

# Energieforschungsprogramm

## Publizierbarer Endbericht

**Programmsteuerung:**

Klima- und Energiefonds

**Programmabwicklung:**

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

13/12/2018

# Projekttitle: HYDRASOL

Projektnummer: 848854

# Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	1. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	02/03/2015
Projektende	28/02/2018
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	36 Monate
ProjektnehmerIn (In- stitution)	Franz Oberndorfer GmbH & Co KG
AnsprechpartnerIn	DI Harald Trommet
Postadresse	Lambacherstraße 14, 4623 Gunskirchen
Telefon	+43 7272 7246-0
Fax	
E-mail	office@oberndorfer.at
Website	www.oberndorfer.at

## HYDRASOL

Nutzung von Hydrationswärme und Solarenergie bei der Betonfertigteilproduktion

**AutorInnen:**

DI Harald Trommet – Franz Oberndorfer GmbH & Co KG

DI Dr. Martin Peyerl – Smart Minerals GmbH

Dr. Gerald Steinmaurer – FH-OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH

Thomas Aigenbauer, MSc. – FH-OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH

## 1 Inhaltsverzeichnis

**Es muss ein Inhaltsverzeichnis mindestens auf Überschriftenebene 1 mit Seitenangabe erstellt werden!**

1	Inhaltsverzeichnis .....	4
2	Einleitung .....	6
3	Inhaltliche Darstellung .....	8
4	Ergebnisse und Schlussfolgerungen .....	10
5	Ausblick und Empfehlungen .....	29
6	Literaturverzeichnis .....	31
7	Anhang .....	31
8	Kontaktdaten .....	31

# Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ein publizierbarer Endbericht sollte folgende Struktur (Index) besitzen und besteht aus **mindestens 25 Seiten**. Die unten angeführte **Darstellung ist eine Mindestanforderung** und kann bei Bedarf erweitert werden.

Vorrangiges Ziel der publizierbaren Berichte ist die Darstellung der wesentlichen Projektergebnisse.

## Textformat

- Papierformat: A4 Hochformat
- Linker und rechter Rand: 2,5 cm
- Schriftformatierung: Arial, 11 Punkt, Zeilenabstand 1,3-fach
- Schriftformatierung für Tabellen: Arial, 10 Punkt
- Fußzeile: Seitennummerierung
- Definition der Überschriften bis zur 3. Ebene
  - Überschrift 1:
    - Schriftformat: Arial, 16 Punkt und Fett
    - Absatzformat: Abstand vor: 24 Punkt, Abstand nach: 12 Punkt
  - Überschrift 2:
    - Schriftformat: Arial, 14 Punkt und Fett
    - Absatzformat: Abstand vor: 24 Punkt, Abstand nach: 12 Punkt
  - Überschrift 3:
    - Schriftformat: Arial, 11 Punkt und Fett
    - Absatzformat: Abstand vor: 12 Punkt, Abstand nach: 6 Punkt

## 2 Einleitung

### Aufgabenstellung

Ziel des Projektes ist es die Treibhausgasemissionen in der Produktion von Betonfertigteilen zu reduzieren und gleichzeitig die Basis für innovative und weltmarktfähige Produkte zu schaffen. Die Nutzung der Hydratationswärme, Einbindung von Solarenergie und die Entwicklung der dafür notwendigen Anlagentechnik hat das Ziel den thermischen Energieeinsatz, auf Basis fossiler Energieträger, in der Betonfertigteil-Produktion massiv zu reduzieren bzw. völlig zu ersetzen.

Hauptsächlich soll dabei ein Beitrag zur Erfüllung der klima- und technologiepolitischen Vorgaben der Bundesregierung geliefert werden. Es wird damit aber auch die Technologieführerschaft und Wettbewerbsfähigkeit des Unternehmens Oberndorfer und der wissenschaftlichen Projektpartner ASiC auf dem Gebiet innovativer Energietechnologien und Smart Minerals GmbH im Bereich der nachhaltigen Bauweisen/Produktion gestärkt.

Das Wachstumspotential der solaren Wärme und Kühlung liegt in größeren Anlagen im gewerblichen Bereich. Die zu untersuchenden Solarthermie Systemkonzepte sind in der Leistungsklasse 200 kW und werden bei einem Temperaturniveau <100°C arbeiten. Die Rahmenbedingungen werden aber durch die prioritäre Umsetzung von Maßnahmen zur Energieeffizienz vorgegeben. Die Untersuchung ob und wie solarthermische Energie in den Prozess integriert werden kann und die evtl. darauffolgende Realisierung beschleunigt die Marktdurchdringung im Bereich solarer Prozesswärme.

### Schwerpunkte des Projektes

Schwerpunkt Energieeffizienz in Industrie und Gewerbe

Subschwerpunkt: Optimierung bestehender und Entwicklung neuer energie- und ressourceneffizienter Produktionsverfahren.

Schwerpunkt Erneuerbare Energien - Solarthermie

Subschwerpunkt: Solare Prozesswärme (&-kälte) in der industriellen Produktion

### Einordnung in das Programm

Wie in der österreichischen Energieforschungsstrategie angeführt, sollen Forschungsschwerpunkte unter anderen im Bereich Steigerung der Energieeffizienz und der Anteile erneuerbarer Energieträger (Seite 7f) gesetzt werden. Mit den Aktivitäten im Projekt HYDRASOL wird technologisch einerseits versucht den Energiebedarf für die Produktion von Betonfertigteilen zu reduzieren und andererseits dabei die Einbindung solarer Prozesswärme und das solare Kühlen zu beforschen. Die Ergebnisse sollen die Technologieführerschaft des Konsortiums im internationalen Wettbewerb stärken und auch Exportmärkte für die entwickelte Technologie eröffnen.

### Verwendete Methoden

Produktionsdatenauswertung

Basis für die Erforschung, sowie die Kontrolle der geplanten Projektziele stellt eine umfassende, langfristige Produktionsdatenauswertung an der Demonstrations- und Versuchsanlage Wöllersdorf dar.

## Hydratations-Wärmerückgewinnung

Auf Basis der Erkenntnisse aus der Produktionsdatenauswertung sowie einer Reihe von Laborversuchen, ist es das Ziel ein entsprechendes Hydraulik- und Regelungskonzept zur Hydratationswärmerückgewinnung zu definieren. Speziell in den Laborversuchen soll der Zusammenhang zwischen nutzbarer Hydratationswärme (Wärmeentwicklung, -verlauf, -spitzen), Betonrezeptur (Zementgehalt, -sorte) und Formgebung des Bauteiles (Hohldiele, Schwerteil, etc.) hergestellt werden und die Umsetzung der Labordaten in die Produktion begleitet werden.

Die Messdaten betreffend Restenergiebedarf bzw. Energieüberschuss dienen als Basis für die Ermittlung der Lastprofile zur Simulation der Solareinbindung.

## Simulation Solareinbindung

Ziel der Simulationen ist es anhand der gemessenen Lastprofile optimierte Systemkonzepte für die solare Prozesswärme- bzw. Prozesskälteeinbindung in den Produktionsprozess zu entwickeln. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Wirtschaftlichkeit der Solarsysteme. Es sollen Konzepte für folgende Anwendungsfälle ausgearbeitet werden:

- Solarthermische Prozesswärmeeinbindung für das Werk Herzogenburg als Best Practice Beispiel für alle weiteren österreichischen und internationalen Standorte
- Solarthermische Prozesskühlung für geplante Werke (z.B. als Know-how-Träger oder Joint Venture) in der Türkei bzw. in Saudi Arabien

## **Aufbau der Arbeit**

Neben der gleich zu Beginn des Projektes realisierten Bestandsaufnahme und Vermessung der Dielenbahnen der Standorte Herzogenburg und Wöllersdorf wurden ebenfalls labortechnische Versuche bzgl. Hydratationswärmefreisetzung und Simulationen durchgeführt welche das Potenzial einer Solareinbindung in dem Betonfertigteil-Produktionsprozess darstellen soll. Dementsprechend wurden auch bereits bei der Projektplanung diese Themen in drei Hauptarbeitspakete geschnürt. Dieser Bericht stellt somit die relevantesten Ergebnisse dieser Arbeitspakete in den folgenden Unterpunkten dar und gibt einen Ausblick sowie Empfehlungen für weitere Forschungstätigkeit, sowie eine Abschätzung wie hoch die Einsparmöglichkeiten bei Einbindung der Hydratations- und Solarwärme in dem Fertigungsprozess liegen.

## 3 Inhaltliche Darstellung

Die Betonkühlung bzw. -erwärmung hat in der Betonfertigteilproduktion eine große Bedeutung. In Mittel- und Nordeuropa spielt die Betonermwärmung die größere Rolle, in südlichen Ländern wie Türkei, VAE, Saudi-Arabien sowie bei z.B. Staudammprojekten oder „Weißen Wannen“ ist eine Herstellung von Qualitätsbeton ohne Kühlung fast undenkbar. Die Oberndorfer Werke produzieren an den Standorten Wöllersdorf, Herzogenburg, Gunskirchen, Grosswilfersdorf, Radfeld und Völkermarkt vorgespannte Hohldielendecken in unterschiedlichen Bauhöhen und mit einer Länge bis 22m.



Abbildung 1: Hohldielendeckenelement

Durch die Umstellung des Produktionsprozesses am Standort Wöllersdorf, in Folge eines firmenintern durchgeführten Entwicklungsprozesses, soll hier künftig bis zu 90% weniger Energie für das Abbinden bzw. die Aushärtung im Bereich der Hohldielenproduktion verbraucht werden. Dieses Ziel soll durch die weltweit erstmalige Nutzung der Hydratationswärme (Wärmeentwicklung durch chemische Reaktion von Wasser und Zement) und die Einbindung von thermischer Solarenergie in den Prozess erreicht werden. Die Nutzung der Hydratationswärme senkt den Energiebedarf, reduziert das Temperaturniveau und macht so auch noch die Nutzung von solarthermischer Energie möglich. Damit die Hydratationswärme genützt werden kann, ist vorrangig eine längerfristige, umfassende Produktionsdatenauswertung erforderlich. Die Wärme soll letztendlich mittels Wärmeträgermedium über Schaloberflächen abgeführt und für den weiteren Produktionsprozess genutzt werden. Dies soll mit dem neuartigen Dielenbahnaufbau in Wöllersdorf geschehen, wobei der Wärmeübertrager von 4 auf 9 Rohre erhöht wurde und der Wärmeübergang dadurch verbessert wurde, indem man diese an eine Stahlplatte befestigt hat (siehe Abbildung 2).

# Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

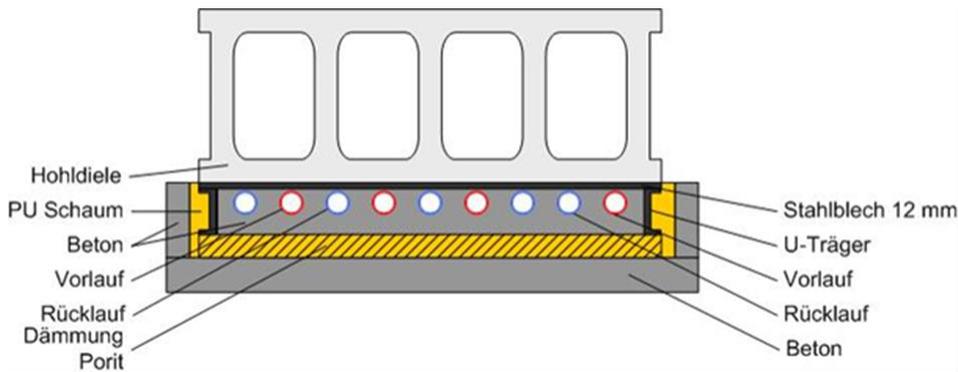


Abbildung 2: Aufbau der neuen Dielenbahn in Wöllersdorf

Auf Basis der Erkenntnisse aus der Produktionsdatenauswertung sowie einer Reihe von Laborversuchen, ist es das Ziel ein erprobtes Hydraulik- und Regelungskonzept für den neuen Dielenbahnaufbau zur Hydratationswärmerückgewinnung zu entwickeln. Die Produktionsdaten werden zu Lastprofilen für die optimierte Beheizung der Dielenbahnen unter Berücksichtigung der Hydratationswärmerückgewinnung verarbeitet. Diese Lastprofile dienen als Basis für dynamische Anlagensimulationen zur Einbindung solarer Prozesswärme. Für den Export der Technologie in sonnenreichere Länder, wird ebenfalls anhand von Simulationen versucht, die dort notwendige Kühlung mittels solar-thermischer Sorptionskältemaschinen zu decken. Ziel der Simulationen ist es optimierte Systemkonzepte für die solare Prozesswärme- bzw. Prozesskälteeinbindung in den Produktionsprozess zu entwickeln. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Wirtschaftlichkeit der Solarsysteme. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen in die Neukonzeption der Dielenbahnproduktion am Standort Herzogenburg einfließen und, unter Voraussetzung einer positiven Produktionsdatenauswertung, in weiterer Folge auf alle Standorte der Oberndorfer Gruppe und möglichen Anwendungsgebiete (Beton-Fertigteile-Produktpalette weltweit) ausgeweitet werden bzw. in Form von Lizenzen auch an interessierte Mitbewerber weitergegeben werden.

## 4 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

### Produktionsdatenauswertung

Aus Gründen der Übersichtlichkeit, werden die Ergebnisse wie nach Projektplan in ihre jeweiligen Arbeitspakete unterteilt. Die ersten Ergebnisse wurden durch die Produktionsdatenauswertung gewonnen, bei der einerseits der Produktionsablauf der Dielenproduktion genau untersucht sowie zeitlich dokumentiert wurde, als auch der Hohlplattenproduktionsprozess selbst untersucht und ausgewertet wurde.

Die Auswertung ergab, dass man die Produktion von Hohlplatten in sechs Prozessschritten unterteilen kann. Beteiligt sind ein Extruder, Aussparrer, Säge, Kran, Putzmaschine und Stapler. Je nach Produktionsplan wird bei einer beliebigen Bahn begonnen und nacheinander auf allen drei Bahnen produziert, wobei der gesamte Produktionsprozess 24 h dauert. Die sechs Prozessschritte beinhalten das Spannen der Stahlseile, Extrudieren, sprich das Aufbringen des Betons auf der Dielenbahn in gewünschter Form, Aushärten, Sägen, Abtransportieren und Putzen der Bahn. Um die Produktqualität sicherstellen zu können sollte die Dielenbahn zwei Stunden vor dem Auftragen des Betons gestartet werden und je nach Dielentyp eine gewisse Zeit nachheizen. Tabelle 1 zeigt die gängigen Deckentypen:

Tabelle 1: Typenübersicht der Produkte

Deckentyp	Querschnitt	Höhe h [cm]	Eigengewicht g1 [kN/m <sup>2</sup> ]	Spanntyp	Biegemoment MRd [kNm/m]	Querkraft VRd [kN/m]
VSD-8-16		16	2,60	M,B	49,1; 61,5	66,1; 67,9
VSD-8-20		20	3,65	B,C	81,8;107,2	80,9;81,8
VSD-6-20		20	2,85	B,C	85,9; 111,4	74,7; 76,3
VSD-5-26,5		26,5	3,75	B,C	176,4;212,4	103,5; 106,9
VSD-4-32		32	4,70	B,C	273,7; 329,6	142,6; 149,2
VSD-4-40		40	5,20	B,C	365,8; 457,5	190,4; 204,2
VSD-4-45		45	6,45	B,C	532,4; 623,8	249,8; 260,8
VSD-4-50		50	7,00	B,C	781,4; 869,3	340,5; 352,4

Legende: g1 ... Eigengewicht der Fertigteile inkl. Fugenverguss

MRd und VRd sind Richtwerte im Grenzzustand der Tragfähigkeit für die Expositionsklasse XC1.

Je Nach Nutzung können im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit höhere Deckenstärken erforderlich sein.

## Datenanalyse:

Stichprobenartig wurden zuerst 3 Monate ausgewählt mit unterschiedlichen Außentemperaturen. Jeder Tag dieser Monate wurde genau betrachtet und die Zeit bei eingeschalteter Heizung notiert. Um einen besseren Überblick zu bekommen wurde jeder Monat auf die gleiche Weise analysiert und in einer Tabelle dargestellt. Tabelle 2 zeigt als Beispiel den Monat April 2015.

Tabelle 2: Analyse April 2015

Datum	Bahnen			Produkte			Zusammenhang zwischen Heizung und Produktion			
	1	2	x	40C	20C	x	✓	x	✓	
1	1	2	x	40C	20C	x	✓	x	✓	
2	1	2	3	20C	20C	40C	x	✓	✓	
7	1	2	3	20C	32C	20C	✓	✓	✓	✓
8	1	x	3	40C	x	32C	x	x	x	
9	1	x	3	40C	x	32C	✓	✓	✓	✓
13	1	2	3	16B	16B	16B	✓	✓	✓	✓
15	1	2	x	16B	20C	x	x	✓	x	
20	x	2	3	x	20C	32B	x	x	✓	
21	1	2	3	20C	16B	20C	✓	✓	✓	✓
22	1	2	3	32B	32B	20C	✓	✓	✓	✓
23	1	2	x	20C	32B	x	x	x	✓	
27	x	2	3	x	20B	16B	x	✓	✓	
28	1	x	x	20C	x	x	✓	✓	✓	✓

In Spalte 3 sind die Produkte aufgelistet, welche an dem jeweiligen Tag produziert wurden. Spalte 4 sagt aus ob es einen Zusammenhang zwischen Produktion und Heizung gibt. Das heißt, dass bei jedem x die Heizung nicht ausschließlich zum Beheizen eines Produktes oder zur reinen Hallenheizung eingesetzt wurde und bei jedem P die Aktivität der Dielenheizung mit dem Produktionsplan übereinstimmt. Ein Häkchen in der letzten Spalte bedeutet, dass die Heizung sinngemäß verwendet wurde und dieser Tag somit in die weitere Auswahl für die Analyse bzw. das Lastprofil geht.

Ergebnis der Monatsauswertungen war, dass nur wenige Tage die Dielenheizung sinngemäß eingesetzt wurde. Aus diesem Grund war die Erstellung eines aussagekräftigen Lastprofils mittels numerischer Auswertung leider nicht möglich. Aus diesem Grund wurde ein theoretisches Lastprofil mit den vorhandenen Daten erstellt und der Jahresenergieverbrauch dargestellt.

In Abbildung 3 ist eine Beispielmessung eines Tages dargestellt. Klar zu sehen ist, dass sich der Startzeitpunkt der Heizung bei allen 3 Bahnen unterscheidet. Die Schlussfolgerung daraus, dass die Heizung mit dem Produktionsplan übereinstimmt und sich der Startzeitpunkt jeweils unterscheidet, ist, dass die Heizung nicht zur Hallenheizung sondern zur Qualitätssicherung verwendet wurde. Folgen bei einer unsachgemäßen Nutzung der Dielenheizung können Zugspannungen sein, welche sich beim Schneidevorgang als Stegrisse der einzelnen Dielen äußern können.

# Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

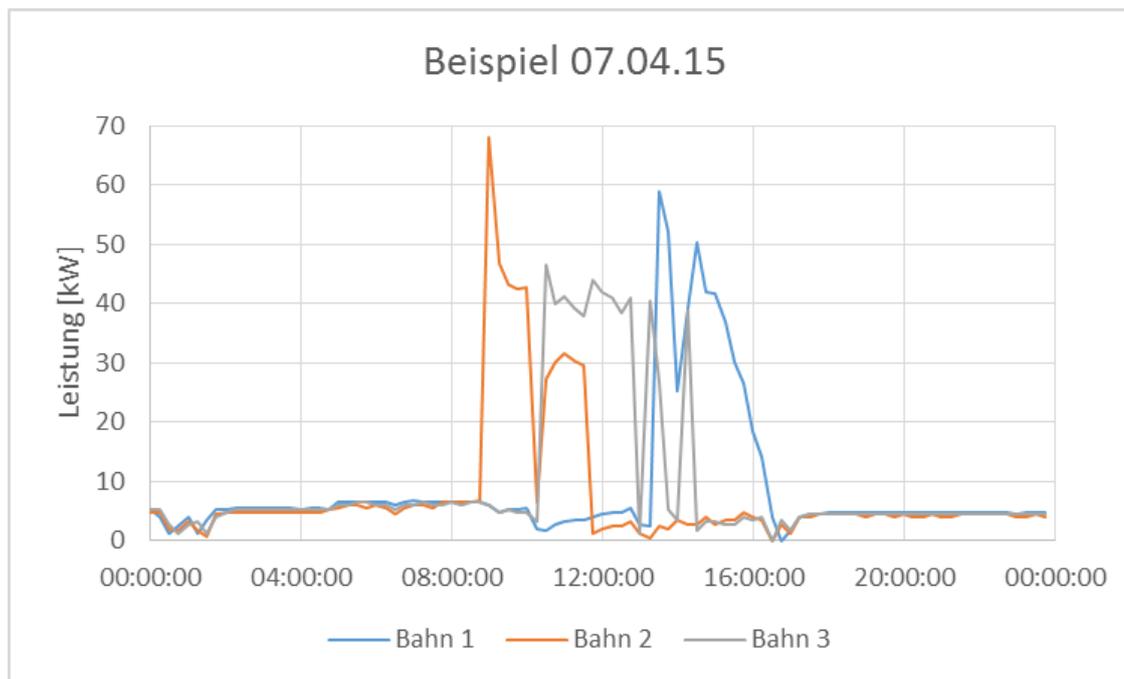


Abbildung 3: Beispiel einer vorgesehenen Bedienung der Heizung

Ein besonders wichtiges Ergebnis ist, dass die Leistung nie 0 beträgt. Obwohl die Heizung ausgeschaltet ist, ist trotzdem eine Leistungsübertragung vorhanden. Diese geringe Leistungsübertragung ist 24 h und an jedem Tag der Aufzeichnung vorhanden. In weiterer Folge stellt sich heraus, dass aufgrund dieser ständigen ungewollten Wärmeübertragung in Summe hohe Verluste entstehen. Erste Vermutungen legten nahe, dass das installierte Einregulier- und Regelventil TA Fusion P DN32 nicht komplett schließt und somit die Hauptpumpe immer einen kleinen Volumenstrom erzeugt, obwohl die Dielenbahnpumpe nicht eingeschaltet ist.

Es wurde ein jährlicher Energieverbrauch ermittelt, um die ungewollten Wärmeverluste zu quantifizieren (siehe Abbildung 4).

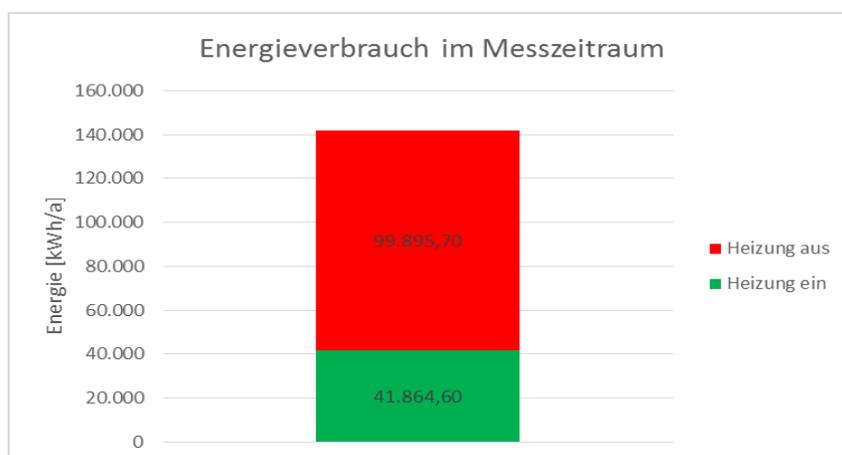


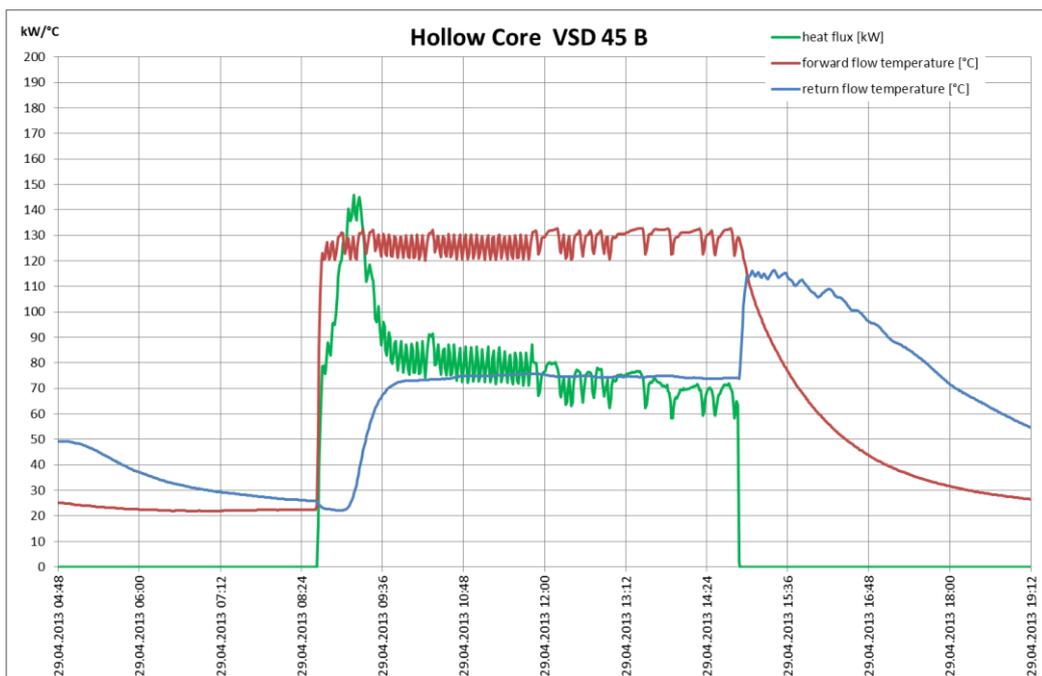
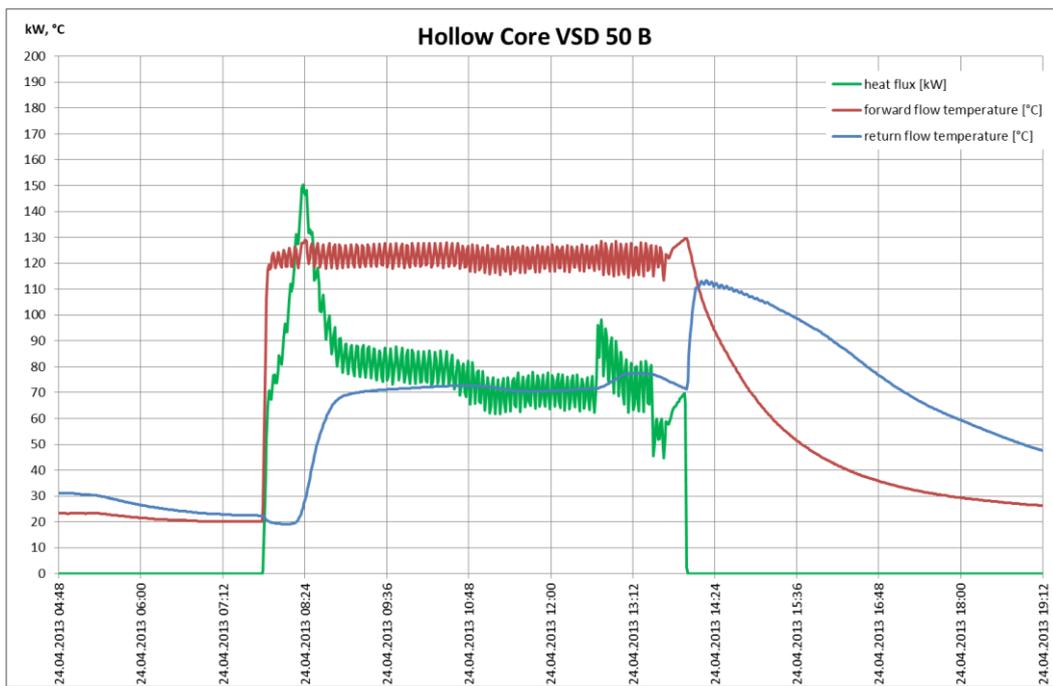
Abbildung 4: Energieverbrauch im Messzeitraum über 1 Jahr

# Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Der Energieverbrauch, in dem Messzeitraum von 01.04.2015 – 31.03.2016, beträgt 141.760. Davon wurden lediglich 41.864 kWh für die aktiv eingesetzte und gewollte Heizung benötigt. Das entspricht einem Prozentsatz von 29,5 %. Die restlichen 99.895 kWh, oder 70,5 %, wurden aufgrund der ungewollten Strömung verursacht und können als Verluste betrachtet werden.

Weiter wurden die Energiekennzahlen von verschiedenen Dielentypen ermittelt. Auf Basis des Energieberichtes der Sattler Energie Consulting und deren Messungen vom 31.05.2013 können für drei unterschiedliche Dielentypen die Energiekennzahlen ermittelt werden. Diese wurden im Zuge einer Masterarbeit berechnet und nachfolgend dargestellt. [1]



# Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

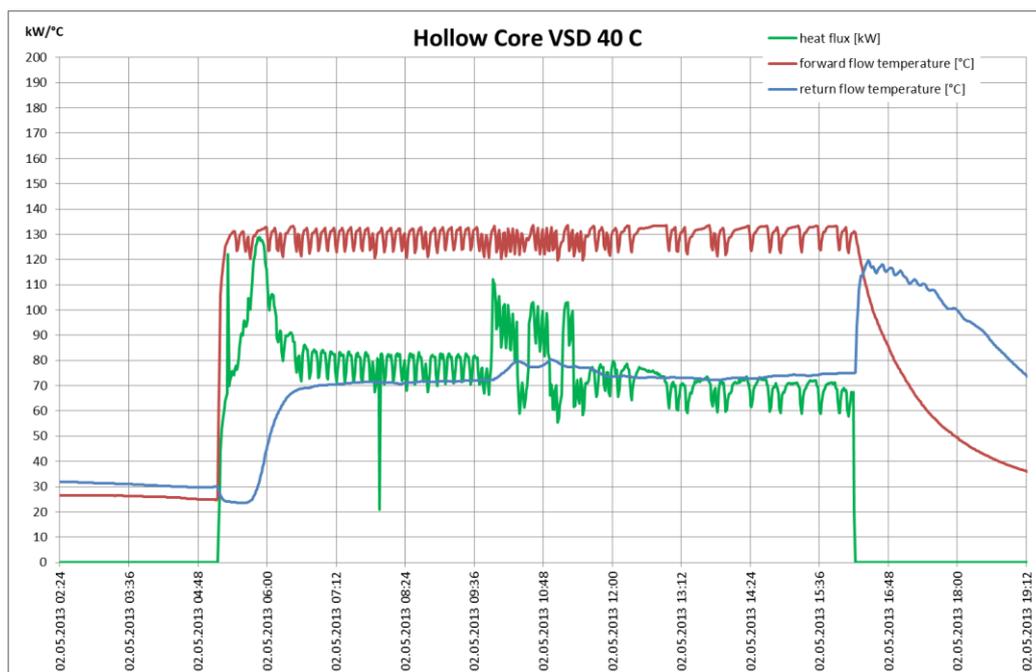


Abbildung 5: Wärmeleistung der Dielenbahn verschiedener Dielentypen während der Produktion

In Tabelle 3 wird der Energieverbrauch sowie die produzierte Dielenfläche angegeben und damit die Energiekennzahl berechnet.

Tabelle 3: Energiekennzahlen von Dielentypen (Messungen von 31.5.2013)

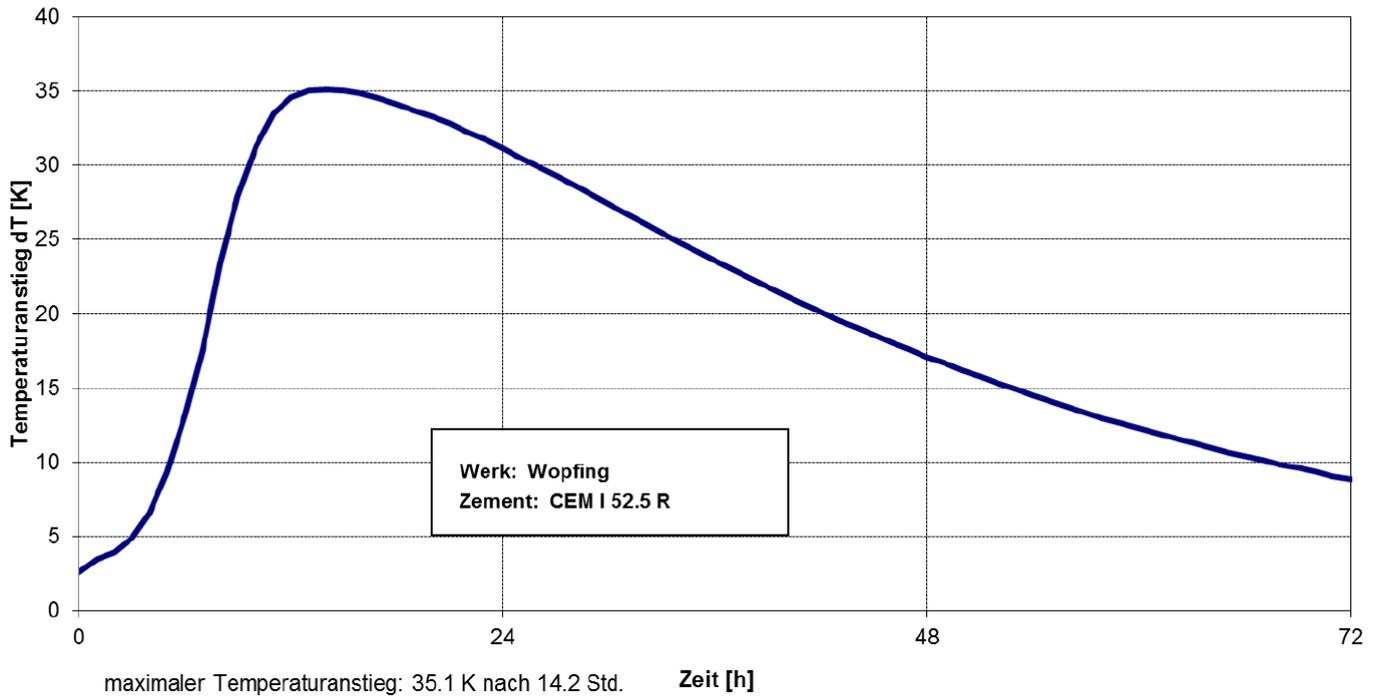
Diellentyp	Wärmeenergieverbrauch [kWh]	Dielenfläche [m <sup>2</sup> ]	Energiekennzahl [kWh/m <sup>2</sup> ]
VSD 50-B	489,54	136,25	3,59
VSD 45-B	501,48	153,26	3,27
VSD 40-C	853,32	164,75	5,18

## Hydratations-Wärmerückgewinnung

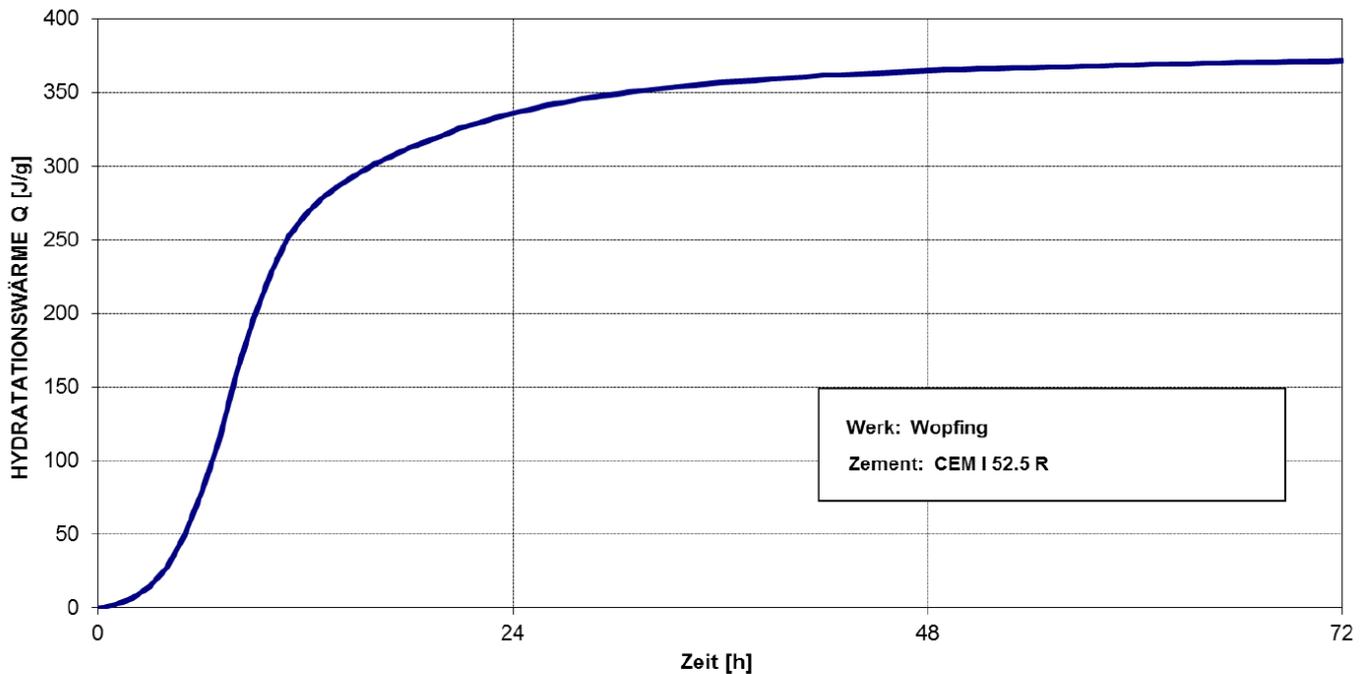
Beim Abbinden von Beton wird eine nicht zu unterschätzende Wärmemenge freigesetzt. Im Grunde hängt die Hydratationswärmeentwicklung von der Art des Zements und Festigkeitsklasse ab. Zur rechnerischen Abschätzung der frei werdenden Hydratationswärme erfolgten die Ermittlung der Hydratationswärme des Bindemittels sowie die Berechnung des Temperaturanstieges in einem mathematischen Modell.

Die Hydratationswärmeentwicklung der in der Dielenproduktion eingesetzten Zemente CEM I 52,5 R sowie CEM II / A-S 42,5 R sind in Abbildung 6 sowie Abbildung 7 dargestellt.

## Temperaturverlauf im Prüfkörper gemäß ÖNORM EN 196-9:2010



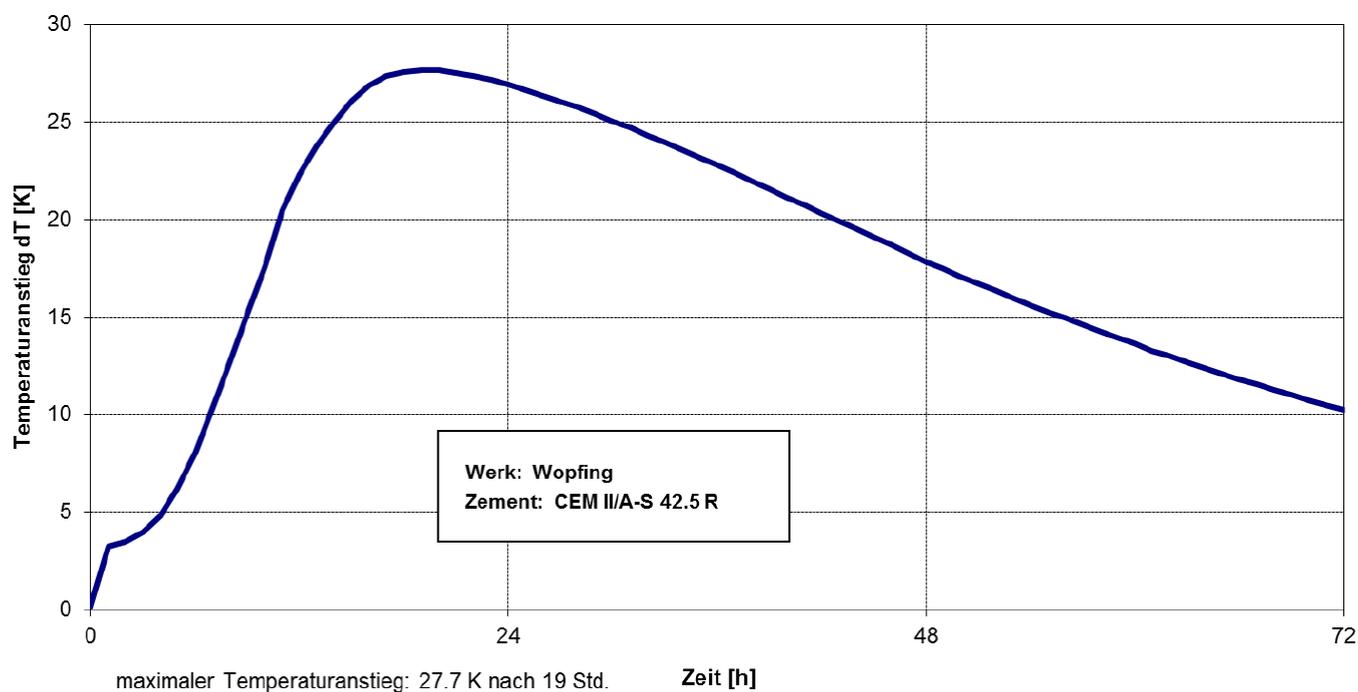
## Wärmeentwicklung von Bindemitteln gemäß ONR 23303:2010 Abschnitt 11.3 zur Berechnung des Temperaturanstieges bei der Erhärtung im Beton <sup>1)</sup>



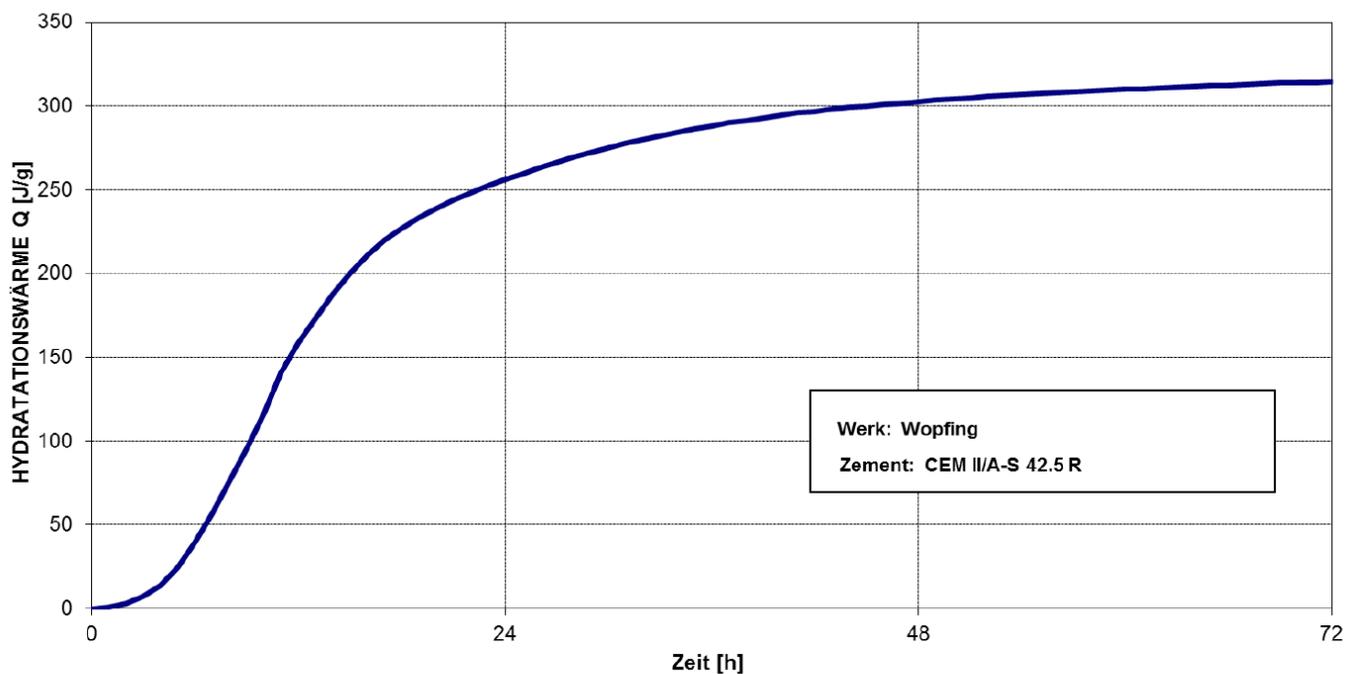
<sup>1)</sup> Messung nach ÖNORM EN 196-9:2010, Auswertung 30 Minuten ab Wasserzugabe

Abbildung 6 : Hydratationswärmewicklung CEM I 52,5R (Diele 32-50 Winter)

## Temperaturverlauf im Prüfkörper gemäß ÖNORM EN 196-9:2010



## Wärmeentwicklung von Bindemitteln gemäß ONR 23303:2010 Abschnitt 11.3 zur Berechnung des Temperaturanstieges bei der Erhärtung im Beton <sup>1)</sup>



<sup>1)</sup> Messung nach ÖNORM EN 196-9:2010, Auswertung 30 Minuten ab Wasserzugabe

Abbildung 7: Hydratationswärmewicklung CEM II / A-S 42,5R (Diele 16-26 und 32-50 Sommer)

# Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Auf Basis dieser Versuchsdaten sowie der Dielenabmessungen wurde ein vereinfachtes Berechnungsmodell erstellt. Als Beispiel wird die Diele VSD-4-40-C in Abbildung 8 dargestellt.

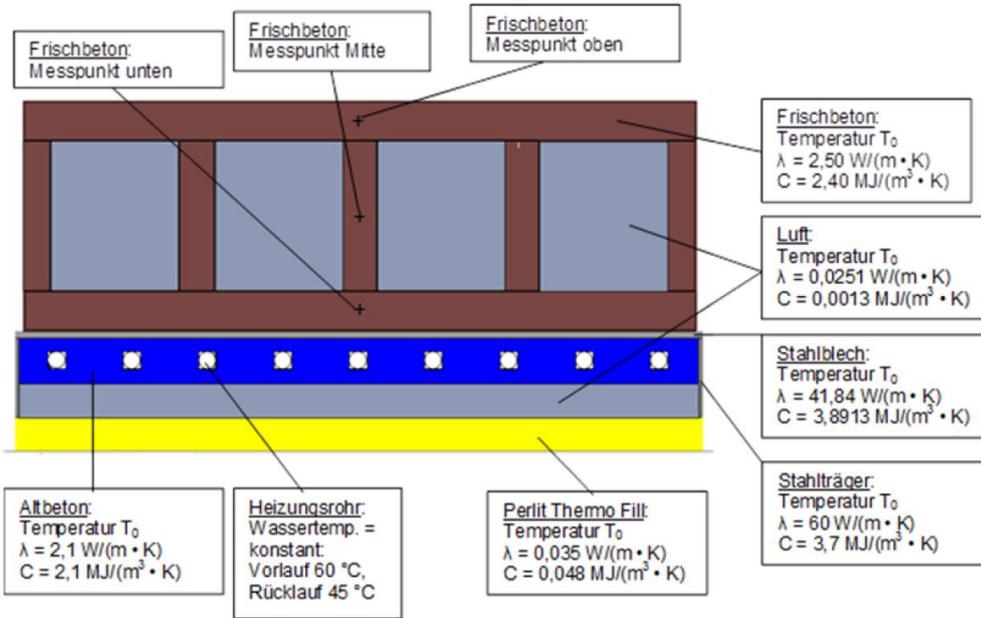


Abbildung 8: Berechnungsmodell für die Dielentyp VSD-4-40-C

Für die Berechnungsschritte wurden folgende Randbedingungen herangezogen:

- Umgebungstemperatur:  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  (Simulation Winter)  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  (Simulation Sommer)
- Bauteiltemperaturen bei Einbaubeginn:  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  (Simulation Winter),  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  (Simulation Sommer)
- Betoneinbautemperaturen:  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  (Simulation Winter)  $27 \text{ }^\circ\text{C}$  (Simulation Sommer)
- Heizbetrieb (optional) Vorlauftemperatur  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  und Rücklauftemperatur  $45 \text{ }^\circ\text{C}$

Auf Basis der definierten Randbedingungen, Materialmodellen, sowie der Hydratationswärmeabgabe des Zementes wurde die Wärmeentwicklung der unterschiedlichen Dielenbahnen errechnet. Zusätzlich erfolgte die Simulation mit Heizbetrieb (eingeschaltete Dielenheizung mit einer Vorlauftemperatur von  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ ), sowie ohne Heizbetrieb (Schaltisch hat die Umgebungstemperatur). Die Ergebnisse der Berechnungen im speziellem für den Dielentyp VSD-4-40-C sind in der folgenden Abbildung 9 und Abbildung 10 zu entnehmen. Letztere Abbildung zeigt exemplarisch die Temperaturentwicklung mit und ohne Heizbetrieb.

# Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

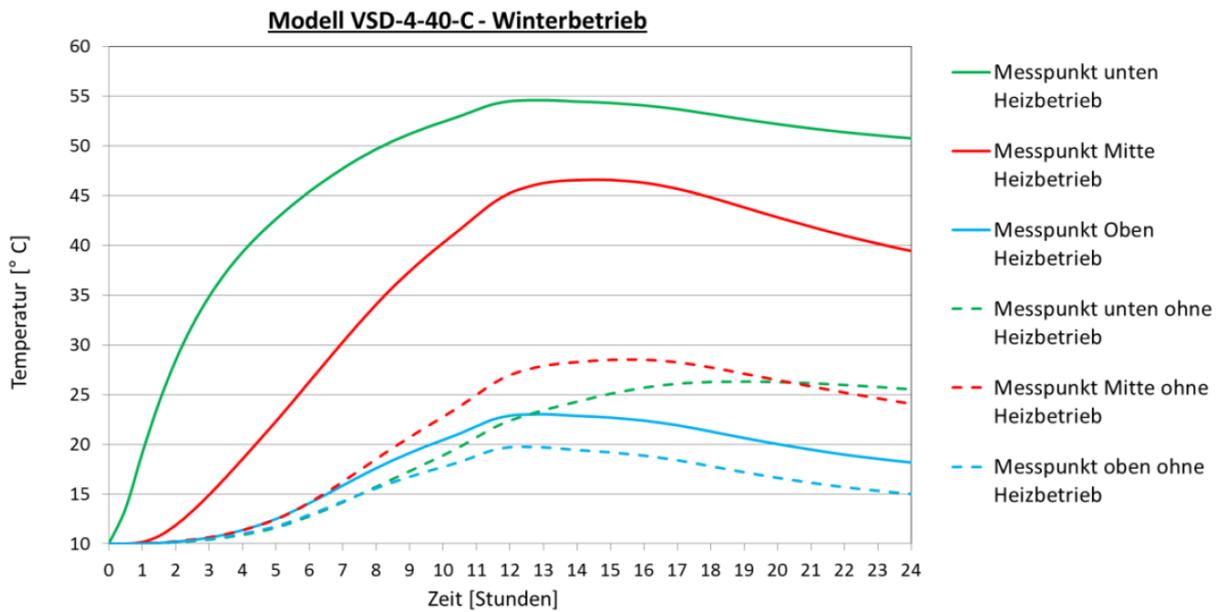
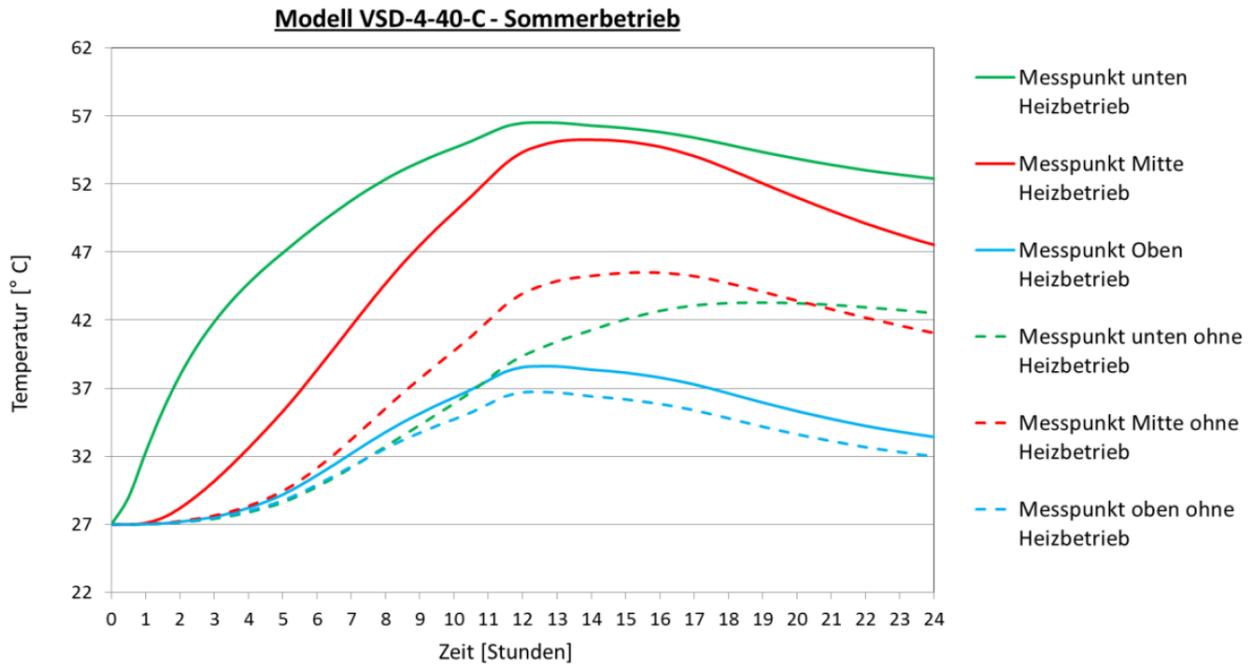


Abbildung 9: Ermittelte Wärmeentwicklung Hohldiele VSD-4-40-C für Sommer- und Winterbetrieb

# Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

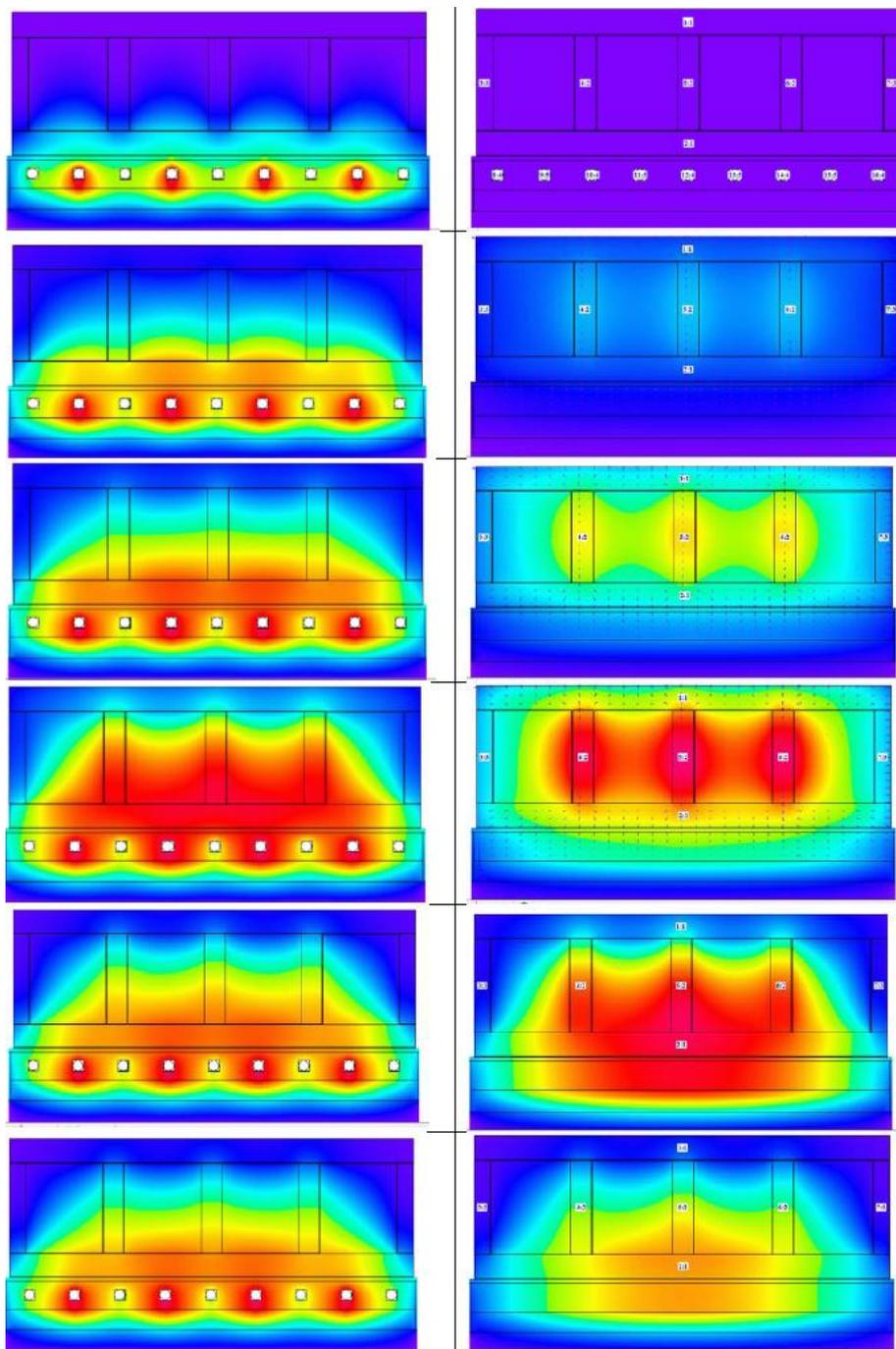


Abbildung 10: Temperaturentwicklung in der Diele VSD-4-40-C mit (links) und ohne (rechts) Heizbetrieb

Die folgenden Tabellen sind die errechneten Maximalwerte der Betontemperatur der jeweilig untersuchten Dielentypen, sowie die maximal auftretende Temperaturdifferenz zwischen Messpunkt oben und Messpunkt unten zusammengestellt. Es zeigt sich, dass die höchsten Temperaturdifferenzen zwischen Dielenober- und Unterseite im Winterbetrieb und bei eingeschalteter Dielenheizung auftreten.

# Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

<u>Modell VSD-6-20-C</u>		Winter, 10 °C		Sommer, 27 °C	
		mit Heizbetrieb	ohne Heizbetrieb	mit Heizbetrieb	ohne Heizbetrieb
maximaler Gradient der Betontemperatur zwischen den Messpunkten oben und unten [°C]		27	2	16	2
Maximaltemperatur	Messpunkt unten	51	15	53	32
	Messpunkt Mitte	39	18	48	35
	Messpunkt oben	26	17	40	34

<u>Modell VSD-5-26,5-C</u>		Winter, 10 °C		Sommer, 27 °C	
		mit Heizbetrieb	ohne Heizbetrieb	mit Heizbetrieb	ohne Heizbetrieb
maximaler Gradient der Betontemperatur zwischen den Messpunkten oben und unten [°C]		31	2	18	2
Maximaltemperatur	Messpunkt unten	54	17	56	34
	Messpunkt Mitte	43	21	51	38
	Messpunkt oben	25	19	39	36

<u>Modell VSD-4-40-C</u>		Winter, 10 °C		Sommer, 27 °C	
		mit Heizbetrieb	ohne Heizbetrieb	mit Heizbetrieb	ohne Heizbetrieb
maximaler Gradient der Betontemperatur zwischen den Messpunkten oben und unten [°C]		33	11	19	11
Maximaltemperatur	Messpunkt unten	55	26	57	43
	Messpunkt Mitte	47	29	55	46
	Messpunkt oben	33	20	39	36

Abbildung 11: Errechnete Maximaltemperaturen der Modelle

## Wärmeentwicklung zufolge Hydratation - Messung

Zur Verifizierung der Simulationsergebnisse wurden Temperaturmessungen bei der tatsächlichen Dielenproduktion durchgeführt. Hierfür wurden Temperaturmessfühler direkt nach der Produktion in die Diele, durch Bohren von Löchern bis zur gewünschten Sensortiefe, eingebracht und anschließend wieder mit Bindemittelleim verschlossen.

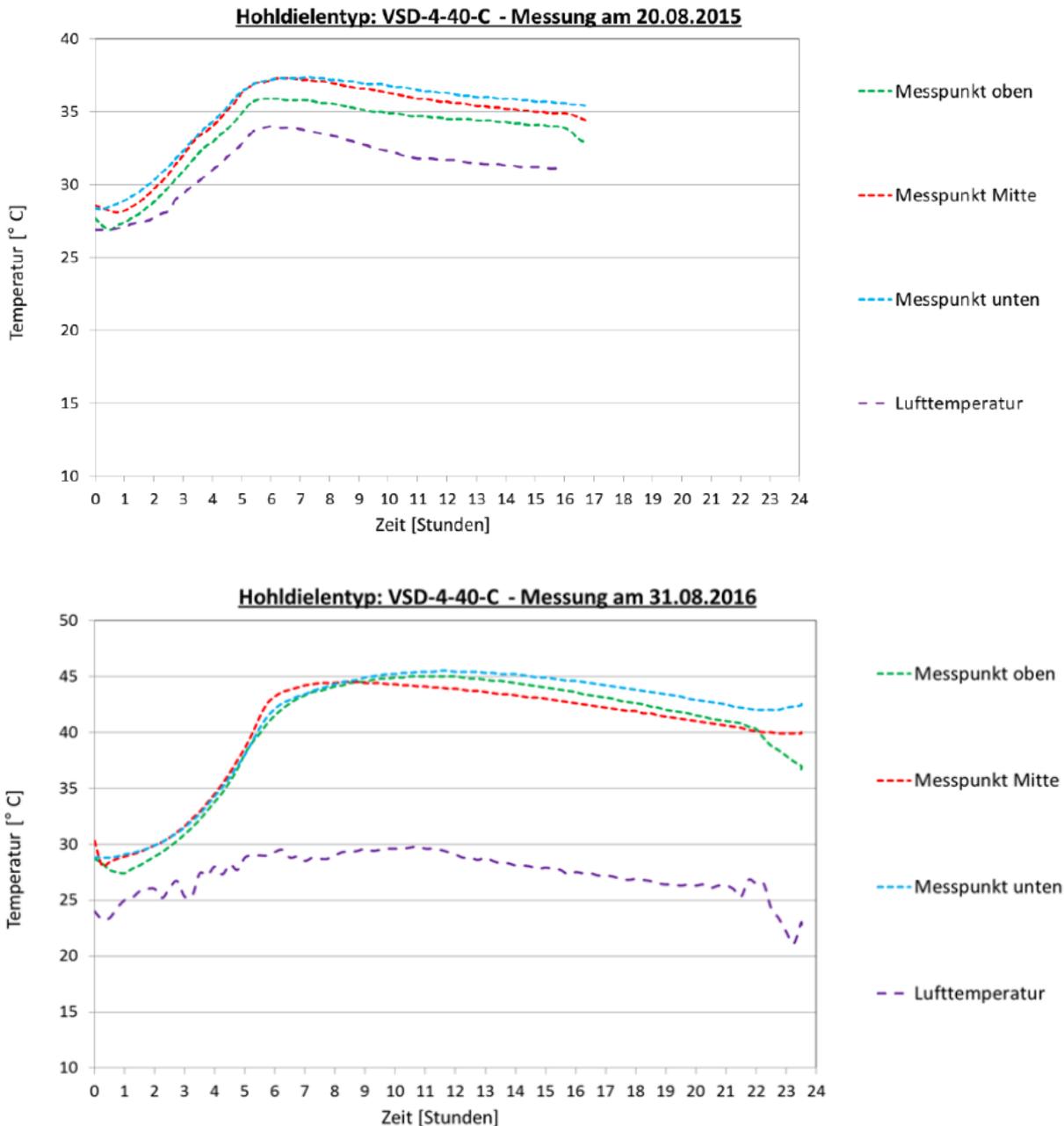


Abbildung 12: Gemessener Temperaturverlauf Dielentyp VSD-4-40-C

Modell VSD-4-40-C		Messdatum	
Max. Gradient der Betontemperatur zwischen den Messpunkten oben und unten [°C]		4	6
Maximaltemperatur	Messpunkt unten	37	46
	Messpunkt mitte	37	45
	Messpunkt oben	36	45

Aus den Untersuchungen wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Die Simulationsrechnungen zeigten, dass im Heizbetrieb (Vorlauftemperatur von 60 °C) die Dielentemperaturen an allen Messfühlern deutlich ansteigen.
- Die Temperaturdifferenz zwischen Dielenober- und Dielenunterseite ist lt. Simulationsrechnung im Heizbetrieb deutlich höher als ohne Heizbetrieb.
- Besonders beim Dielentyp VSD-4-40-C zeigen sich bei der Simulation im Winterbetrieb Temperaturdifferenzen zwischen Dielenober- und Dielenunterseite von etwa 33 °C. Ohne Heizbetrieb würde diese Differenz nur 11 °C ausmachen.
- Die simulierten Wärmebilder zeigen, dass die höchsten Temperaturen mit Heizbetrieb an der Dielenunterseite und ohne Heizbetrieb im Bereich der Stege auftreten.
- Die vor Ort gemessenen Temperaturverläufe stimmen gut mit den Simulationsrechnungen für den Sommerbetrieb überein. Geringfügige Abweichungen sind durch teilweise von den Simulationsrechnungen abweichenden Umgebungstemperaturen begründbar.
- Eine sinnvolle Messung der Erwärmung der Diele, zufolge Hydratation und Dielenheizung im Winterbetrieb, konnte nicht erfolgen

Auf Grundlage der Simulationen bzw. Messdaten wurden zudem Überlegungen angestellt, in wieweit über den Querschnitt auftretenden Temperaturdifferenzen zu Schäden zufolge Rissbildung führen bzw. wie diese möglichst reduziert werden können. Um diese Fragestellungen zu untersuchen, wurde eine Diele VSD-4-40-C direkt nach dem Schneiden und Abheben vom Schalungstisch beprobt (siehe Abbildung 13).

# Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

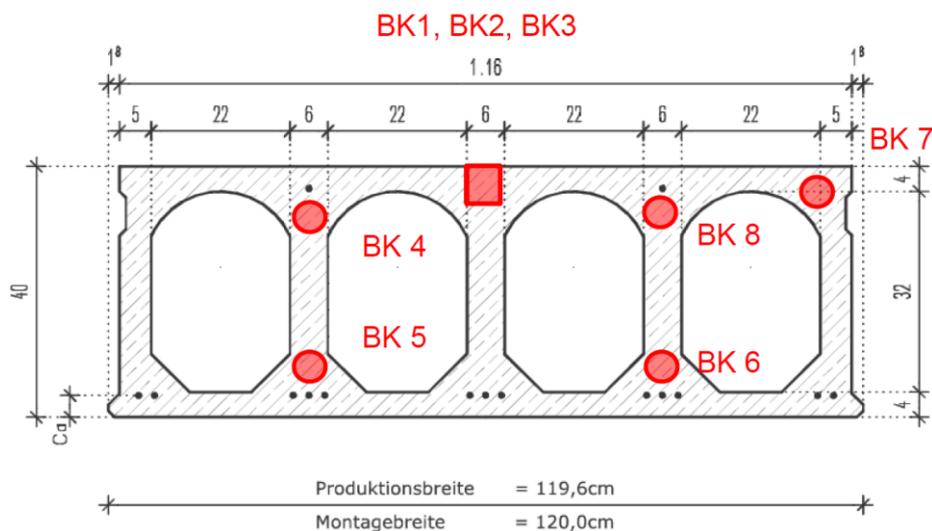


Abbildung 13: Diele VSD-4-40-C mit Probenahmestellen (Bezeichnung BK1 bis BK8)

An den entnommen Bohrkernen wurde die Druck- bzw. Zugfestigkeit bei unterschiedlichen Betonaltern sowie die Rohdichte bestimmt. Die Ermittlung erfolgte an Bohrkernen mit einem Durchmesser und einer Höhe von 10 cm. In Tabelle 4 sind die Ergebnisse zusammengestellt.

Tabelle 4: Ergebnisse der Rohdichte- und Festigkeitsbestimmung der an der Diele VSD-4-40-C entnommen Bohrkern

Stelle	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]							Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
	1	2	3	4	5	6	7	8
Alter [Tage]	7	7	7	1	1	7	1	7
	72,8	88,2	67,9	49,8	46,4	57,1	41,3	4,02
	69,6	79,7	59,2	45,6	45	56,9	48,5	4,07
				41,7	45,8	55,3	45,6	4,02
				48,5	51,2	61	51,2	4,38
				40,4	37,4	62,1	44,3	4,13
MW	71	84	64	45	45	58	46	4
	Rohdichte [kg/m <sup>2</sup> ]							Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
	2532	2532	2534	2516	2514	2532	2531	
	2534	2547	2536	2525	2532	2531	2529	
				2516	2537	2534	2537	
				2527	2529	2548	2545	
				2526	2521	2533	2533	
MW	2530	2540	2530	2520	2530	2540	2530	

Bei Betrachtung der Ergebnisse aus Tabelle 4 kann festgestellt werden, dass bei einem Probenalter von einem Tag die Festigkeiten der Bohrkern, die im oberen Teil der Hohlziele entnommen wurden (BK 4 und BK 7 mit mittleren Festigkeiten von 45 bzw. 46 N/mm<sup>2</sup>), nahezu die gleiche Festigkeit aufweisen wie jener Bohrkern, der im unteren Teil der Hohlziele entnommen wurden (BK 5 mit einer mittleren Festigkeit von 45 N/mm<sup>2</sup>). Bei einem Probenalter von 7 Tagen zeigen die oberen Bohrkern (BK 1, BK 2 und BK 3 mit mittleren Festigkeiten von 73 N/mm<sup>2</sup>) höhere Festigkeiten als der im unteren Teil entnommen Bohrkern

(BK 6 mit einer mittleren Festigkeit von 58 N/mm<sup>2</sup>). Eine örtlich variierende Verdichtungsleistung und damit ein Einfluss auf Festigkeitseigenschaften konnte nicht festgestellt werden.

Neben der Druck und Zugfestigkeit war eine weitere zu betrachtende Fragestellung, ob der durch Hydrationswärme, Dielenheizung bzw. Kühlung durch niedrige Außentemperatur vorhandenen Temperaturunterschied zwischen Dielenober- und Unterseite die Stegrissbildung begünstigt.

Im gegenständlich untersuchten Fall kühlt der Beton speziell im Winter sehr schnell ab, während dem unteren Teil der Hohlziele Wärme durch die Dielenheizung zugeführt wird. Dadurch kommt es zu einer hohen Temperaturdifferenz zwischen Dielenober- und -unterseite. Da mit dem Erstarren die sich veränderten Materialeigenschaften des jungen Betons (z. B. Elastizitätsmodul), auf Basis der im Rahmen dieses Projektes erfassten Information, nur sehr ungenau abgeschätzt werden können, wurde eine vereinfachte Abschätzung gewählt und die Dehnungen der Dielentypen ermittelt.

Dielentyp	Abgeschätzte Dehnungen aufgrund spannungserzeugender Temperaturdifferenz Simulation Heizbetrieb Winter [mm/m]	Zugbruchdehnung des Betons [mm/m]
Modell VSD-6-20-C	0,16	≤ 0,15 bzw. max. 0,20
Modell VSD-5-26,5-C	0,18	
Modell VSD-4-40-C	0,20	

Bei ungünstigen Bedingungen (Dielenheizung und kalte Außentemperatur) zeigt sich vor allem bei hohen Dielen (wie z.B. VSD-4-40-C), dass die Zugbruchdehnungen aufgrund der Temperaturdifferenz zwischen Dielenunter- und Oberseite im Dielensteg überschritten werden kann. Auf eine Produktion dieser Dielen bei niedrigen Beton- und Außentemperaturen sollte daher möglichst verzichtet werden.

Auf Basis der Analyse konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Die ermittelten Materialkennwerte zeigen, dass die Festigkeiten der Bohrkerne, die im oberen Teil der Hohlziele entnommen wurden, nach einem Tag nahezu die gleiche Festigkeit aufweisen wie die Bohrkerne die im unteren Teil der Hohlziele entnommen wurden.
- Bei einem Probealter von sieben Tagen zeigen die aus der Oberseite entnommenen Bohrkerne höhere Festigkeiten, als die im unteren Teil der Hohlziele entnommenen Bohrkerne. Eine eventuelle Auswirkung der Vorspannung auf die Betonfestigkeit kann nicht ausgeschlossen werden.
- Die aufgebrachten Vorspannkkräfte sind deutlich kleiner als die zum entsprechenden Betonalter vorherrschenden Druckfestigkeiten.
- Zur Verhinderung von Rissen im Bauwerk werden in der Literatur Grenzwerte für einen höchstzulässigen Gradienten der Betontemperatur von < 0,7 K / cm definiert. Bei Vergleich mit der tatsächlich über den Querschnitt vorhandenen Temperaturverteilung wird deutlich, dass bei den simulierten Extremwerten für den Winterbetrieb mit Dielenheizung dieser Grenzwert mit bis zu 1,7 K / cm deutlich überschritten wird.

# Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

- Auf Basis der abgeschätzten risserzeugenden Dehnungen zwischen Dielenober- und -unterseite wurde festgestellt, dass bei ungünstigen Bedingungen (Dielenheizung im Winterbetrieb) die Zugbruchdehnungen des Betons überschritten und so Risse im Dielensteg entstehen können.

Nach dem Umbau der Dielenbahnen im Werk in Wöllersdorf und den daraus gewonnen Erkenntnissen wurde von einer weiteren Umsetzung in Herzogenburg abgesehen, da die aus den theoretischen Modellen erwartete Hydrationswärme nicht abgeführt und somit genutzt werden konnte.

## Anlagensimulation mit Solareinbindung

Als Grundlage für die Simulation wurde die Vorlage 58a von Polysun zur Prozesswärme verwendet und im Anschluss so ergänzt, dass diese das Anlagenschema der Firma optimal darstellt. Neben dem Solar-Kreislauf beinhaltet diese einen Pufferspeicher, einen Gaskessel und 3 Energiesenken, welche die einzelnen Bahnen darstellen sollen. Die Temperatur wird dabei mithilfe einer Beimischschaltung mit Dreiwegeventil geregelt.

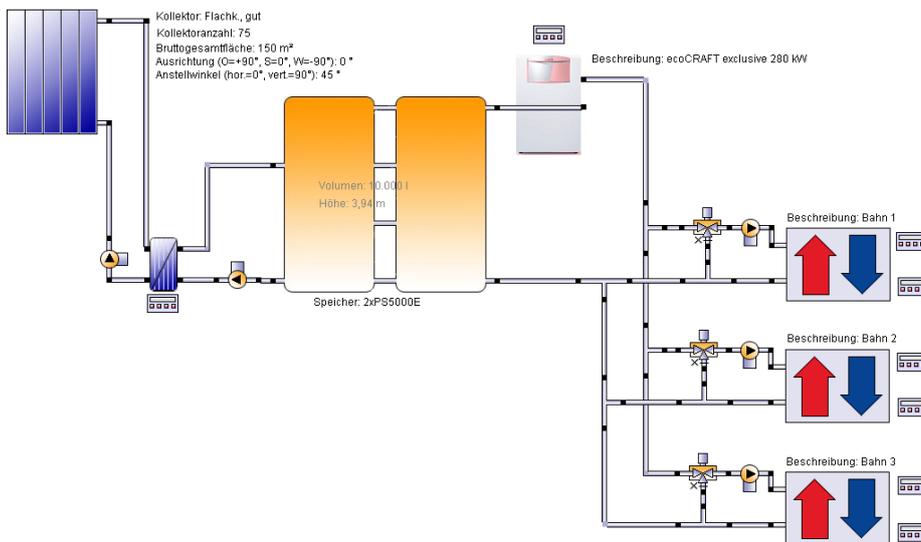


Abbildung 14: Anlagenschema Polysun

Da diese Arbeit keine Planung der Solaranlage beinhaltet, wurden, aufgrund der in diesem Kapitel errechneten Werte zur Vorauslegung, eine Bruttogesamtfläche der Anlage von 150 m<sup>2</sup> und ein Speichervolumen von 10 m<sup>3</sup> als vorläufige Auslegungswerte der folgenden Simulationen gewählt.

Um zu einem aussagekräftigen Ergebnis zu kommen wurden 4 verschiedenen Kenngrößen analysiert:

- Solarer Deckungsanteil (SD)
- Kollektorfeldertrag bzgl. Bruttogesamtfläche (KFE)
- Anlagennutzungsgrad
- Wärmegestehungskosten

Außerdem wurde jede Kenngröße für Flachkollektoren (FK) und Vakuumröhrenkollektoren (VRK) berechnet. Die Abbildung 15 stellt den SD und den KFE bei einer fixen Bruttofläche von 150 m<sup>2</sup> über einem

# Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

variablen Speichervolumen dar. Das Speichervolumen wird dabei in 2 m<sup>3</sup> Schritten von 2 – 18 m<sup>3</sup> variiert. Der SD beginnt bei ca. 40 % und ist beim FK und VRK gleich. Erhöht man das Speichervolumen bis 18 m<sup>3</sup> steigt der SD bis 57,9 % beim FK und 54,4 % beim VRK.

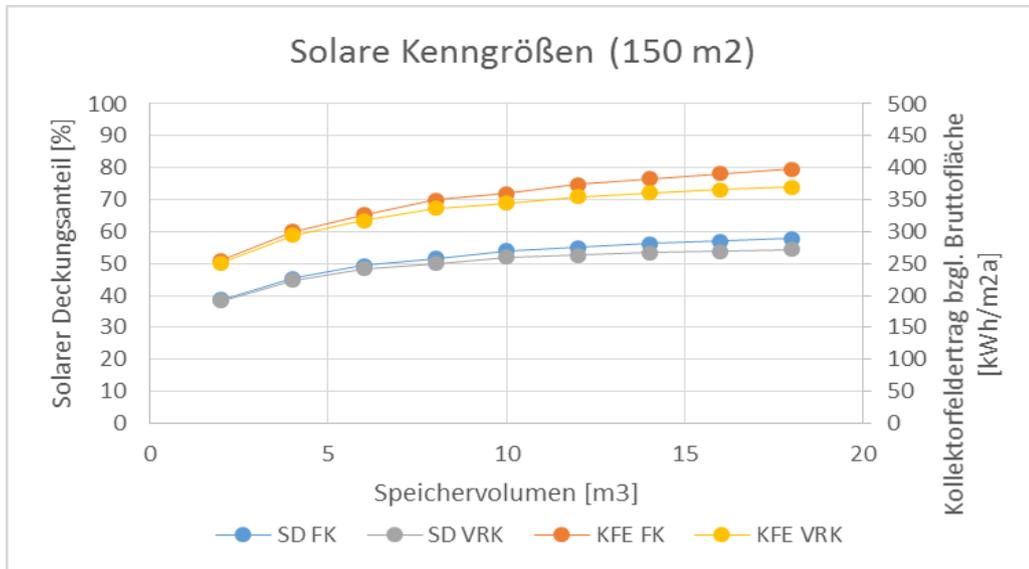


Abbildung 15: Solare Kenngrößen bei variablem Speichervolumen

Die Abbildung 16 stellt den SD und den KFE bei einem fixen Speichervolumen von 10 m<sup>3</sup> über einer variablen Kollektorfläche dar. Auffallend ist vor allem der Punkt bei einer Fläche von 200 m<sup>2</sup>. Rund um diesem Punkt schneiden sich sowohl der SD von FK und VRK als auch der KFE der beiden Kollektortypen.

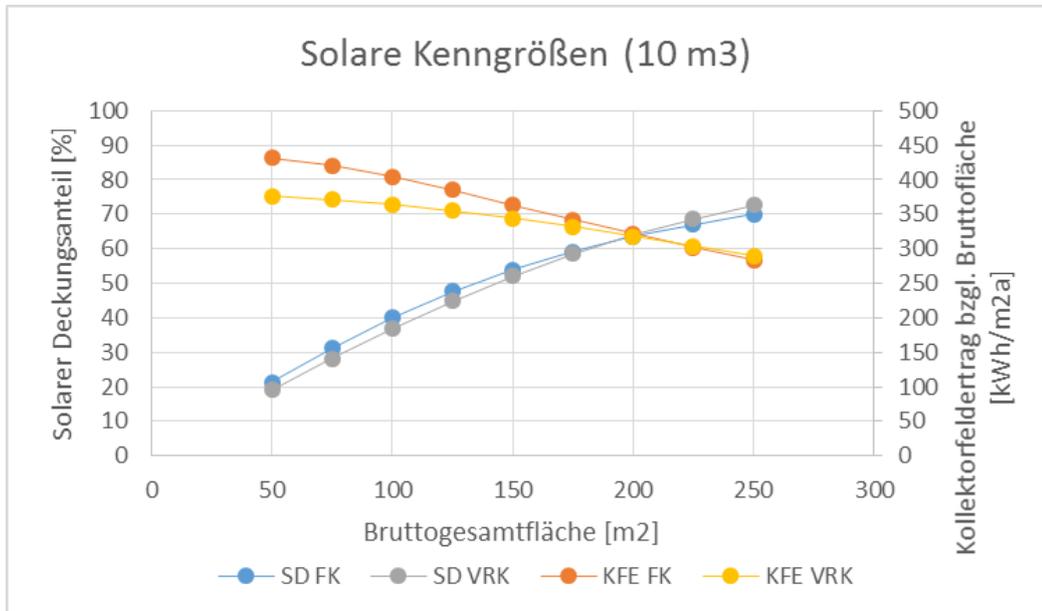


Abbildung 16: Solare Kenngrößen bei variabler Kollektorfläche

Der SD steigt bei Erhöhung der Kollektorfläche an und erzielt maximale Einzelwerte bei einer Fläche von 250 m<sup>2</sup> von 70 % beim FK und 72,7 % beim VRK. Da sich das Speichervolumen nicht ändert schneiden

# Energieforschungsprogramm – 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

sich die beiden Kurven bei einer Fläche bei der sich das Temperaturniveau so stark erhöht hat, dass die Vorteile des VRK hervortreten.

Der Anlagennutzungsgrad wird in Abbildung 17 explizit für eine Variante mit 10 m<sup>3</sup> fixem Speichervolumen und variabler Kollektorfläche dargestellt. Je größer die Anlage desto schneller wird der Speicher beladen und desto öfter geht die Anlage in Stagnation.

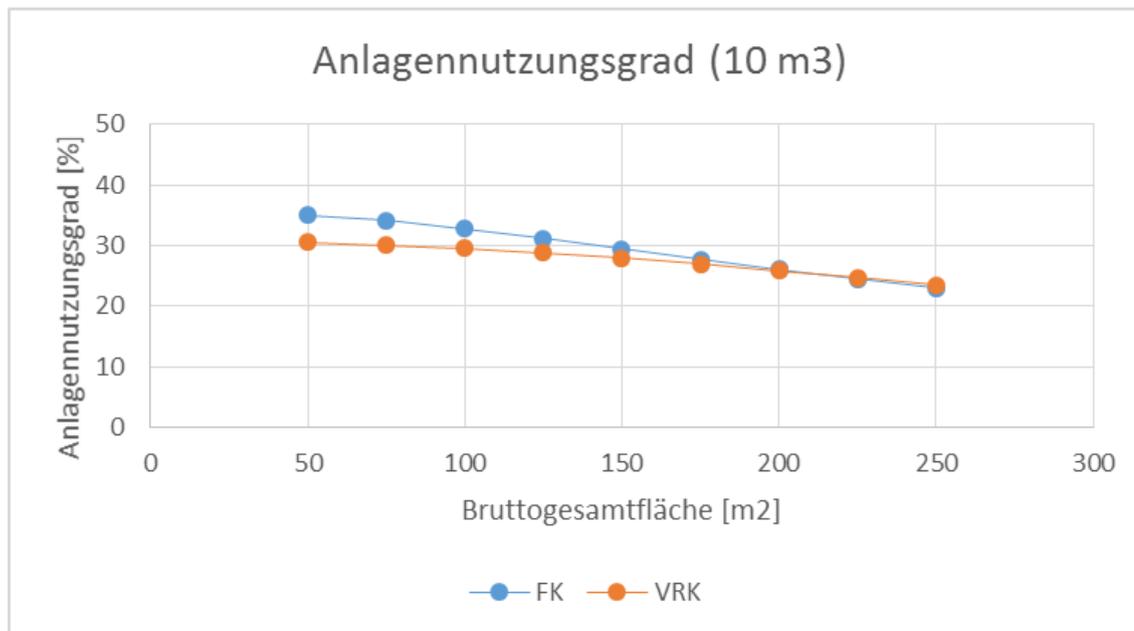


Abbildung 17: Anlagennutzungsgrad

Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit ist vor allem in Verbindung mit Prozesswärme ein wichtiger Aspekt. Geringe Amortisationszeiten sind oft Voraussetzungen für Investitionen. Um die Investitionskosten inklusive Förderung zu berechnen wurde der Leitfaden für Solare Großanlagen des Klima- und Energiefonds der österreichischen Bundesregierung herangezogen.

Der jährliche solare Energieertrag wurde durch unterschiedliche Varianten simuliert. In Tabelle 5 sind die Ergebnisse, welche für die Berechnung des Wärmepreises relevant sind, zu sehen.

Tabelle 5: Jährlicher solarer Energieertrag

Kollektorfläche [m <sup>2</sup> ]	Kollektorfeldertrag bzgl. Bruttogesamtfläche [kWh/m <sup>2</sup> a]					
	5 m <sup>3</sup>		10 m <sup>3</sup>		15 m <sup>3</sup>	
	FK	VRK	FK	VRK	FK	VRK
50	397,5	359,7	432,1	376,3	447,8	382,8
75	378,4	348,4	420,4	371,1	441,3	380,9
100	358,2	335,7	404,7	364	429,3	376,7
125	336,9	321,6	384,9	355	411,9	370,4
150	316,3	307,2	363,3	344,5	392	362,3
175	296,6	292,9	342,2	331,9	370,4	351,9
200	277,1	278,9	321,6	318	349,4	339,2
225	259,5	264,7	302	304	328,7	324,7
250	243,1	251,2	283,5	289,9	308,9	309,7

Die Ergebnisse für die unterschiedlichen Varianten werden in Abbildung 18 grafisch dargestellt. Es ist der Wärmepreis in Euro/kWh über der Bruttogesamtfläche aufgetragen. Außerdem wurden 3 verschiedene Speichervolumina einbezogen.

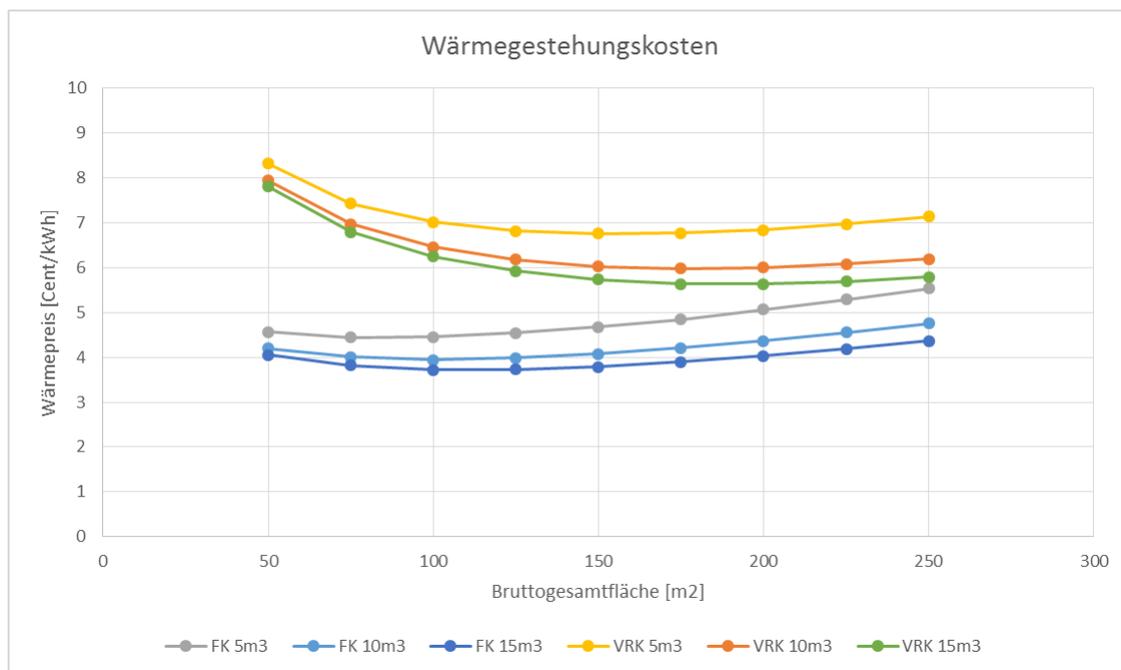


Abbildung 18: Wärmegestehungskosten

Abbildung 18 zeigt, dass der Wärmepreis für FK bei kleinerer Kollektorfläche deutlich geringer ist als für VRK.

Da sich die Investitionskosten bei einem Speicher in Grenzen halten und der Wärmepreis bei größerer Ausführung sinkt ist eine Anlage mit einem 15 m<sup>3</sup> Speicher und einem 150 m<sup>2</sup> Flachkollektorfeld zu empfehlen.

## 5 Ausblick und Empfehlungen

### Anpassung der Produktionsabfolge an Hydrationswärme, techn. Umsetzung

Infolge der durchgeführten Versuche, theoretischen Berechnungen und Simulationen, lässt sich ein theoretisches Bild über das Ausmaß der Neuentwicklungen im Bereich der beheizten Dielenbahn darstellen.

Für den Produktionsstandort WOE würden sich in Verbindung mit einer Solarthermie folgende Zahlen ergeben:

- 80 % Energieeinsparung
- 14,4 % der benötigten fossilen Energie kann durch solare Wärme erzeugt werden
- 5,6 % der Wärme muss noch durch Erdgas erzeugt werden - Gesamte Energiekostensparnis 94,4 %

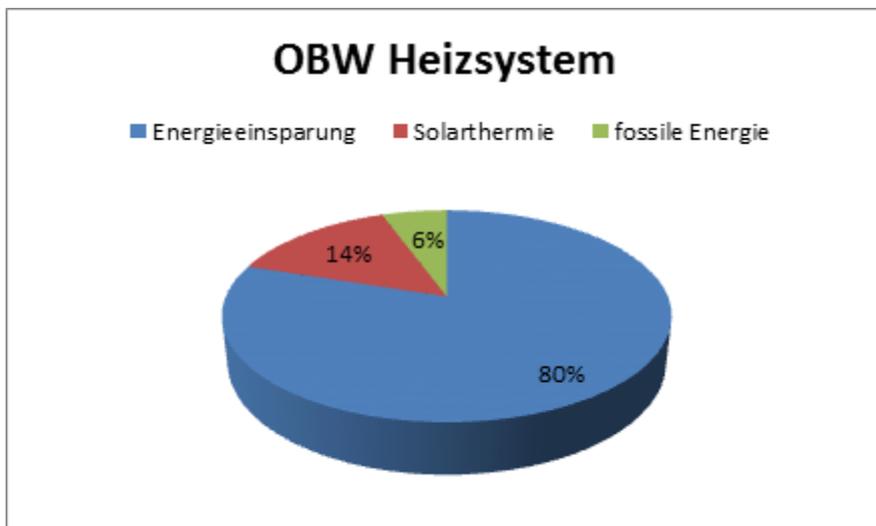


Abbildung 19: Energieeinsparungspotenzial durch verbesserte Hydraulik und Solareinbindung

Ein wesentlich größeres Potential der Einsparung würde sich bei einem 24-Stunden-Betrieb ergeben. Hier könnte die Hydrationswärme des Betons als Wärmelieferant durch die Wärmespeicherung im neuen Heizsystem genutzt werden. Eine Errichtung einer Solarthermieanlage wäre hierbei nicht erforderlich, jedoch muss eine durchgehende Produktion gewährleistet werden.

Nach dem einmaligen Aufwärmen der Bahnen auf 30°C würden sich in einer theoretischen Betrachtung und Berechnung folgende Werte einstellen (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Ergebnisse bei einem 24-Stunden-Betrieb

Ablauf	Dauer [min]	Dauer [h]	Blechtemperatur	Energiezufuhr	Bemerkung
Sägen	120	2	39°C	27 W/m <sup>2</sup>	3,8 kWh/120m Bahnlänge – 144m <sup>2</sup>
Bahnreinigung + Litzen spannen	90	1,5	33°C	0	
Extrudieren	90	1,5	30°C	0	
Aushärten	420	7	45/37°C	Hydrationswärme	
Sägen	120	2	39°C	27 W/m <sup>2</sup>	3,8 kWh/120m Bahnlänge – 144m <sup>2</sup>
Bahnreinigung + Litzen spannen	90	1,5	33°C	0	
Extrudieren	90	1,5	30°C	0	
Aushärten	420	7	45/37°C	Hydrationswärme	
	1440	24		54W/m <sup>2</sup>	7,6 kWh/Tag u. Bahn – 288m <sup>2</sup>

Der Energiebedarf liegt bei unserer bisherigen Produktion bei 8,71 kWh/m<sup>2</sup>. Mit dem neuem System würde man bei durchgehender Produktion auf einen theoretischen Energiebedarf von 0,027kWh/m<sup>2</sup> kommen. Dies würde somit einer Energieeinsparung von 99,97% bedeuten.

Die Umsetzung eines durchgehenden 24-Stunden-Betriebes ist auf Grund einer schwankenden Auftragslage in der Praxis jedoch nur schwer realisierbar.

### **Techn. Machbarkeit zur Speicherung der Hydrationswärme:**

Es wurden zwei mögliche Schemen zur Speicherung der Hydrationswärme innerhalb eines Puffers erarbeitet. Da die gewonnen Hydrationswärme in den Versuchen deutlich geringer ausfiel, als die erwartete Wärmegewinnung, wurde von einer Umsetzung abgesehen. Ebenfalls erschien aufgrund der niedrigen Energiepreise eine Umsetzung als nicht wirtschaftlich.

## 6 Literaturverzeichnis

- [1] Schlattner, M.: Analysis of the Energy Consumption and Concept for the Optimization of the Production Process of pre-fabricated Concrete Components, Masterarbeit, FH Wels, Juli 2014

## 7 Anhang

- Deliverable-Bericht D2.1, D2.2 und D2.3 (entspricht dem Arbeitspaket 2)
- Deliverable-Bericht D3.1 (entspricht Arbeitspaket 3)
- Deliverable-Bericht D4.1 (entspricht Arbeitspaket 4)

## 8 Kontaktdaten

DI Harald Trommet  
Franz Oberndorfer GmbH & Co KG  
Lambacher Straße 14, 4623 Gunskirchen  
+43 7246 7272-0  
h.trommet@oberndorfer.at  
<https://www.oberndorfer.at/>

DI Dr. Martin Peyerl  
Smart Minerals GmbH  
Arsenal 214, 1030 Wien  
+43 1 714 6681-24  
peyerl@smartminerals.at  
<https://www.smartminerals.at/>

Dr. Gerald Steinmaurer  
FH-OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH  
Ringstraße 43a, 4600 Wels  
gerald.steinmaurer@fh-wels.at  
<https://www.fh-ooe.at/campus-wels/>