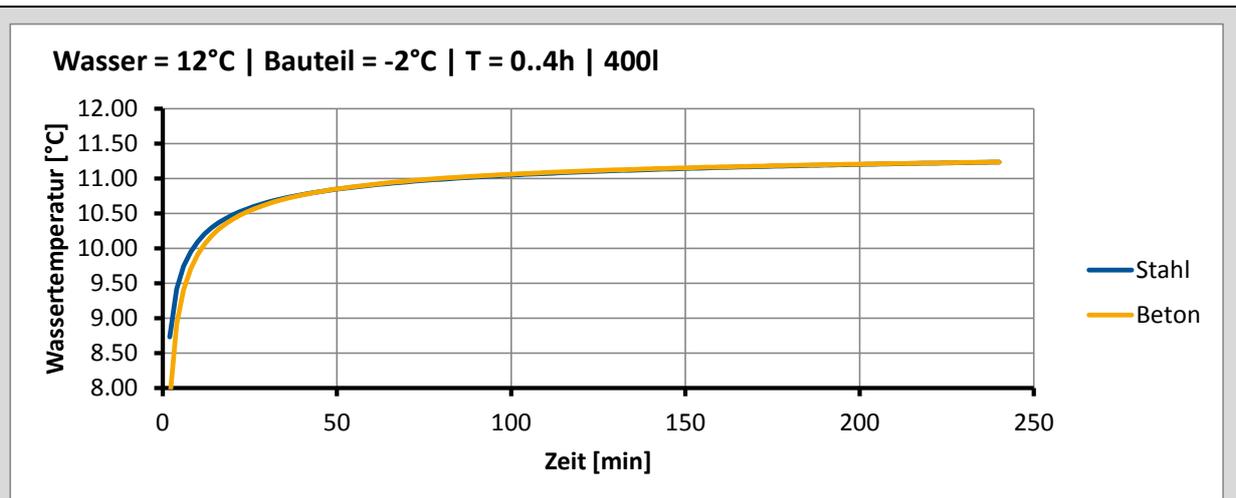


Abbildung 20: Temperaturentwicklung des Trägermediums (Wasser) an der Position $x=20m$ über die Zeit

Aufgrund der nahezu affinen Wärmestromverläufe ergeben sich auch bei den Temperaturverläufen keine großen Abweichungen (Abbildung 20).

Die so ermittelten Temperaturverläufe werden im Rahmen einer Zeitschrittanalyse als äußere Lasten auf die jeweiligen FE-Modelle aufgebracht, um so die Oberflächentemperatur zu ermitteln.

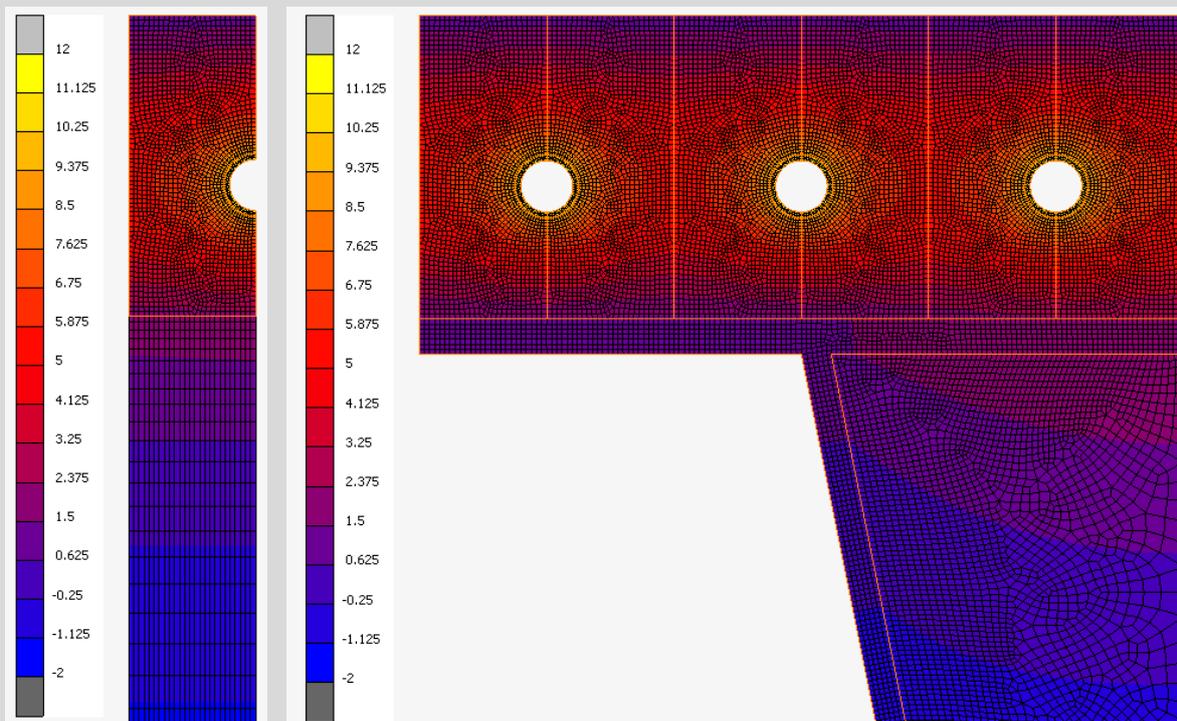


Abbildung 21: Temperatur im Bauteil an der Position $x=20m$ nach $t=4h$

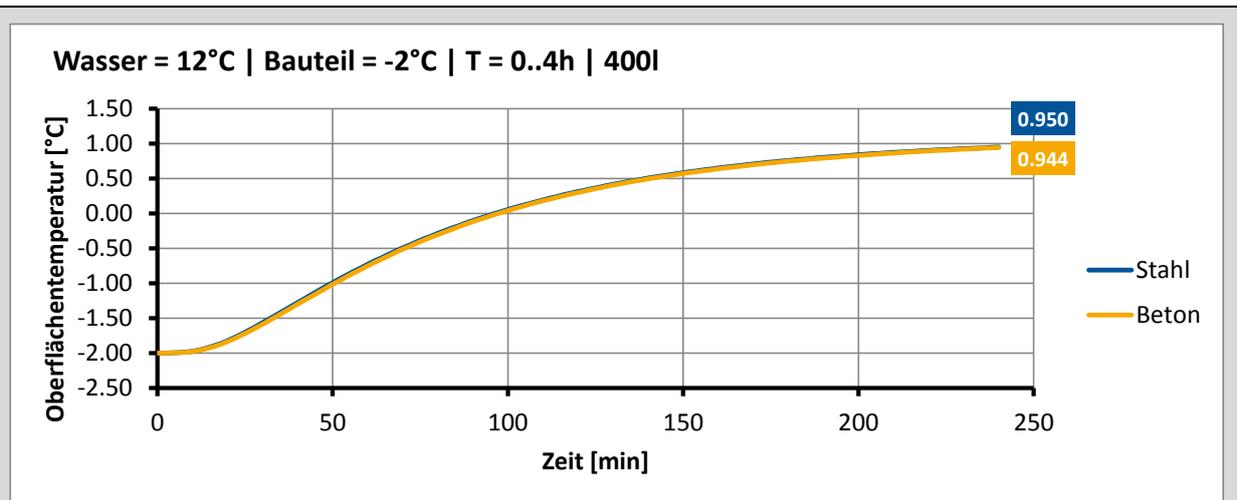


Abbildung 22: Temperaturentwicklung der Fahrbahnoberfläche an der Position $x=20m$ über die Zeit, mittlere Temperatur

Auch die ermittelten Temperaturverläufe für die Oberflächentemperatur sind bei beiden Systemen (Beton und Stahl) zumindest bis zum Zeitpunkt $t=4h$ affin. Ausgewertet wurde stets die mittlere Oberflächentemperatur (Abbildung 23).

$$T_{O,Beton,t=4h} = 0,944[°C]$$

$$T_{O,Stahl,t=4h} = 0,950[°C]$$

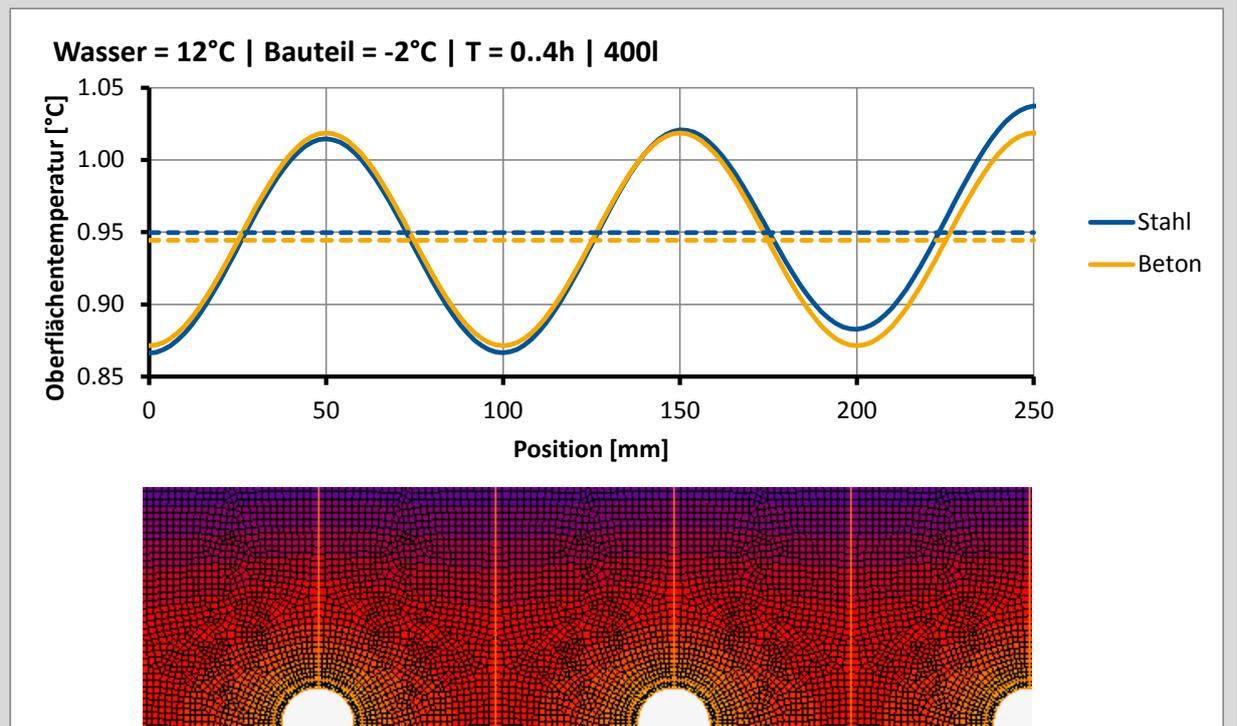


Abbildung 23: Oberflächentemperatur an der Position $x=20m$ nach $t=4h$ (Abbildung: Stahlbrücke)

Dies führt dazu, dass die Vorbemessungstabellen für die Verbundbrücke (Beton) und die Stahlbrücke identisch ausfallen. Im folgenden Vergleich wird daher lediglich die Stahlbrücke betrachtet, die Schlussfolgerungen gelten analog für die Betonbrücke.

6.2 Bauwerkstemperatur / Außentemperatur („Starttemperatur“)

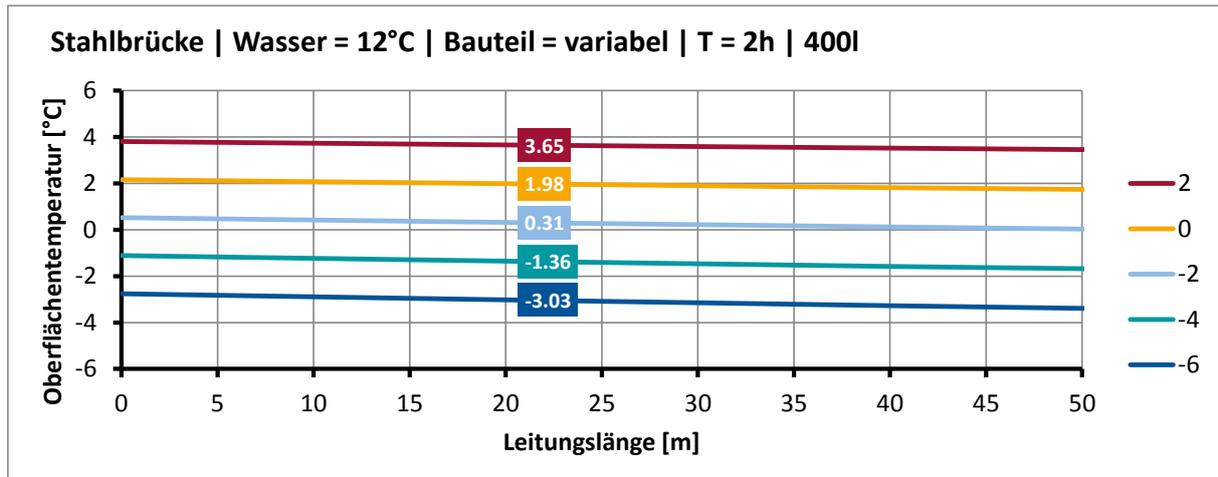


Abbildung 24: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 2 Stunden, $v=400\text{l/h}$, 12°C Wassertemperatur bei unterschiedlichen Bauwerkstemperaturen („Starttemperatur“) (Wert bei $x=20\text{m}$)

Die Bauwerkstemperatur zu Beginn des Heizvorganges hat einen linearen Einfluss auf die Oberflächentemperatur nach einer definierten Zeit T (Reaktionszeit, hier: 2 Stunden). So wird bei einer um 2°C geringeren „Starttemperatur“ bei den hier betrachteten Randbedingungen nach 2 Stunden Heizbetrieb an der Position $x=20\text{m}$ jeweils eine um 1,67°C geringere Oberflächentemperatur erreicht (Abbildung 24). Nach 4 Stunden beträgt die Differenz noch 1,58°C (Abbildung 25).

6.3 Vorlaufzeit

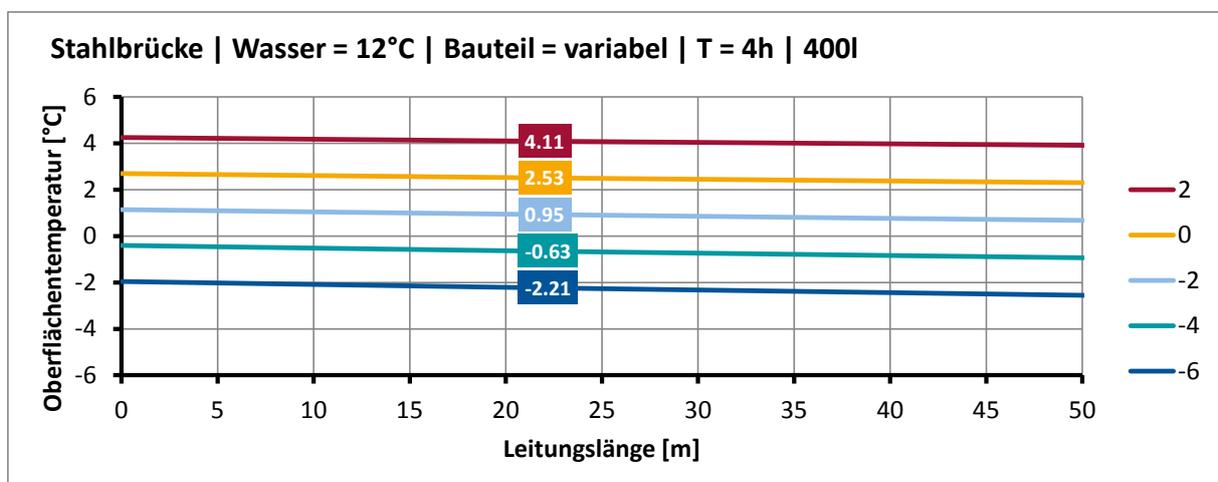


Abbildung 25: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 4 Stunden, $v=400\text{l/h}$, 12°C Wassertemperatur bei unterschiedlichen Bauwerkstemperaturen („Starttemperatur“) (Wert bei $x=20\text{m}$)

Bei größer werdender Temperaturspreizung (Wassertemperatur - Außentemperatur) wird der Einfluss der Vorlaufzeit größer, d.h. bei niedriger „Starttemperatur“ ist der zusätzliche Temperaturgewinn durch eine längere Heizdauer größer. Die folgende Tabelle soll dies verdeutlichen:

Tabelle 8: Einfluss von Bauwerks- / Starttemperatur und Vorlaufzeit auf die Oberflächentemperatur

Starttemperatur	2h	4h	Differenz
2°C	3,65°C	4,11°C	0,46°C
0°C	1,98°C	2,53°C	0,55°C
-2°C	0,31°C	0,95°C	0,64°C
-4°C	-1,36°C	-0,63°C	0,73°C
-6°C	-3,03°C	-2,11°C	0,92°C

6.4 Fließgeschwindigkeit

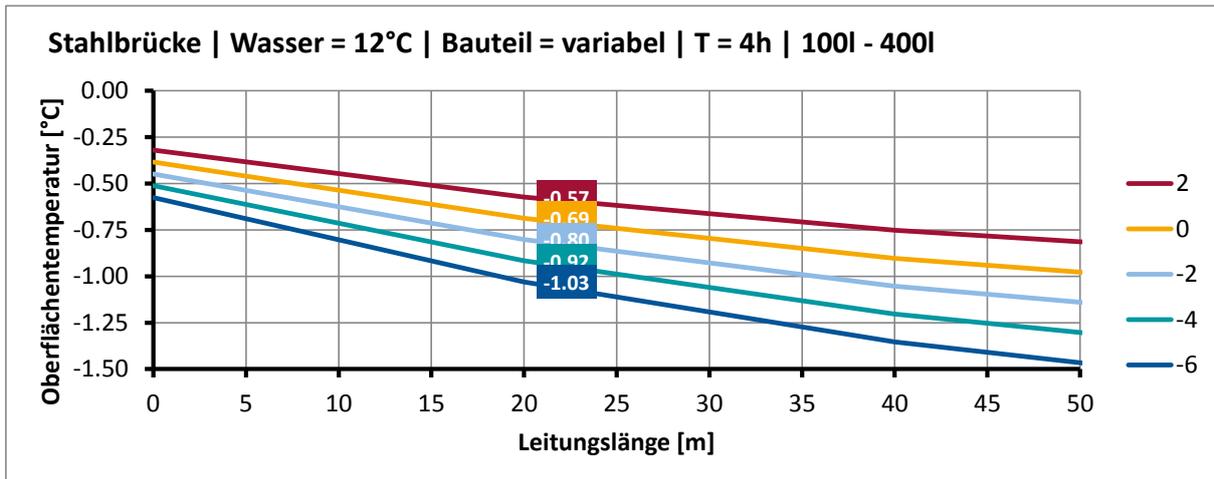


Abbildung 26: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 4 Stunden, v=100l/h – v=400l/h, 12°C Wassertemperatur bei unterschiedlichen Bauwerkstemperaturen („Starttemperatur“) (Wert bei x=20m)

In Abbildung 26 ist der Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf die Oberflächentemperatur dargestellt. Hierzu wird die Differenz aus Oberflächentemperatur bei einer Fließgeschwindigkeit von 100l/h und einer Fließgeschwindigkeit von 400l/h aufgetragen. Hieraus wird deutlich, dass die Bedeutung der Fließgeschwindigkeit auf die Oberflächentemperatur bei zunehmender Leitungslänge zunimmt.

6.5 Möglicher Einsatz des Systems ohne Wärmepumpe

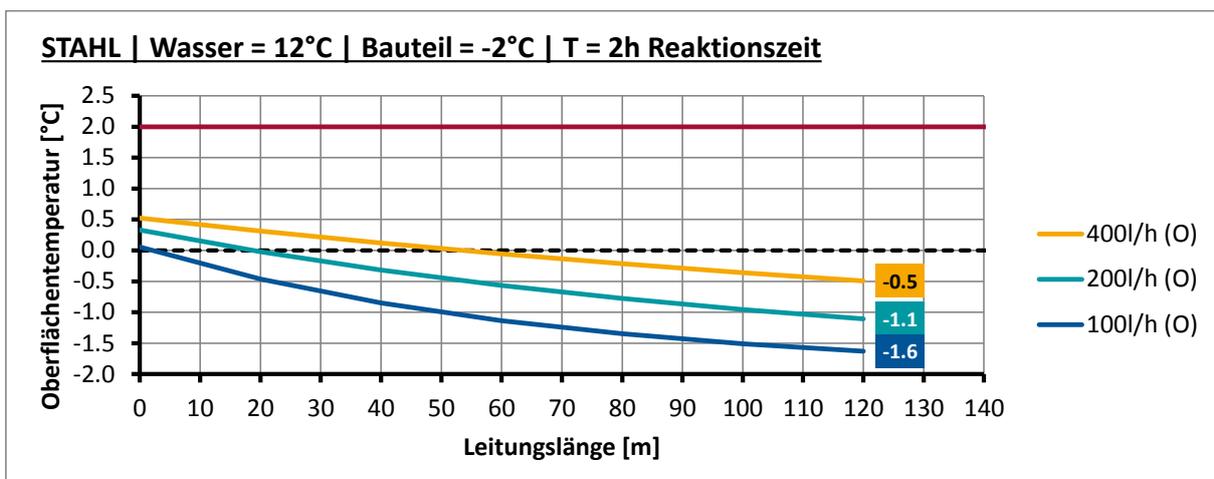


Abbildung 27: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 2 Stunden, 12°C Wassertemperatur, Bauteiltemperatur: -2°C

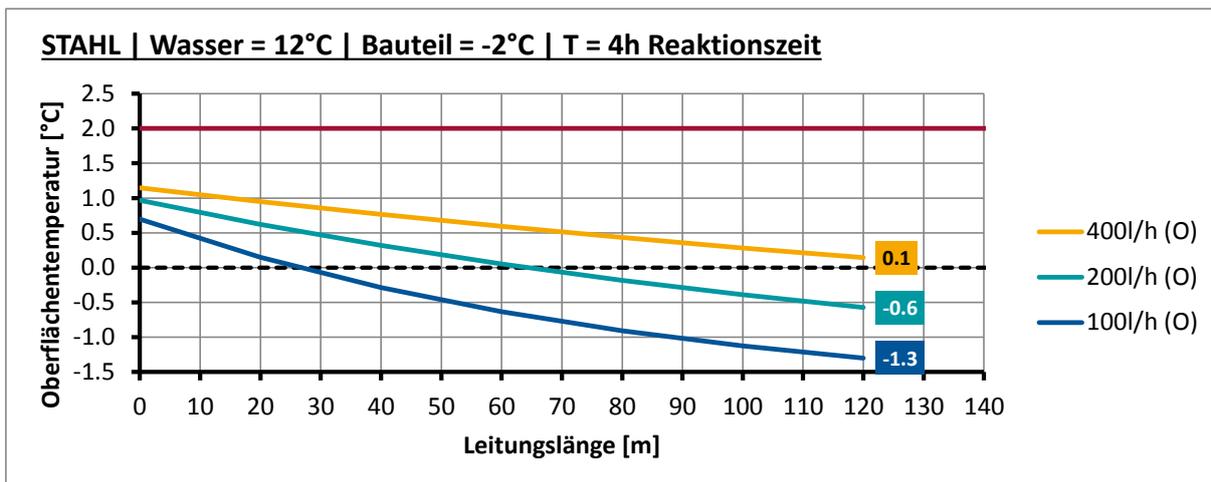


Abbildung 28: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 4 Stunden, 12°C Wassertemperatur, Bauteiltemperatur: -2°C

Aus den Vorbemessungsdiagrammen (Abbildung 27) und (Abbildung 28) geht hervor, dass bei einer Bauwerkstemperatur („Starttemperatur“) von -2°C eine Eisfreiheit der Fahrbahnoberfläche weder nach 2 noch nach 4 Stunden sichergestellt werden kann.

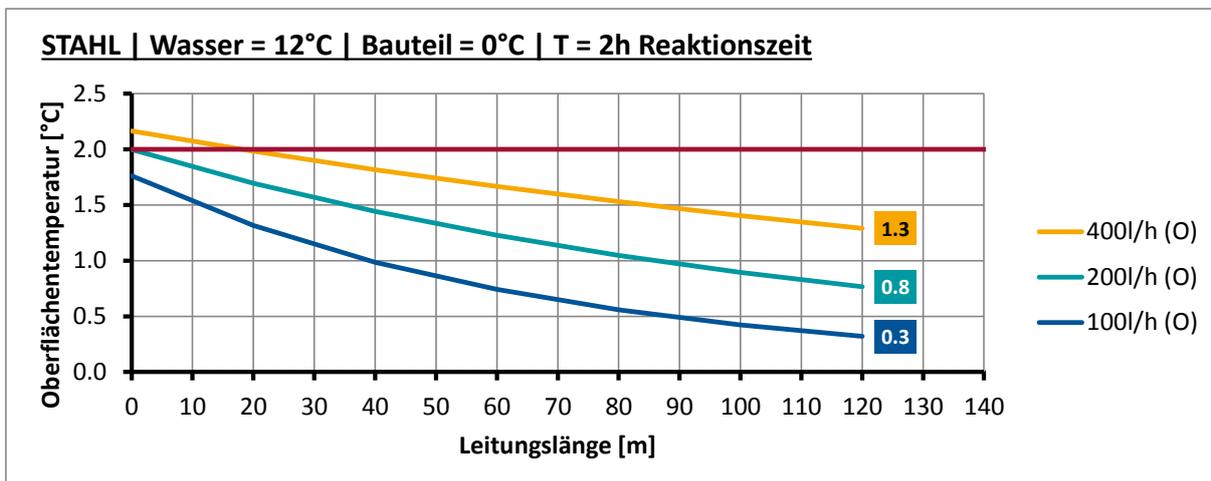


Abbildung 29: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 2 Stunden, 12°C Wassertemperatur, Bauteiltemperatur: 0°C

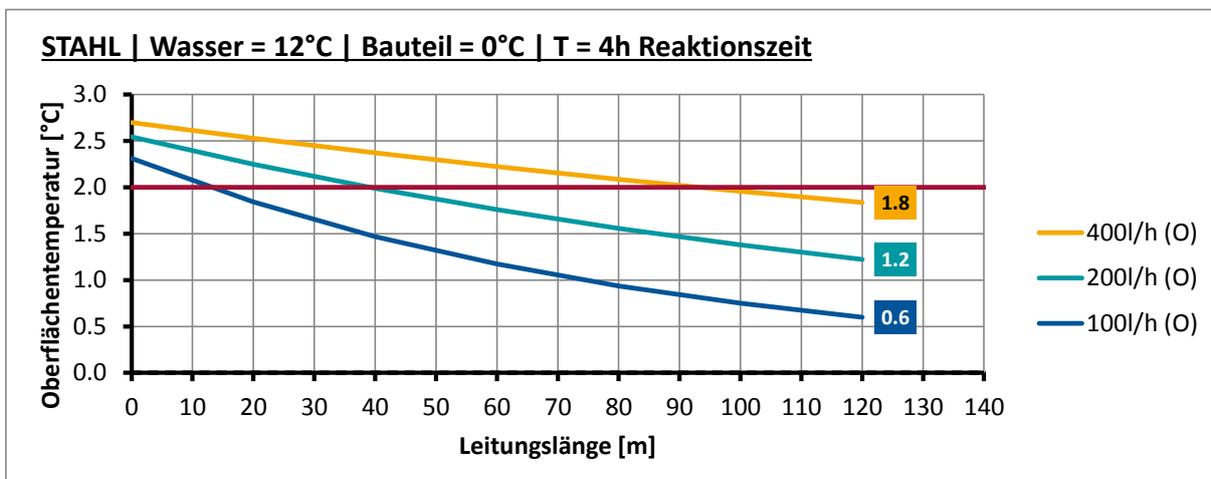


Abbildung 30: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 4 Stunden, 12°C Wassertemperatur, Bauteiltemperatur: 0°C

Erst ab einer Bauwerkstemperatur („Starttemperatur“) von 0°C kann die Oberflächentemperatur auf über 2°C angehoben werden (Abbildung 29, Abbildung 30). Bei einer Reaktionszeit von 2 Stunden und einer Wassertemperatur von 12°C ist dies jedoch nur bei einer hohen Fließgeschwindigkeit (400l/h) möglich, und dann auch nur bis zu Leitungslängen von ca. 15m (Abbildung 29). Wird die Reaktionszeit auf 4 Stunden angehoben, so kann die Fahrbahnoberfläche auch schon bei geringeren Fließgeschwindigkeiten eisfrei gehalten werden (Abbildung 30). In diesem Fall ist der Einfluss der Fließgeschwindigkeit als groß einzustufen.

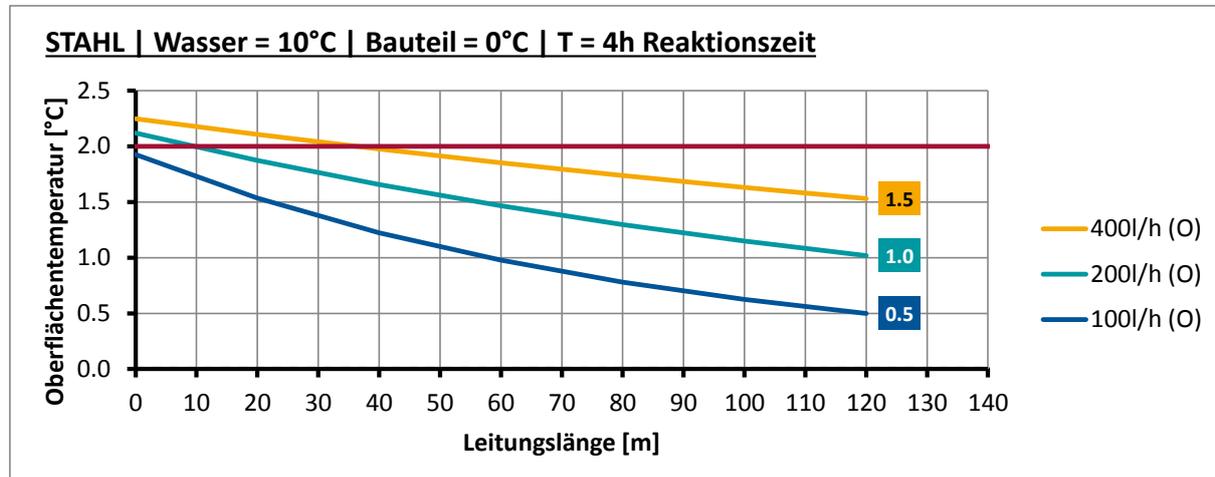


Abbildung 31: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 4 Stunden, 10°C Wassertemperatur, Bauteiltemperatur: 0°C

Sinkt die Wassertemperatur von 12°C auf 10°C ab, schränken sich die Einsatzmöglichkeiten einer Brückenheizung ohne Wärmepumpe wiederum ein (Abbildung 31). In diesem Fall sind bei einer Fließgeschwindigkeit von $v=200l/h$ und einer Reaktionszeit von 4 Stunden noch Rohrlängen bis 10m realisierbar. Nimmt die Wassertemperatur zu (14°C), so kann das System selbst bei einer Reaktionszeit von 2 Stunden und einer Fließgeschwindigkeit von $v=200l/h$ noch bei Rohrlängen bis 20m zum Einsatz kommen (Abbildung 32).

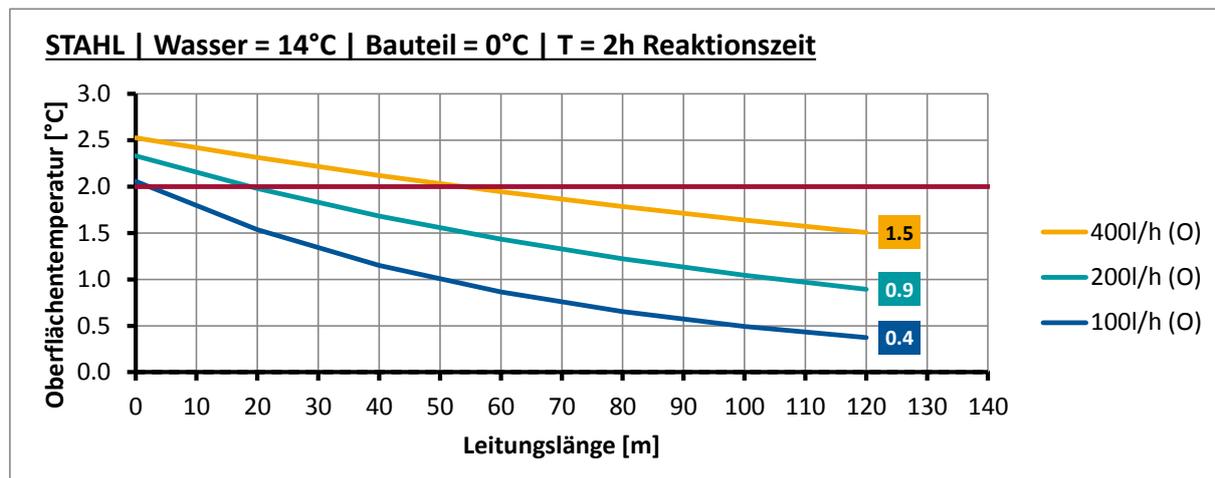


Abbildung 32: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 2 Stunden, 14°C Wassertemperatur, Bauteiltemperatur: 0°C

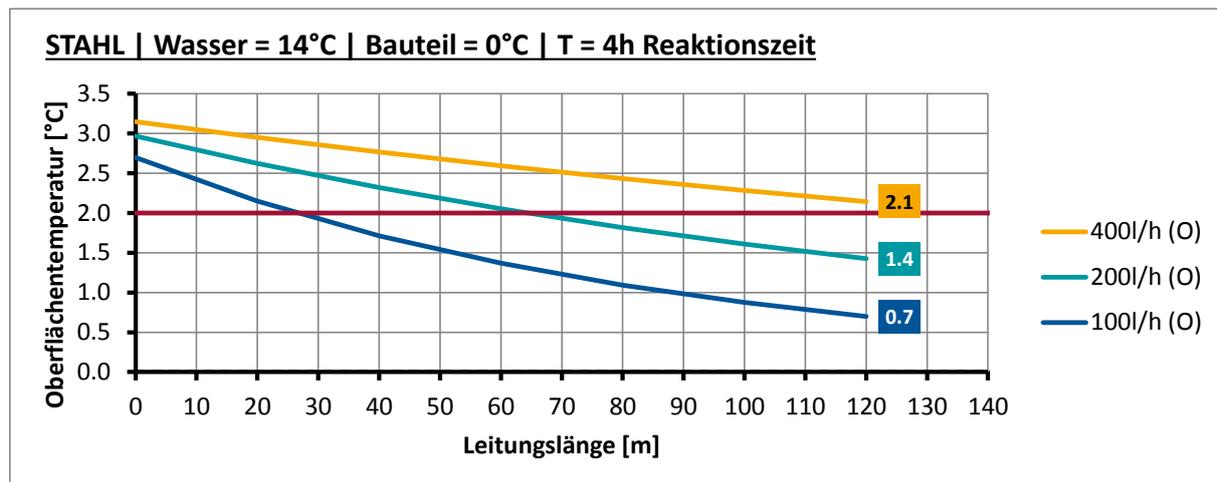


Abbildung 33: Oberflächentemperatur über die Leitungslänge nach 4 Stunden, 14°C Wassertemperatur, Bauteiltemperatur: 0°C

7 Schlussfolgerungen

Der Einsatz einer Brückenheizung ohne Zuhilfenahme einer Wärmepumpe gestaltet sich als schwierig. Sinkt die Bauwerkstemperatur unter -2°C ab, so ist eine Erwärmung der Oberfläche auf 2°C selbst innerhalb von 4 Stunden nicht möglich. Wird die Brückenheizung (12°C) bei Temperaturen von 0°C eingeschaltet, so ist eine Erwärmung der Oberfläche auf 2°C innerhalb von 2 Stunden zwar möglich; allerdings nur dann, wenn die Fließgeschwindigkeit (400l/h) hoch und die Leitungslänge kurz ($<15\text{m}$) ist. Bei einer Wassertemperatur von 14°C ist eine Erwärmung der Oberfläche auf 2°C auch schon bei geringeren Fließgeschwindigkeiten möglich (200l/h). Bei hohen Fließgeschwindigkeiten kann die Leitungslänge in diesem Fall bis auf 50m erhöht werden. Innerhalb der ersten 4 Stunden sind keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Aufheizverhalten der Betonbrücke und der Stahlbrücke identifiziert worden, da die Energie zunächst lediglich in die Asphaltsschichten abgegeben wird. Werden die Umgebungstemperaturen als variabel angesetzt, so kann jedoch die höhere Wärmespeicherkapazität des Betons zu abweichenden Ergebnissen (in beide Richtungen) führen.

Bei einer gewünschten Reaktionszeit von einer Stunde ist das System ohne Wärmepumpe nicht zum effektiven Erwärmen der Fahrbahnoberfläche einsetzbar. Hier kann die Heizung lediglich unterstützend wirken, um eventuell bei sinkenden Temperaturen die vorherrschende Oberflächentemperatur zu halten. Hierzu sind jedoch weitere Untersuchungen mit variierenden Umgebungstemperaturen erforderlich.

Es soll abschließend noch einmal darauf hingewiesen werden, dass allen Berechnungen die Annahme zu Grunde liegt, dass die Bauwerkstemperatur im Moment des Einschaltens der Brückenheizung homogen ist und der Umgebungstemperatur entspricht. Weiterhin wurde die Umgebungstemperatur im Zuge der Berechnungen als konstant angesetzt. Aufgrund der verwendeten Materialparameter (Gussasphalt, hohe Wärmeleitfähigkeit) sind die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf Bauwerke / Straßen mit anderen Asphaltarten übertragbar.

8 Literaturverweise und Dokumente

- [1] Feldmann, M. et.al, Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie, BASt-Bericht B 87, Carl Schünemann Verlag GmbH, Bremen, 2012
- [2] Mackert, K.-U., Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn, Expertengespräch Stahlbrückenbau, Bergisch Gladbach 27.09.2011
- [3] REHAU AG + Co, REHAU Geothermisches Brückenheizungssystem Objekt Info: Schluss mit Eis und Schnee auf der Elbe-Lübeck-Kanal-Brücke in Berkenthin, Produktinformation, 05/2010
- [4] Recknagel, H., Sprenger, E., Schramek, E.-R., Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik (07/08), Oldenbourg Industrieverlag, München, 2007

Anhang A Validierung der Berechnungsergebnisse an einem Versuch im Deckenprüfstand

Anhang A.1 Messungen am Deckenprüfstand

Zur Validierung des zuvor aufgestellten Konzeptes wurden Messungen an einem Deckenprüfstand (Abbildung 34) durchgeführt.

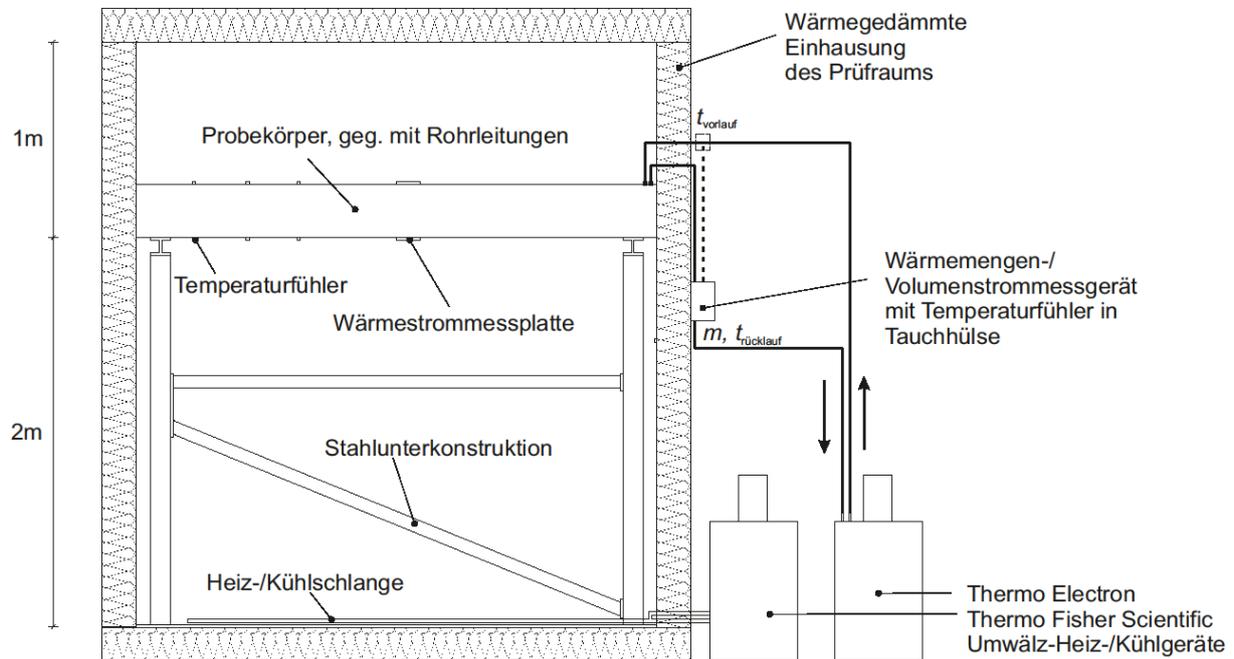


Abbildung 34: Schematischer Aufbau des Deckenprüfstandes zur Leistungsermittlung von thermisch aktivierten Decken am Institut für Stahlbau

Bei dem untersuchten Probekörper handelt es sich um eine Verbunddeckenplatte, die aus einem Betongurt mit Betonkerntemperierung und Stahlprofilen mit Stegöffnungen für die Gebäudetechnik besteht (Abbildung 36). Als Leitung der Betonkerntemperierung wird der Typ Rautherm S der Firma Rehau in der Größe 20 x 2 mm verwendet. Die Rohre besitzen eine Manteldicke von 2 mm und einen Gesamtdurchmesser von 20 mm. Verlegt werden sie schlaufenartig in einem Abstand von 15 cm.

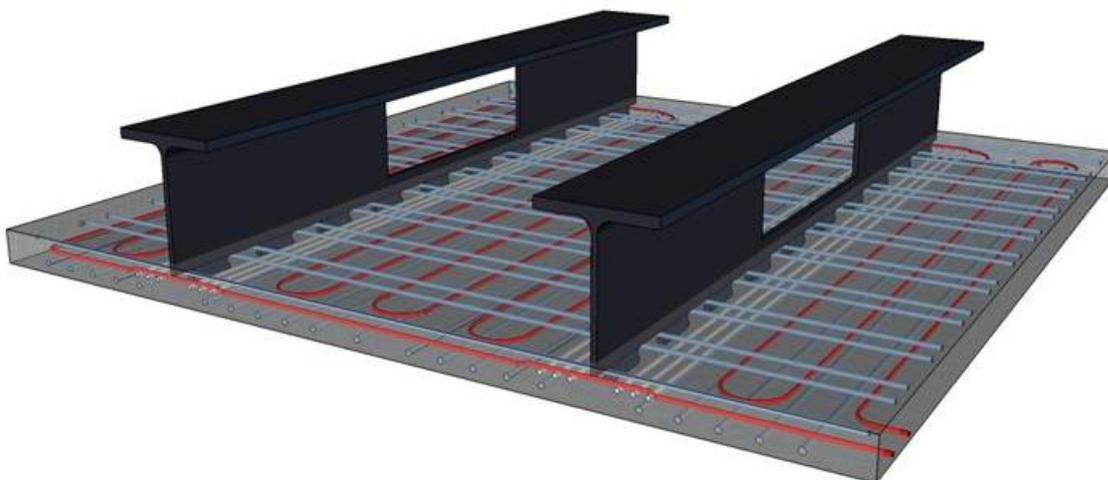
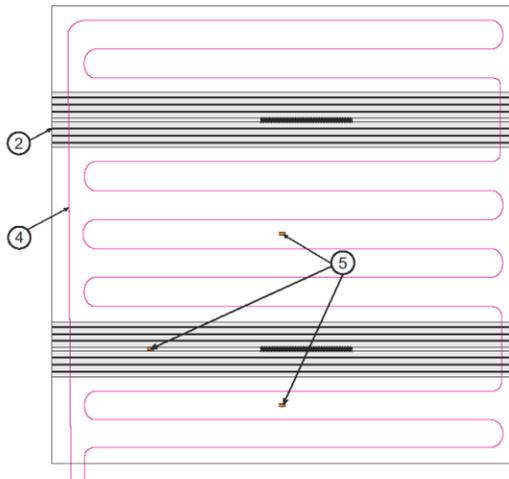


Abbildung 35: 3D-Zeichnung des Probekörpers zur Validierung der Temperaturgleichungen

Betonkerntemperierung (Var. A)



Legende:

- Position 1: In jede Puzzeausnehmung werden 2 Stück Stabstahl d12 eingelegt. Das bedeutet 2x d12 alle 25 cm
- Position 2: Beidseitig des Steges werden in die Platte jeweils auf einer Breite von 15 cm Spannlitzen St 1570/1770, 0,5" (d=1,25cm) eingelegt. Vorspannung muss **nicht** aufgebracht werden.
- Position 3: Schlaffstahlbewehrung 20 Stäbe d16
- Position 4: RAUTHERM S 20x2 mm schlaufenartig in einem Abstand von 15 cm verlegt
- Position 5: Temperaturfühler Pt100

Querschnitt auf Höhe der Stegöffnungen (Var A)

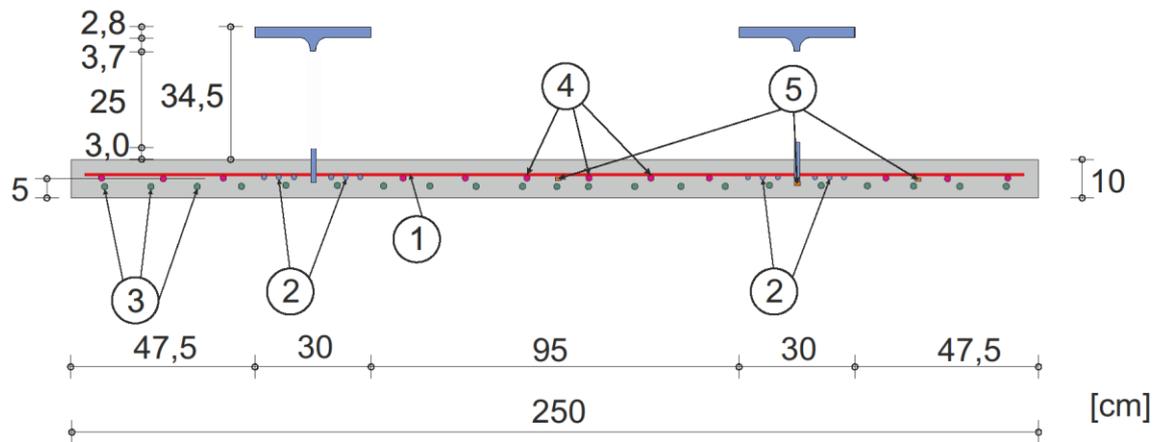


Abbildung 36: Probekörper zur Validierung der Temperaturgleichungen

Es wurden folgende Randbedingungen gewählt:

Das Erwärmen des Prüfraums erfolgte über elektrisch beheizte Kühllast-Simulatoren, die auf dem Fußboden im Prüfraum angeordnet waren. Die Erwärmung des Prüfraumes führte nach ca. 72 Stunden zu einer verharrenden Temperaturverteilung über den gesamten Prüfstand („Steady State“). Während des Aufheizvorgangs wurde die Decke nicht aktiv temperiert. Die Temperaturmessungen an den Oberflächen der Decke ergaben Werte von ca.

- $T_{oben} = 34^{\circ}C$
- $T_{unten} = 38,5^{\circ}C$

Nach „Einschwingen“ der Decke wurde mit der aktiven Temperierung begonnen, wobei sowohl Vorlauf- als auch Rücklauftemperatur gemessen wurden:

- $T_{Vorlauf} = 12^{\circ}C$
- $v = 350 \text{ l/h}$

Die Messungen am Temperierungssystem des Deckenprüfstandes ergaben folgende Werte für den Volumenstrom (Abbildung 37) sowie für Vorlauf- und Rücklauftemperatur (Abbildung 38):

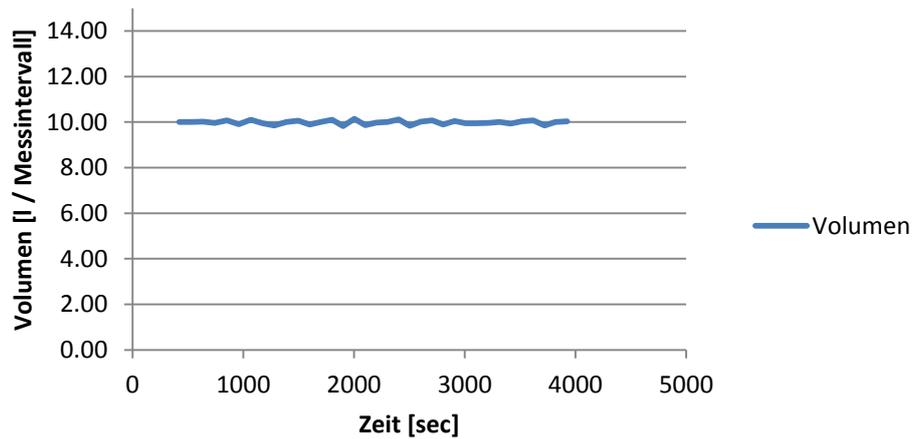


Abbildung 37: Volumenstrom Wasser über die Zeit (Messintervall: ca. 105 sec)

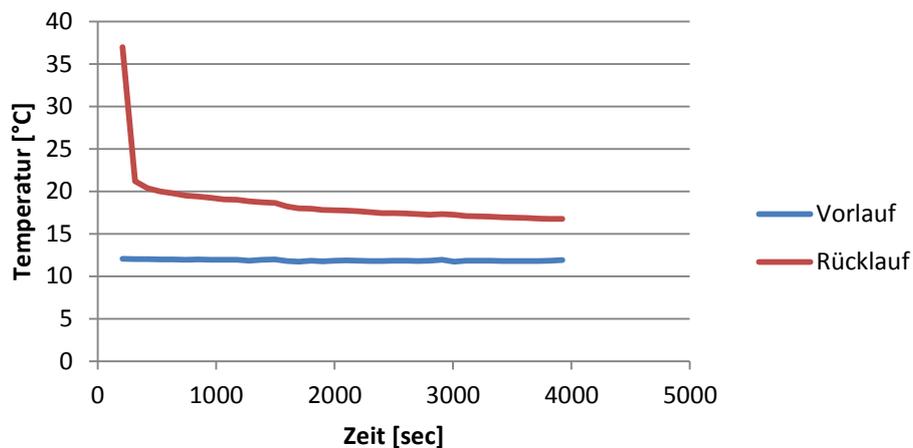


Abbildung 38: Wassertemperatur Vorlauf / Rücklauf

Anhang A.2 Handrechenergebnisse, basierend auf FE-Untersuchungen

Mit Hilfe der FEM wurde ein Segmentmodell der Deckenplatte erstellt und mit folgenden Randbedingungen beaufschlagt:

- $T_{oben} = 34^{\circ}C$
- $T_{unten} = 38,5^{\circ}C$
- $T_{Wasser,1} = 10^{\circ}C$
- $T_{Wasser,2} = 25^{\circ}C$

Der Wärmeübergangskoeffizient (Wasser - Rohrwandung) wurde basierend auf der Wassertemperatur, dem hydraulischen Durchmesser des Rohres sowie der Fließgeschwindigkeit nach Kapitel 4.3 bestimmt zu:

$$a_K = 1500 \text{ W/m}^2\text{K}$$

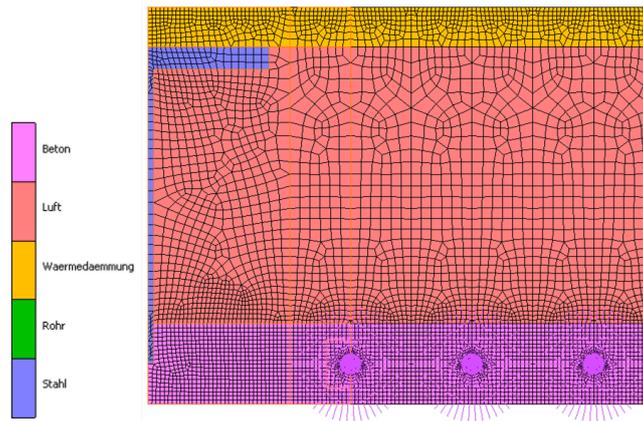


Abbildung 39: FE-Modell mit Randbedingung „Wassertemperatur“

Folgende Wärmeströme wurden im eingeschwungenen Zustand ausgelesen:

- $\Theta_{steady} (T_{Wasser} = 10^{\circ}C) = -0,03523808 [W/mm]$
- $\Theta_{steady} (T_{Wasser} = 25^{\circ}C) = -0,01661222 [W/mm]$

Darauf basierend ergibt sich die Temperaturgleichung für den eingeschwungenen Zustand („Steady State“) zu:

$$T_W(x) = e^{-\frac{a}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot x} \cdot \frac{(b + a \cdot T_0) - b}{a}$$

mit

- $a = 0,0012417$
- $b = -0,0476553$
- $v = 460 [mm/s]$
- $s A_W = 0,8424 [Ws/mmK]$

Im vorliegenden Fall liefert dies (für $T_0 = 10^{\circ}C$):

$$T_W(x) = 28,3784 \cdot e^{-3,20423 \cdot 10^{-6} \cdot x} + 38,378$$

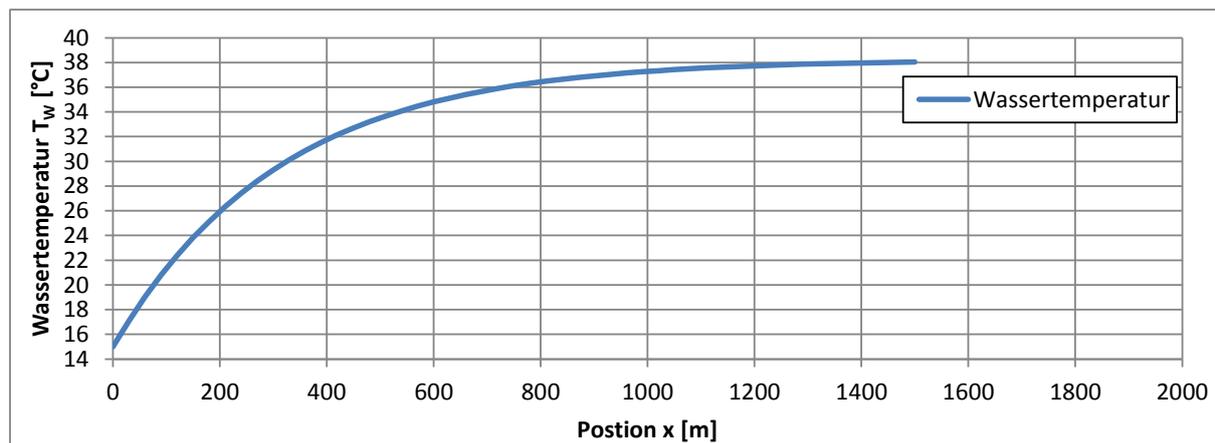


Abbildung 40: Temperaturzunahme im Rohr über die Rohrlänge

Folgende Wärmeströme wurden im Rahmen der transienten Analyse ausgelesen:

- $\Theta_{steady} (T_{Wasser} = 10^{\circ}C) = -0,05131558 [W/mm]$ ($t = 192.000 \text{ sec}$) (je Rohr)
 - $\Theta_{steady} (T_{Wasser} = 25^{\circ}C) = -0,02416221 [W/mm]$ ($t = 192.000 \text{ sec}$) (je Rohr)
 - $\Theta_{steady} (T_{Wasser} = 10^{\circ}C) = x,xxxxxxx [W/mm]$ ($t = 0..39.600$) (je Rohr)
- (Abbildung 41)

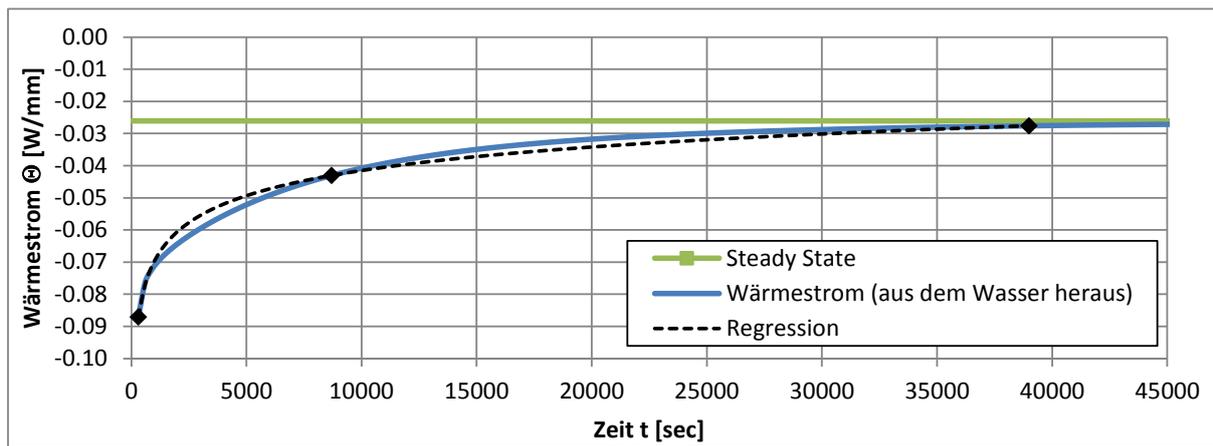


Abbildung 41 : Wärmestrom „Transient“ über die Zeit t (FE, $T_{\text{Wasser}} = 10^\circ\text{C}$), Regressionsgerade

Die Wärmestromgerade (Abbildung 41) wird durch folgende Gleichung angenähert:

$$\theta_{T_0}(t) = n \cdot t^m + p$$

mit:

$$\begin{aligned} m &= -0,027214746 \\ n &= -1,328966802 \\ p &= 0,978393052 \end{aligned}$$

wobei der Zeitraum zwischen $T = 300 \text{ sec}$ und $T = 10.200 \text{ sec}$ berücksichtigt wird (Abbildung 41).

Daraus ergibt sich die Temperaturgleichung zu:

$$T_W(x, t) = e^{-\frac{a(t)}{A_W \cdot v \cdot s} \cdot x} \cdot \frac{(r(t) - T_0 \cdot a(t)) + r(t)}{a(t)}$$

mit

$$\begin{aligned} m &= -0,027214746 \\ n &= -1,328966802 \\ p &= 0,978393052 \\ s A_W &= 0,8424 [\text{Ws/mmK}] \end{aligned}$$

Beispielhafte Wassertemperaturen sind in Abbildung 42 über die Rohrlänge aufgetragen.

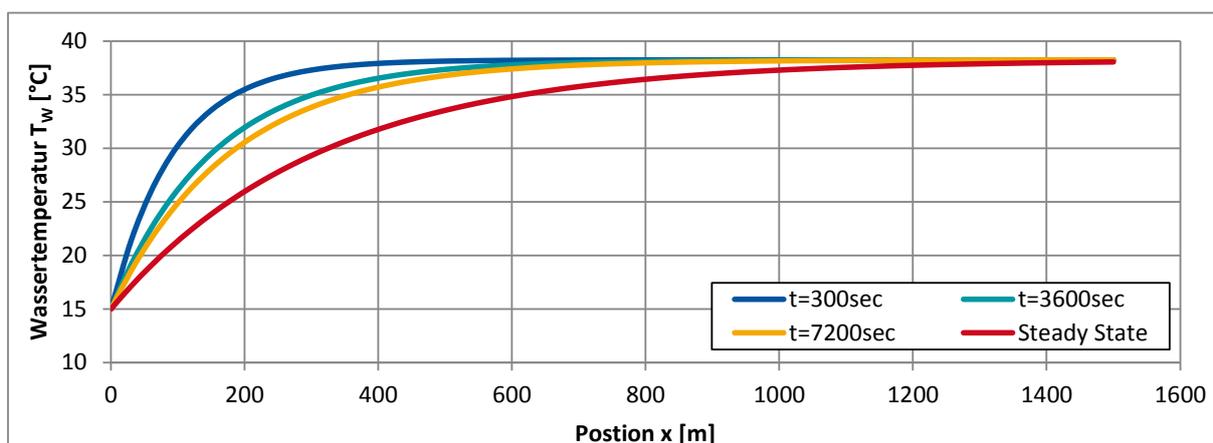


Abbildung 42 : Temperaturabfall zu unterschiedlichen Zeitpunkten T , $\alpha = 1500$

Der Vergleich der so ermittelten Rücklauftemperaturen mit den gemessenen Rücklauftemperaturen ist in Abbildung 43 über die Zeit aufgetragen.

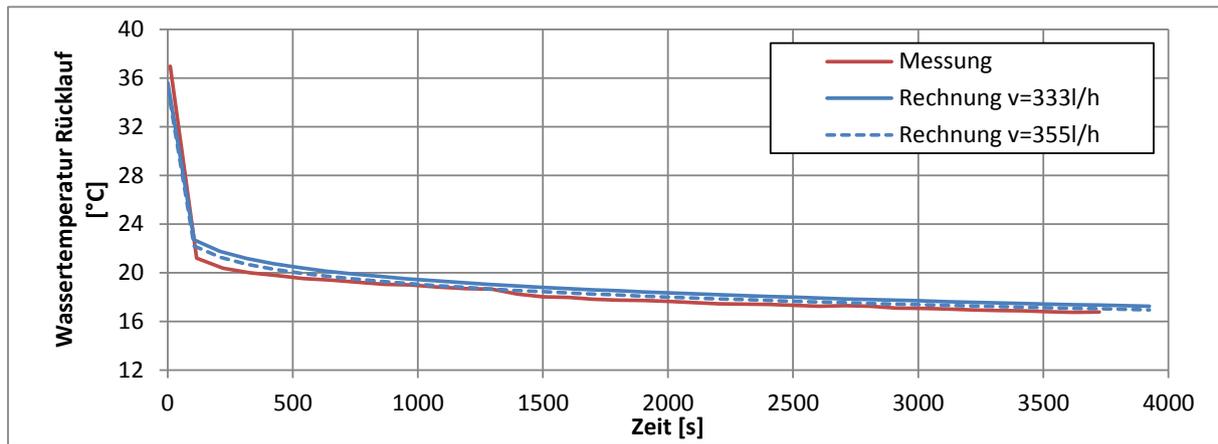


Abbildung 43 : Vergleich der Rücklauftemperatur (Messwerte / berechnete Werte)

Anhang B Vorbemessungstafeln (Verbundbrücke)

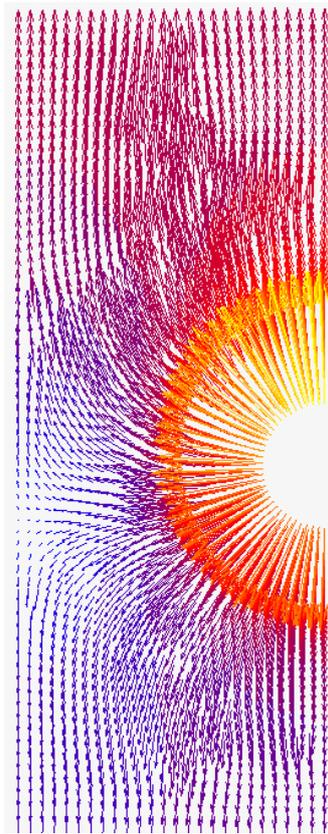


Abbildung 44 : Wärmestrom „Verbundbrücke“

Tabelle 9: Materialparameter FE „Verbundbrücke“

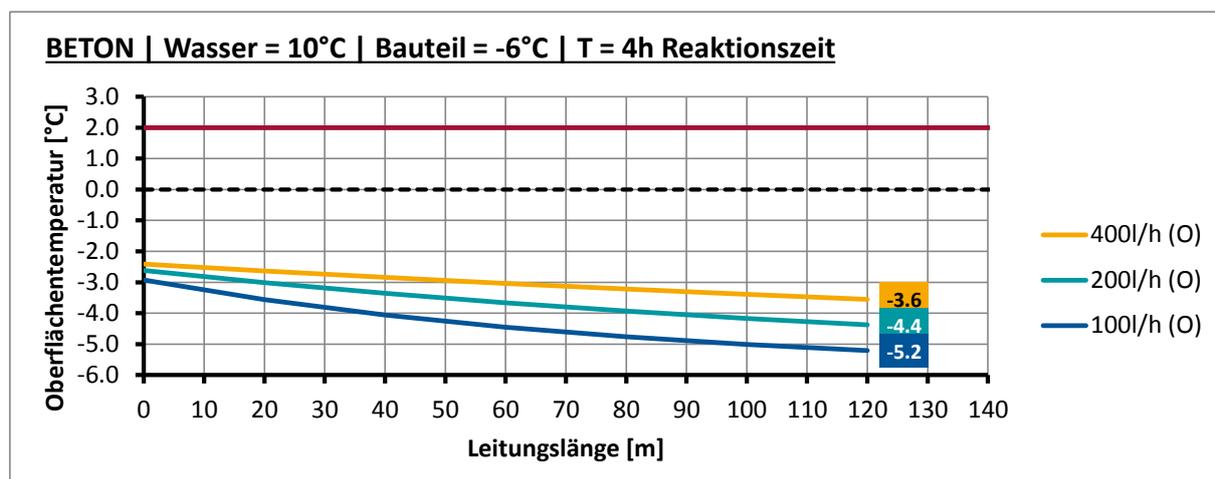
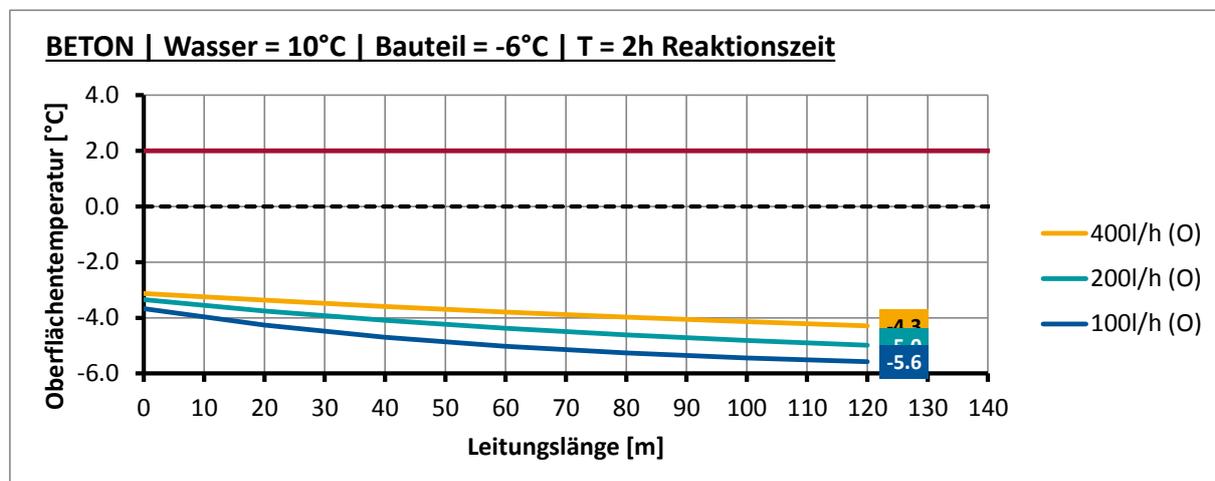
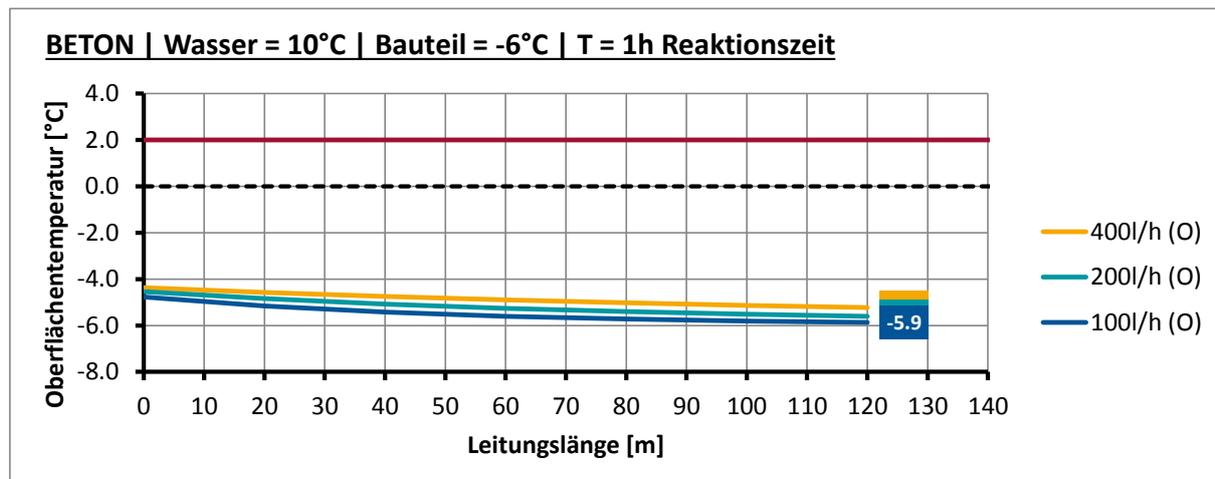
Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spezifische Wärmekapazität c [J/(kg K)]	Dichte ρ [kg/m ³]
Beton	2,5	1.000	2.500
Rohr	0,35	900	800
Gussasphalt	0,7	1.000	2.100

Die Oberflächentemperatur $T_o(T,x)$ wurde basierend auf der Wassertemperatur im Rohr $T_w(T,x)$ ermittelt (vgl. Kapitel 3.8). Hierzu wurden die Stellen ($x=0m, 20m, 40m, 60m, 80m, 100m, 120m$) ausgewertet.

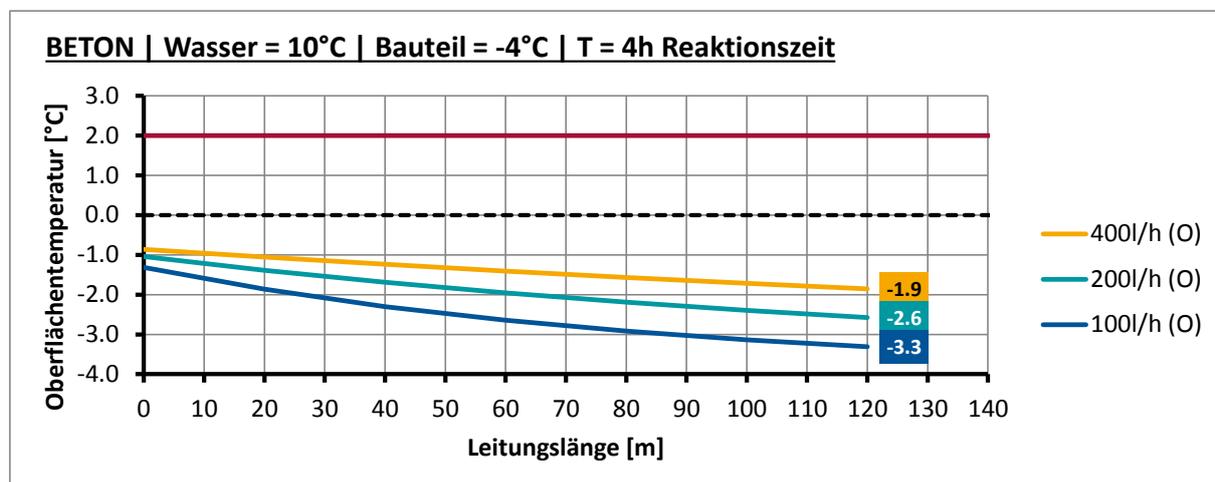
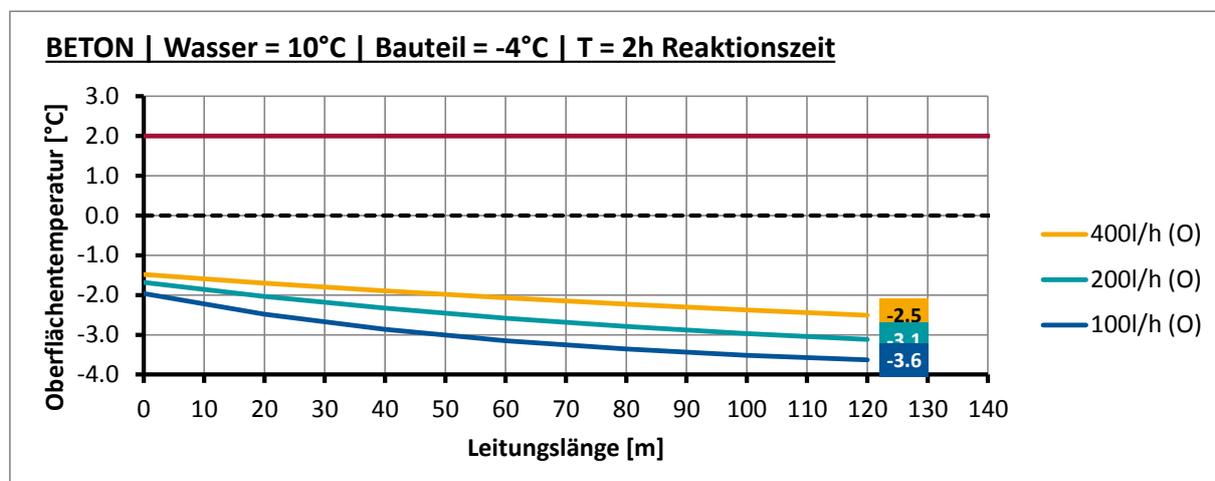
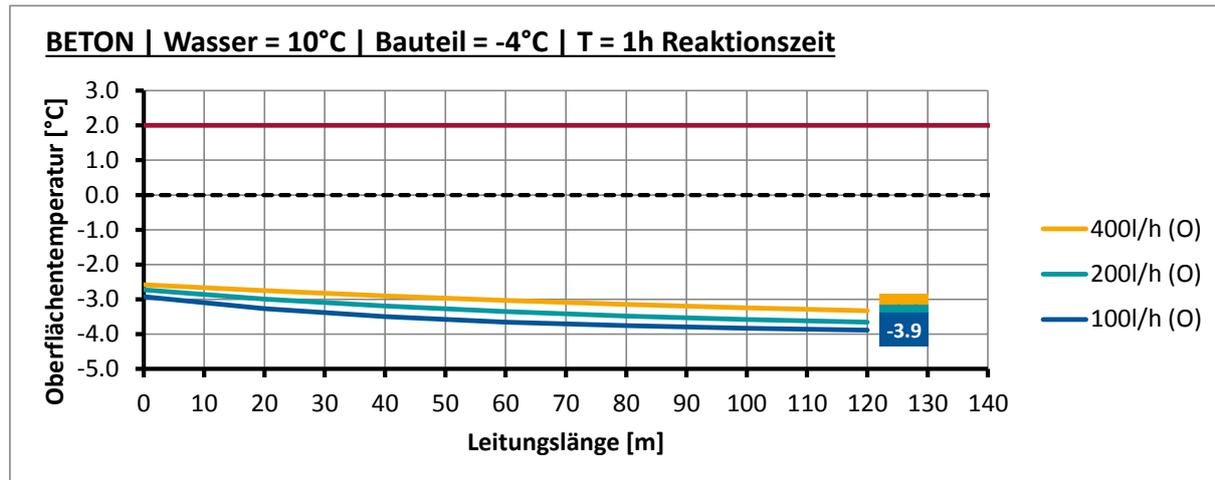
Den Berechnungen liegt der in Kapitel 3.2 beschriebene Fahrbahnaufbau zu Grunde. Die Berechnungen gelten lediglich für die in Tabelle 9 aufgeführten Materialien bzw. Materialparameter. Hier sei darauf hingewiesen, dass insbesondere eine Änderung des Asphalts zu anderen Ergebnissen führen wird. Es ist davon auszugehen, dass ein konventioneller Asphalt (welcher aufgrund der Porosität eine geringere Wärmeleitfähigkeit aufweist) die Funktionsweise des Temperierungssystems negativ beeinflussen wird.

Anhang B.1 Verbundbrücke, $T_w=10^\circ\text{C}$

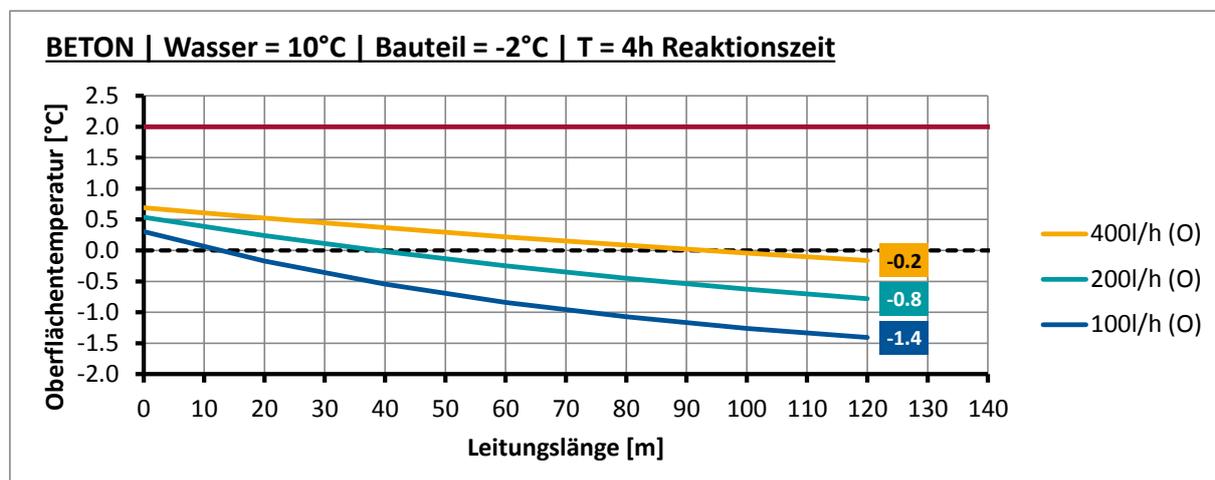
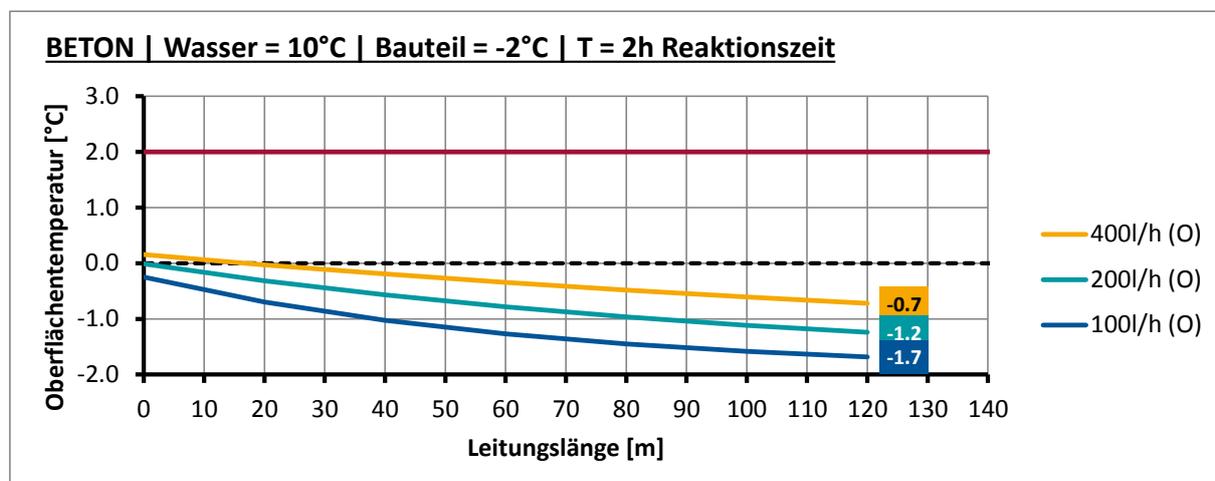
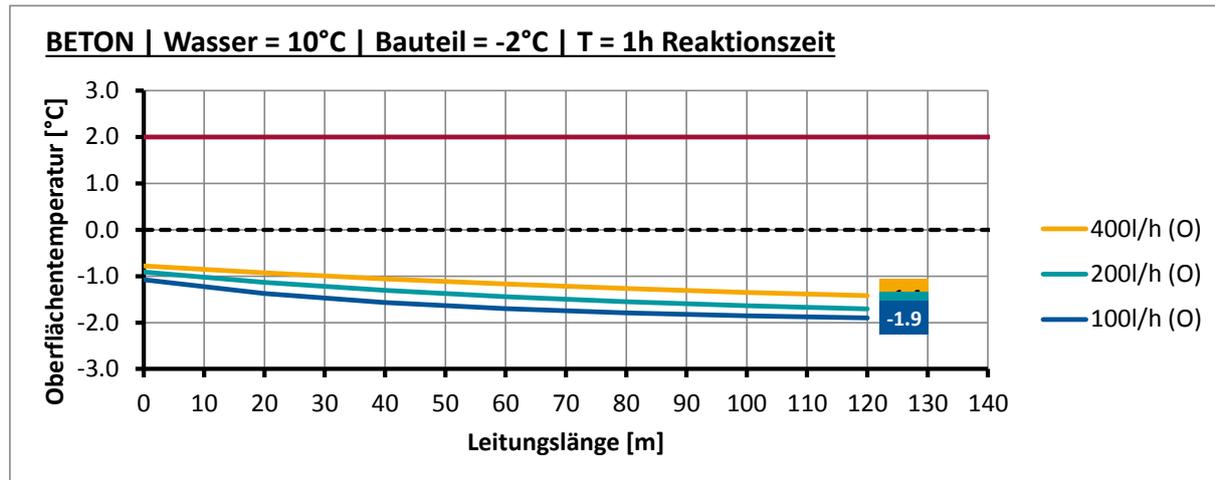
Anhang B.1.1 Verbundbrücke, $T_w=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-6^\circ\text{C}$



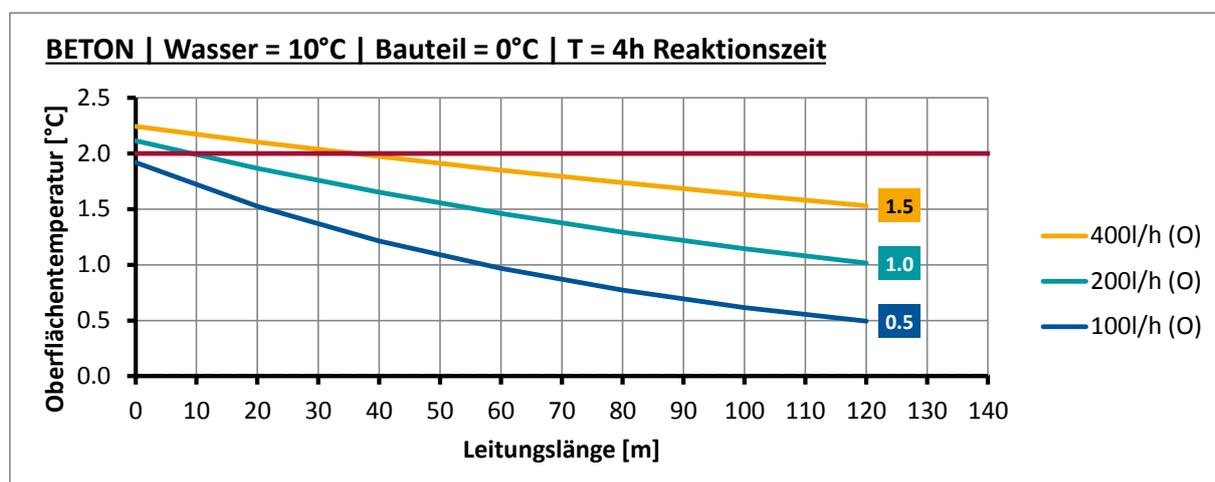
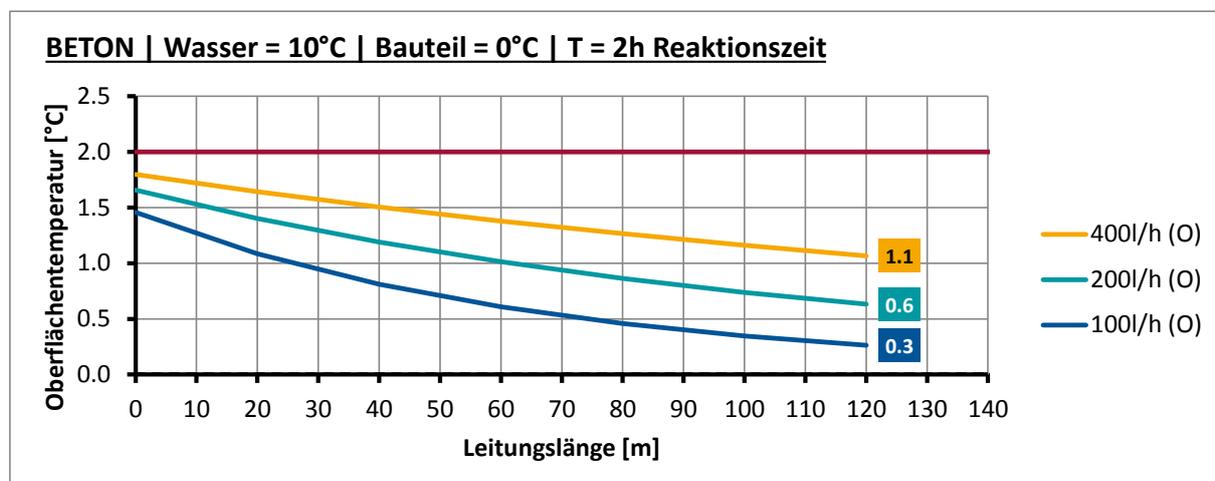
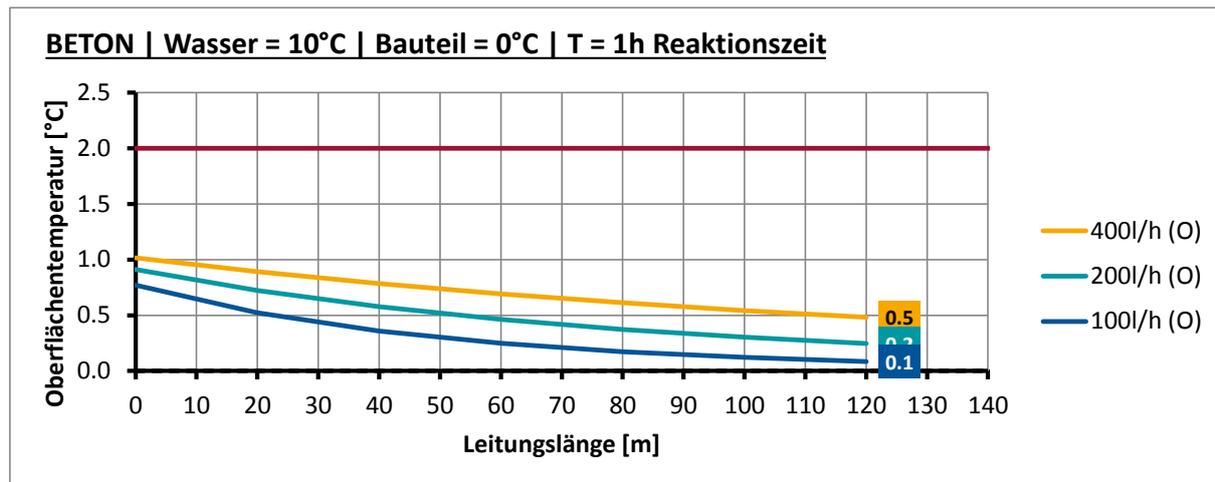
Anhang B.1.2 Verbundbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-4^\circ\text{C}$



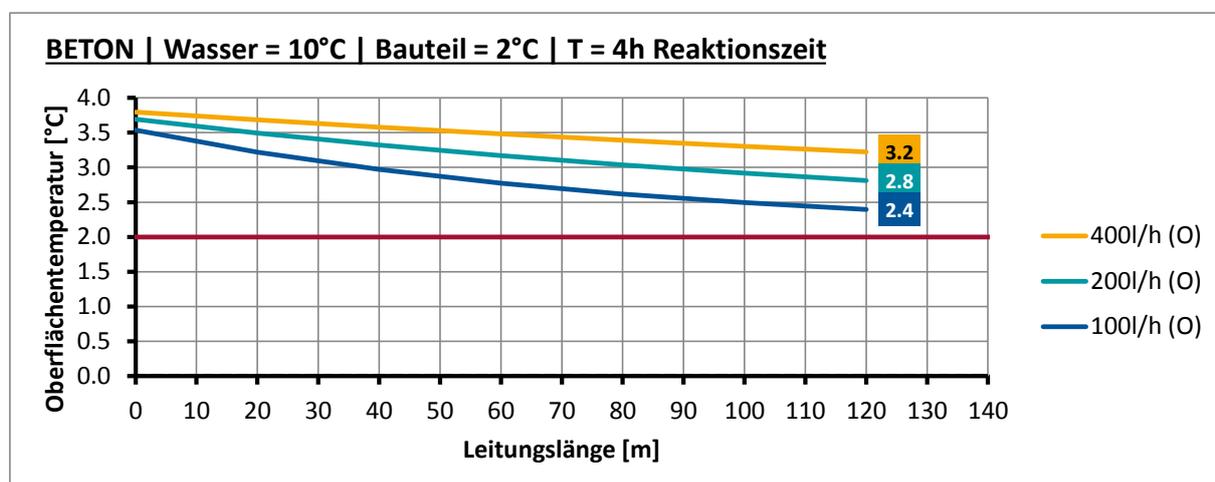
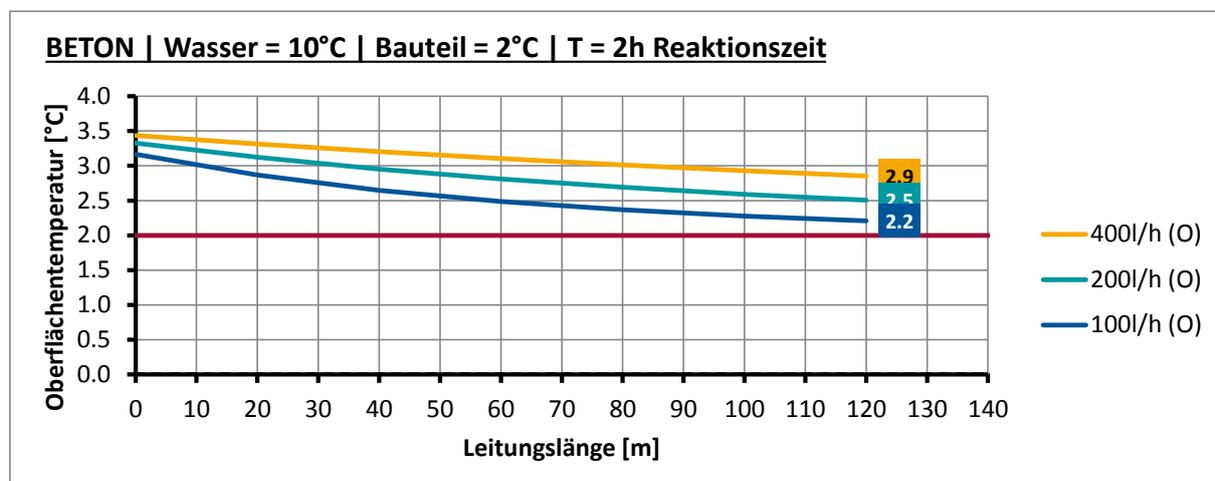
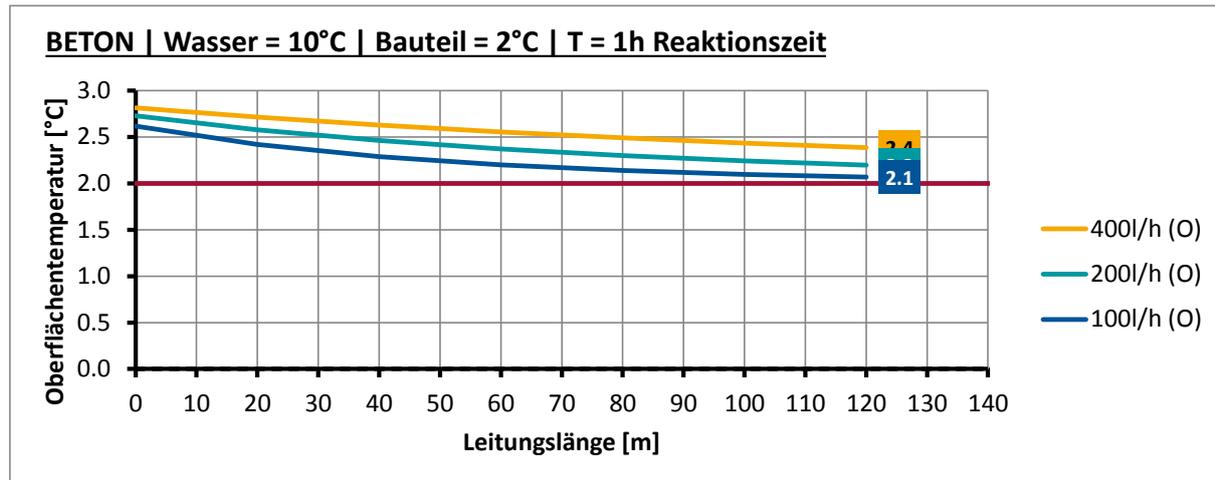
Anhang B.1.3 Verbundbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-2^\circ\text{C}$



Anhang B.1.4 Verbundbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=0^\circ\text{C}$

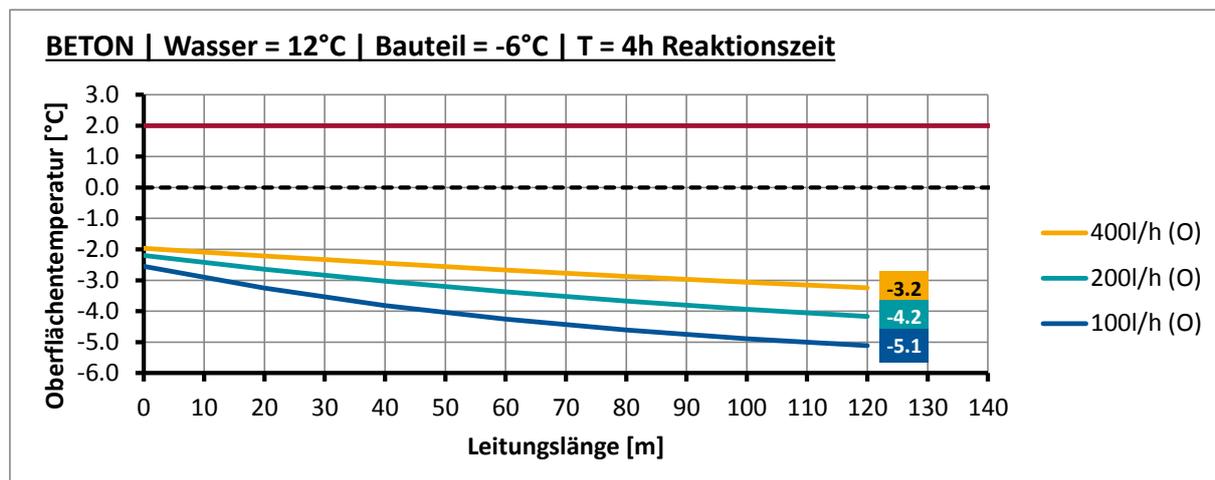
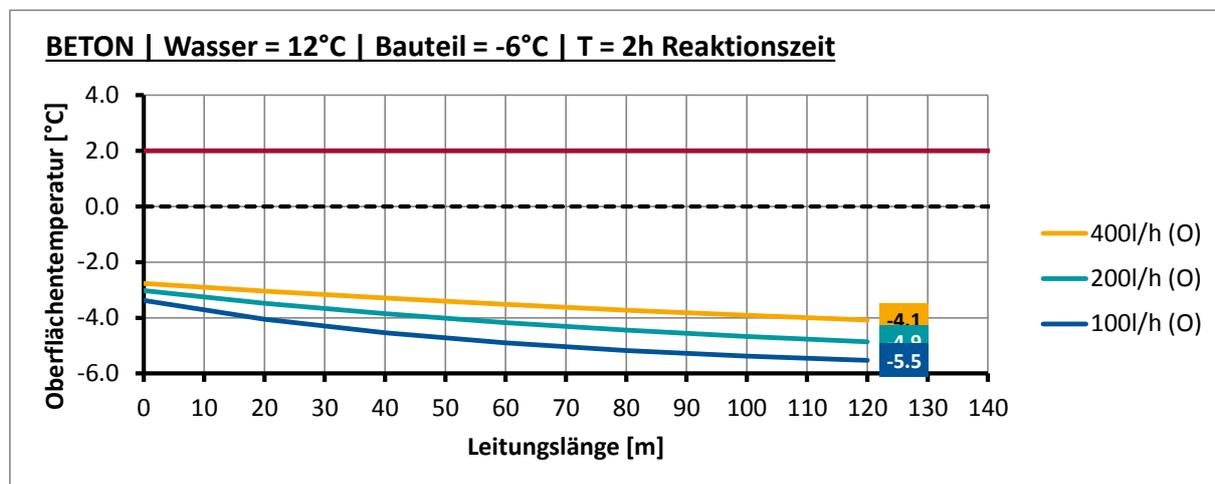
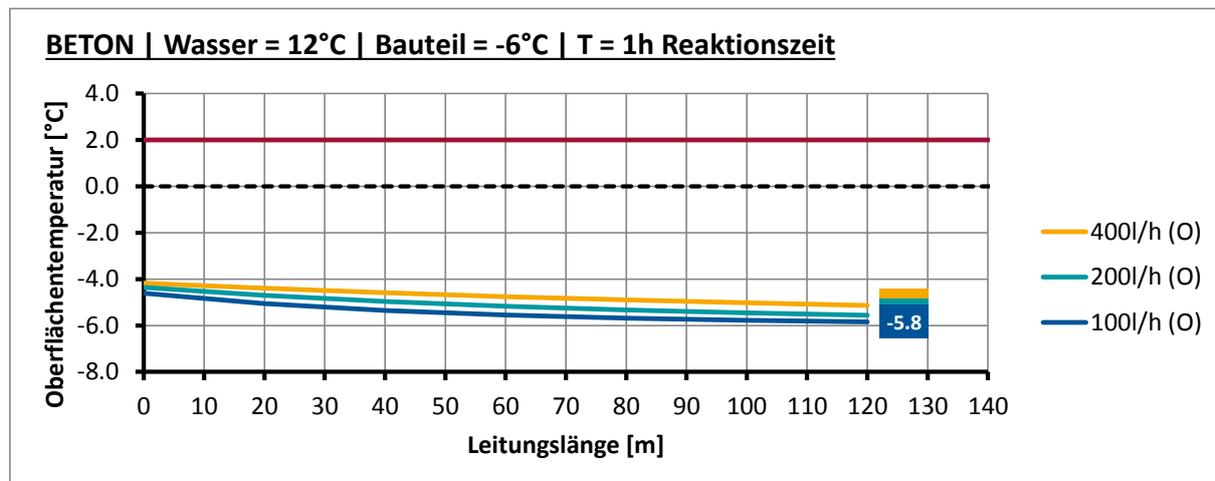


Anhang B.1.5 Verbundbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=2^\circ\text{C}$

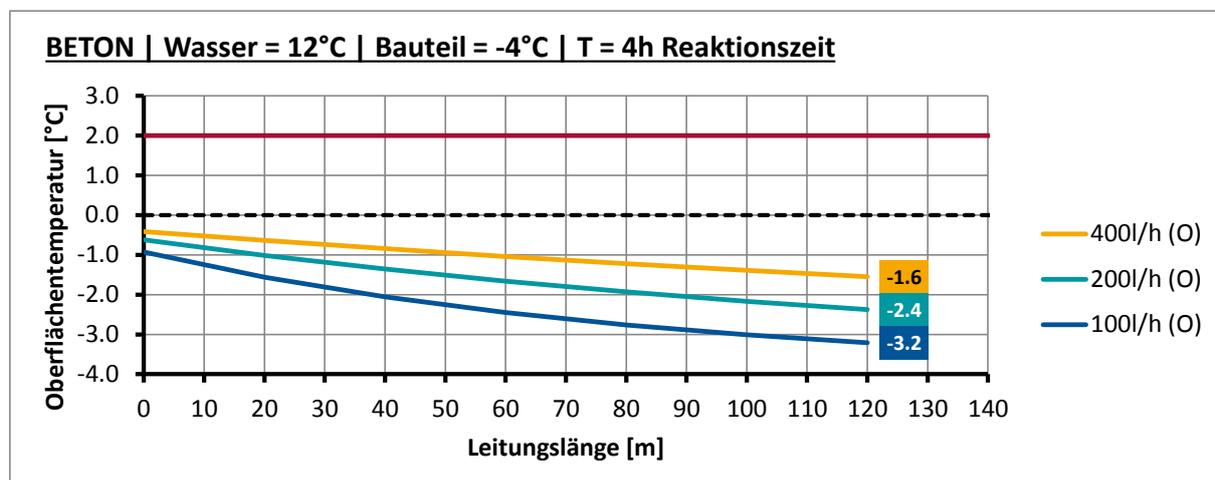
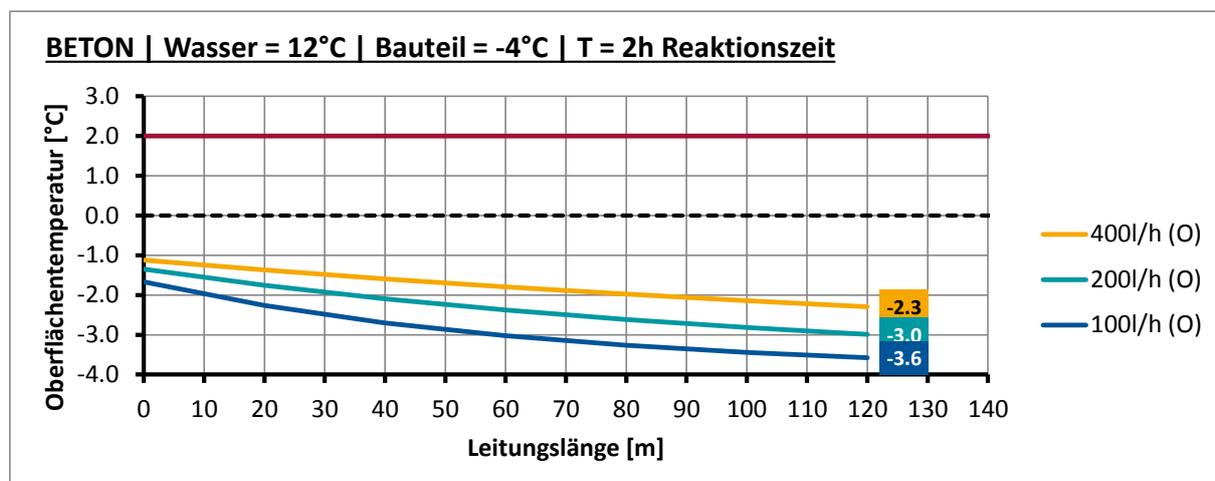
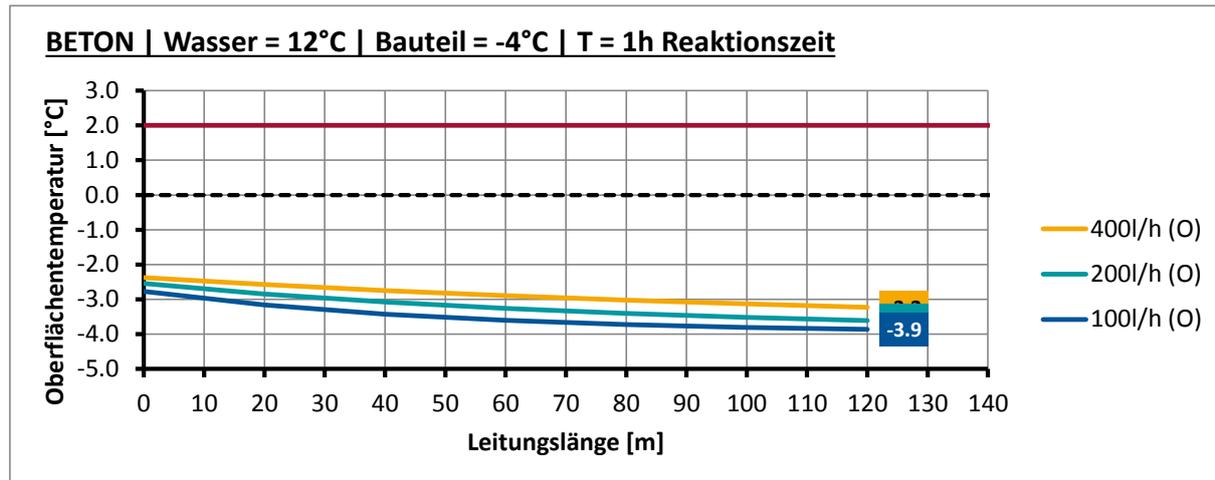


Anhang B.2 Verbundbrücke, $T_w=12^\circ\text{C}$

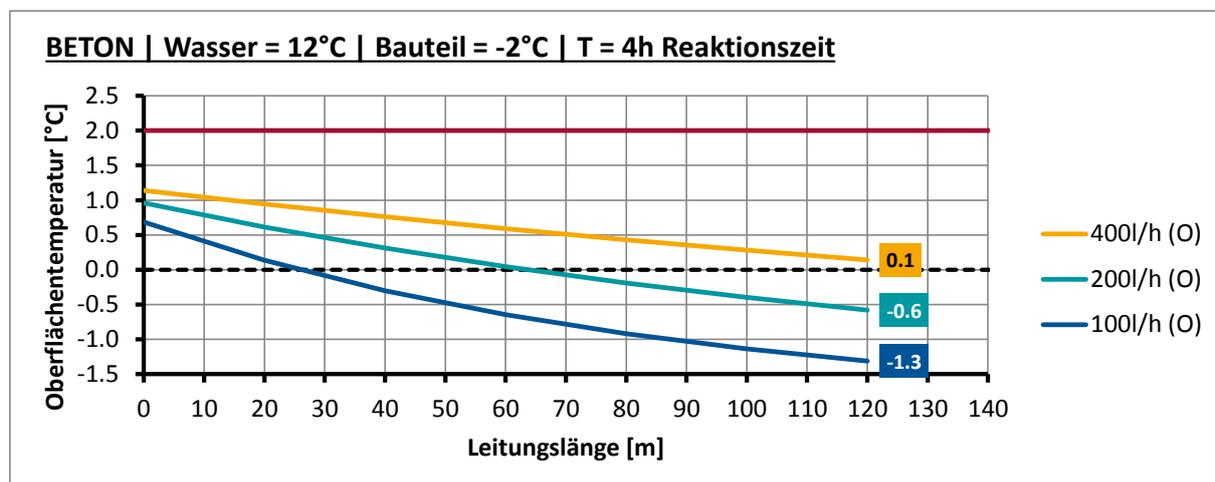
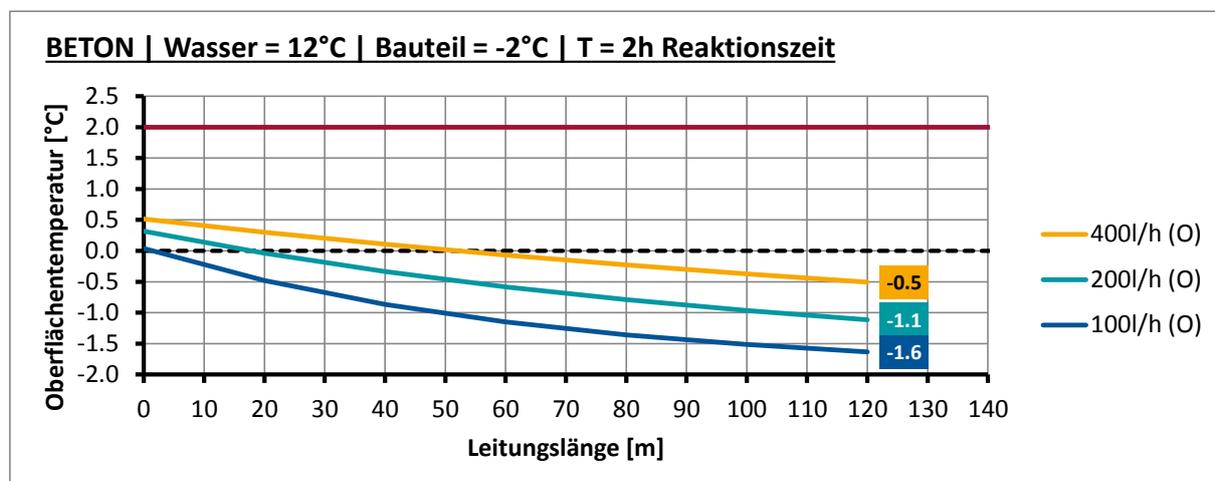
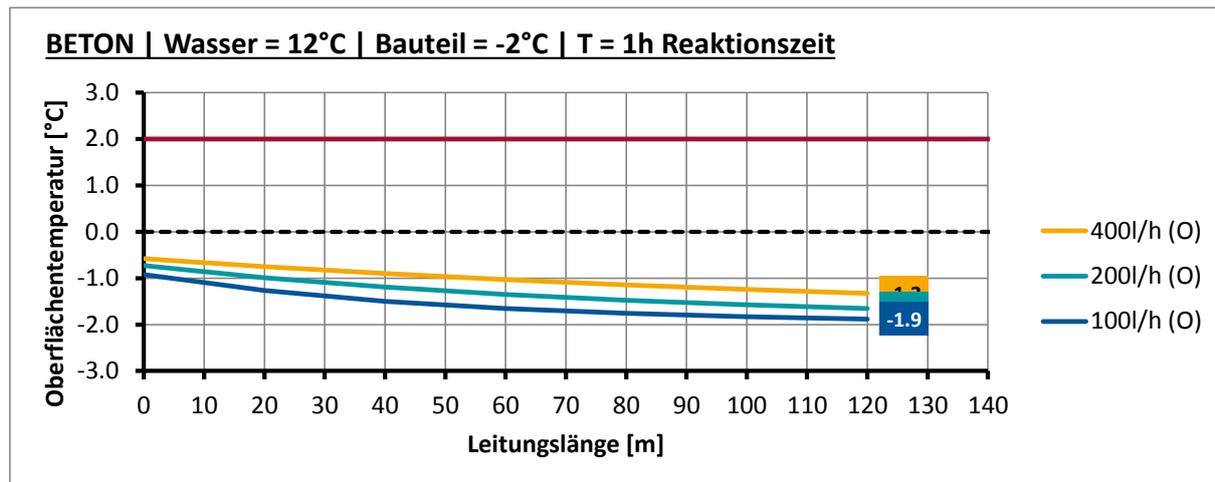
Anhang B.2.1 Verbundbrücke, $T_w=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-6^\circ\text{C}$



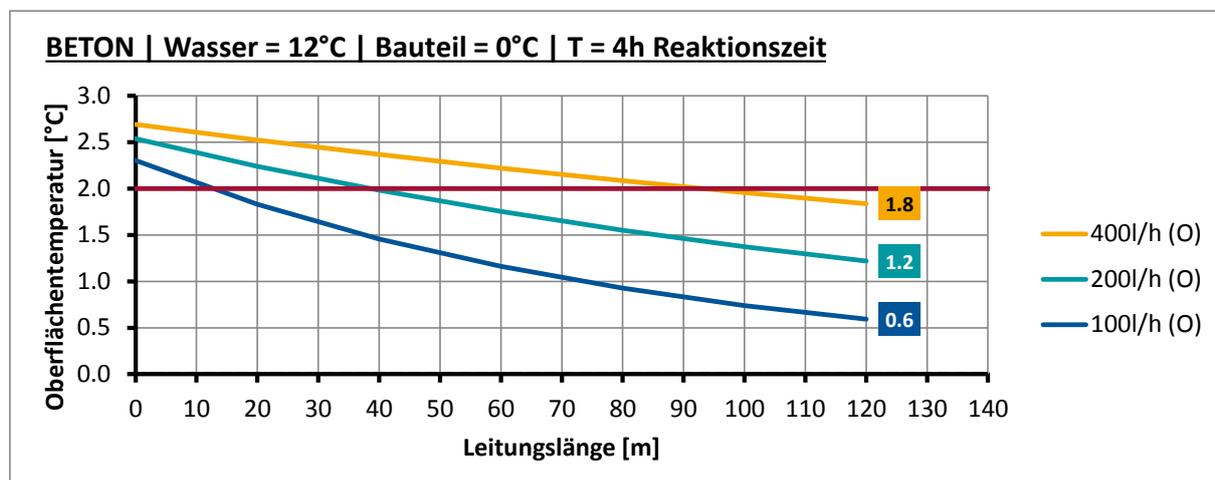
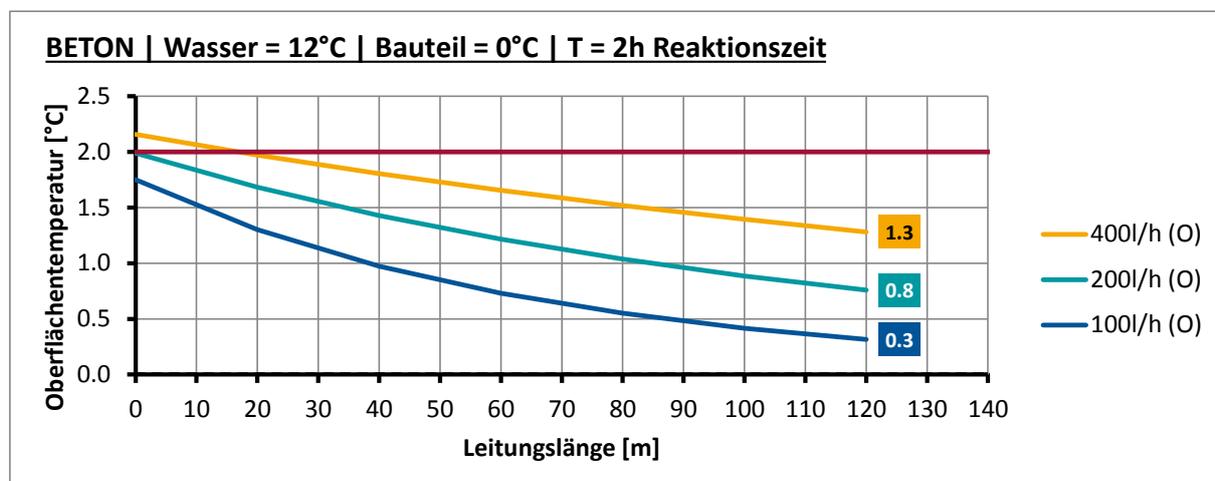
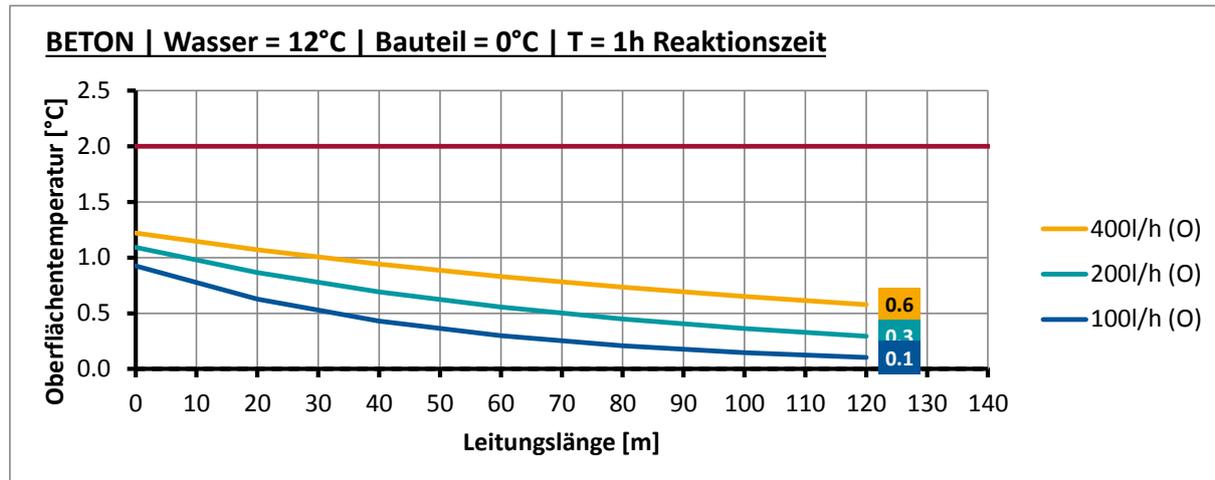
Anhang B.2.2 Verbundbrücke, $T_W=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-4^\circ\text{C}$



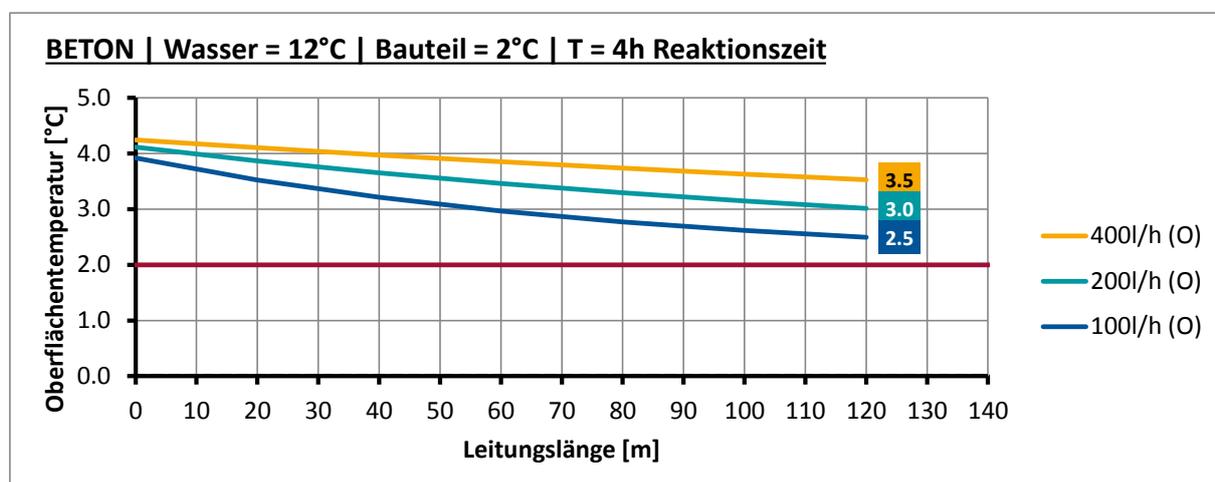
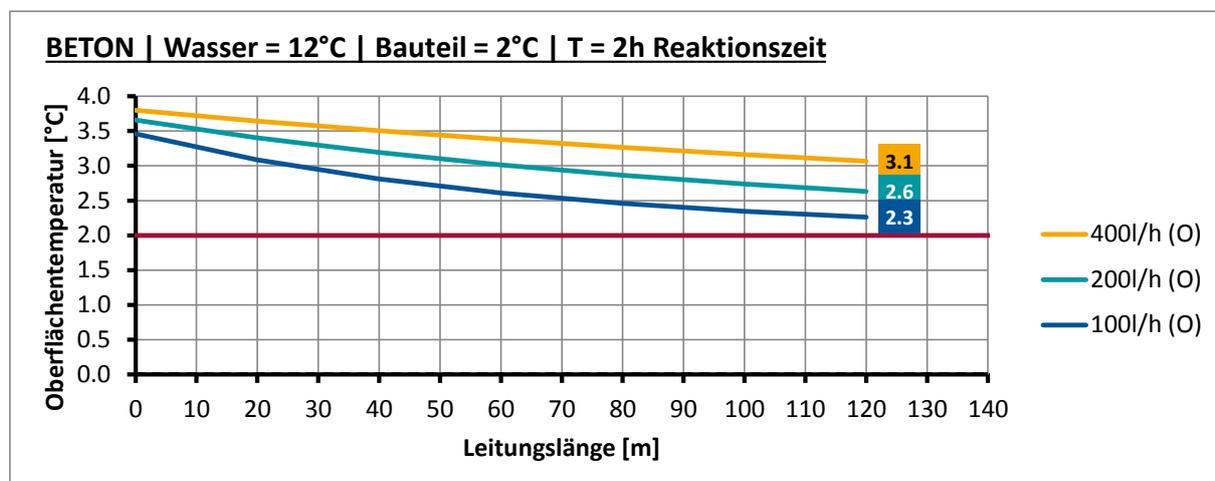
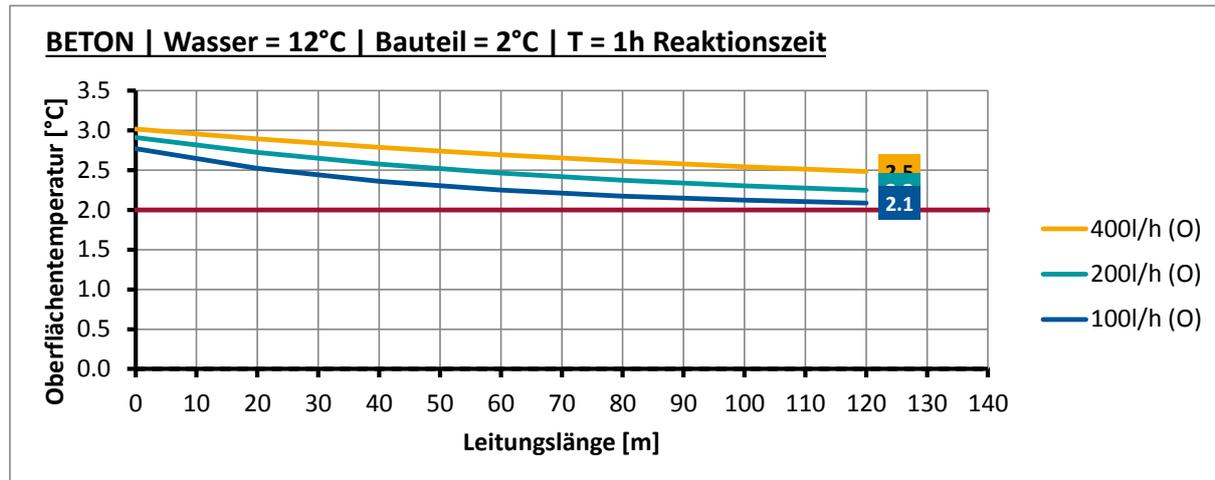
Anhang B.2.3 Verbundbrücke, $T_W=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-2^\circ\text{C}$



Anhang B.2.4 Verbundbrücke, $T_W=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=0^\circ\text{C}$

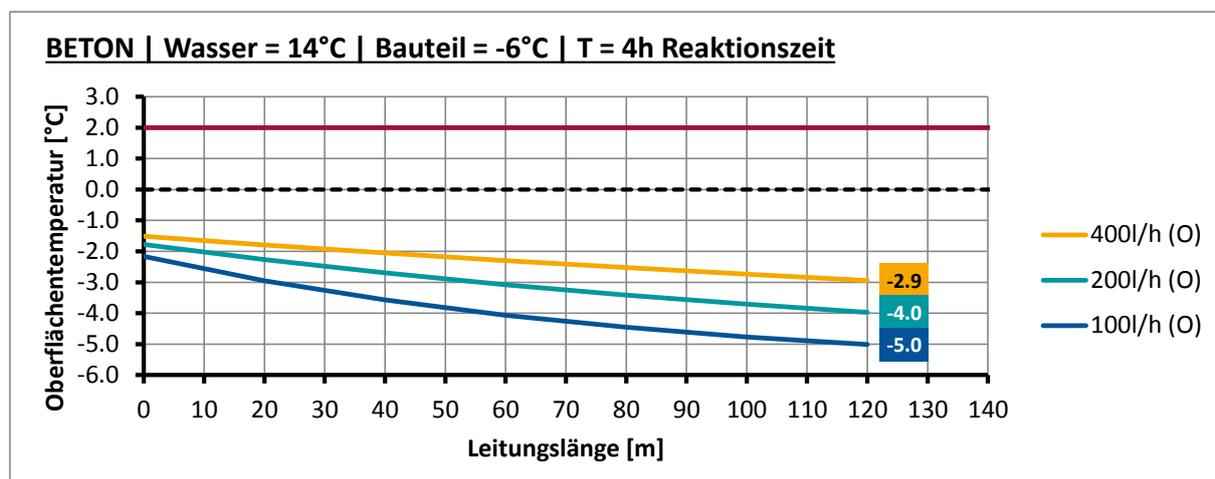
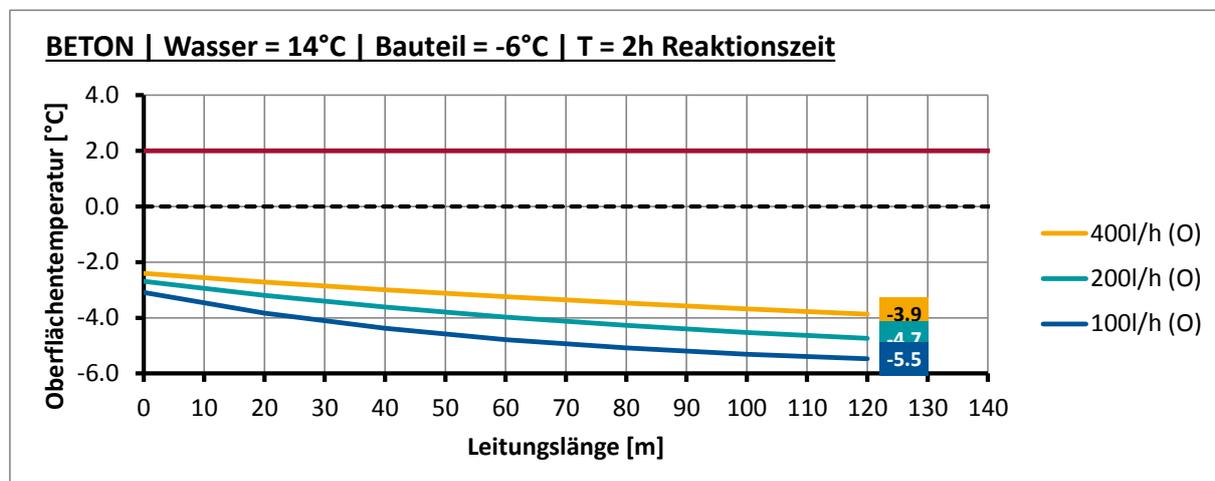
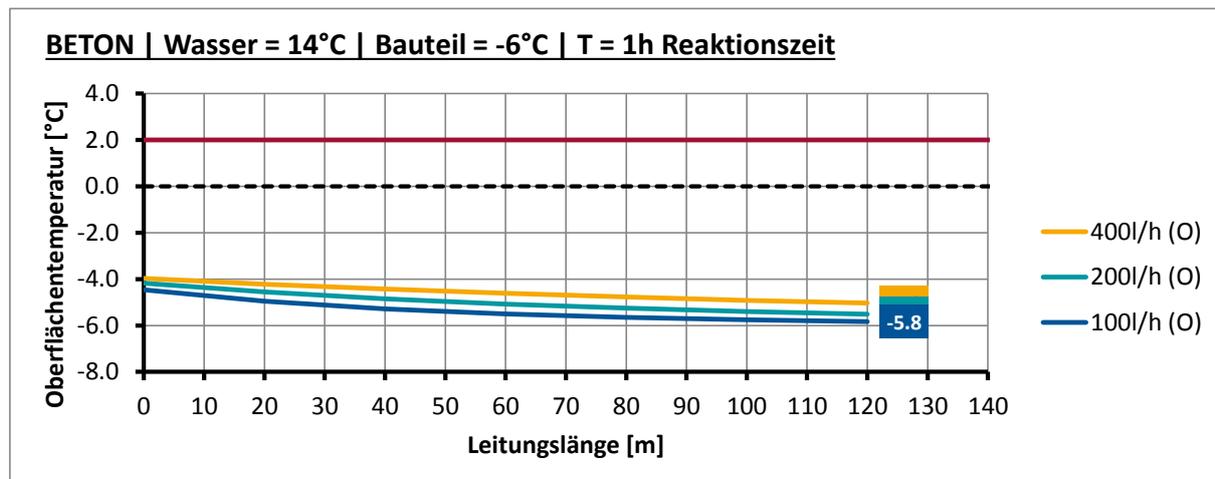


Anhang B.2.5 Verbundbrücke, $T_W=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=2^\circ\text{C}$

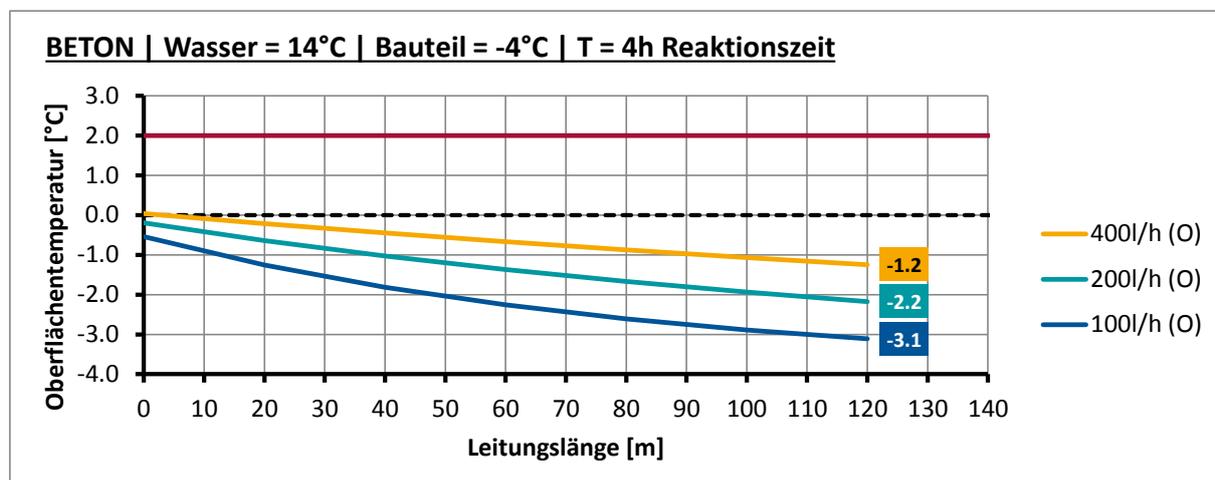
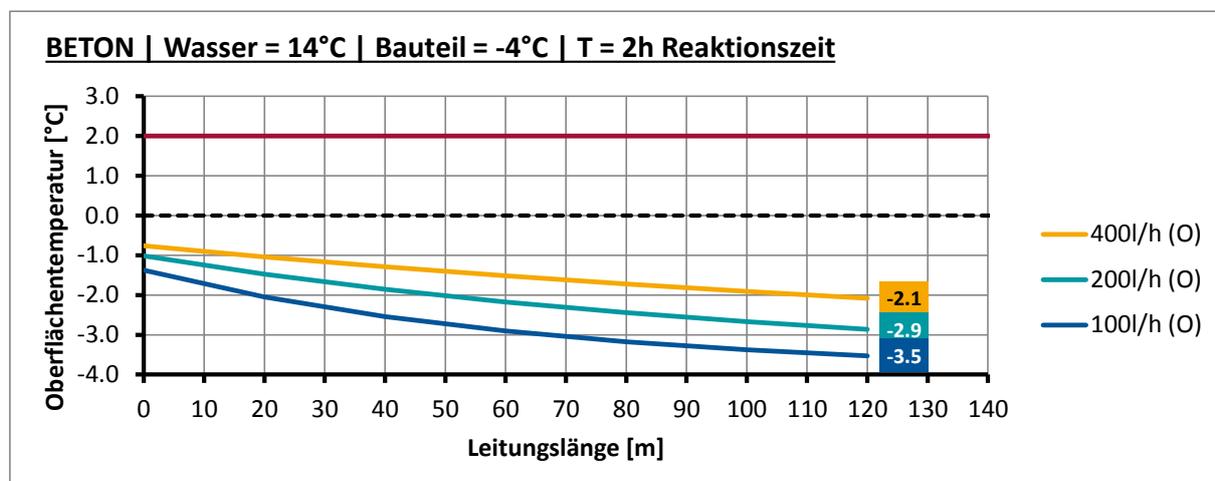
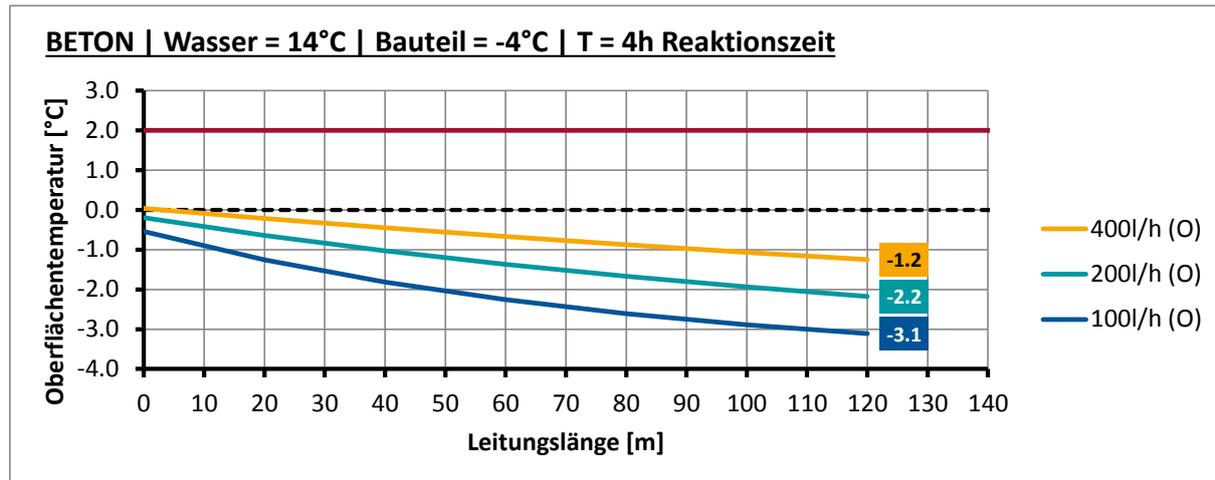


Anhang B.3 Verbundbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$

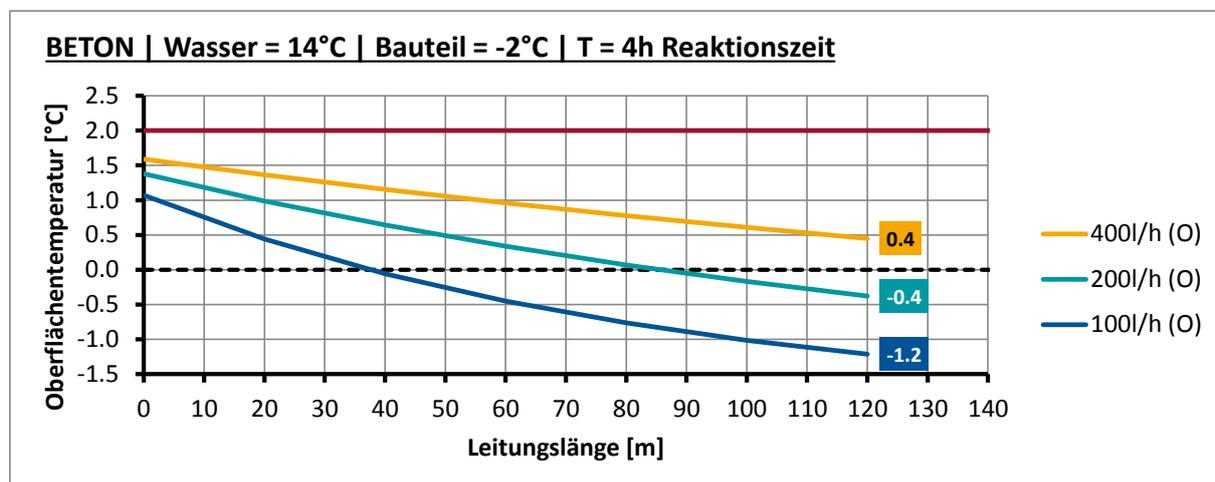
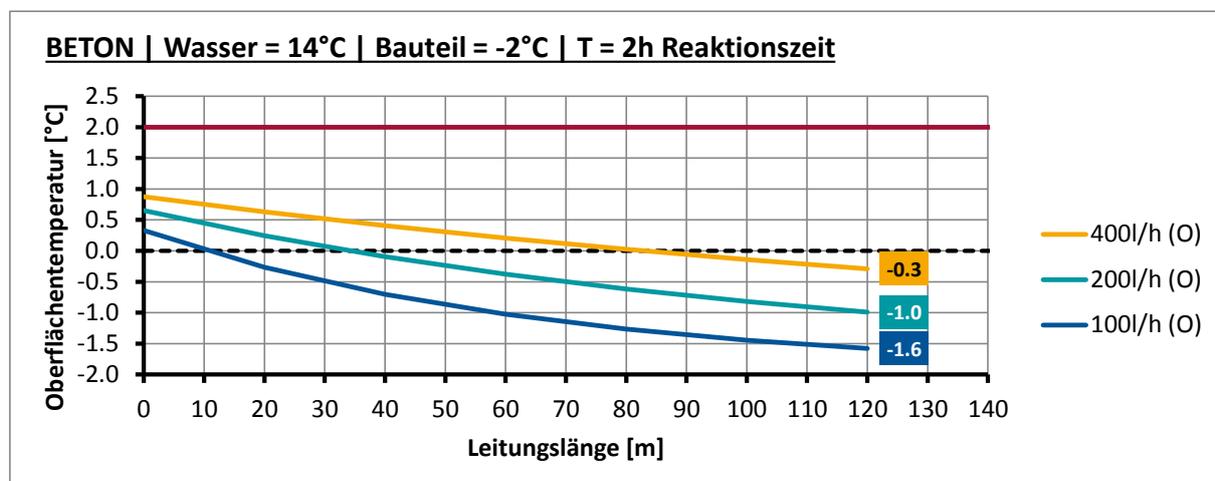
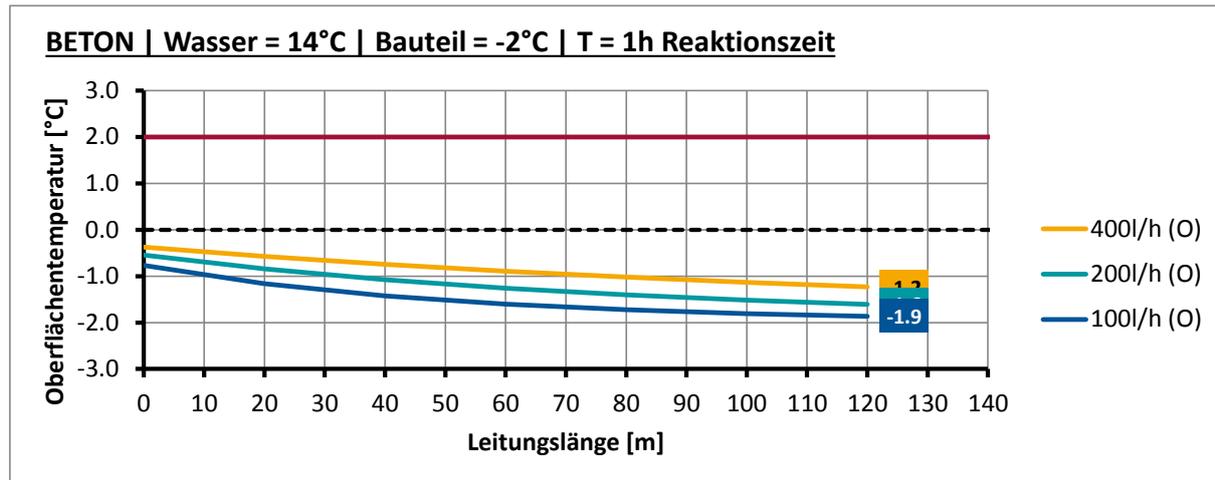
Anhang B.3.1 Verbundbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-6^\circ\text{C}$



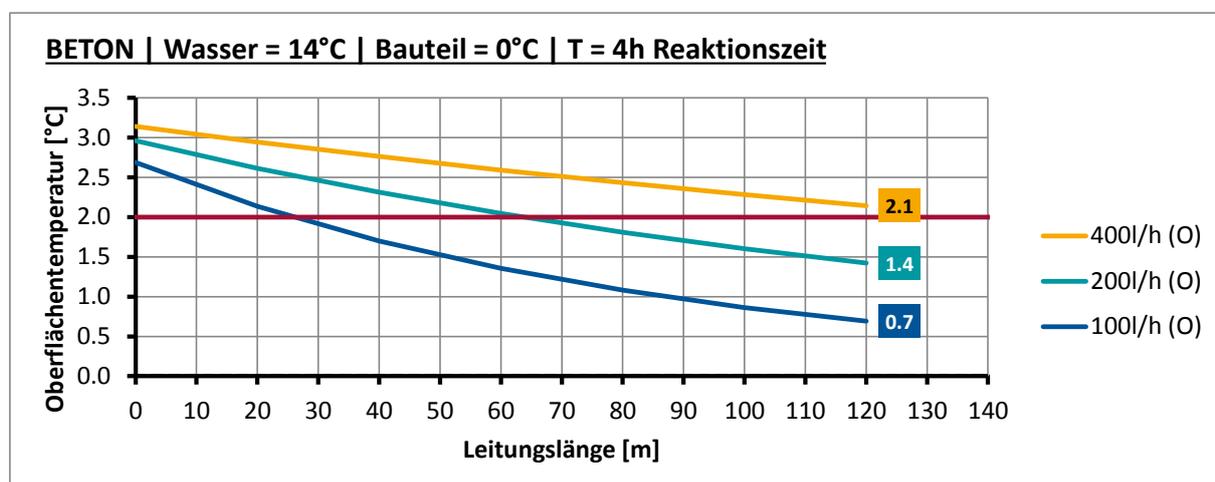
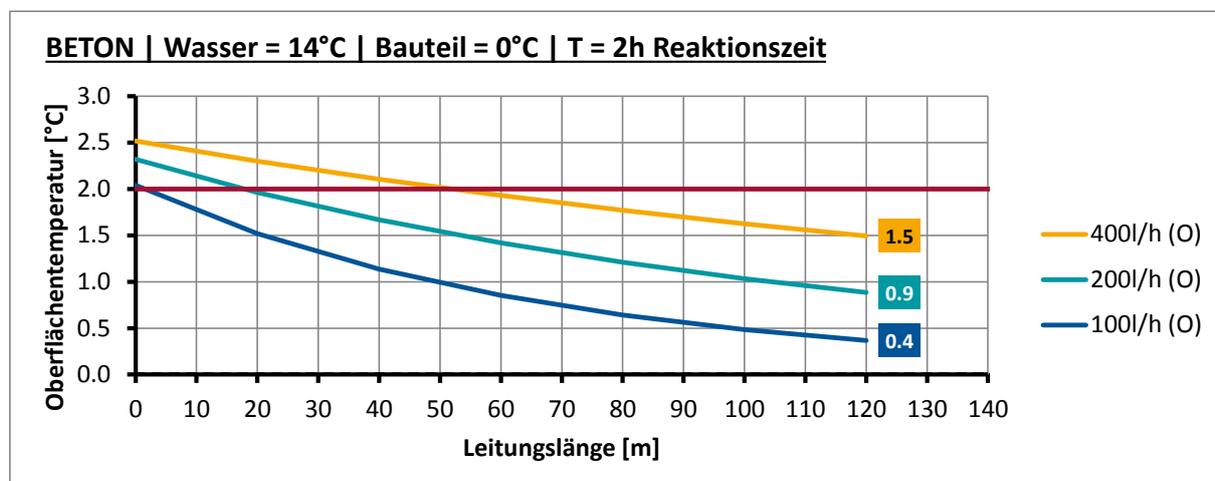
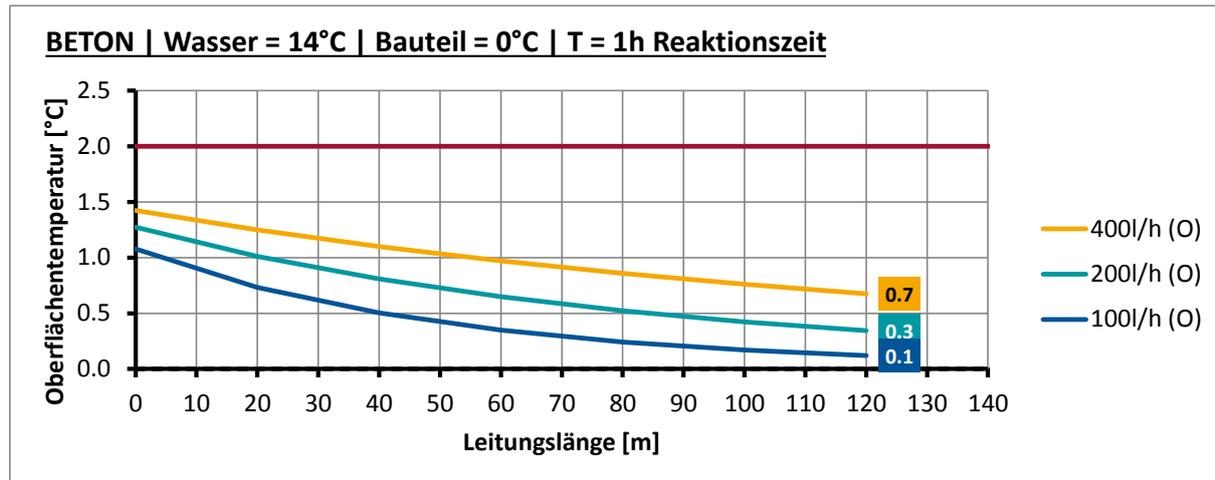
Anhang B.3.2 Verbundbrücke, $T_W=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-4^\circ\text{C}$



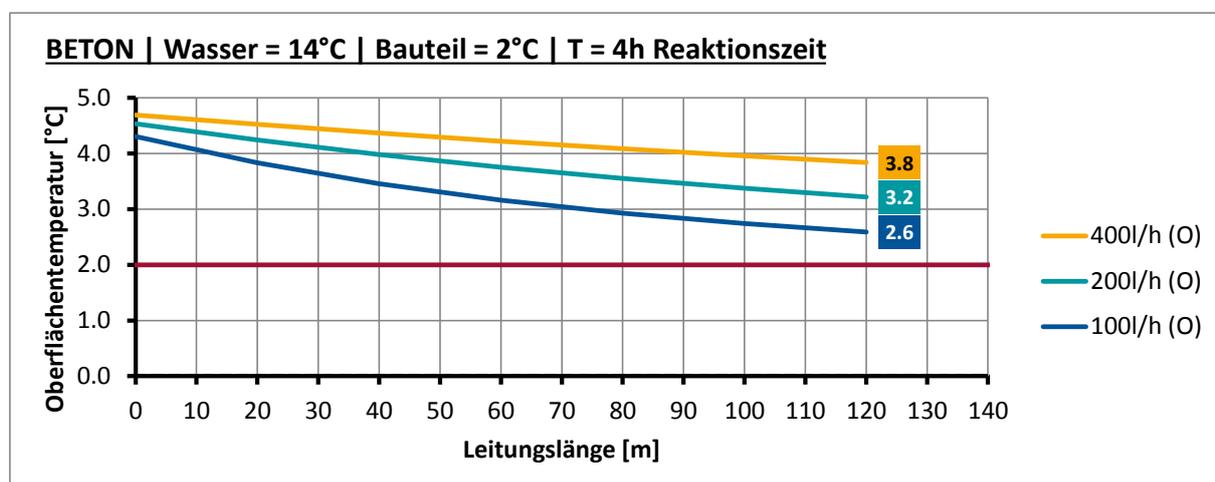
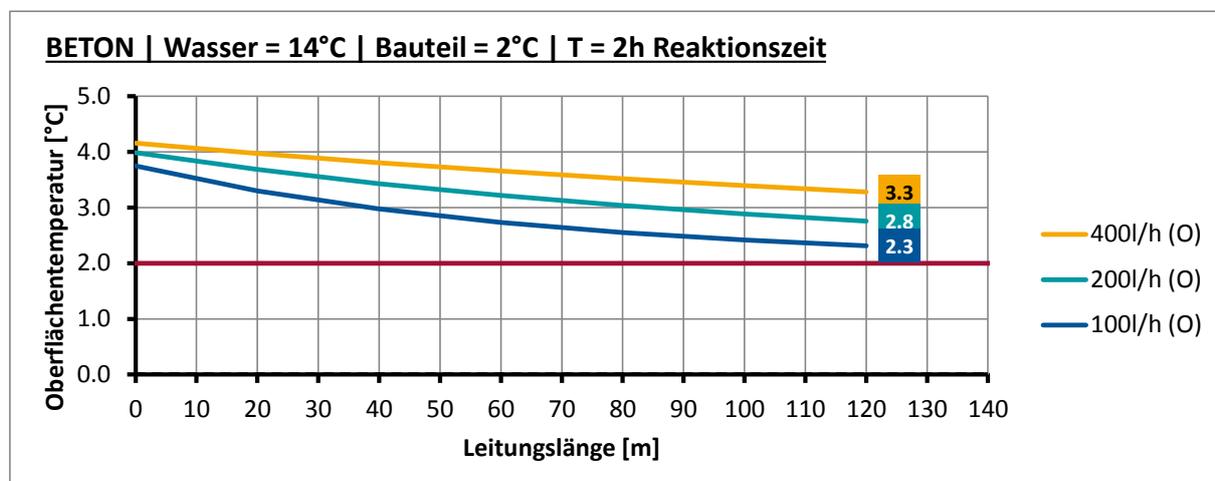
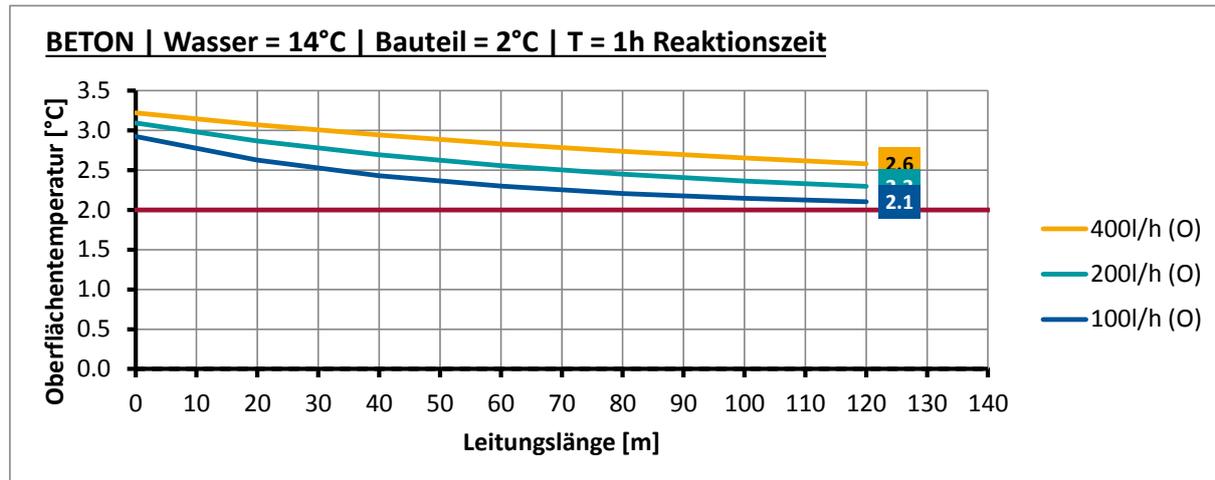
Anhang B.3.3 Verbundbrücke, $T_W=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-2^\circ\text{C}$



Anhang B.3.4 Verbundbrücke, $T_W=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=0^\circ\text{C}$



Anhang B.3.5 Verbundbrücke, $T_W=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=2^\circ\text{C}$



Anhang C Vorbemessungstafeln (Stahlbrücke)

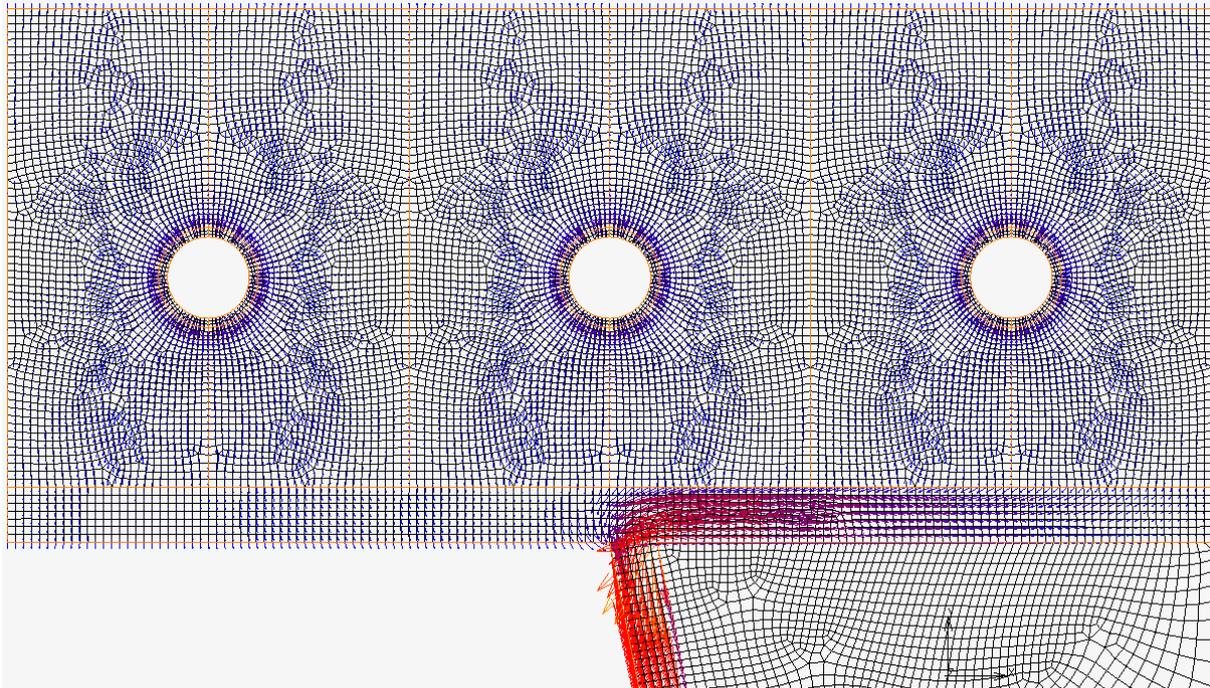


Abbildung 45 : Wärmestrom „Stahlbrücke“

Tabelle 10: Materialparameter FE „Stahlbrücke“

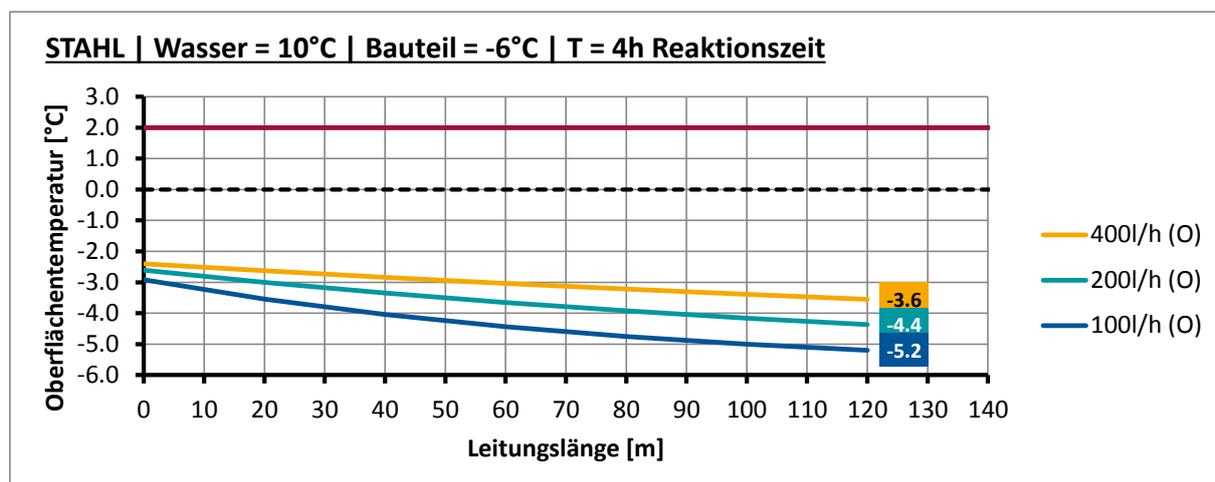
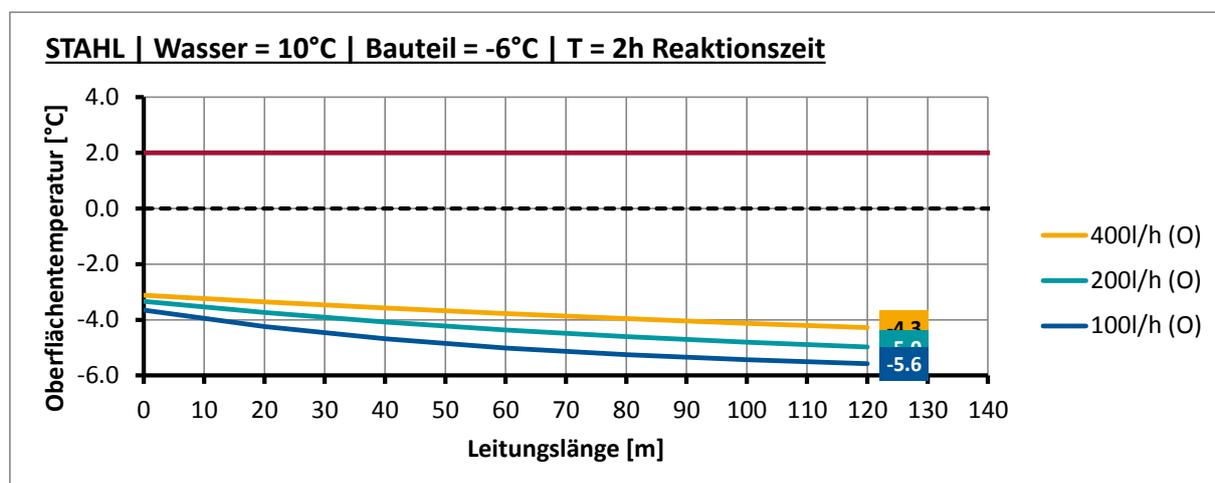
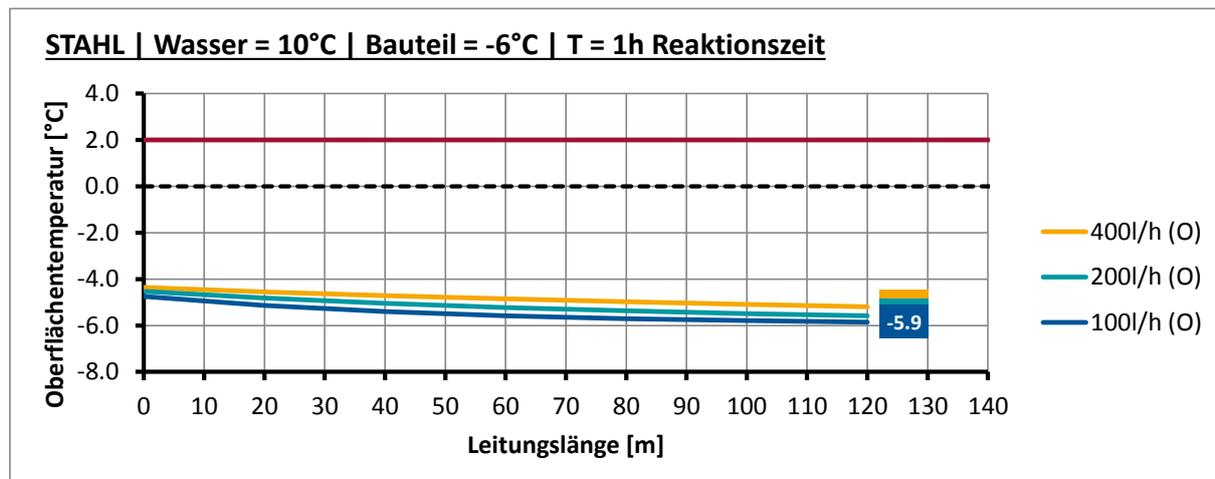
Material	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]	Spezifische Wärmekapazität c [J/(kg K)]	Dichte ρ [kg/m ³]
Stahl	50,0	450	7.850
Rohr	0,35	900	800
Gussasphalt	0,7	1.000	2.100
Luft (Rippe)	0,2	1.000	1,29

Die Oberflächentemperatur $T_o(T,x)$ wurde basierend auf der Wassertemperatur im Rohr $T_w(T,x)$ ermittelt (vgl. Kapitel 3.8). Hierzu wurden die Stellen ($x=0m, 20m, 40m, 60m, 80m, 100m, 120m$) ausgewertet.

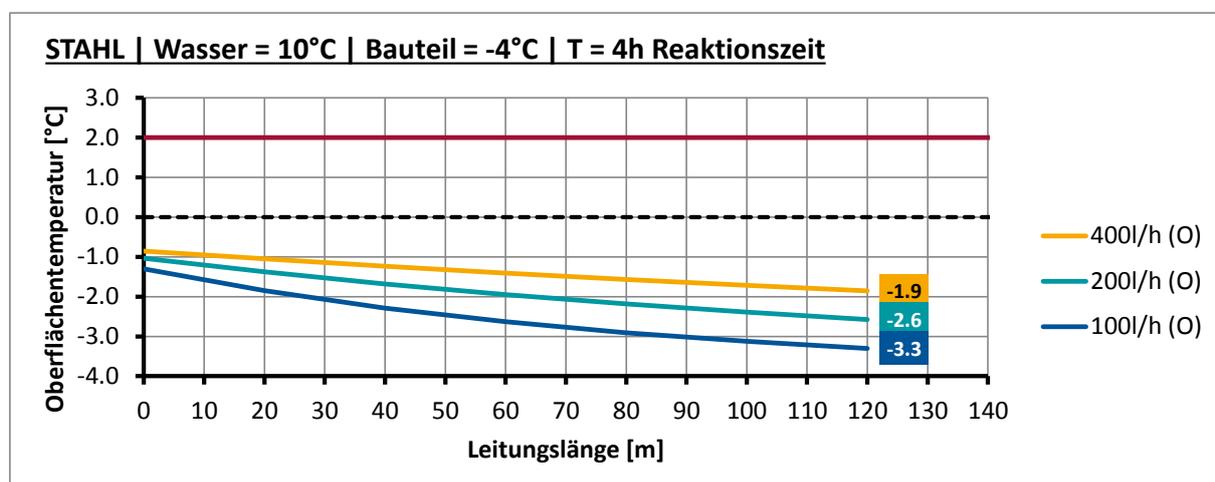
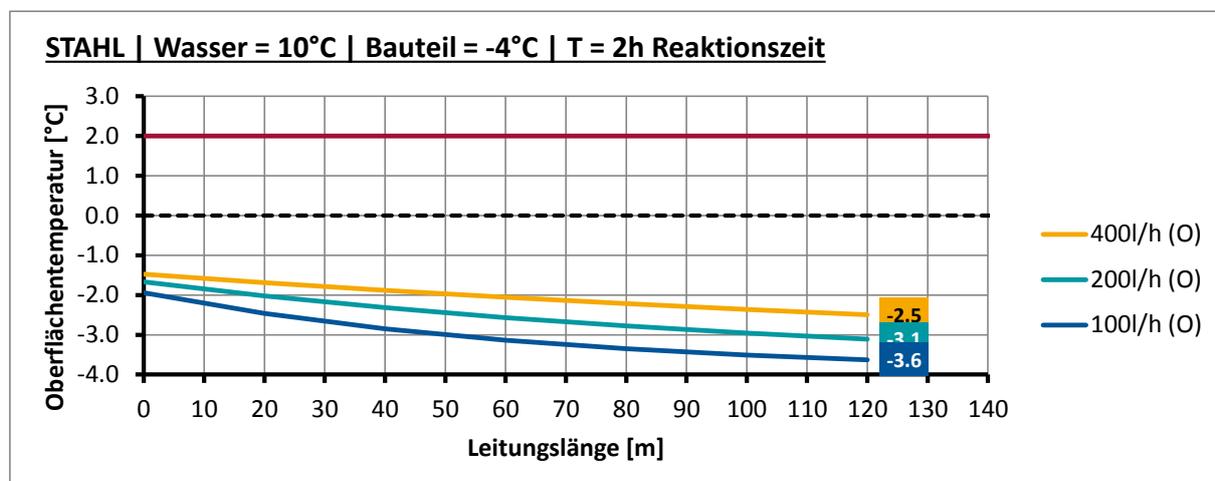
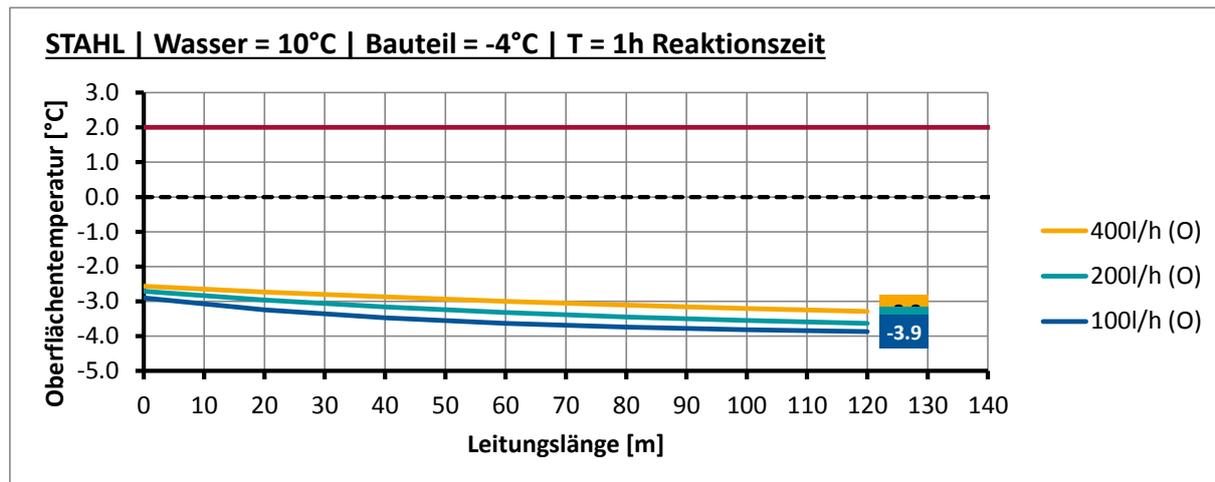
Den Berechnungen liegt der in Kapitel 3.2 beschriebene Fahrbahnaufbau zu Grunde. Die Berechnungen gelten lediglich für die in Tabelle 10 aufgeführten Materialien bzw. Materialparameter. Hier sei darauf hingewiesen, dass insbesondere eine Änderung des Asphalts zu anderen Ergebnissen führen wird. Es ist davon auszugehen, dass ein konventioneller Asphalt (welcher aufgrund der Porosität eine geringere Wärmeleitfähigkeit aufweist) die Funktionsweise des Temperierungssystems negativ beeinflussen wird.

Anhang C.1 Stahlbrücke, $T_w=10^\circ\text{C}$

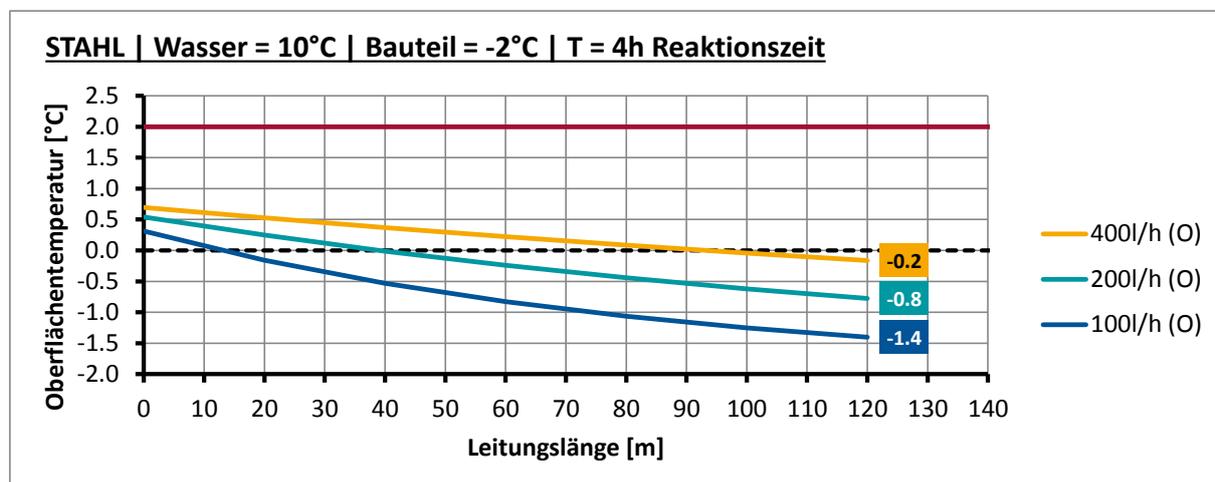
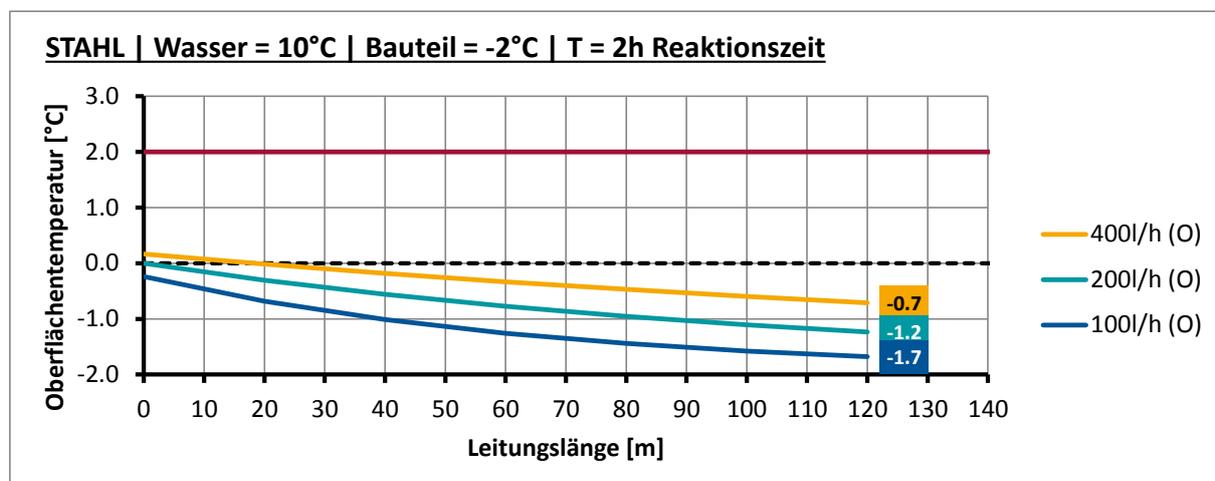
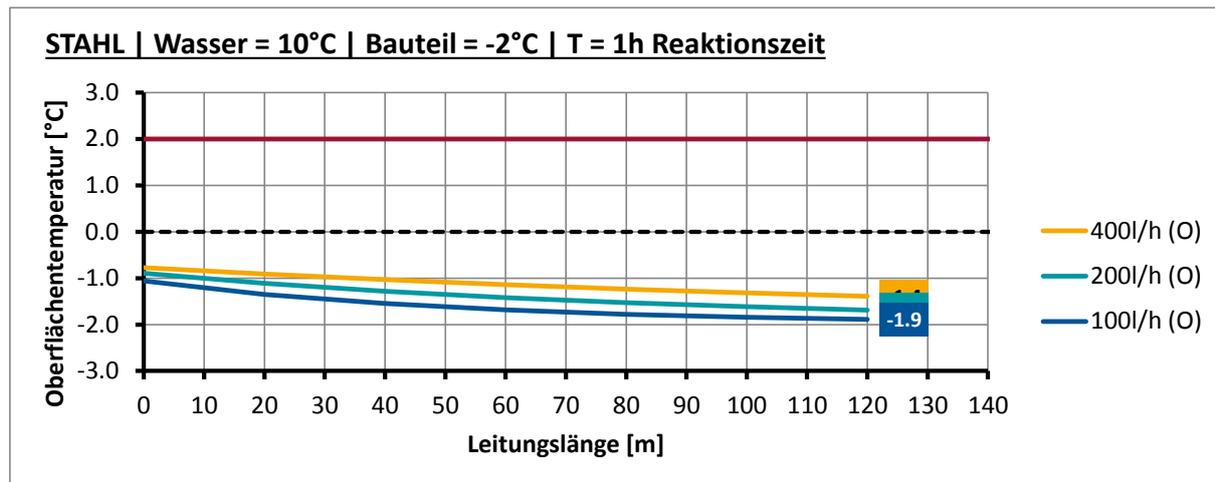
Anhang C.1.1 Stahlbrücke, $T_w=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_u=-6^\circ\text{C}$



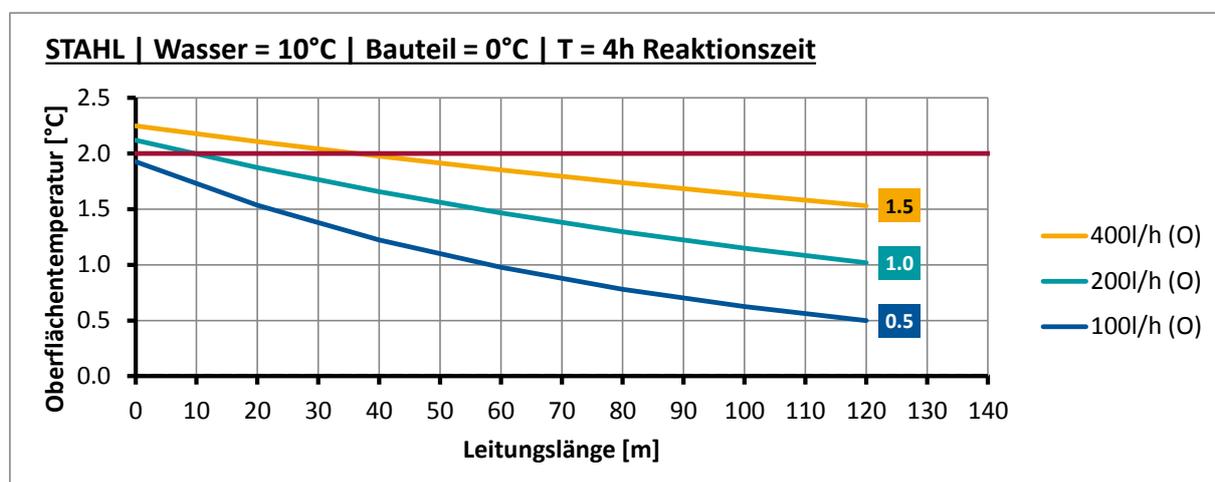
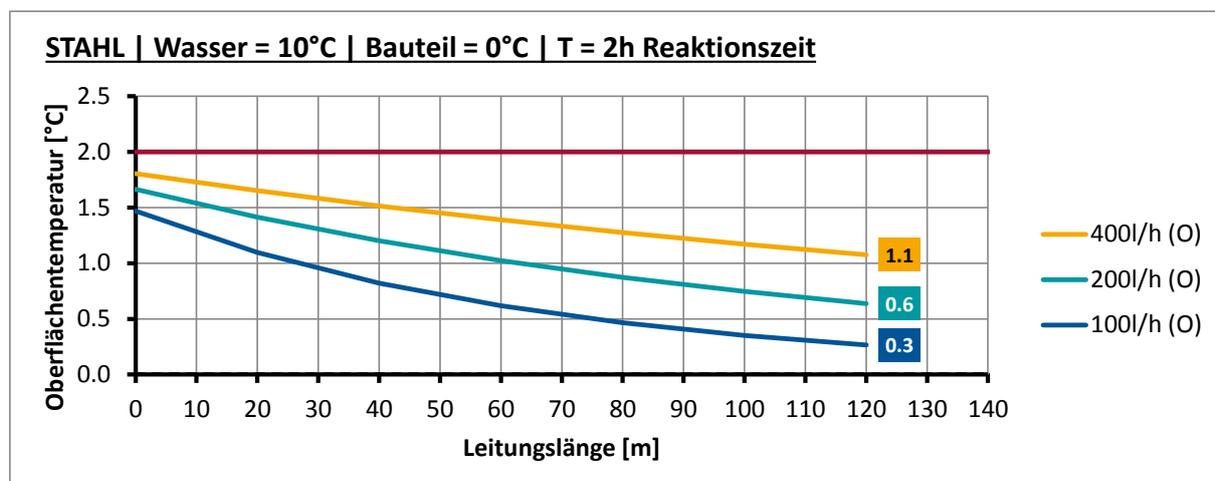
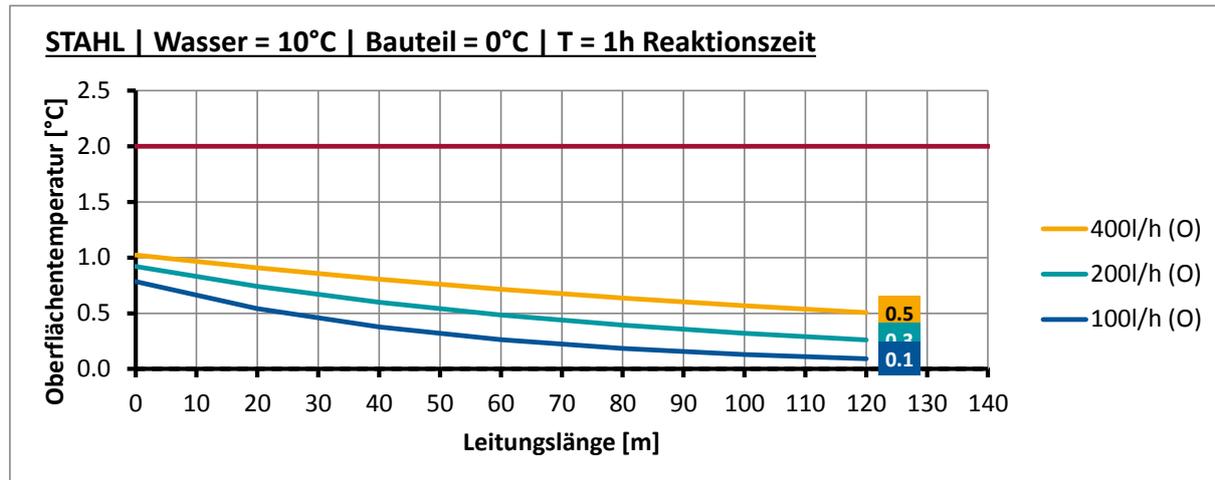
Anhang C.1.2 Stahlbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-4^\circ\text{C}$



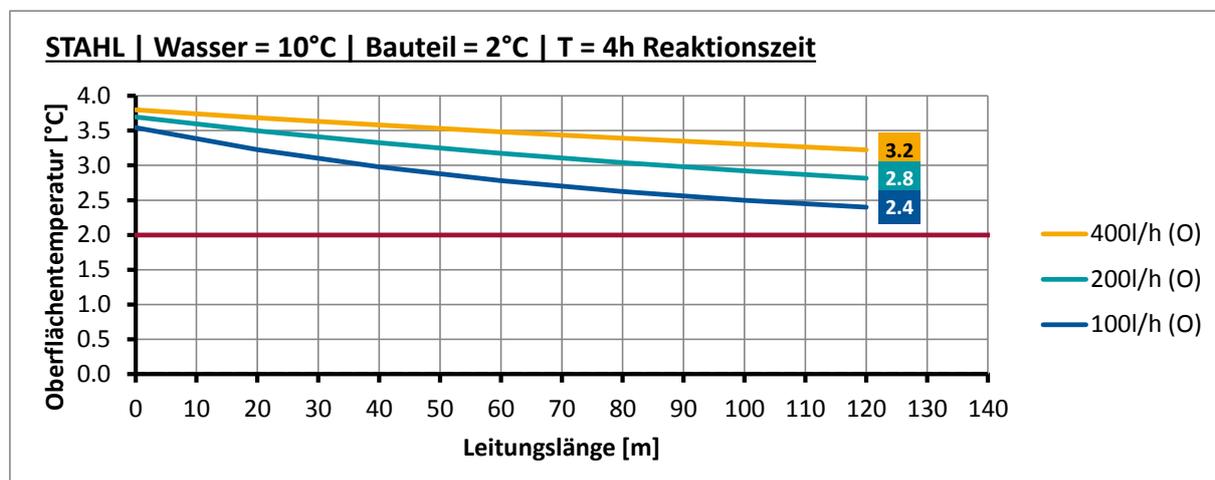
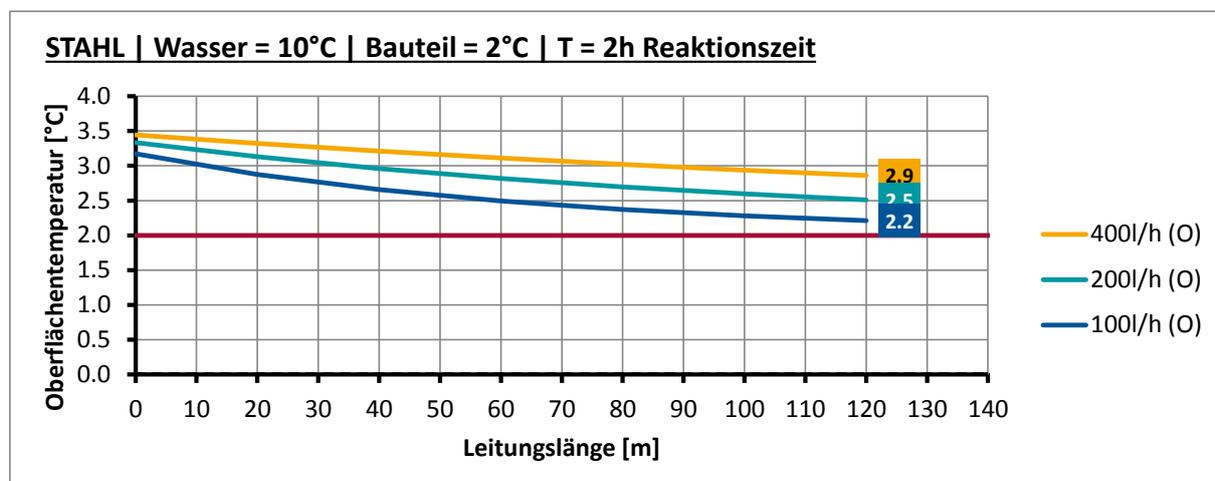
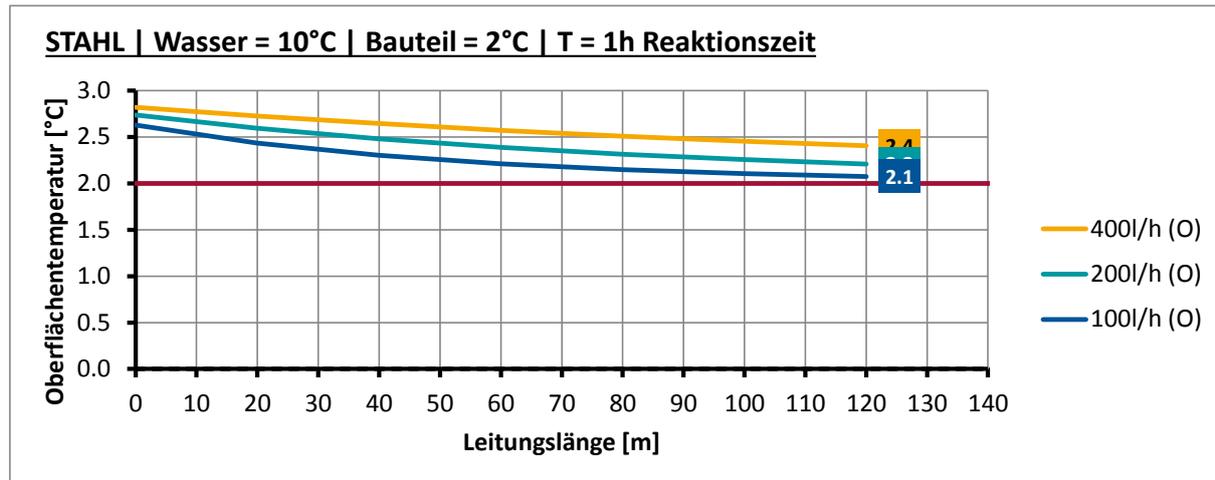
Anhang C.1.3 Stahlbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-2^\circ\text{C}$



Anhang C.1.4 Stahlbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=0^\circ\text{C}$

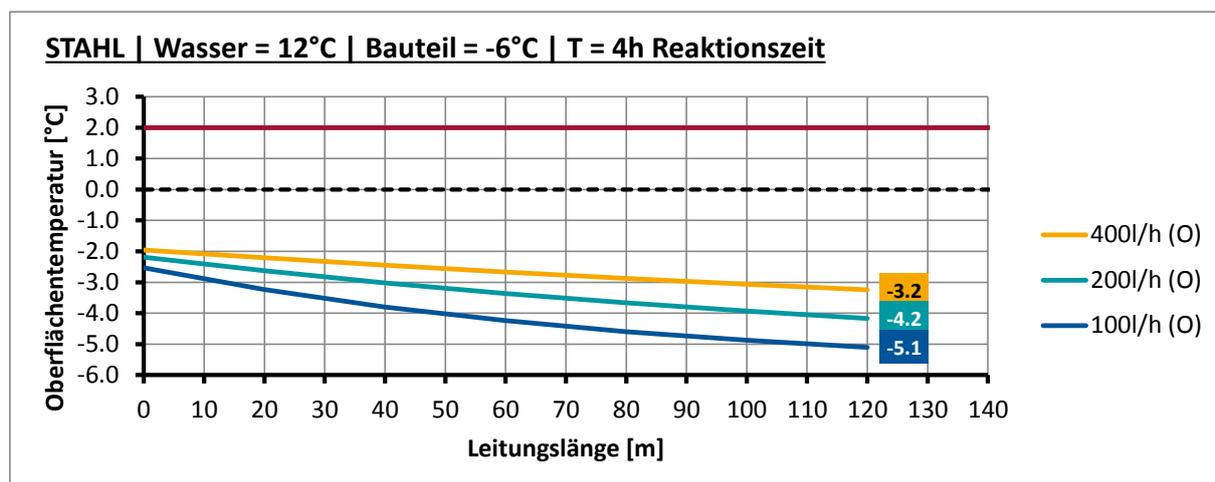
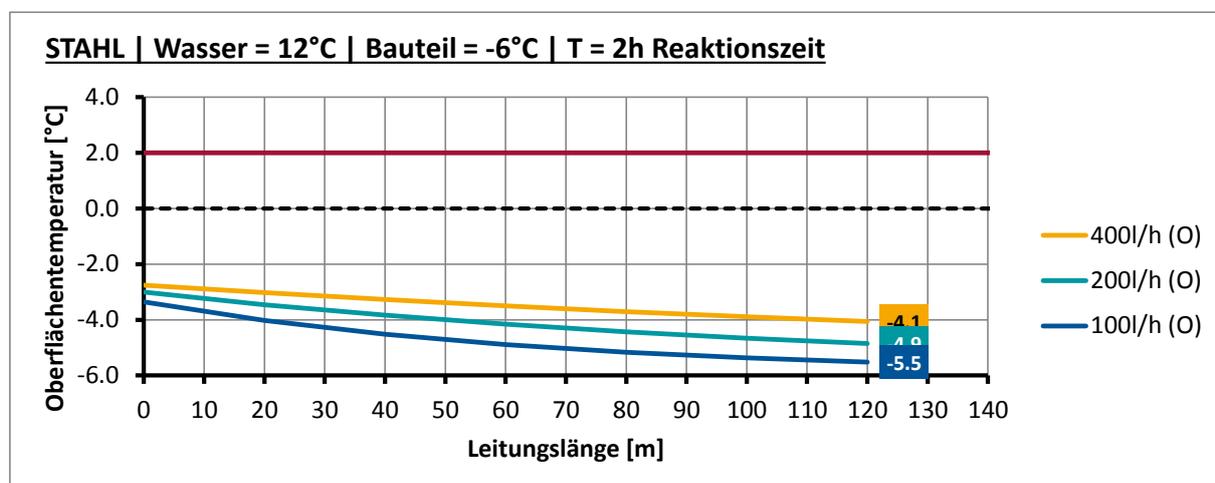
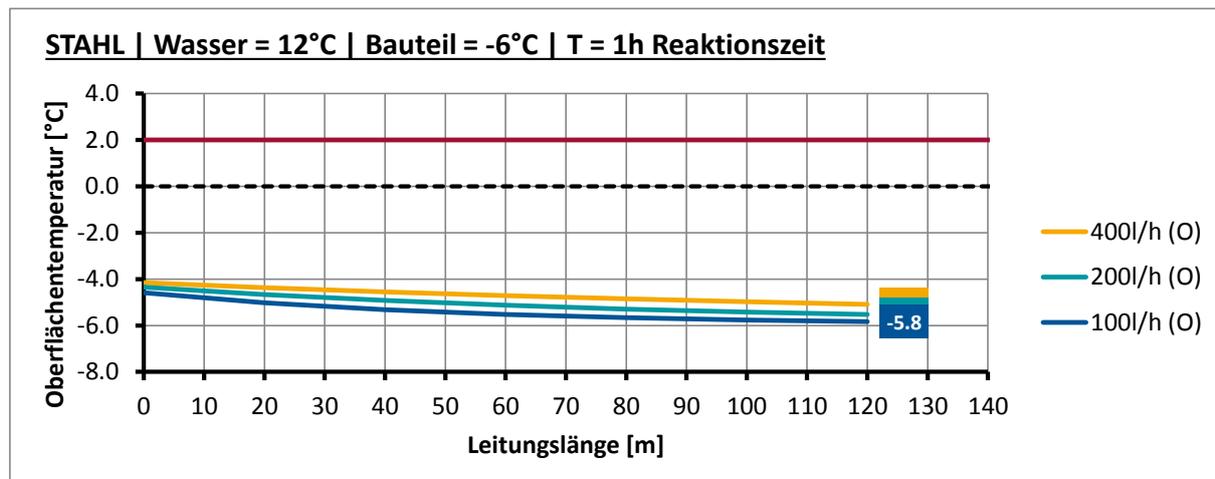


Anhang C.1.5 Stahlbrücke, $T_W=10^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=2^\circ\text{C}$

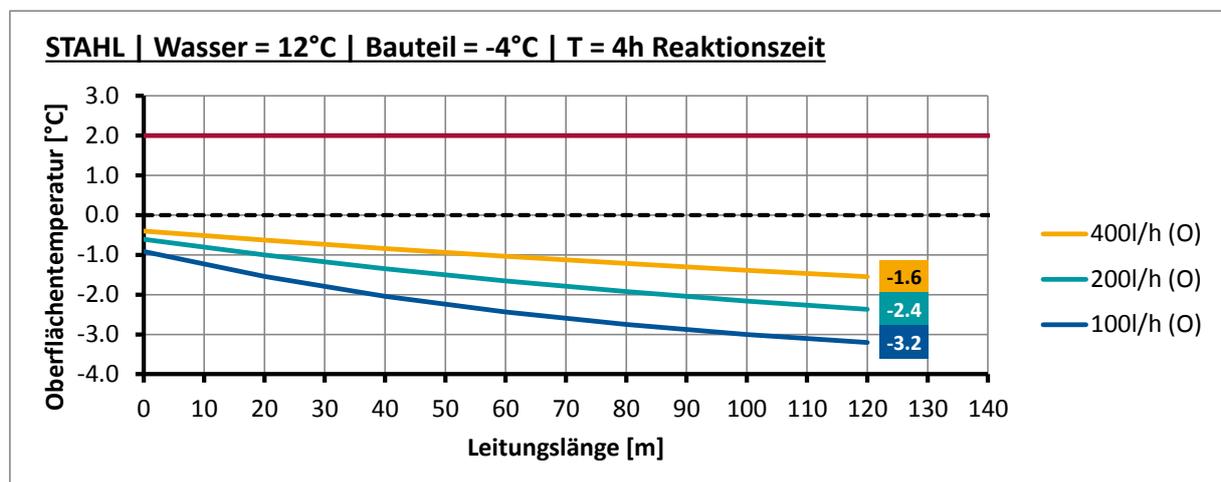
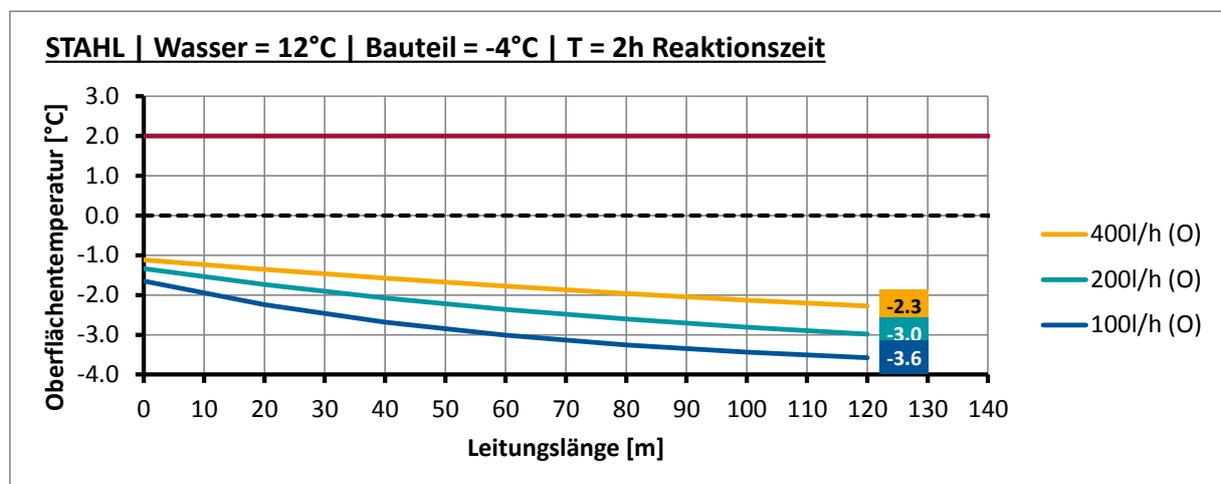
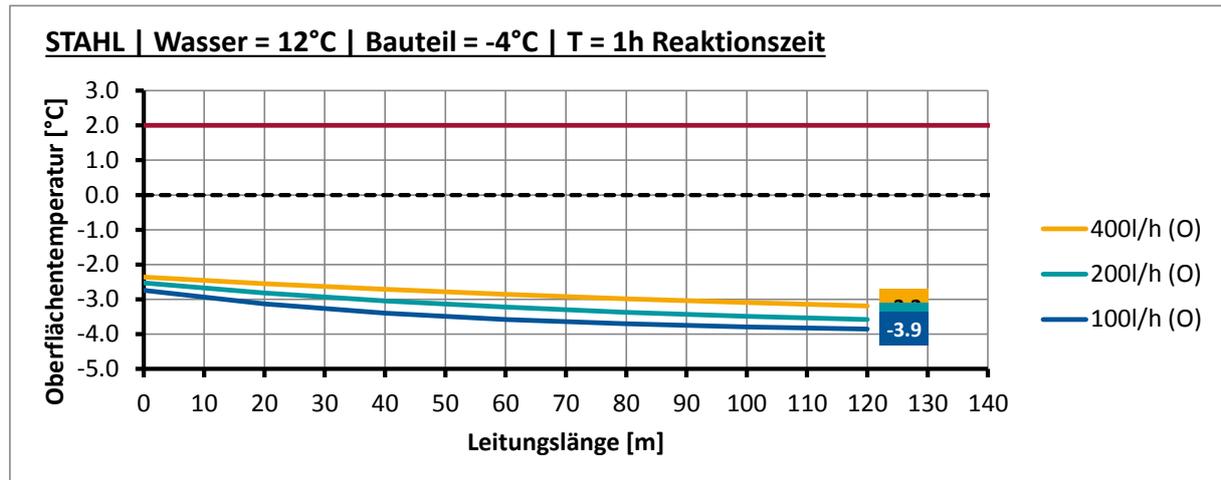


Anhang C.2 Stahlbrücke, $T_w=12^\circ\text{C}$

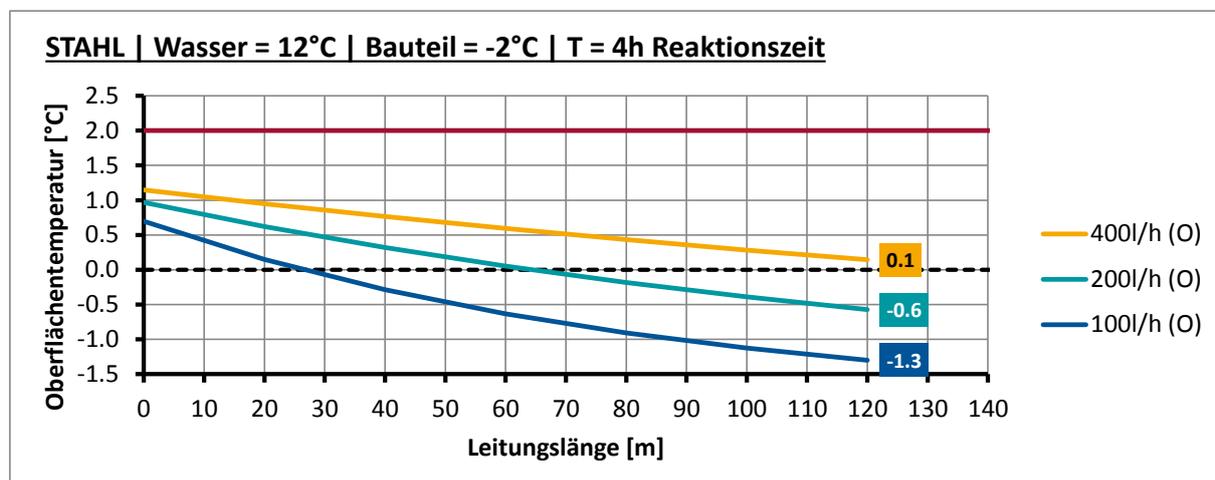
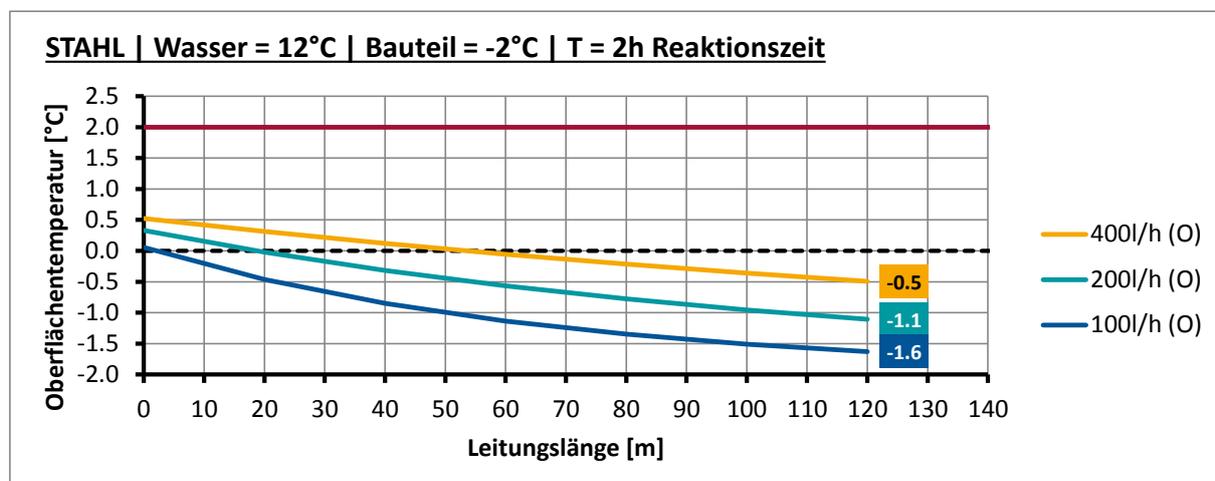
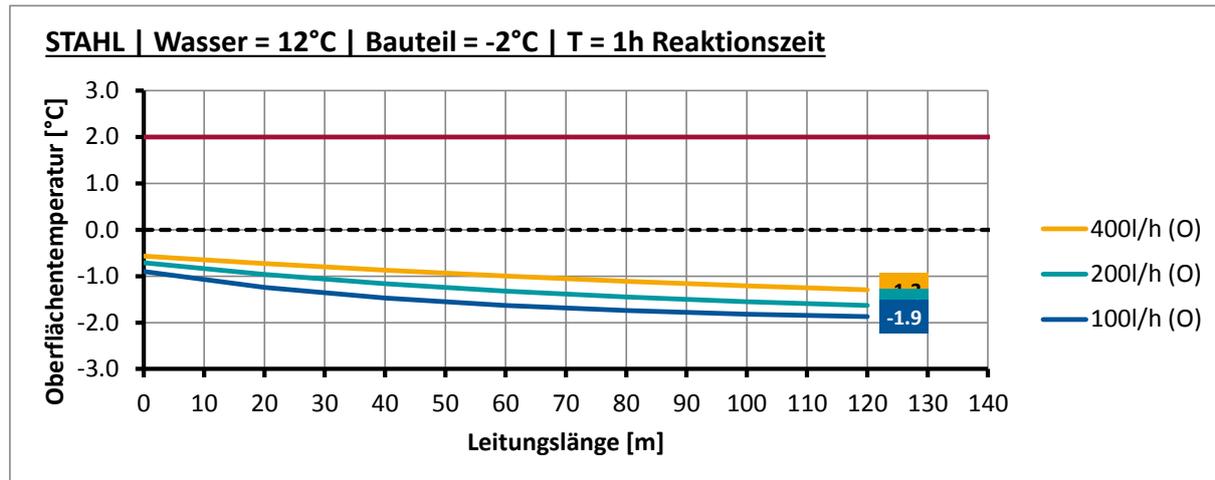
Anhang C.2.1 Stahlbrücke, $T_w=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_u=-6^\circ\text{C}$



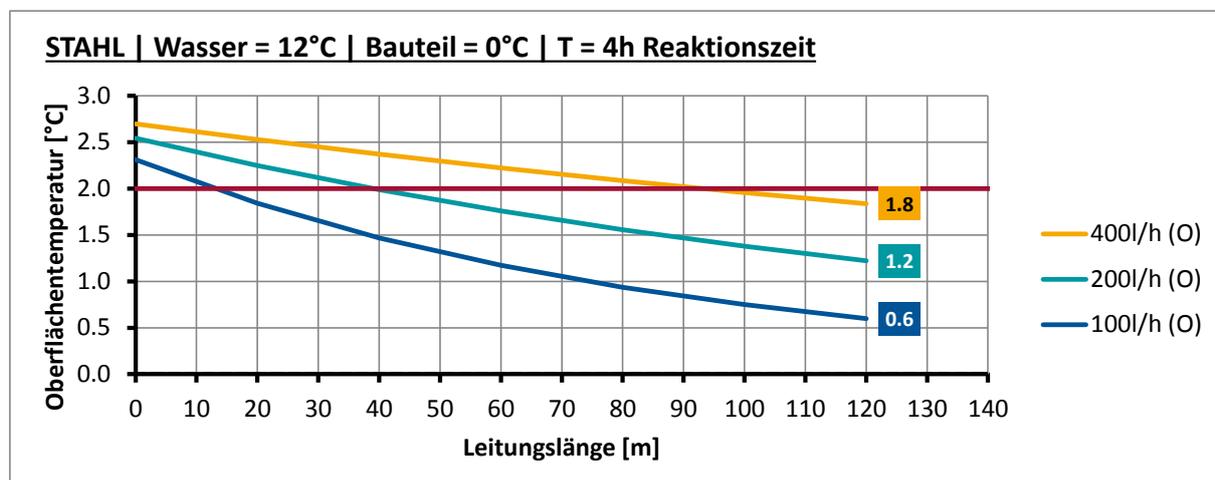
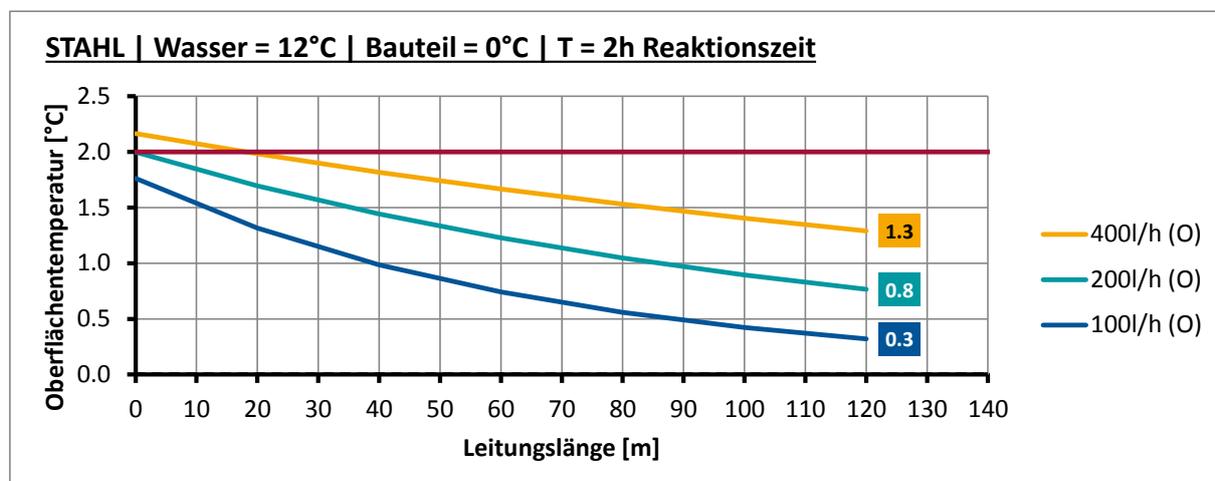
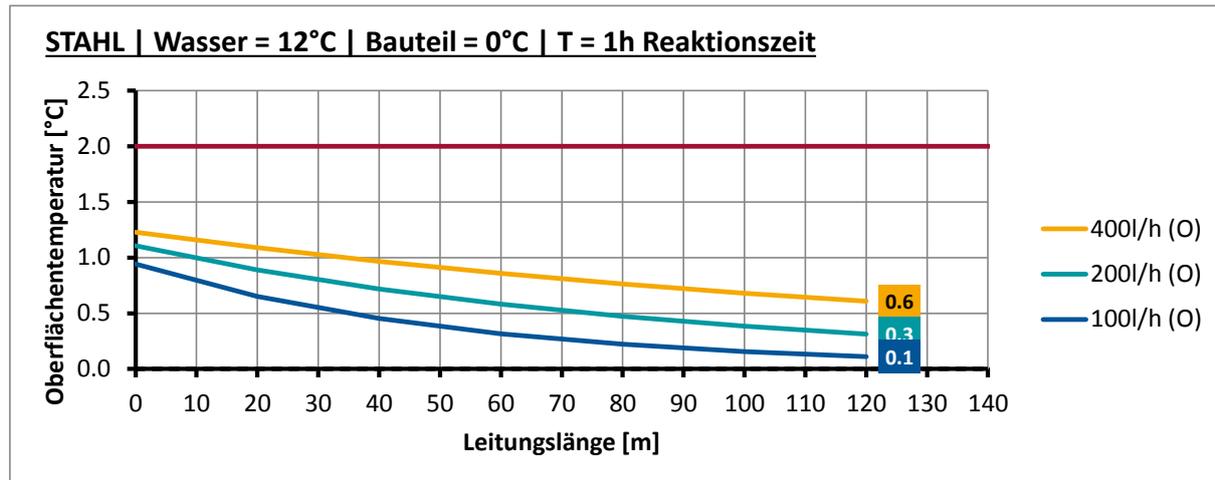
Anhang C.2.2 Stahlbrücke, $T_W=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-4^\circ\text{C}$



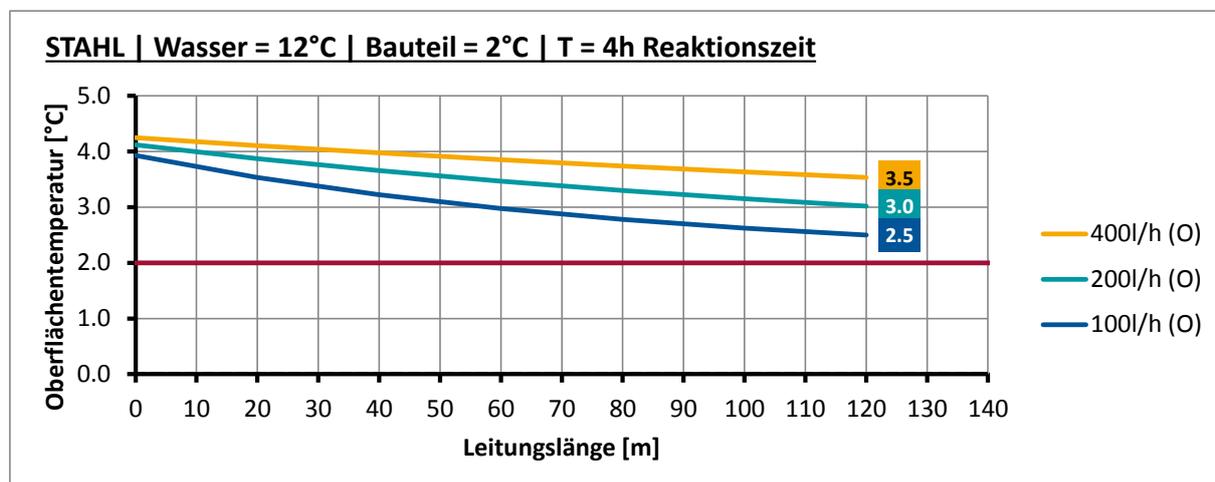
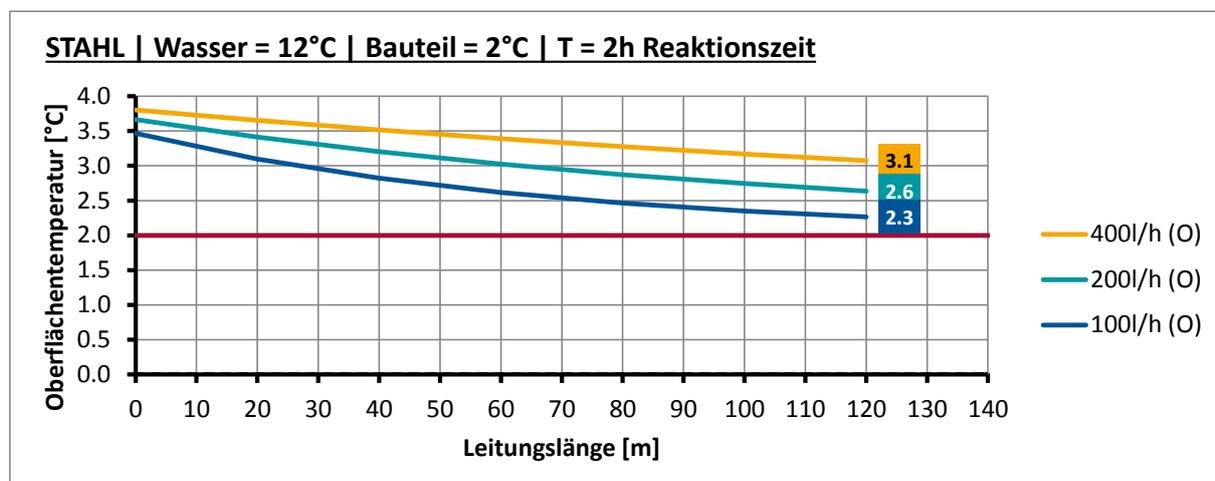
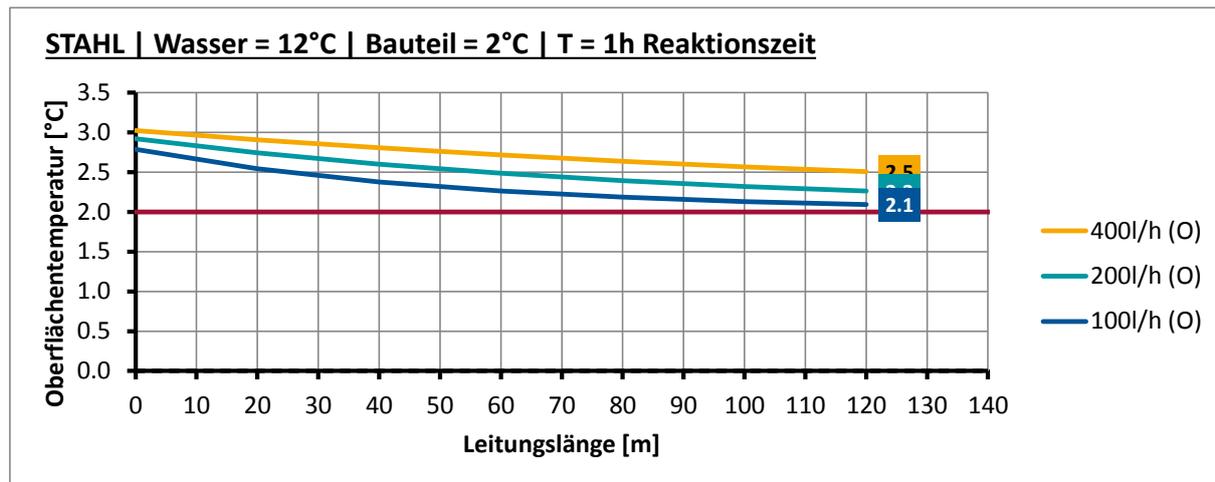
Anhang C.2.3 Stahlbrücke, $T_W=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-2^\circ\text{C}$



Anhang C.2.4 Stahlbrücke, $T_W=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=0^\circ\text{C}$

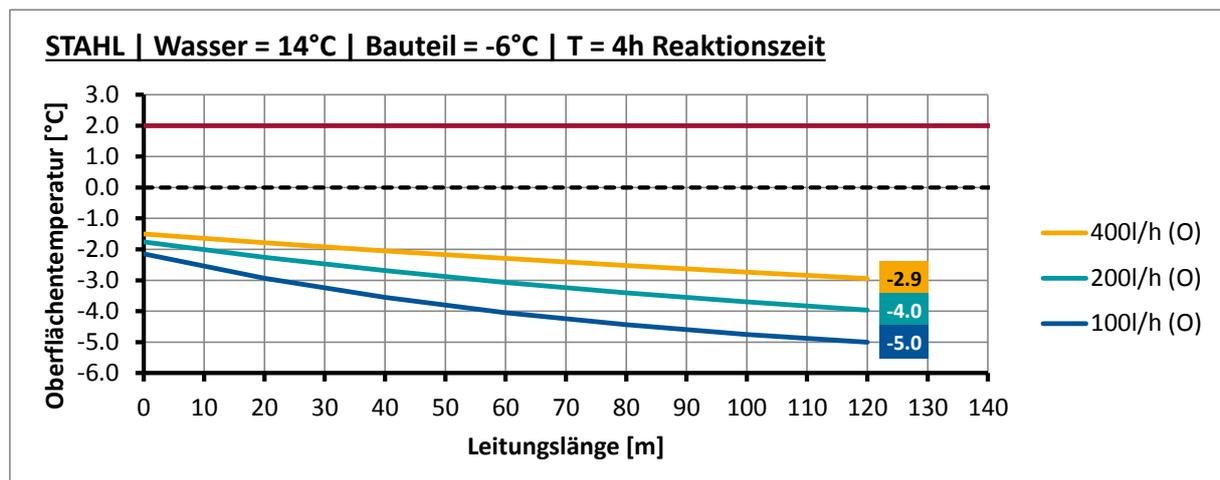
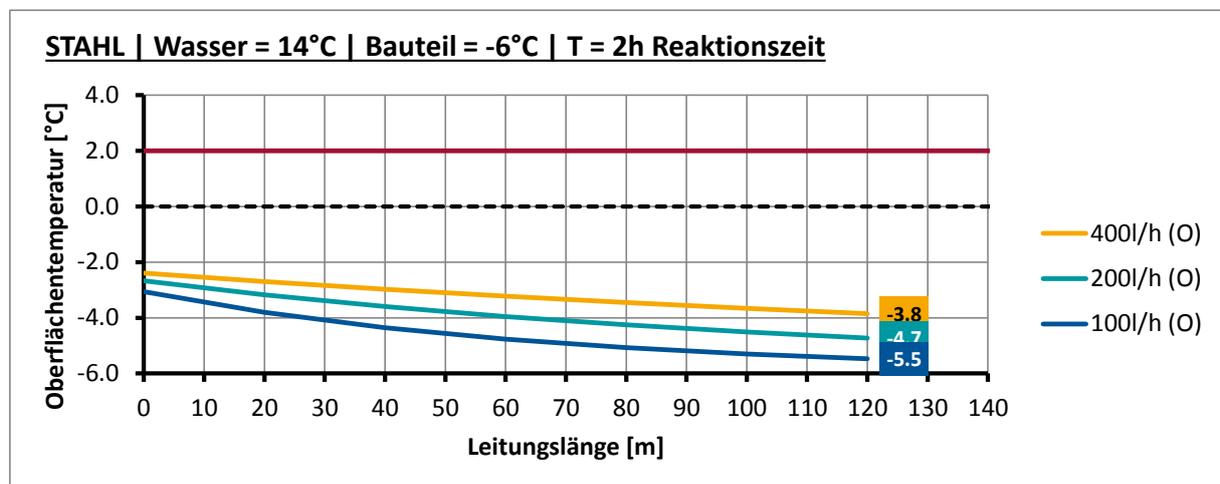
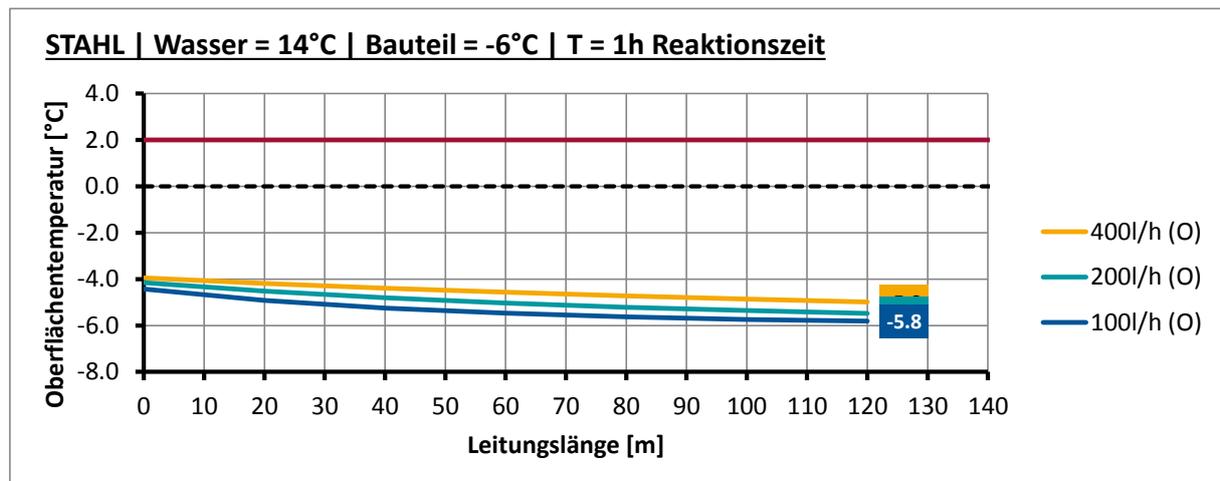


Anhang C.2.5 Stahlbrücke, $T_w=12^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=2^\circ\text{C}$

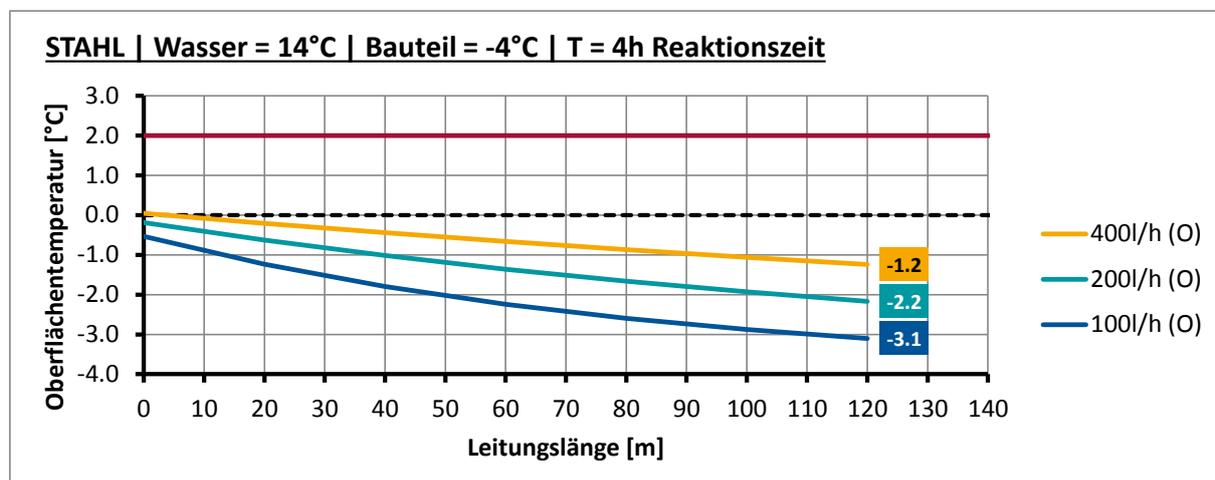
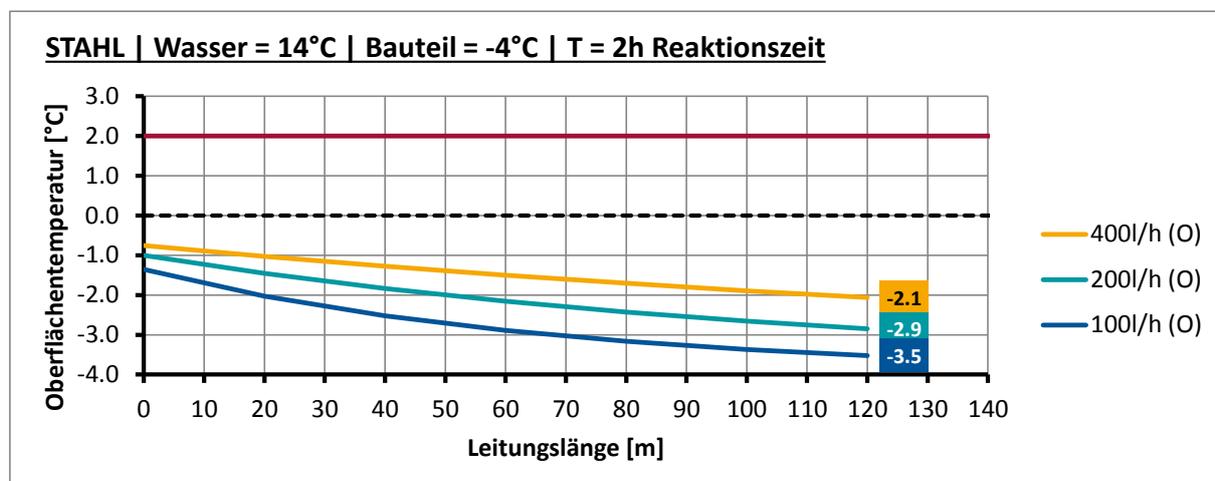
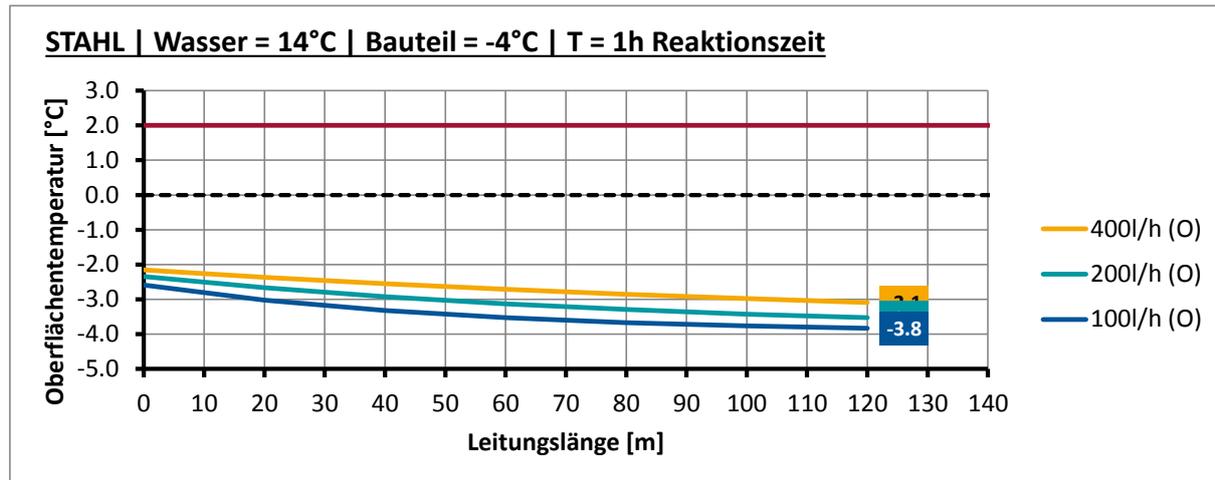


Anhang C.3 Stahlbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$

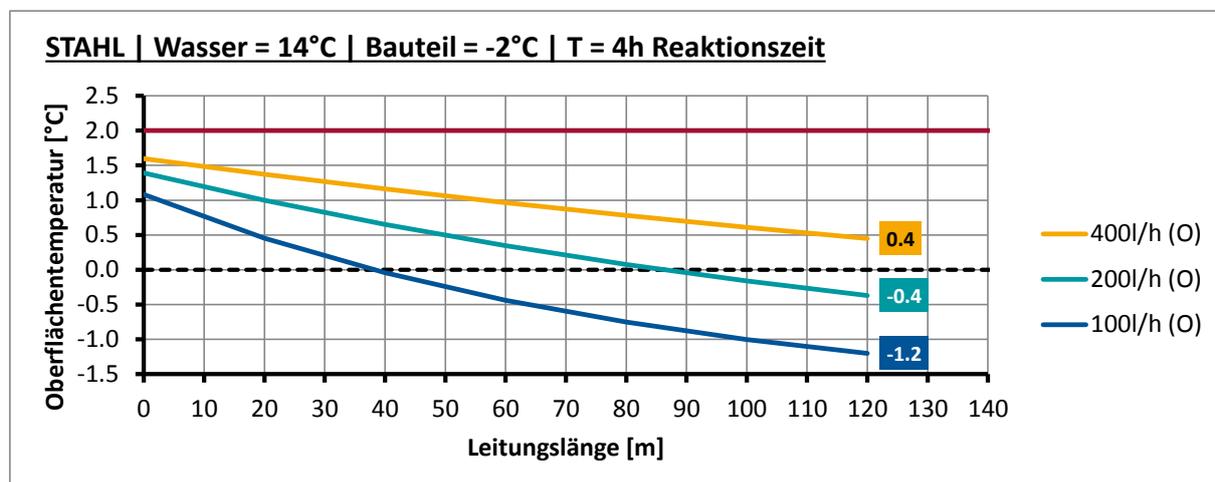
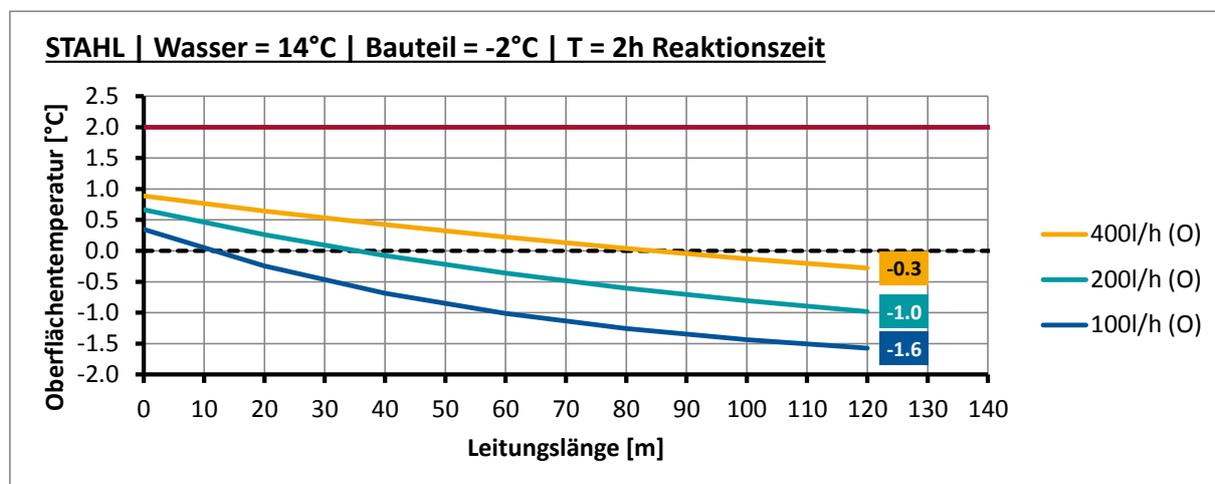
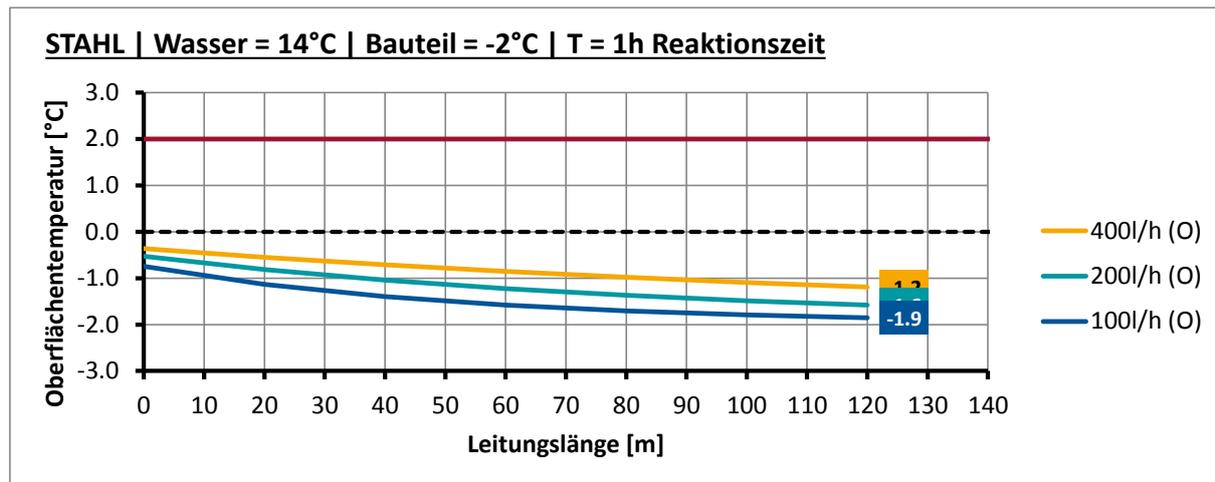
Anhang C.3.1 Stahlbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_u=-6^\circ\text{C}$



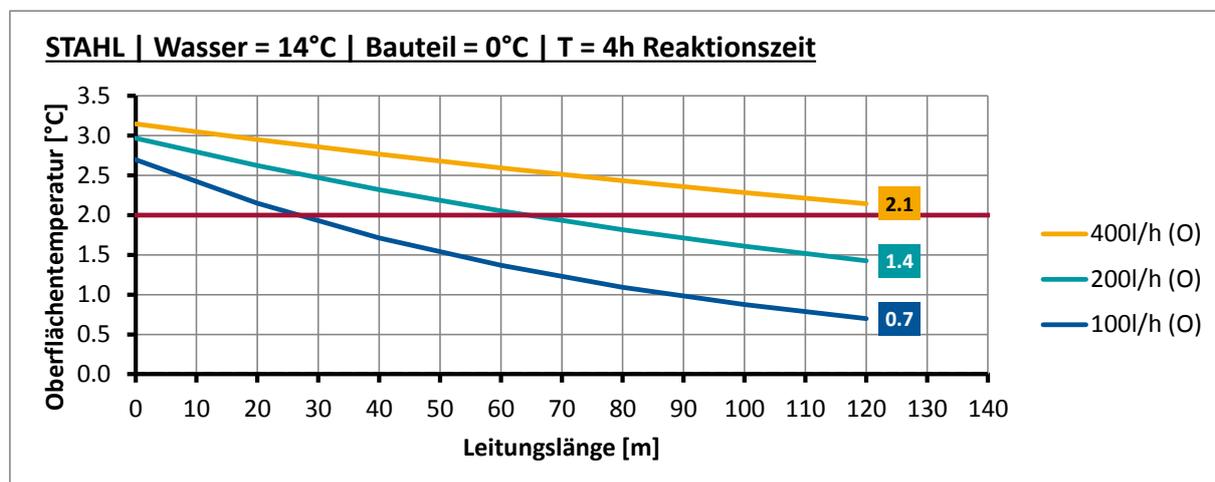
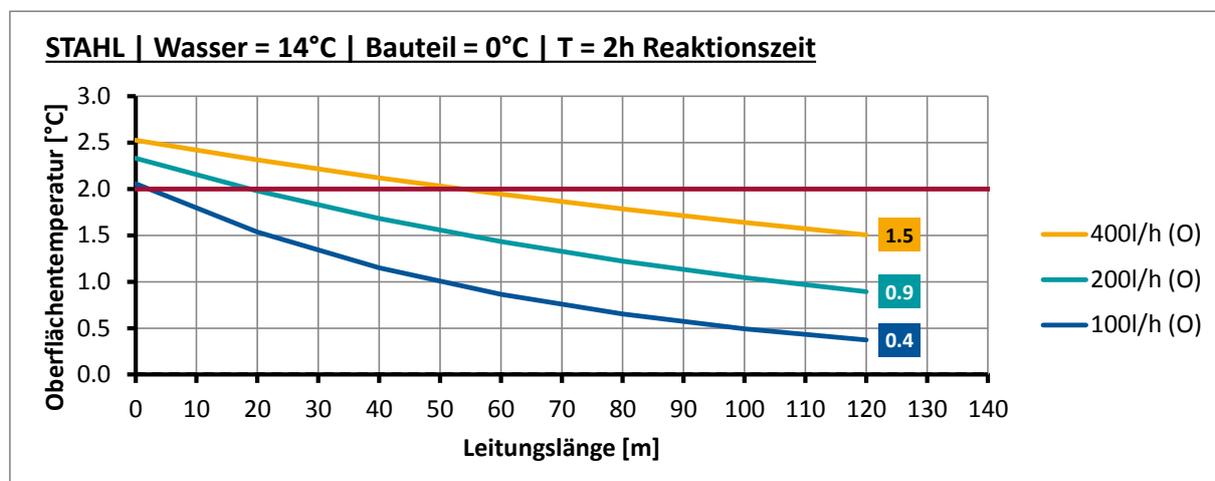
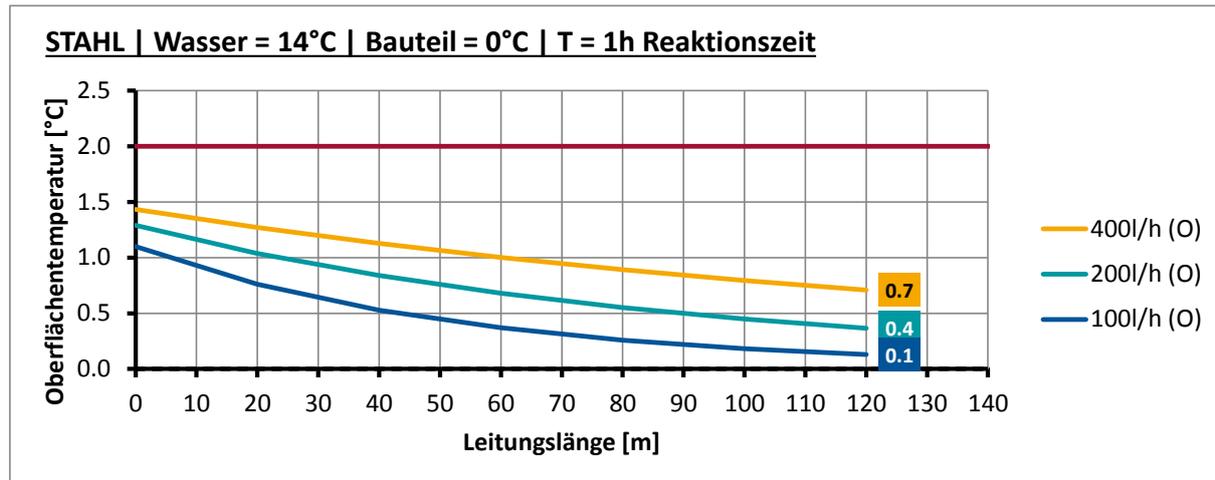
Anhang C.3.2 Stahlbrücke, $T_W=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-4^\circ\text{C}$



Anhang C.3.3 Stahlbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=-2^\circ\text{C}$



Anhang C.3.4 Stahlbrücke, $T_W=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=0^\circ\text{C}$



Anhang C.3.5 Stahlbrücke, $T_w=14^\circ\text{C}$, Ausgangstemperatur $T_U=2^\circ\text{C}$

