

# Projektbericht

Aktenzeichen: 35796/01

---

Titel:

**Eine Synergie aus grüner Infrastruktur mit innovativer Regenwassernutzung und Gebäudeenergieversorgung zur Wiederherstellung des natürlichen Wasserhaushaltes im urbanen Raum sowie einer verstärkten Nutzung von regenerativen und CO<sub>2</sub>-armen Erzeugungstechnologien zur Gebäudeklimatisierung**

Kurztitel:

**QK ecoSquare: Innovatives Regenwassermanagement**

10. Dezember 2021

Antragsteller:

**Dr. Thomas E. Banning**  
**eco eco AG**  
**Bahnhofstraße 55**  
**91330 Eggolsheim**

gefördert durch



Deutsche  
Bundesstiftung Umwelt

06/02		<b>Projektkennblatt</b> der <b>Deutschen Bundesstiftung Umwelt</b>			
Az	<b>35796/01</b>	Referat	<b>23</b>	Fördersumme	51.905,00 EUR
Antragstitel		QK ecoSquare: Innovatives Regenwassermanagement			
Stichworte		Urbanes Quartier, Thermische Zisternennutzung, Energieeffizienz, Anergienetz, Regenwassermanagement, integrale Planung, Systemsimulationen			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
12 Monate	25.08.2020	24.08.2021	1		
Zwischenberichte		-			
Bewilligungsempfänger		eco eco AG Bahnhofstraße 55 91330 Eggolsheim		Tel.: 05151 556 635-9	
				Projektleitung Dipl.-Ing. Nicolai Beckmann	
				Bearbeiter Dipl.-Ing. Nicolai Beckmann	
Kooperationspartner		-			
<p><b>Zielsetzung und Anlass des Vorhabens</b></p> <p>Für das urbane Quartier ecoSquare, welches in der oberfränkischen Stadt Bamberg entsteht, soll eine innovative und umweltfreundliche Entwässerung umgesetzt werden, welche einen natürlichen Wasserhaushalt mit geringstmöglichem Abfluss von Niederschlägen in die Kanalisation unter Berücksichtigung eines überdurchschnittlichen Überflutungsschutzes sicherstellt. Hierzu ist ein hohes Maß an lokaler Regenwasserverdunstung und -versickerung auf dem Quartier vonnöten. Folglich waren für ein derartiges innovatives Regenwassermanagement entsprechende Anlagen zu planen, die Regenwasser transportieren, speichern, verdunsten sowie versickern. Im Rahmen des Förderprojektes wurden u. a. die entsprechenden planerischen Maßnahmen von Entwurfs- hin zu Ausführungsplanung getätigt. Darüber hinaus fanden numerische Simulationsstudien zu einer energetischen Nutzung der Komponenten des innovativen Regenwassersystems statt. Im Speziellen wurden große unterirdische Regenwasserspeicher (Zisternen), die im Zuge des Regenwassermanagements vorzusehen sind, als niedrig-exergetische thermische Speicher numerisch modelliert und in einer übergeordnetes Simulationsmodell der thermischen Quartiersversorgung mit Wärmepumpen implementiert. Mit Hilfe darauf basierender dynamischer Simulationen sollten Potenziale zur Steigerung der Energieeffizienz der gesamten thermischen Quartiersversorgung durch die thermische Nutzung von Regenwasserzisternen und ökonomische Indikatoren im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsanalyse ermittelt werden.</p> <p>Um diverse bauliche Maßnahmen im Hoch- und Tiefbau mit den Ent- und Bewässerungskomponenten sowie der Energietrassen zu harmonisieren, wurde hier eine integrale Planung mit iterativen Abfragen und Anpassungen forciert.</p>					
<p><b>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</b></p> <p>Aufbauend auf bereits vorliegenden Entwurfsplanungen für die Entwässerung des Quartiers wurden von der Fränkische Rohrwerke GmbH &amp; Co.KG und der Optigrün international AG für das Quartier ecoSquare ein innovatives Regenwassermanagement in einem ersten Entwurf auf Basis vorliegender Lagepläne und Ent- sowie Bewässerungsdaten konzipiert. Das von der eco eco AG beauftragte Ingenieurbüro für die Planung der technischen Gebäudeausrüstung plante die Anlagen für das innovative Regenwassermanagement mittels iterativer Abstimmungen mit Akteuren wie den oben genannten Unternehmen sowie den Planern für die Contracting-seitige thermische Energieversorgung unter der Koordination der planenden und ausführenden Architekten der eco eco AG. In diesem Zuge wurden die Regenwasserzisternen und -rigolen bzgl. ihrer Dimensionen, Kubatur und Lokalisierung im Quartier unter Berücksichtigung aller Mindestanforderungen (Überflutungsschutz, minimaler Abfluss) angepasst.</p>					
<small>Deutsche Bundesstiftung Umwelt □ An der Bornau 2 □ 49090 Osnabrück □ Tel 0541/9633-0 □ Fax 0541/9633-190 □ <a href="http://www.dbu.de">http://www.dbu.de</a></small>					

Hinzu kam eine planerische Erweiterung um wasserspeichernde Gründachflächen und die hierzu notwendige zusätzliche Infrastruktur zur Bewässerung dieser Flächen.

Für die Entwicklung von thermischen Simulationsmodelle wurde eine Bestandsaufnahme bzgl. der übergeordneten thermischen Quartiersversorgung, dynamischer Daten wie Zeitreihen zum Wärme- und Kältebedarf, zum Regenwasserzufluss und zu Klimadaten sowie der finalen Zisternenabmessungen und -daten durchgeführt. Zunächst wurden numerisch-thermische Modelle für die Energiezentralen, eine vorgesehene Erdwärmesondenanlage sowie die Wärme- und Kälteverteilung (Anergienetz) erstellt und validiert. Analog dazu wurde ein Simulationsmodell für die Zisternen entwickelt und hierbei zwei Varianten zur Entnahme und Zuführung von Wärme bzgl. der Energieeffizienz verglichen. Die energieeffizientere Variante wurde für die weitere Koppelung aller numerischen Modelle (Energiezentralen, Anergienetz, Zisternen) verwendet. Als Entwicklungsumgebung kam die numerische Software MATLAB zur Anwendung. Als tragender Indikator für die zu ermittelnde Energieeffizienzanehebung durch die thermische Nutzung von Regenwasserzisternen wurden die System-Jahresarbeitszahlen (SJAZ) von zwei Simulationsvarianten „ohne“ und „mit“ Nutzung der Zisternen verglichen.

Die aus dem Vergleich sich ergebenden energetischen Optimierungen flossen in eine Wirtschaftlichkeitsanalyse ein, um potenzielle Einsparungen bei Wärmegeheimungskosten durch die Erweiterung des Energiesystems darzustellen.

### **Ergebnisse und Diskussion**

Für die Entwässerungsplanung führte ein iterativer Abgleich zwischen den Planungen der innovativen Entwässerung und den bereits fortgeschrittenen Planungsbereichen der Gebäudeplanung zu einer Optimierung der Dimensionierung und der Anordnung von Zisternen, Rigolen und dem Grundleitungsnetz. Für die Dachflächen konnte in der Tragwerksplanung nachgewiesen werden, dass tragende Bauteile keiner Umbemessung aufgrund einer Mehrbelastung durch wasserspeichernde Dachflächen bedürfen. Standortspezifische Simulationen der konzipierten innovativen Regenwasserbewirtschaftung haben den Überflutungsschutz für ein 30-jähriges und darüber hinaus für ein 100-jähriges Ereignis nachgewiesen.

Die vereinfachte thermische Modellierung des Anergienetz konnte erfolgreich umgesetzt und validiert werden. Bei den Zisternen konnte durch simulierte Ergebnisgegenüberstellung von zwei Varianten zur thermischen Aktivierung des Zisternenregenwassers eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz gezeigt werden, wenn die thermische Aktivierung durch einen externen Wärmeübertrager mit Regenwasserumwälzung erfolgt. Auf Basis dieser Variante konnte eine Steigerung der Effizienz des thermischen Gesamtsystems durch den Einsatz einer thermischen Aktivierung von Zisternen simulativ nachgewiesen werden. Hierzu wurde die System-Jahresarbeitszahl der Quartiers-Wärmepumpen in Energiezentralen als Schlüsselindikator fokussiert. Es wurde rechnerisch eine Steigerung von 6,2 auf 6,34 erzielt. Hinsichtlich ökonomischer Aspekte wurde im Rahmen einer Wirtschaftlichkeitsanalyse ein lediglich geringfügiges Strom-Einsparpotenzial von 2,2 % durch die thermische Zisternennutzung festgestellt. Es werden hierzu Handlungsempfehlungen für die Erhöhung des Einsparpotenzials gegeben.

### **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

Die Ergebnisse und Erkenntnisse zu den Simulationen der thermischen Zisternenaktivierung sollen bei (wissenschaftlichen) Konferenzen und mittels Beiträge in wissenschaftlichen Journalen der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt werden. Im Rahmen dieses Förderprojektes konnten bisher keine Veröffentlichungen stattfinden. Darüber hinaus sind im Zuge eines voraussichtlichen F&E-Folgeprojektes entsprechende Veröffentlichungen angedacht.

### **Fazit**

In diesem Förderprojekt konnte eine übertragbare integrale Planung für eine Entwässerungsplanung für die Erreichung eines innovativen Regenwassermanagements für einen natürlichen Wasserhaushalt anhand des realen Quartiersprojekt ecoSquare in Bamberg dargestellt werden, welche – wie in diesem Fall – die regulatorischen Anforderungen bzgl. Überflutungsschutzes sogar übertreffen. Auch konnte durch thermische Modellierung und Simulation von für das innovative Regenwassermanagement notwendigen Regenwasserzisternen gezeigt werden, dass die Energieeffizienz einer übergeordnete thermische Quartiersversorgung auf Basis von Wärmepumpen durch Zisternen als niedrig-exergetische thermische Speicher erhöhte werden können. Im Zuge eines folgenden F&E-Projektes sollen auf Basis der Ergebnisse und Erkenntnisse aus diesem Förderprojekt bisherige Planungen konkretisiert als auch umgesetzt und einem langfristigen Energiemonitoring unterzogen werden.

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>Entwässerungsplanung für eine innovative Regenwassernutzung</b> .....	<b>13</b>
2.1	Hintergrund der innovativen Entwässerungsplanung .....	13
2.2	Darstellung des Konzeptes.....	14
2.3	Planungsprozess des innovativen Regenwasser-Managements .....	16
2.4	Integrale Planung – Optimierung der Entwässerungsplanung .....	20
2.5	Regenwasser-Simulationen für 30-jährige/100-jährige Ereignisse Optigrün.....	22
<b>3</b>	<b>Dynamische Untersuchung der energetischen Nutzung von Regenwasserzisternen am Quartier ecoSquare</b> .....	<b>24</b>
3.1	Auslegungen und Grundlagenermittlung für die Modellierung des Konzeptes (Zisternen, Anergierung, Energiezentralen) (AP 2.1).....	24
3.2	Entwicklung eines vereinfachten Simulationsmodells des Anergierings (AP 2.3)....	27
3.3	Entwicklung eines detaillierten Simulationsmodells für die energetische Nutzung von Zisternen (AP 2.2).....	34
3.4	Simulationsmodell für das Quartier / Ersatzschaltbild .....	42
3.5	Entwicklung Regelungsstrategie Anergierung und Zisterne (AP 2.4) .....	43
3.5.1	Top-Down-Regelung .....	43
3.5.2	Vergleich der Zisternenmodelle / unterschiedliche Regelungsstrategien.....	44
3.6	Vorbereitende Maßnahmen bzw. Handlungsempfehlungen für die Zukunft (AP 2.5) 49	
3.7	Nachträgliche Änderung der Grundlagen .....	52
<b>4</b>	<b>Wirtschaftlichkeitsanalyse</b> .....	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> .....	<b>55</b>

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Genordeter Lageplan ecoSquare Bamberg: Los 1 (türkis): Büro- und Hotelnutzung, Los 2 (gelb) Wohnnutzung, Los 3 (orange) Wohn- und Gewerbenutzung sowie Kinderladen und gemeinschaftliche Nutzung. Nördlich verlaufen die Pödeldorfer, östlich die Anna- und nördlich die Starkenfelder Straße. ....	11
Abbildung 2: Energiekonzept für das Quartier ecoSquare (Sicht aus Norden). ....	12
Abbildung 3: Blick vom Quartierplatz Richtung Südwesten (Los 2), Eingang zum Büro-/Hotelbereich (rechts). ....	12
Abbildung 4: Ausschnitt Entwässerungsplanung Stand 31.07.2019 Ausgangssituation. Dargestellt die Rigole (rot umschlossene Fläche) mit einer vorgeschalteten Zisterne. Aufwendige Anbindung der südlichen RW-Leitungen über Düker-Konstruktion unterhalb des Gebäudes. ....	13
Abbildung 5: Retentionsbox WRB 80F inklusive begrüntem Dachaufbau (Quelle: Fa. Optigrün international AG). ....	14
Abbildung 6: System Regenwassermanagement Fa. Fränkische Rohrwerke und Optigrün international AG. Dargestellt sind die Verknüpfung von Dach- und Verkehrsflächen mit den unterirdischen Bauwerken bestehend aus Zisternen und Rigolen (Quelle: Fa. Fränkische Rohrwerke GmbH & Co.KG und Fa. Optigrün international AG). ....	15
Abbildung 7: Vergleich Dachaufbauten extensives und intensives Dach. ....	16
Abbildung 8: Dachaufsicht gesamtes Quartier. Dargestellt ist die Verteilung von intensiven (hellgrün), extensiven (dunkelgrün) und hartbedachten (türkis, gelb, lila) Dachflächen sowie Dachaufbauten z.B. Photovoltaikanlagen (orange) und technische Geräte (pink). ....	17
Abbildung 9: Grundleitungsplanung Entwässerung. Dargestellt ist das Konzept der unterirdischen Bauwerke bestehend aus Rigolen und Zisternen (violett) (Quelle: Rennert Ingenieure, Bamberg). ....	18
Abbildung 10: Genehmigungsplanung Entwässerungsantrag. Dargestellt ist die Planung der unterirdischen Bauwerke bestehend aus Rigolen, Zisternen (violett) und Grundleitungen, welche abschließend zur Genehmigung eingereicht wurde. Rennert Ingenieure, Bamberg..	20
Abbildung 11: Auszug Grundleitungsplanung. Dargestellt ist die komplexe Planung der erdverlegten Leitungen im Außenraum, Rennert Ingenieure, Bamberg .....	21
Abbildung 12: Vereinfachter TGA-Plan (vom Auftraggeber bereitgestellt) zur Energieversorgung des Quartiers bestehend aus drei Energiezentralen (EZ), 2 Zisternen, dem Erdwärmesondenfeld, dem Rückkühler und dem Anergiering zur bedarfsgerechten Verschaltung der einzelnen Gewerke untereinander. (Quelle: NATURSTROM AG) .....	24
Abbildung 13: Zentrales Element der dargestellten Energiezentrale (TGA-Plan vom Auftraggeber bereitgestellt) sind die beiden parallel geschalteten Wärmepumpen (WP) welche direkt an die beiden Pufferspeicher (Wärme und Kälte) angekoppelt sind. Durch die Anbindung der Energiezentrale an den Anergiering ist es möglich, die einzelnen Gewerke quartiersdienlich mit den Energiezentralen zu verschalten und in die Energieversorgung einzubinden. Durch die bedarfsgerechte thermische Lastverschiebung zwischen den einzelnen Gewerken verbessert sich die Anlageneffizienz des Gesamtsystems. (Quelle: NATURSTROM AG).....	25

- Abbildung 14: Zeitlich aufgelöster Jahresenergiebedarf (Stundenwerte) des gesamten Quartiers für Heizen (rot) und Kühlen (blau). Die Werte wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt. ....27
- Abbildung 15: Vom Auftraggeber zur Verfügung gestellter Vertikalschnitt durch das Erdreich (schraffierter Bereich ist die Geländeoberkante). Dargestellt sind die Anergieringleitungen (blau), die Zisternenanbindung (grün) und die Trinkwasserversorgung (rot). (Quelle: NATURSTROM AG).....27
- Abbildung 16: Tiefenaufgelöster Temperaturverlauf im Erdreich dargestellt für einzelne Kalendermonate (vereinfachte Berechnung über idealisierte sinusförmige thermische Anregung auf Rand eines halbunendlichen Körpers). Die Temperaturamplitude nimmt mit zunehmender Bodentiefe ab. ....28
- Abbildung 17: Ausschnitt aus einem FD-Berechnungsgitter. Dargestellt ist ein finites Berechnungselement mit der Temperatur  $T_{x,y}$ . Von den benachbarten Berechnungselementen fließen in X-Richtung die Wärmeströme und  $\Delta Q_x - 1$  und  $\Delta Q_x + 1$ , in Y-Richtung  $\Delta Q_y - 1$  und  $\Delta Q_y + 1$ .....29
- Abbildung 18: Wärmespeicherung bei einem idealen Phasenwechsel. Dargestellt ist die Temperaturerhöhung  $T_1$  bis  $T_2$  bei konstanter Wärmezufuhr. Zunächst wird die zugeführte Wärme sensibel gespeichert, um die Temperatur vom Ausgangszustand  $T_1$  auf den Schmelzpunkt  $T_{ph}$  zu erhöhen. Im Schmelzbereich  $T_{ph}$  bleibt die Temperatur zunächst konstant, die zugeführte Wärme wird in latenter Wärme gespeichert, der Phasenzustand wechselt von fest nach flüssig. Die Temperaturerhöhung in der flüssigen Phase von  $T_{ph}$  auf  $T_2$  erfolgt wiederum über sensible Wärmespeicherung. ....30
- Abbildung 19: Skizze des numerischen Finite-Differenzen-Modells für die Anergieringleitung. Die roten Striche skizzieren das kubische Berechnungsgitter. Blau eingezeichnet ist die Anergieringleitung. Der kreisförmige Rohrquerschnitt wird hierbei vereinfachend durch ein Quadrat mit gleichem Flächeninhalt approximiert. Um den Berechnungsaufwand zu reduzieren, wird von einer, zur vertikalen Schnittfläche längs der Rohrachse symmetrischen, Temperaturverteilung ausgegangen.....33
- Abbildung 20: Screenshot mit simulierten Teilergebnissen des Anergierings. Oben links: Temperaturverlauf in der X-Y Ebene. Oben rechts: Transienter Temperaturgang im ungestörten Erdreich. Unten rechts: Randbedingungen der Simulation.....34
- Abbildung 21: Technische Umsetzung der Zisternen im ecoSquare Projekt (basierend auf Grafiken der Fränkische Rohrwerke GmbH & Co. KG): Der Zisternenkorpus wird aus den einzelnen Rigolenfüllkörpern (1) zusammengesetzt. Diese bestehen jeweils aus zwei Halbschalen (oben rechts). Der Zisternenkorpus wird zunächst von einem Rigolenvlies (2) umhüllt und über eine Kunststoffdichtungsbahn (3) abgedichtet. Über entsprechende Systemschächte (4) kann auf das Speichervolumen zugegriffen werden. (Quelle: Fränkische Rohrwerke GmbH & Co. KG) .....35
- Abbildung 22: TGA-Planausschnitt (vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt) der Zisterne Z2 bestehend aus Rigolen-Füllkörpern (grün) und Wärmeübertrager-Rohrschlangen (rot). In der Draufsicht (links) ist die Verlegung von zwei parallelgeschalteten Rohrschlangen in der horizontalen Ebene zu sehen, in der Seitenansicht (rechts) die 3 Etagen der Rigolen-Füllkörper (in jeder Etage mit zwei parallelgeschalteten Wärmeübertrager-Rohrschlangen, wie auch in der Draufsicht zu sehen). (Quelle: NATRUSTROM AG) .....35
- Abbildung 23: Verortung einer Zisterne (Planzeichnung vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt). Eingezeichnet sind die vertikalen Wartungsschächte sowie die Regenwasserzuläufe in die Zisterne. (Quelle: Fränkische Rohrwerke GmbH & Co. KG).....36

- Abbildung 24: Das numerische FD-Berechnungsgitter des rotationssymmetrischen Modells besteht hierbei aus konzentrischen Ringen (links), welche in der Y-R-Schnittebene (rechts) ein zweidimensionales Gitter bestehend aus einzelnen Quadrern bilden. Zwischen den benachbarten ringförmigen Berechnungselementen fließen in radialer Richtung die Wärmeströme  $\Delta Q_r - 1$  und  $\Delta Q_r + 1$  und in axialer Richtung die Wärmeströme  $\Delta Q_y - 1$  und  $\Delta Q_y + 1$ .....37
- Abbildung 25: Schematische Darstellung des Zisternentanks mit den einzelnen Berechnungselementen (Layern) in vertikaler Richtung (äquidistante Einteilung in den zu 100 % gefüllten Layern). Jedem diskreten Berechnungselement wird die Masse  $m_y$ , die Elementhöhe  $\Delta y$  und die Temperatur  $T_y$  zugeordnet. Je nach Füllstand kann die Wärmeleitfähigkeit, Elementmasse und auch die Füllhöhe eines Layers variieren. ....38
- Abbildung 26: Symbolische Darstellung der Bilanzmassenströme eines einzelnen Berechnungselementes mit der Temperatur  $T_y$ . In das Berechnungselement fließende externe Massenströme sind mit dem Index *min* gekennzeichnet, austretende externe Entnahme-Massenströme mit dem Index *mout*. Zwischen den einzelnen Berechnungsknoten können in vertikaler Richtung die Massenströme *mvin* und *mvout* auftreten, die Richtung kann gegenüber der Darstellung auch wechseln. ....39
- Abbildung 27: Linke Abbildung: Das an den horizontalen Zylinder angrenzende Fluid erwärmt sich wodurch seine Dichte sinkt. Hierdurch entsteht eine nach oben gerichtete Strömung an der Zylinderwandung (der Prozess ist reversibel). Rechte Abbildung: Interferenzaufnahme Bei Freier Konvektion am horizontalen Zylinder (rechte Hälfte der Abbildung) und simulierte Isothermen (linke Hälfte der Abbildung) für die freie Konvektion . ....40
- Abbildung 28: Links: Die Wasseroberkante liegt knapp über der Wärmetauscher-Rohrschlange. Hierdurch erhöht sich der Strömungswiderstand für die freie Konvektion am Zylinder. Mitte: Bei entsprechendem Füllstand erfährt die Wärmeübertrager-Rohrschlange nur eine teilweise Benetzung. Rechts: Die Wasseroberkante liegt knapp unter der Wärmetauscher-Rohrschlange. Hierdurch erhöht sich der Strömungswiderstand für die freie Konvektion am Zylinder. ....41
- Abbildung 29: Skizzierte Schnittdarstellung des numerischen Zisternenmodells. Die roten Linien stellen das Berechnungsgitter des rotationssymmetrischen FD-Modells dar (konzentrische Ringe, bzw. Zylinderscheiben). Auf dem zylindrischen Modellrand wird die tiefaufgelöste Temperaturverteilung des ungestörten Erdreiches zum entsprechenden Zeitpunkt vorgegeben. Die Randbedingung der Oberfläche ergibt sich aus der aktuellen Wetterlage. Am unteren Modellrand wird eine konstante Temperatur angenommen. Aufgrund der Rotationssymmetrie des Modells ist es ausreichend, die zweidimensionale Temperaturverteilung in der Schnittebene (braun eingefasst) zu berechnen. Für die Temperatur im Rohrschlangen-Wärmeübertrager wird ein separates Netz herangezogen (ohne grafische Darstellung). ....42
- Abbildung 30: Abbildung des Quartiers, des Anergierings und seiner Komponenten in einem vereinfachten Simulationsmodell. Die drei vorhandenen Lastabnehmer und Energiezentralen sind jeweils zu einer einzelnen entsprechend dimensionierten Anlagenkomponente zusammengefasst, ebenso die beiden geplanten Zisternen. Der Anergiering basiert auf einem 4-Leitersystem und verbindet die Energiezentrale mit der Hydraulischen Weiche. Alle Simulationen in diesem Bericht wurden mit diesem vereinfachten Simulationsmodell durchgeführt. Abkürzungen: PS = Pufferspeicher, HW = Hydraulische Weiche, EWS = Erdwärmesondenfeld, WT = Wärmetauscher, AR = Anergiering und P = Pumpe. ....43
- Abbildung 31: Dargestellt sind die einzelnen Hierarchie-Ebenen (Stufe 1 bis 4) der Top-Down-Regelung. Der warme und kalte Anergiering wird hierbei jeweils in die Segmente  $H_1$ ,  $H_2$  sowie  $C_1$  und  $C_2$  gesplittet. Abkürzungen: PS = Pufferspeicher, HW = Hydraulische Weiche, EWS =

Erdwärmesondenfeld, RKW = Rückkühlwerk, H1, H2, C1 und C2 sind Anergieringsegmente. .....	44
Abbildung 32: Vergleich der simulierten Leistungsentnahme beider Zisternenvarianten für ein Kalenderjahr. Der grün geplottete Verlauf gibt die Entnahmeleistung von Modell-Variante 1 mit internen Wärmeübertrager-Rohrschlangen wieder, der blau dargestellte Verlauf zeigt die Entnahmeleistung von Modell-Variante 2.....	45
Abbildung 33: Temperaturgang der mittleren Zisternentemperatur eines Kalenderjahres für Zisternenvariante 1 (grün) und Zisternenvariante 2 (blau). Die „Rechteckplateau-Funktion“ von Variante 2 entsteht durch die Top-Down Regelung. Diese versucht in der warmen Jahreszeit über die Zisterne zu kühlen. Dies ist effektiv nur möglich, solange die Temperatur in der Zisterne die obere Sollwertschranke für den kalten Pufferspeicher nicht überschreitet. In der kalten Jahreszeit liegen die Verhältnisse umgekehrt. ....	46
Abbildung 34: Aggregierte Sankey Diagramme für die Quartiersversorgung. Links mit thermischer Zisternennutzung, rechts ohne. ....	48
Abbildung 35: Analyse der Energieanteile der Einzelkomponenten des kalten Nahwärmenetzes ohne thermische Zisternennutzung (oben) und mit thermischer Zisternennutzung (unten) in einem Jahr. Rot dargestellte Energieströme sind Wärme, blaue sind Kälte und grüne sind Strom. (Für eine bessere Sichtbarkeit wurden die Energieströme des Anergierings und der Zisterne mit dem Faktor 20 und die der Hydraulischen Weiche mit dem Faktor 30 multipliziert). Die auf den PS-Kälte zulaufenden Wärme- und Kältemengen ergeben aufbilanziert den Kältebedarf des Quartiers.....	49
Abbildung 36: Exemplarischer Lageplan der benötigten Temperaturmessstellen für Zisternenvariante 1 in der Seitenansicht (oben) und der Draufsicht (unten). Die hellblauen Punkte symbolisieren entsprechende Temperaturmessstellen. Je nach Lage der Wasser-Entnahmestelle und Zisternengröße müssen die Sensoren 9 bis 11 entsprechend verschoben werden.....	50
Abbildung 37: Exemplarischer Lageplan der benötigten Temperaturmessstellen für Zisternenvariante 2 Temperaturmessstellen für Zisternenvariante 1 in der Seitenansicht (oben) und der Draufsicht (unten). Je nach Lage der Wasser-Entnahmestellen und Zisternengröße müssen die Sensoren 9 bis 11 entsprechend verschoben werden. ....	51
Abbildung 38: Exemplarischer Lageplan der Temperaturmessstellen (hellblau) relativ zu den Anergieringleitungen.....	51
Abbildung 39: Kumulierte Einsparungen durch thermische Aktivierung der Zisternen über den spezifischen Stromkosten.....	53

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Simulationen für die Versickerungs- und Verdunstungsanteile über 20 Jahre sowie für den Überflutungsschutznachweis im Fall eines 30- und eines 100-jährigen Ereignisses (Quelle: Optigrün international AG). .....	23
Tabelle 2: Übersicht über die wichtigsten technischen Eckdaten der einzelnen Komponenten des Quartiers. (Nachträgliche Änderungen zu den Grundlagen und Auswirkungen auf Simulationsergebnisse werden im Abschnitt 3.7 angesprochen).....	26
Tabelle 3: Simulationsergebnisse mit thermisch aktvierten Zisternen (grün) und ohne Zisternennutzung (rot). .....	47
Tabelle 4: Simulationsergebnisse mit thermisch aktvierten Zisternen (grün) und ohne Zisternennutzung (rot) nach Anpassung des Gesamt-Zisternenvolumens von ursprünglich 102,6 m <sup>3</sup> auf 136,8 m <sup>3</sup> . .....	52
Tabelle 5: Differenzkostenrechnung bzgl. Strombezug mit und ohne thermische Zisternennutzung. ....	53

## 1 Einleitung

Die eco eco AG wurde 1999 gegründet. Das erklärte Ziel: Im Mittelpunkt sollen nachhaltige unternehmerische Entwicklung und Mehrwert für die Gesellschaft stehen, nicht kurzfristiges und -sichtiges Profitstreben. Diese nachhaltigen Ideale wurden zur Philosophie für das gesamte Unternehmen und zum Leitbild, das die Unternehmenskultur bis heute prägt.

Die eco eco AG entwickelt in der Abteilung für nachhaltiges Bauen zukunftsweisende Hochbau- und Quartiersprojekte.

Ein verantwortungsvoller Umgang mit Ressourcen, das Wohl des Menschen als Mittelpunkt, Vereinbarkeit von Arbeit und Privatleben – auf die Stadt der Zukunft und auf ihre Bewohner kommen zahlreiche Herausforderungen zu. Unter Berücksichtigung dieser wichtigen Fragen werden zukunftsorientierte Quartierskonzepte, Wohn- und Gewerbeobjekte mit klarem Fokus auf Umwelt und Nutzer entwickelt.

Im entstehenden Stadtquartier ecoSquare in Bamberg ist ein innovatives Regenwassermanagement mit wasserspeichernden Gründächern, großvolumigen Zisternen und Versickerungsanlagen geplant. In Verbindung mit einer thermischen Nutzung der Zisternen soll durch Wärme- und Kälteentzug des Regenwassers eine regenerative und energieeffiziente Einbindung des Regenwassersystems in das thermische Versorgungskonzept der Quartiersgebäude forciert werden. Zur Umsetzung der genannten Bestrebungen im Projektanschluss finden im Rahmen des beantragten Projektes die Konzeptionierung des Gesamtsystems sowie die Entwässerungsplanung und eine simulative thermische Untersuchung der Zisternen in Verbindung mit dem bestehenden Energiekonzept des Stadtquartiers statt.

Beim Bauvorhaben ecoSquare handelt sich um ein modernes und nutzerfreundliches Stadtquartier, das unter den Gesichtspunkten des nachhaltigen Bauens auf einem Grundstück von circa 1,2 Hektar Fläche entsteht. Zum Quartier gehören 73 Wohneinheiten, ein Hotel, Büro- und Veranstaltungsflächen, Gewerbeeinheiten, ein Kindergarten sowie ein innovatives Energie- und Mobilitätskonzept. Grundsätze der Planung im Allgemeinen sind neben den Kriterien des Nachhaltigen Bauens das Erkennen und Nutzen von Synergien sowie die „Doppelnutzung“ von Flächen und verbauter Technik. Als Beispiel werden allgemeingegenutzte Flächen im Quartier durch verschiedene Nutzergruppen zu unterschiedlichen Tageszeiten genutzt. Ferner werden Flächenheizungen sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen verwendet. Dies führt zu einer Erhöhung der Effizienz und zu einer optimierten Verwendung dieser Ressourcen.

Im Kontext der Regenwassernutzung finden voluminöse Wasserspeicher (Zisternen) Anwendung. Diese nehmen eine Schlüsselfunktion zur Regenwassernutzung ein und bieten zugleich eine enorme thermische Speicherkapazität auf niedrigem Temperaturniveau. Im Stadtquartier ecoSquare sollen großskalige Zisternen zur Regenwassernutzung umgesetzt werden, welche als Wärmespeicher der Wärme- und Kälteversorgung der Quartiersgebäude dienen und die CO<sub>2</sub>-neutrale regenerative Anlagentechnik (Wärmepumpen) mit Kälte und niedrig-exergetischer Wärme versorgen.

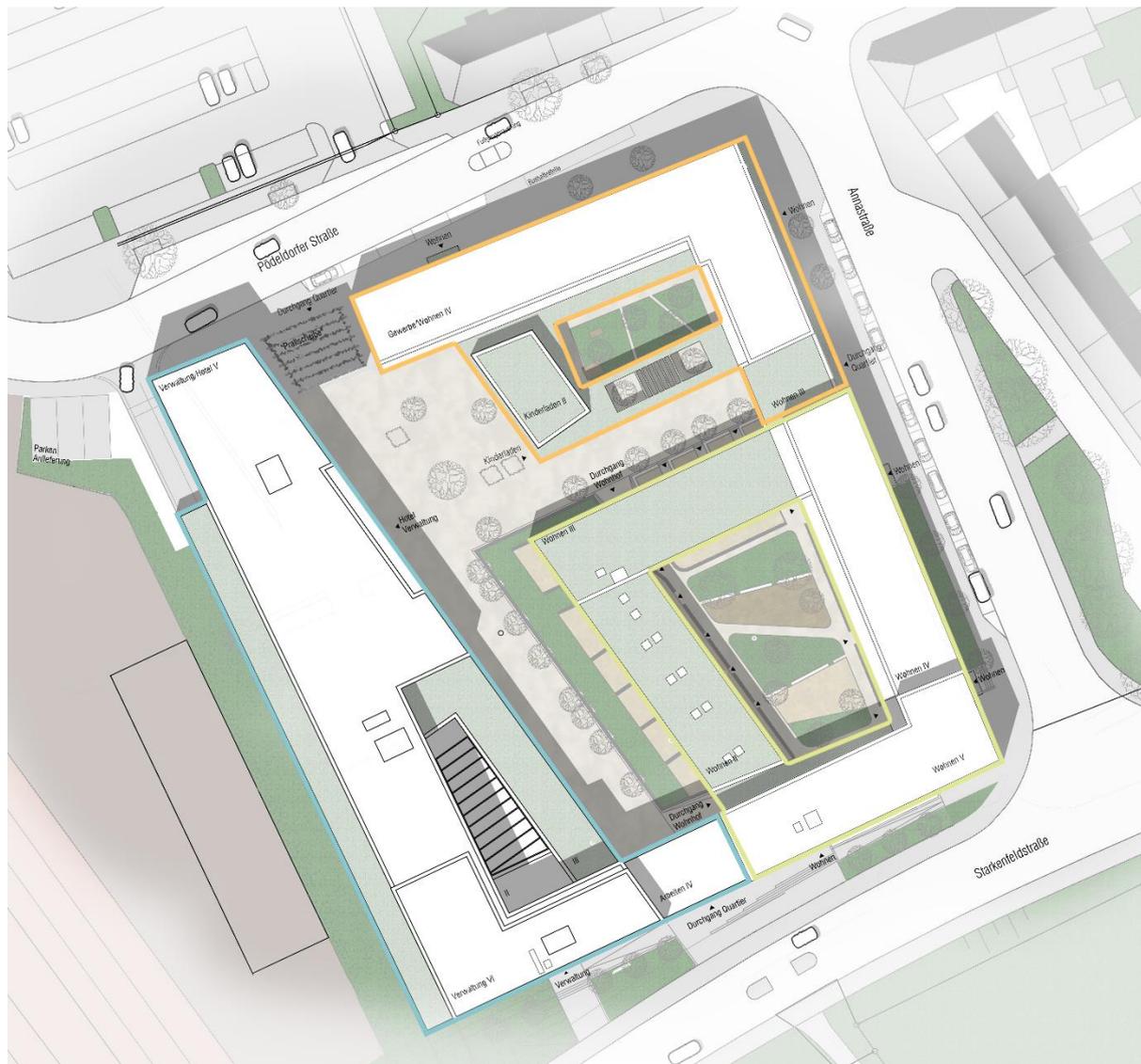


Abbildung 1: Genordeter Lageplan ecoSquare Bamberg: Los 1 (türkis): Büro- und Hotelnutzung, Los 2 (gelb) Wohnnutzung, Los 3 (orange) Wohn- und Gewerbenutzung sowie Kinderladen und gemeinschaftliche Nutzung. Nördlich verlaufen die Pödelhofer, östlich die Anna- und nördlich die Starkenfelder Straße.

Das Energiekonzept fokussiert eine energieeffiziente Wärmeversorgung mit geringem Temperaturniveau auf Basis von Wärmepumpen zur Beheizung und Kühlung der Gebäude in drei Energiezentralen. Die Wärmepumpen werden mit thermischer Quellenergie aus einem Anergienetz versorgt, welches wiederum mittels eines Erdwärmesondenfeldes mit Wärme und Kälte versorgt wird. Über Flächenheizungen (Betonkerntemperierung und Fußbodenheizungen) werden die Räume mit den niedrigen bzw. kühlenden Vorlauftemperaturen temperiert. Zusätzlich sind ein Blockheizkraftwerk mit Spitzenlastgaskessel für die Warmwasserbereitung und die Lüftungsanlage geplant. Darüber hinaus können die Wärmepumpen teilweise mit dezentral erzeugtem Photovoltaik-Strom betrieben werden.

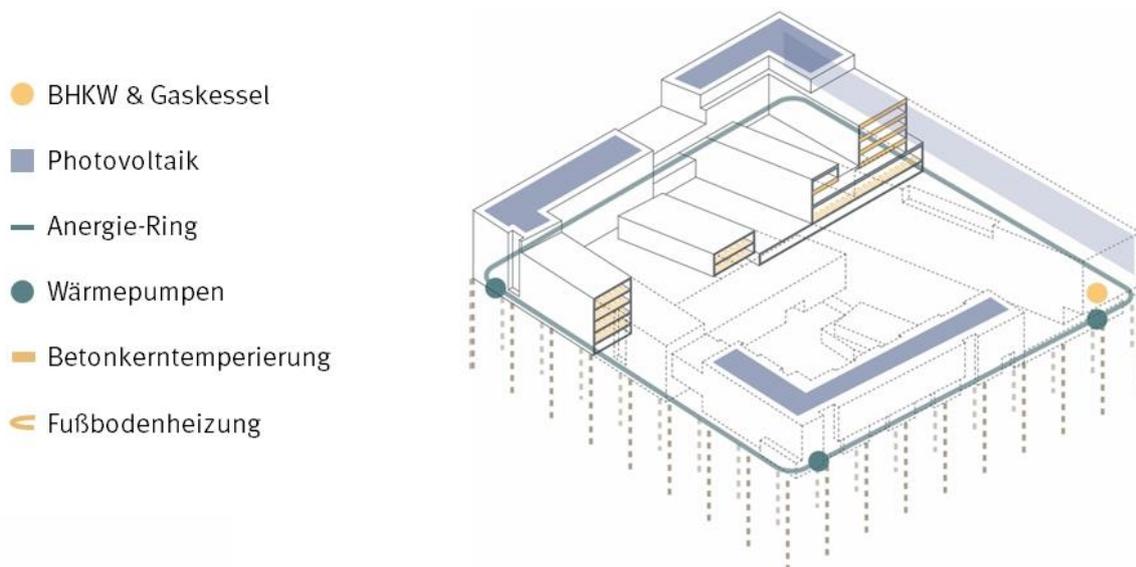


Abbildung 2: Energiekonzept für das Quartier ecoSquare (Sicht aus Norden).

Des Weiteren sind hier wasserspeichernde Dachgrünflächen (Retentionsdächer) vorgesehen, die mit den Zisternen hydraulisch bidirektional verbunden sind. Ein weiterer Mehrwert der Niederschlagsrückhaltung ergibt sich durch eine somit ermöglichte kontinuierlichen Verdunstung der Grünflächen in Höfen und auf Dachflächen, was eine Steigerung der Behaglichkeit im Mikroklima bewirkt und dabei den natürlichen Wasserkreislauf reproduziert. Diesbezüglich sind intelligente prädiktive Steuerungen vorgesehen. Die Doppelnutzung der Zisternen birgt einen fruchtbaren Synergieeffekt im Quartier.



Abbildung 3: Blick vom Quartierplatz Richtung Südwesten (Los 2), Eingang zum Büro-/Hotelbereich (rechts).

Das Projekt verkörpert eine integrale Planungsphase für die angestrebte innovative Regenwassernutzung und die synergetische thermische Nutzung der Zisternen für die Speicherung thermischer Energie zur zusätzlichen Kälte- und Wärmeversorgung der

Quartiersgebäude. In diesem Rahmen findet die Entwässerungsplanung des Quartiers bis hin zur Ausführungsplanung statt. Es soll die Umsetzbarkeit eines hochinnovativen intelligenten Regenwassermanagements auf Basis von Retentions-Gründächern sowie von Zisternen und Versickerungsanlagen (Rigolen) untersucht werden, um einen natürlichen Wasserhaushalt entgegen der Flächenversiegelung herzustellen. Die Nutzung von Zisternen als Wärmespeicher mit Einbindung in das thermische Energiekonzept des Quartiers steht dabei zusätzlich im Fokus. Diesbezüglich werden ein thermisches Modell der Zisternen erstellt und thermische Computersimulationen unter Einbeziehung der gesamten bisher geplanten Wärme- und Kälteversorgung des Stadtquartiers durchgeführt.

## 2 Entwässerungsplanung für eine innovative Regenwassernutzung

### 2.1 Hintergrund der innovativen Entwässerungsplanung

Vor der Idee, ein innovatives Regenwassermanagementsystem in das Quartier zu implementieren, bestand die Regenwassernutzung und -ableitung lediglich aus einer sehr klein dimensionierten Zisterne zur Entnahme von Regenwasser zur Bewässerung kleiner Flächen sowie einer kleinflächigen Rigole zur Versickerung.



Abbildung 4: Ausschnitt Entwässerungsplanung Stand 31.07.2019 Ausgangssituation. Dargestellt die Rigole (rot umschlossene Fläche) mit einer vorgeschalteten Zisterne. Aufwendige Anbindung der südlichen RW-Leitungen über Düker-Konstruktion unterhalb des Gebäudes.

Auf diese Weise sollte ein Großteil des anfallenden Regenwassers innerhalb des Quartiers verbleiben. Lediglich ein Teil des Oberflächenwassers der befestigten Verkehrsflächen sollte in die öffentliche Kanalisation eingeleitet werden müssen.

Aufgrund der Forderung ein 30-jähriges Regenereignis nachzuweisen zu müssen und der Zielvorgabe kein Regenwasser in die öffentliche Kanalisation einzuleiten, stellte bei der Überprüfung des gewählten Systems heraus, dass diese Vorgaben auf diese Weise nicht erfüllt werden können.

Aufgrund der beengten baulichen Situation des städtischen Quartiers zeigte sich, dass die vorhandenen Freiflächen des Grundstücks nicht ausreichend Platz boten, um über unterirdische Rigolenbauwerke das gesamte Regenwasser auf dem Grundstück versickern zu lassen.

Zur Erfüllung der Vorgaben eines 30-jährigen Regenereignisses musste ein alternativer Lösungsweg gefunden werden. Es wurde daher entschieden, neben einer Versickerung die Speichervolumen und die Verdunstung innerhalb des Quartiers zu erhöhen.

Aus diesem Grund werden die begrünten Dachflächen mit zusätzlichen Speichervolumen belegt und mit unterirdischen Zisternen und Rigolen bidirektional verknüpft. Mit Hilfe dieser Maßnahmen wurde ein innovatives Regenwasserkonzept verortet, das nicht nur die geforderten Vorgaben einhält, sondern darüber hinaus einen Mehrwert für die Umgebung und die Bewohner darstellt.

## 2.2 Darstellung des Konzeptes (AP 1.1)

Das anfallende Regenwasser wird auf den Dachflächen in Retentionskörpern unterhalb der Dachbegrünung gesammelt und zur Bewässerung/Verdunstung der Vegetation verwendet. Das anfallende Regenwasser der Verkehrsflächen sowie der harten Bedachungen wird direkt den Zisternen zur Speicherung zugeführt. Über Nachspeiseleitungen sind Zisternen und Gründächer miteinander verbunden.



Abbildung 5: Retentionsbox WRB 80F inklusive begrüntem Dachaufbau (Quelle: Fa. Optigrün international AG).

Kommt es im Sommer zu einem Absinken des Wasserstands in den Retentionskörpern kann Wasser aus den Zisternen nachgespeist werden. Der erhoffte Vorteil: Während der

sommerlichen Hitzeperioden wird die Dachbegrünung bewässert, das Wasser verdunstet, kühlt die Umgebung ab und reduziert urbane Hitzeinseln.

Die Füllstände der Retentionsdächer sowie der Zisternen unterliegen einer dauerhaften Überwachung durch ein übergeordnetes Steuerungssystem, welches vorausschauend das Wetter „beobachtet“. Kündigt sich ein Starkregenereignis an, werden die Speichervolumen der Dächer automatisch in die Zisternen entleert. Sofern diese ebenfalls gefüllt sind, fließt das überschüssige Regenwasser zur Versickerung in die Rigolen weiter.

Dadurch stehen die Volumina der Dächer und Zisternen zum Auffangen des Regenwassers zur Verfügung und Überflutungen werden verhindert. Ferner werden auf diese Weise natürliche Wasserkreisläufe wiederhergestellt, das Mikroklima des Quartiers verbessert und kein Regenwasser muss in das öffentliche Kanalnetz eingeleitet werden.

Die unterirdischen Zisternen weisen zu jeder Zeit einen Mindestfüllstand auf, da Trinkwasser in den trockenen Sommermonaten nachgespeist werden kann.

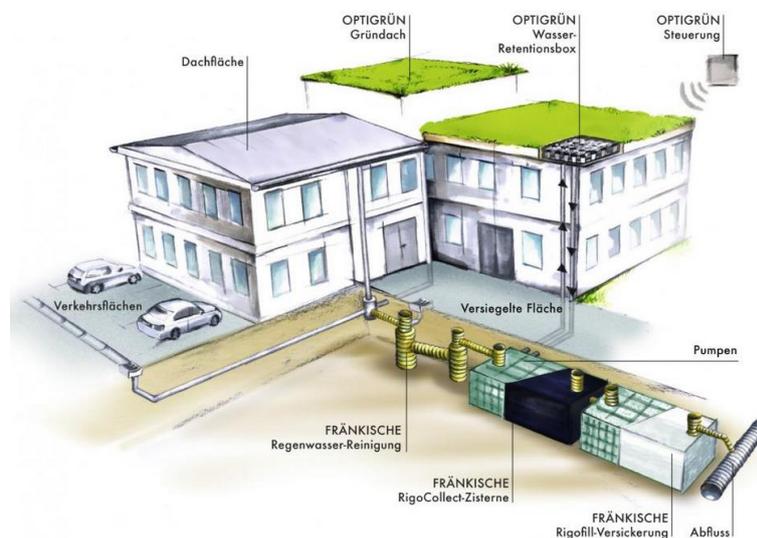


Abbildung 6: System Regenwassermanagement Fa. Fränkische Rohrwerke und Optigrün international AG. Dargestellt sind die Verknüpfung von Dach- und Verkehrsflächen mit den unterirdischen Bauwerken bestehend aus Zisternen und Rigolen (Quelle: Fa. Fränkische Rohrwerke GmbH & Co.KG und Fa. Optigrün international AG).

Die unterirdischen Zisternen weisen aufgrund der Anforderung an die zu speichernden Regenwassermengen ein entsprechend großes Speichervolumen auf. Dadurch, dass damit eine sehr hohe Wärmekapazität einhergeht, stellen die Regenwasserzisternen einen energieeffizienten Baustein für die Wärme- und Kälteversorgung des Quartiers dar. Diese erfolgt maßgeblich durch mehrere Wärmepumpen, welche thermische Energie aus einer Geothermieanlage beziehen. Unterstützend sollen die unterirdischen Zisternen hierbei als alternative thermische Quelle, bspw. im Fall von thermischen Spitzenlasten, für die Wärmepumpen zugeschaltet werden.

Die thermische Nutzung als auch die Art der thermischen Aktivierung der Regenwasserzisternen wurde durch Simulationsmodelle im Rahmen des Förderprojektes untersucht. Die Vorgehensweise sowie die Ergebnisse sind in Abschnitt 3 verschriftlicht.

### 2.3 Planungsprozess des innovativen Regenwasser-Managements (AP 1.2 und 1.3)

Das nachhaltige Bauen beruht auf einigen elementaren Prozessen, um die Gebäude und die Infrastruktur möglichst effizient zu gestalten. Iterative Planungsabläufe, bei denen wiederkehrend eine Bewertung zur Optimierung der Planungsergebnisse und der Ziele erfolgt, sind dabei ein Grundstein.

Die große Herausforderung bei der planerischen Umsetzung dieses Regenwassersystems bestand darin, alle Kollisionen mit anderen direkt davon betroffenen Fachplanungen zu beachten. Diese Komplexität ist lediglich durch eine iterative Planung möglich, in den getroffenen Entscheidungen immer wieder überprüft und bewertet werden müssen. Hinzu kam, dass sich die Fachplaner des Projekts z.T. in verschiedenen Planungsphasen bewegten. Während die Entwässerungsplanung sich im Bereich Entwurfsplanung- und Genehmigungsplanung befand, war die Hochbauplanung bereits bis in die Ausführungsplanung fortgeführt, so dass bei der Bearbeitung der Genehmigungsplanung bereits intensiv bis in die Ausführungsplanung gedacht und geplant wurde. Diese Tatsache erschwerte zwar Teile der Entwässerungsplanung, führte am Ende jedoch zu einer Optimierung der Anordnung von Zisternen, Rigolen und dem Grundleitungsnetz.

Nach der Festlegung des generellen Konzepts und der oberflächlichen Überprüfung für die Umsetzung der Regenwassernutzung wurde die Planung mit den bereits fortgeschritteneren Planungsbereichen der Gebäudeplanung abgeglichen

Zwei bedeutende und entscheidende Faktoren galt es dabei zuerst mit der Hochbauplanung und dem Tragwerksplaner abzugleichen.

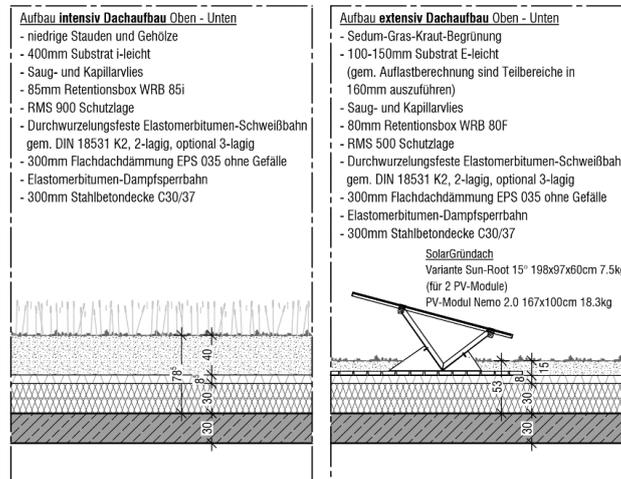


Abbildung 7: Vergleich Dachaufbauten extensives und intensives Dach.

Zum einen musste überprüft werden, ob eine Nutzung der Flachdächer als Regenwasserspeicher möglich ist. Durch das dauerhafte Anstauen von Regenwasser in den Retentionsboxen entsteht eine zusätzliche Last, die durch das Tragwerk aufgenommen werden muss. Nach Addition aller anfallenden Lasten aus Photovoltaik, Begrünung (extensiv und intensiv), Retentionsboxen, Regenwasser, der Dachdämmung, etc. konnte nachgewiesen werden, dass eine Umbemessung tragender Bauteile durch den Tragwerksplaner nicht notwendig ist.

Ferner mussten die Standorte der unterirdischen Zisternen und Rigolen und deren Abhängigkeit zu den Gebäudekörpern geprüft werden.



Abbildung 8: Dachaufsicht gesamtes Quartier. Dargestellt ist die Verteilung von intensiven (hellgrün), extensiven (dunkelgrün) und hartbedachten (türkis, gelb, lila) Dachflächen sowie Dachaufbauten z.B. Photovoltaikanlagen (orange) und technische Geräte (pink).

In der Konzeptphase waren drei Standorte identifiziert worden, an denen u.a. kombinierte Bauwerke aus Zisternen und Rigolen verortet wurden. Die Größe der Speicher- und Versickerungsanlagen ergab sich aus der anfallenden Regenwassermenge der angeschlossenen Verkehrs- und Dachflächen. Unter Berücksichtigung des beschriebenen Regenwassermanagementsystems, welches aus einem Zusammenspiel aus Speichervolumina, Versickerungsflächen und technischen Komponenten besteht, wurden anhand einer Simulation durch die Fa. Optigrün international AG, die Volumina für die Regenwasserspeicher- und Versickerung dimensioniert und auf diese drei Standorte „verteilt“. Dabei galt es zu beachten, welche Dachflächen der Baukörper wie an die verschiedenen Zisternen und Rigolen angeschlossen werden können.



Abbildung 9: Grundleitungsplan Entwässerung. Dargestellt ist das Konzept der unterirdischen Bauwerke bestehend aus Rigolen und Zisternen (violett) (Quelle: Rennert Ingenieure, Bamberg).

In Rahmen dieses Planungsschritt stellte sich heraus, dass die einzelnen unterirdischen Baukörper z.T. etwas größer zu dimensionieren waren, als in der Vordimensionierung ermittelt. Nachdem in der Grundrisspositionierung die horizontale Lage festgelegt worden war, galt es ferner auch Grundleitungen anderer Gewerke wie der Geothermie oder auf Schmutzwasserleitungen zu beachten und die Einflüsse zu bewerten.

Mit der Festlegung der Standorte begann eine entscheidende Planungsphase der TGA-Fachplanung. Ausgehend von den Entwässerungspunkten (Dachabläufe, Entwässerungspunkte Außenanlagen, etc.) und unter Berücksichtigung der Standorte wurde das Grundleitungsnetz der Regenentwässerung erarbeitet. Dabei mussten nicht nur die erdverlegten Rohre aufgrund der anfallenden Wassermengen dimensioniert werden, sondern auch die Gefällesituationen geplant werden.

Im anschließende Planungsschritt mussten unter Berücksichtigung nicht nur Normen und allgemein gültige Regeln der Technik berücksichtigt werden mussten. Vielmehr ergaben sich aufgrund der Vielzahl an erdverlegten Leitungen Kollisionen innerhalb des sehr komplexen Leitungsnetz bestehend aus Abwasser-, Regenwasser-, Geothermie-, Elektro-,

Anergieringleitungen und anderen baulichen Anlagen wie Schachtbauwerken, Fundamenten, etc.. Erschwert wurde die Situation durch einen sehr beengten Freiraum zwischen den Gebäudekörpern.

Mit der Implementierung der Gefälleverläufe der Regenwassergrundleitungen in die Gesamtplanung ergab sich die vertikale Höhenlage der unterirdischen Zisternen- und Rigolenbaukörper.

Hier zeigte sich, dass das vorausschauende Abwägen und Bewerten des integralen Planungsprozesses aus unterschiedlichen Planungsphasen heraus ein Vorteil waren.

Aufgrund des vorgelagerten Grundleitungsnetzes stellten sich die Einbausituationen der Standorte Z1 und Z3 als sehr problematisch heraus. Nicht nur die bauliche Umsetzung, nämlich die Ausführung der späteren Erdarbeiten unter Beachtung von Böschungs- und Lastabtragwinkeln der angrenzenden Gebäude, war nur mit sehr hohem Aufwand umsetzbar, sondern stellte sich auch als besonders kostenaufwendig heraus. Vorbereitenden Maßnahmen auf dem Baufeld hatten Kenntnisse von Kontaminationen im Erdreich zu Tage gebrachte, die erhebliche Mehrkosten bei den notwendigen Erdarbeiten bedeutet hätten.

Aus diesem Grund wurde noch einmal intensiv nach Lösungswegen gesucht, die Planung zu optimieren und die Erdarbeiten zu reduzieren.

Durch horizontale Verschiebungen der Grundleitungsanordnungen konnte ein Teil schnell angepasst werden. Das größte Problem stellte jedoch die vertikale Höhenlage des Bauwerks Z3 dar. Da der Einbau der Zisterne und Rigole erst nach Fertigstellung des erweiterten Rohbaus und nach Rückbau des Baustellenkrans möglich ist, wären die Aushubarbeiten im Innenhof des Gebäude nur durch zusätzliche bauliche Maßnahmen möglich gewesen (z.B. tiefere Fundamente der angrenzenden Gebäude oder aufwendige Verbauarbeiten). Durch die Anpassung der Höhenlage eines sehr weit von der Zisterne entfernten Entwässerungspunktes konnten Grundleitungen angehoben und somit die Höhenlage des unterirdischen Bauwerks Z3 um ca. 0,95 m nach oben korrigiert werden. Dadurch können zukünftige Erdaushubarbeiten für den Einbau eingespart werden. Zusätzliche bauliche Maßnahmen an den Gebäuden werden daher nicht mehr notwendig sein. (siehe Abbildung 10)

Bei dem Zisternen-/Rigolenbauwerk Z1 erfolgten im Rahmen der Umplanung ebenfalls größere Änderungen. Das Bauwerk war in der Vorplanung parallel entlang des Gebäudes (Los 1) positioniert worden. Der schmale und beengte Grundstückstreifen entlang der Grundstücksgrenze stellte sich jedoch als ein Nadelöhr heraus, da eine Vielzahl an Grundleitungen sowohl für die Entwässerung des Schmutz-/Regenwassers als auch für die Energieversorgung in diesem Bereich parallel im Erdreich verlegt werden mussten. Die Zisterne verblieb in diesem Streifen wohingegen die Rigole nun mit einigem Abstand in die Nordwestliche Grundstücksecke unterhalb einiger dort befindlicher Parkplätze verschoben wurde. Auf diese Weise können alle erdverlegten Leitungen mit den notwendigen Abständen positioniert werden. (siehe Abbildung 10)

Der integralen Planungsprozess half eine Optimierungsvariante zu erarbeiten, die ausführbare Abläufe im Bauprozess schafft und für den Bauherrn einen wirtschaftlichen Lösungsweg darstellt.



Abbildung 10: Genehmigungsplanung Entwässerungsantrag. Dargestellt ist die Planung der unterirdischen Bauwerke bestehend aus Rigolen, Zisternen (violett) und Grundleitungen, welche abschließend zur Genehmigung eingereicht wurde. Rennert Ingenieure, Bamberg

Ferner konnte sichergestellt werden, dass der auf dieser Grundlage eingereichte Entwässerungsantrag später umsetzbar ist. Die planerischen Vorgaben des Konzepts für ein innovatives Regenwassermanagement können somit gemäß der Zielvorgaben in der Konzeptionierung mit kleineren Anpassungen umgesetzt werden.

## 2.4 Integrale Planung – Optimierung der Entwässerungsplanung

Um die beschriebenen komplexen Planungssituationen und -vorgaben zielführend zu einem Ergebnis zu führen, gilt es strukturell vorzugehen. Durch eine Priorisierung der Abhängigkeiten wurde bei der Planung mit den Aspekten begonnen, die die größten Auswirkungen bzw. Abhängigkeiten besitzen und grundlegend darüber entscheiden, ob sich ein so komplexes Konzept umsetzen lässt.

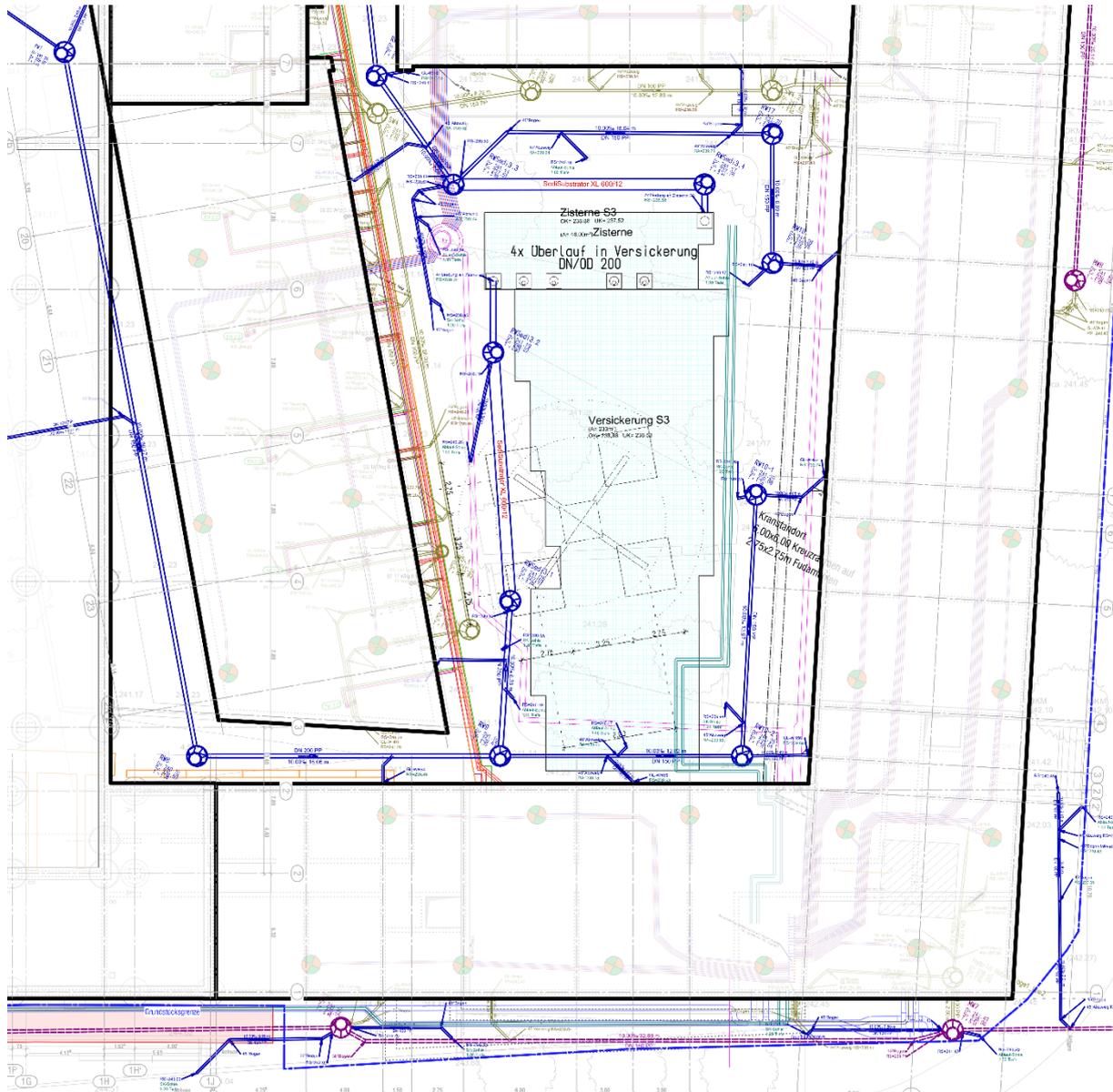


Abbildung 11: Auszug Grundleitungsplanung. Dargestellt ist die komplexe Planung der erdverlegten Leitungen im Außenraum, Rennert Ingenieure, Bamberg

Die Implementierung der Simulationsergebnisse führte zu einer Netto-Regenwasser-Speicherkapazität von ca. 158 m<sup>3</sup> in den unterirdischen Zisternen (Bauwerk Z1: ca. 65,60 m<sup>3</sup>, Bauwerk Z2: ca. 32,80 m<sup>3</sup>, Bauwerk Z3: ca. 60,00 m<sup>3</sup>). Zusätzlich wurden auf den Dächern Retentionskörper mit einem Netto-Speichervolumen von insgesamt ca. 424 m<sup>3</sup> (Fläche ca. 5.678 m<sup>2</sup>) geschaffen. Die Retentionskörper im Quartier speichern somit eine Wassermenge von ca. 426.000 Litern oder ca. 2.800 gefüllte Badewannen.

Lediglich das Oberflächenwasser der Verkehrsflächen zwischen Gebäude und Straßenraum entlang der Annastraße und der Pödeldorfer Straße werden zukünftig in die öffentliche Kanalisation eingeleitet. Das verbleibende Regenwasser kann komplett auf dem Grundstück verbleiben.

Das Wasser der Zisternen soll zusätzlich zur Bewässerung der Außenanlage genutzt werden. Der Bedarf liegt hier in der Anwuchsphase im 1.-3. Jahr nach Anpflanzung je Bewässerungsgang bei 47.000 Litern (ab dem 4. Jahr 11.750 l). Es kann davon ausgegangen werden, dass ein Teil der Bewässerung über die Zisternen ohne die Verwendung von

Trinkwasser erfolgen wird können. Die genaue Höhe lässt sich nicht ermitteln, da Faktoren wie z. B. die Dauer der Trockenperioden im Sommer und die anfallenden Niederschlagsmengen nicht abgeschätzt werden können.

In nachfolgend geplanten Studien- und Forschungsprojekten sollen Synergien und funktionale Einflüsse des innovativen Regenwassermanagements auf unterschiedliche Quartiersgegenstände ermittelt, untersucht und quantifiziert werden. Darunter fallen u. a. folgende Themenblöcke.

Die Erhöhung der Verdunstung auf den Dachflächen führt im Quartier nicht nur zu einer Verbesserung des Mikroklimas durch den eintretenden Kühlungseffekt, sondern potenziell auch dazu, dass die darüber liegenden Photovoltaikanlagen auf den begrünten Dachflächen gekühlt werden. Dies kann zur Folge haben, dass der Stromertrag der Anlagen gesteigert wird.

Ferner sollen die Pflanzen der Gründächer die Staubbindung erhöhen, wodurch nicht nur die Luft gefiltert wird, sondern auch eine Verschmutzung der PV-Anlage durch Staubablagerungen reduziert wird.

## **2.5 Regenwasser-Simulationen für 30-jährige/100-jährige Ereignisse**

Zur Überprüfung der anfallenden Regenwassermengen und der Aufnahme auf den Dachflächen sowie in den unterirdischen Zisternen- und Rigolenbauwerke wurden durch die Fa. Optigrün international AG umfangreiche Simulationen mit Hilfe der Simulationssoftware RWS 4.0 der Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker mbH durchgeführt. Es handelt sich um ein Langzeitsimulationsprogramm zur Berechnung und zum Nachweis von Wasserbilanzen und Einleitmengen in die öffentliche Entwässerung, unter Berücksichtigung von Dachbegrünungen in Kombination mit Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen. Die Simulationen berücksichtigten als Eingabeparameter u. a. das verwendete Dachbegrünungssystem in Kombination mit den bereits beschriebenen Regenwasserbewirtschaftungssystemen mit intelligenter vorausschauender Steuerung sowie die Niederschlagsdaten und meteorologische Daten (Temperatur, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer, Feuchtigkeit, geographische Breite).

Zur Betrachtung wurden alle Dachflächen in Größe und Aufbau einzeln dargestellt, die Abflüsse den verschiedenen Zisternen zugeordnet und über einen zeitlichen Ablauf von 18 Monaten simuliert. Um die Belastbarkeit des Systems zu überprüfen, wurden verschiedene Szenarien untersucht. Neben dem geforderten 30-jährigen Regenereignis wurden Simulationen für das 100-jährige Regenereignis und das 30-jährige Regenereignis unter Ausfall einer bidirektionalen Steuerung vorgenommen. Darüber hinaus wurde eine Langzeitsimulation für 20 Simulationsjahre vorgenommen, um die jahresdurchschnittlichen Anteile an Regenwasserversickerung und -verdunstung ohne Regenwasserabfluss über diesen Zeitraum bilanziell zu ermitteln. Im Mittel über 20 Jahre resultieren für das Quartier 647,16 mm/a an Niederschlag. Davon werden aus der Simulation 33,49 % über Rigolen versickert und 66,41 % auf Dachflächen verdunstet.

In Tabelle 1 sind die Rahmenbedingungen der Simulationen dargestellt. Ein Überflutungsschutz bei einem 100-jährigen Ereignis wird mit der geplanten Dimensionierung der Entwässerungsanlagen ist sichergestellt, wenn die intelligente Steuerung der Entwässerung durchgehend funktionsfähig ist. Beim Ausfall dieser intelligenten Steuerung ist dennoch mindestens der Überflutungsschutz im Falle eines 30-jährigen Ereignisses sichergestellt und somit Redundanz beim Überflutungsschutz gegeben.

Tabelle 1: Simulationen für die Versickerungs- und Verdunstungsanteile über 20 Jahre sowie für den Überflutungsschutznachweis im Fall eines 30- und eines 100-jährigen Ereignisses (Quelle: Optigrün international AG).

<b>Simulationsbezeichnung/ Model-Regenereignisse</b>	<b>Voraussetzung zur Erfüllung von Model-Regenereignisse</b>	<b>Annahmen</b>
Langzeitsimulation 20 Jahre	Funktionsfähigkeit intelligenter Systeme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Max. Drosselablauf aus dem Gesamtsystem: 0,00 l/s</li> <li>• Das Gesamtsystem läuft alle &gt;20,33 Jahre über. Gerechnet wurde mit einer 20,33-jährigen Langzeitsimulation.</li> </ul>
Bemessungsregen 30 Jahre	Ausfall intelligenter Systeme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Max. Drosselablauf aus dem Gesamtsystem: 0,00 l/s</li> <li>• Berechnet wurde mit einem 30-jährigen Bemessungsregen.</li> </ul>
Bemessungsregen 100 Jahre	Funktionsfähigkeit intelligenter Systeme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Max. Drosselablauf aus dem Gesamtsystem: 0,00 l/s</li> <li>• Berechnet wurde mit einem 100-jährigen Bemessungsregen</li> </ul>

Unter Beachtung der Füllstände innerhalb der Retentionskörper auf den Flachdächern und der im Jahresverlauf anfallenden Regenmengen konnte gemäß der DIN 1986-100 nachgewiesen werden, dass durch das Regenwassergesamtkonzept die anfallenden Regenmengen auf dem eigenen Grundstück zurückgehalten werden können. Eine Einleitung in die öffentliche Kanalisation kann bei allen beschriebenen Regenszenarien vermieden und das öffentliche Kanalnetz entlastet werden.

### 3 Dynamische Untersuchung der energetischen Nutzung von Regenwasserzisternen am Quartier ecoSquare

#### 3.1 Auslegungen und Grundlagenermittlung für die Modellierung des Konzepts (Zisternen, Anergierung, Energiezentralen) (AP 2.1)

Die energetische Versorgung des Quartiers wird über einen Anergierung realisiert (Abbildung 12). Dieser ermöglicht eine thermische Lastverschiebung zwischen den einzelnen Energiezentralen (Abbildung 12 und Abbildung 13).

Ein Überschuss an Wärme oder Kälte kann so bei Bedarf anderen Energieabnehmern zur Verfügung gestellt werden, wodurch sich die Energieeffizienz des Gesamtsystems verbessert. Die an den Anergierung angebotenen Zisternen werden nicht nur für das Regenwassermanagement verwendet, sondern fungieren darüber hinaus auch als thermische Speicher. Durch die Speicherfunktionalität kann die Energiebereitstellung zeitverzögert erfolgen wodurch neue Energieeinsparpotentiale erschlossen werden können.

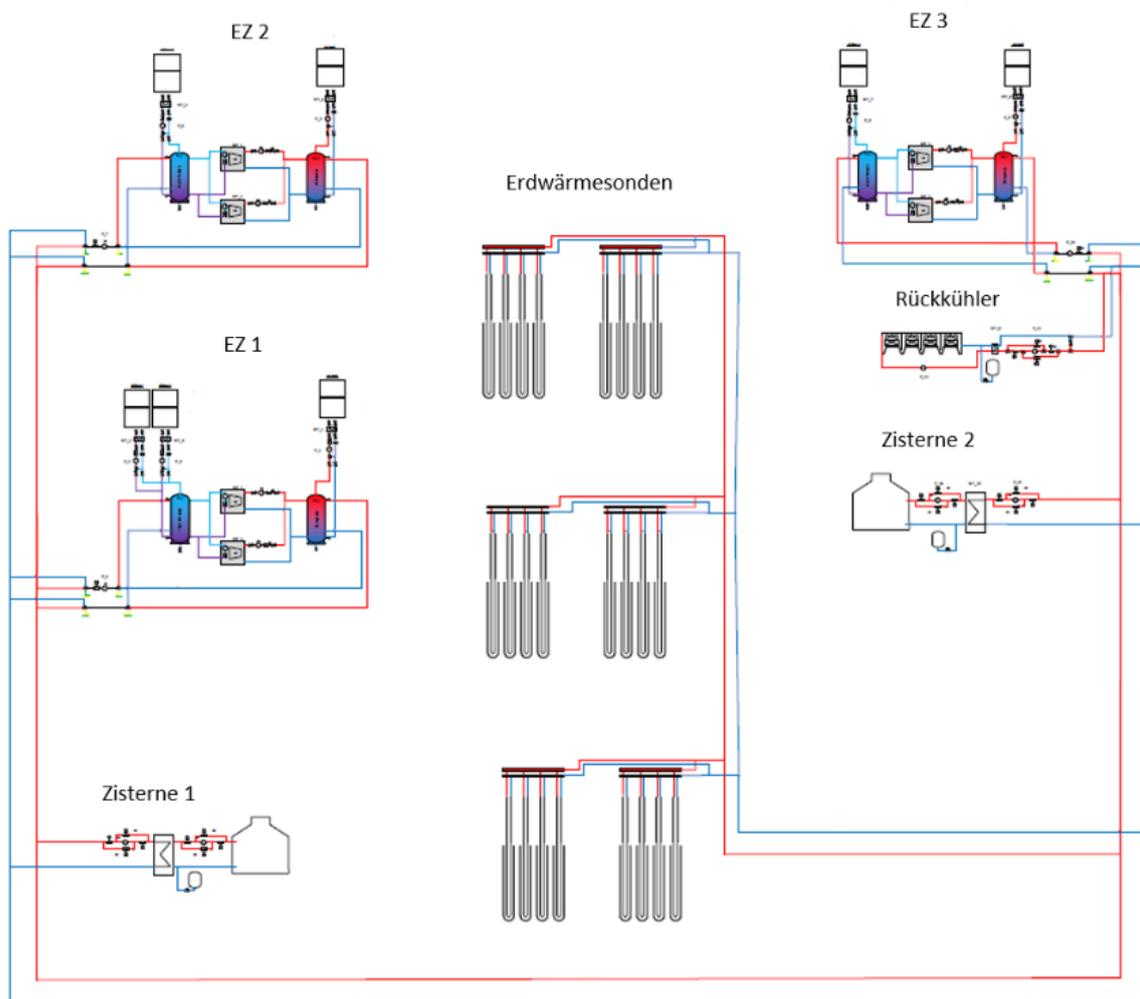


Abbildung 12: Vereinfachter TGA-Plan (vom Auftraggeber bereitgestellt) zur Energieversorgung des Quartiers bestehend aus drei Energiezentralen (EZ), 2 Zisternen, dem Erdwärmesondenfeld, dem Rückkühler und dem Anergierung zur bedarfsgerechten Verschaltung der einzelnen Gewerke untereinander. (Quelle: NATURSTROM AG)

Um die für das zu erstellende Simulationsmodell notwendige Datenbasis zu schaffen, wurden zu Beginn der Arbeiten von der Naturstrom AG die thermischen Komponenten entsprechend ihren Anforderungen dimensioniert. Hierzu zählen die Zisternen sowie alle durchströmten Rohre, Rohrschlangen und Wärmetauscher, der Anergierung, die Anbindungsleitungen zu den Energiezentralen und die Definition von Volumenströmen.

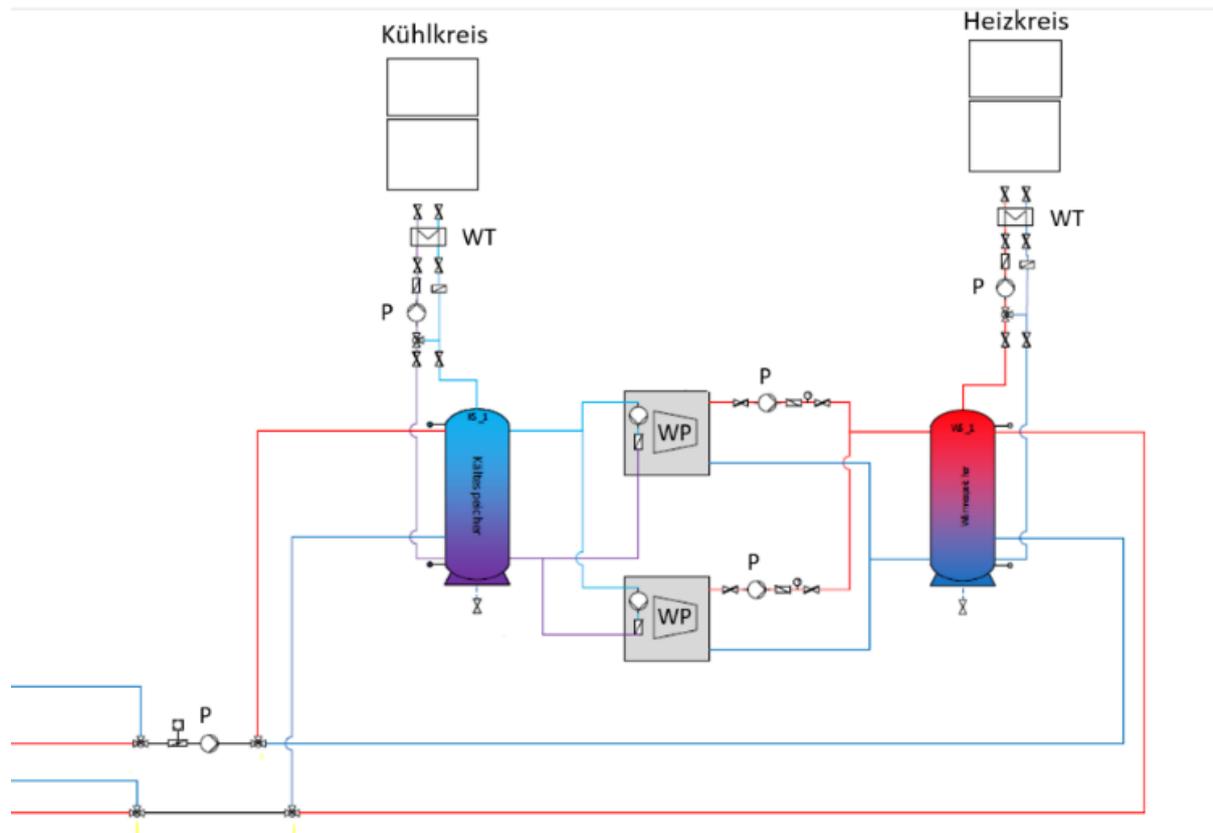


Abbildung 13: Zentrales Element der dargestellten Energiezentrale (TGA-Plan vom Auftraggeber bereitgestellt) sind die beiden parallel geschalteten Wärmepumpen (WP) welche direkt an die beiden Pufferspeicher (Wärme und Kälte) angekoppelt sind. Durch die Anbindung der Energiezentrale an den Anergierung ist es möglich, die einzelnen Gewerke quartiersdienlich mit den Energiezentralen zu verschalten und in die Energieversorgung einzubinden. Durch die bedarfsgerechte thermische Lastverschiebung zwischen den einzelnen Gewerken verbessert sich die Anlageneffizienz des Gesamtsystems. (Quelle: NATURSTROM AG)

Die technischen Daten der einzelnen Wärme- und Umwälzpumpen sowie des Erdwärmesondenfeldes wurden katalogisiert und für die weitere Nutzung entsprechend aufgearbeitet (siehe Tabelle 2).

*Tabelle 2: Übersicht über die wichtigsten technischen Eckdaten der einzelnen Komponenten des Quartiers. (Nachträgliche Änderungen zu den Grundlagen und Auswirkungen auf Simulationsergebnisse werden im Abschnitt 3.7 angesprochen)*

	Wert:	Einheit:
<b>Zisterne Z1</b>		
Speichervolumen:	68.4	m <sup>3</sup>
Länge:	12.8	m
Breite:	3.2	m
Höhe:	1.67	m
Tiefe (Oberkante):	1	m
<b>Zisterne Z2</b>		
Speichervolumen:	34.2	m <sup>3</sup>
Länge:	12.8	m
Breite:	1.6	m
Höhe:	1.67	m
Tiefe (Oberkante):	1	m
<b>Anergiering</b>		
Verlegetiefe:	1.5	m
Leitungslänge (einfach):	200	m
Rohrdurchmesser (außen):	280	mm
Rohrdurchmesser (innen):	229.2	mm
Speichervolumen:	33.1	m <sup>3</sup>
<b>Erdwärmesondenfeld (EWS)</b>		
Anzahl WS:	60	Stk
Ausführung:	Doppel-U	
Anordnung:	6x10	
Sondenabstand:	10.2	m
Bohrtiefe:	120	m
Sondendurchmesser:	152	mm
Tube-Durchmesser (außen):	32	mm
Tube_Dicke:	3	mm
Tube_Distance:	65	mm
Tube Wärmeleitfähigkeit:	0.44	W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup>
Vergußmasse Wärmeleitfähigkeit:	2.0	W*m <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup>
<b>Energiezentrale EZ1</b>		
Leistung Heizen / Kühlen:	380 / 560	kW
<b>Energiezentrale EZ2</b>		
Leistung Heizen / Kühlen:	120 / 90	kW
<b>Energiezentrale EZ3</b>		
Leistung Heizen / Kühlen:	112 / 80	kW
<b>Glykol-Wasser-Gemisch</b>		
spezifische Wärmekapazität:	3860	J*kg <sup>-1</sup> *K <sup>-1</sup>
Dichte	1.04	kg*l <sup>-1</sup>
dynamische Viskosität:	21	mPa*s <sup>-1</sup>

Für das Stadtquartier wurden entsprechende Heiz- und Kühllastprofile zur Verfügung gestellt. Abbildung 14 zeigt den Jahresbedarf an Wärme und Kälte für das Quartier. Dieser Energiebedarf liegt den nachfolgenden Berechnungen zugrunde.

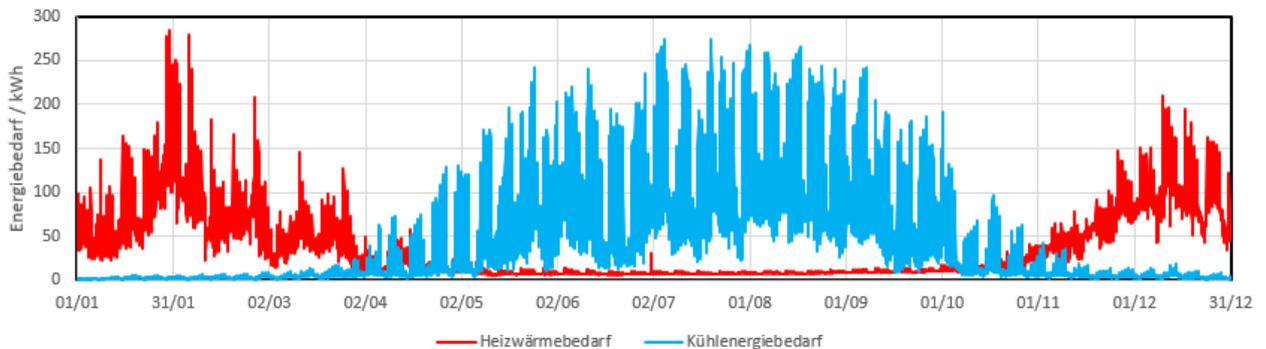


Abbildung 14: Zeitlich aufgelöster Jahresenergiebedarf (Stundenwerte) des gesamten Quartiers für Heizen (rot) und Kühlen (blau). Die Werte wurden vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt.

### 3.2 Entwicklung eines vereinfachten Simulationsmodells des Anergierings (AP 2.3)

Zentrale Schnittstelle zur thermischen Lastverschiebung zwischen den einzelnen Gewerken des Quartiers ist der Anergiering. Dieser besteht im ecoSquare aus einem Rohrsystem aus vier ungedämmten Rohren, welche in 1,5 m Tiefe verlegt werden. Für die energetische Betrachtung des Anergieringes ist die Wärmeübertragung zum umgebenden Erdreich, das Speichervolumen des Ringes und die Rohrleitungslänge entscheidend. Abbildung 15 zeigt die Lage der Anergieringleitungen relativ zur Oberfläche.

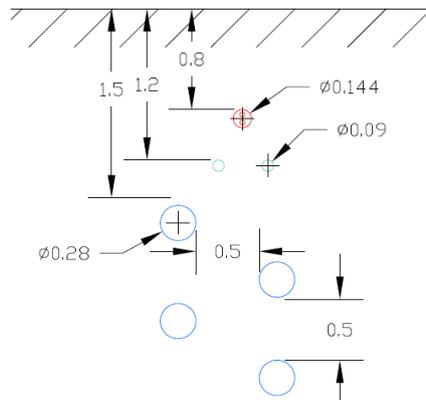


Abbildung 15: Vom Auftraggeber zur Verfügung gestellter Vertikalschnitt durch das Erdreich (schraffierter Bereich ist die Geländeoberkante). Dargestellt sind die Anergieringleitungen (blau), die Zisternenanbindung (grün) und die Trinkwasserversorgung (rot). (Quelle: NATURSTROM AG)

Die Temperatur im Boden unterliegt saisonalen Schwankungen, die durch die schwankende Außentemperatur und die solare Einstrahlung induziert werden. Stark vereinfachte Rechenverfahren basieren hierbei auf der Annahme einer idealisierten sinusförmigen thermischen Anregung auf dem Rand (Erdoberfläche) eines halbbunendlichen Körpers (Erdreich). Hierbei wird die anregende Schwingung in den Erdboden übertragen, was zur Ausbildung eines „Temperaturtrichters“ wie in Abbildung 16 gezeigt führt.

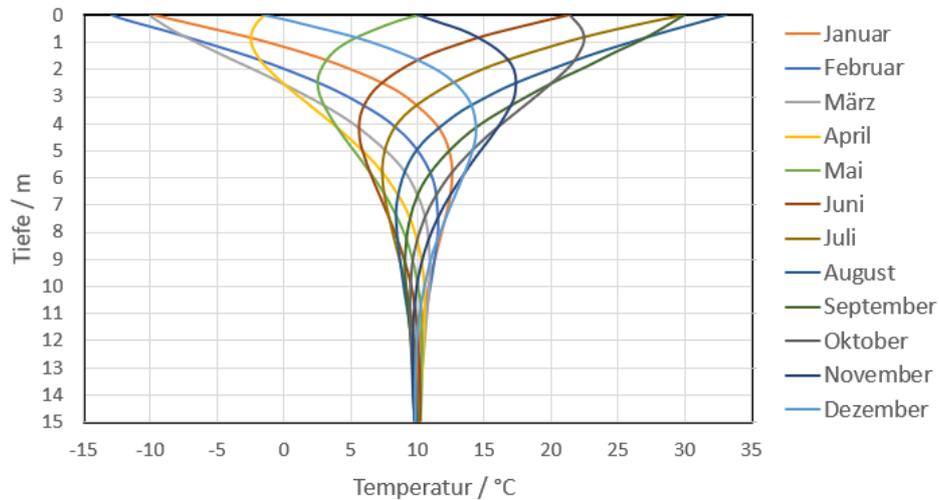


Abbildung 16: Tiefenaufgelöster Temperaturverlauf im Erdreich dargestellt für einzelne Kalendermonate (vereinfachte Berechnung über idealisierte sinusförmige thermische Anregung auf Rand eines halbunendlichen Körpers). Die Temperaturamplitude nimmt mit zunehmender Bodentiefe ab.

Mit zunehmender Tiefe nimmt die Amplitude kontinuierlich ab und ist bereits ab einer Tiefe von ca. 10 bis 15 m vernachlässigbar klein (je nach Temperaturleitfähigkeit), während an der Erdoberfläche stärkere Schwankungen zu erkennen sind.

Thermische Abweichungen von diesem vereinfachten Modell entstehen dadurch, dass sich in der Realität Wetterphänomene häufig nicht durch einfache Sinusschwingungen beschreiben lassen. So unterliegt z. B. die lokale solare Einstrahlung auf der Bodenoberfläche nichtperiodischen Schwankungen. Diese Schwankungen führen gegenüber dem idealisierten Modell vor allem in den oberflächennahen Erdschichten zu Unterschieden im transienten Temperaturverlauf. Zusätzliche thermische Abweichungen entstehen durch Erdschichten mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften, sowie dem Feuchtetransport und möglichen Phasenwechselprozessen (Bodenfrost) in den Wintermonaten.

Für die Wärmeübertragung an den Anergiering, und die damit verbundenen thermischen Erträge/Verluste, spielt die umgebende Erdreichtemperatur eine zentrale Rolle. Die Anergieringleitungen liegen knapp unterhalb der frostsicheren Bodenzone und somit noch im Einzugsgebiet der thermischen Oberflächeneffekte. Zusätzlich zu den wetterbedingten Einflüssen können thermische Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Anergieringleitungen auftreten.

Physikalisch ähnliche Wärmetransporteffekte und Randbedingungen lassen sich analog zum Anergiering z. B. auch bei Erdwärmekollektoren beobachten. Um die erforderliche Rechengenauigkeit bei der Simulation von Erdwärmekollektoren zu gewährleisten, werden bei kommerziell erhältlichen Simulations-Modulen deshalb meist numerische Modelle für die Berechnung gewählt. Diese numerischen Modelle sind in der Lage, den Wärmetransport ins Erdreich unter Berücksichtigung der wetterbedingten Energieeinträge an der Oberfläche, den Einfluss verschiedener Erdschichten mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften und die bestehenden Wechselwirkungen mit dem Kollektor ausreichend genau abzubilden.

Dazu wurde vom ZAE Bayern ein entsprechendes numerisches Modell für den Anergiering erstellt. Das Modell ist in der Lage, den Wärmetransport in das Erdreich unter Berücksichtigung der aktuellen Wettersituation abzubilden. Horizontale Erdschichten mit unterschiedlichen thermischen Eigenschaften können in dem Modell modelliert werden. Ein eventueller Phasenwechsel in den Wintermonaten wird ebenfalls rechnerisch berücksichtigt. Jedoch werden thermische Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Anergieringleitungen

vernachlässigt, da der Einfluss vergleichsweise gering ist. Das erstellte Modell kann bei Bedarf in Zukunft prinzipiell auf Mehrleitersysteme erweitert werden, um thermische Wechselwirkungen in die Betrachtungen miteinzubeziehen.

Der Wärmetransport im Erdreich basiert im Wesentlichen auf dem Wärmetransportmechanismus der Wärmeleitung. Die instationäre Wärmeleitung für das räumliche Temperaturfeld  $T(x,y,z,t)$  zum Zeitpunkt  $t$  für einen homogenen isotropen Körper unter Berücksichtigung eines vorhandenen Quellfeldes  $Q$  wird über die Fourier'sche Differenzialgleichung beschrieben:

$$\frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\dot{Q}(x,y,z,T,t)}{\rho c} \quad (1)$$

Die Temperaturleitfähigkeit  $a$  berechnet sich zu

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}. \quad (2)$$

Für die numerische Berechnung des transienten räumlichen Temperaturfeldes wurde ein Berechnungsverfahren basierend auf der Methode der Finiten-Differenzen gewählt. Um entsprechende Finite Differenzen (FD) Berechnungen durchführen zu können wird das zu berechnende Gebiet zunächst über ein entsprechendes Berechnungsgitter diskretisiert. Abbildung 17 zeigt exemplarisch einen quaderförmiges Volumenelement mit der Temperatur  $T_{x,y}$  in einem beliebig räumlich ausgedehnten kubischen Berechnungsgitter, wobei hier nur der Blick auf die X-Y-Ebene dargestellt ist (auf die räumliche Ausdehnung in Z-Richtung sowie deren Indizes wurde in Abbildung 17 aus Vereinfachungsgründen verzichtet).

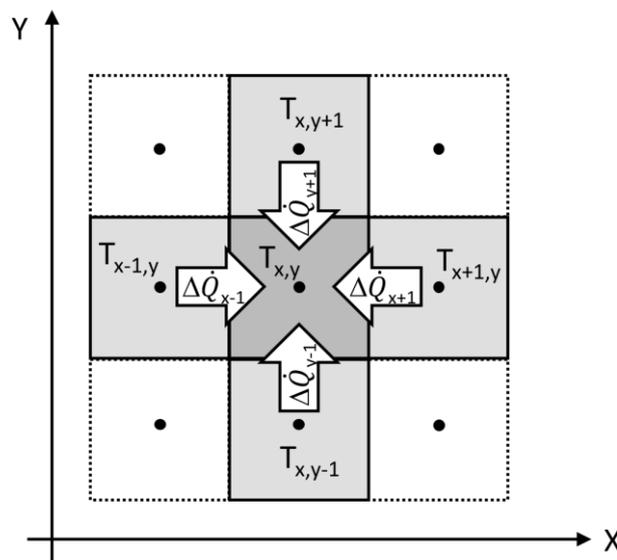


Abbildung 17: Ausschnitt aus einem FD-Berechnungsgitter. Dargestellt ist ein finites Berechnungselement mit der Temperatur  $T_{x,y}$ . Von den benachbarten Berechnungselementen fließen in X-Richtung die Wärmeströme  $\Delta \dot{Q}_{x-1}$  und  $\Delta \dot{Q}_{x+1}$ , in Y-Richtung  $\Delta \dot{Q}_{y-1}$  und  $\Delta \dot{Q}_{y+1}$ .

Betrachtet man die Wärmeströme, die zwischen benachbarten Diskretisierungsquadrern fließen, so ergeben sich in X-Richtung für den dreidimensionalen Fall die folgenden Gleichungen:

$$\Delta \dot{Q}_{x-1} = \frac{\lambda}{\Delta x} (T_{x-1,y,z}(t) - T_{x,y,z}(t)) \Delta y \Delta z \quad (3)$$

den zweiten in X-Richtung angrenzenden Berechnungsknoten folgt:

$$\Delta \dot{Q}_{x+1} = \frac{\lambda}{\Delta x} (T_{x+1,y,z}(t) - T_{x,y,z}(t)) \Delta y \Delta z \tag{4}$$

Analog lassen sich die Gleichungen für die Y und Z Richtung aufstellen. Die zeitliche Temperaturänderung in einem Quader des Berechnungsgitters ergibt sich im Zeitintervall  $\Delta t$  unter Berücksichtigung aller vorhandener Wärmeströme bei sensibler Wärmespeicherung zu

$$T_{x,y,z}^{t+1} = T_{x,y,z}^t + \frac{\Delta t}{\rho c \Delta x \Delta y \Delta z} (\Delta \dot{Q}_{x+1} + \Delta \dot{Q}_{x-1} + \Delta \dot{Q}_{y+1} + \Delta \dot{Q}_{y-1} + \Delta \dot{Q}_{z+1} + \Delta \dot{Q}_{z-1} + \Delta \dot{Q}_{Quelle\ x,y,z}) \tag{5}$$

Die Wärmespeicherung im Erdreich erfolgt überwiegend sensibel. Durch den Wasseranteil im Erdreich weist das Wasser-Erdreich Gemisch bei 0 °C überdies Eigenschaften eines Latentwärmespeichers auf, welche im Erdboden unter natürlichen Bedingungen beim Phasenwechsel zwischen fest und flüssig in Erscheinung treten. Diese Latentwärmespeicherung erfolgt z. B., wenn das im Erdboden entstandene Eis aufgeschmolzen wird. Beim Phasenwechsel von fest zu flüssig wird hierbei thermische Energie im Phasenwechsel gespeichert ohne dass eine Temperaturerhöhung eintritt (siehe Abbildung 18). Diese im Phasenwechsel gespeicherte Wärme wird auch als latente Wärme bezeichnet, der Vorgang ist reversibel und verläuft beim Erstarren in umgekehrter Richtung. Hierbei treten oftmals Unterkühlungseffekte auf, welche an dieser Stelle jedoch vernachlässigt werden. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass die Wärmespeicherung immer einer Ideallinie (Abbildung 18) folgt, welche allein durch Schmelztemperatur, Schmelzenthalpie, Wärmespeicherkapazität (fest, flüssig) und Wärmezu- bzw. -abfuhr bestimmt ist.

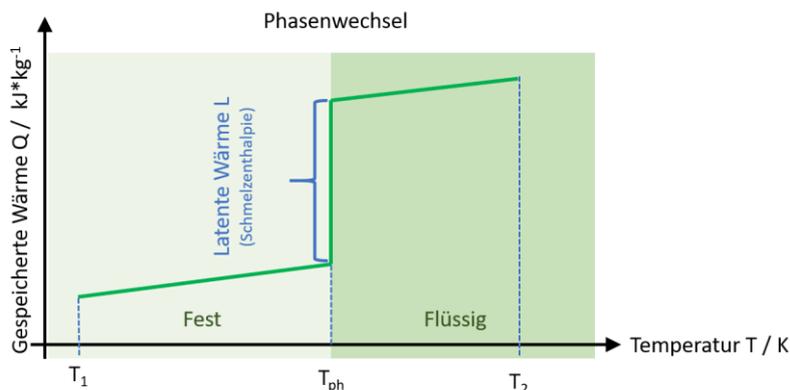


Abbildung 18: Wärmespeicherung bei einem idealen Phasenwechsel. Dargestellt ist die Temperaturerhöhung  $T_1$  bis  $T_2$  bei konstanter Wärmezufuhr. Zunächst wird die zugeführte Wärme sensibel gespeichert, um die Temperatur vom Ausgangszustand  $T_1$  auf den Schmelzpunkt  $T_{ph}$  zu erhöhen. Im Schmelzbereich  $T_{ph}$  bleibt die Temperatur zunächst konstant, die zugeführte Wärme wird in latenter Wärme gespeichert, der Phasenzustand wechselt von fest nach flüssig. Die Temperaturerhöhung in der flüssigen Phase von  $T_{ph}$  auf  $T_2$  erfolgt wiederum über sensible Wärmespeicherung.

Diese ideale Wärmespeicherung wird durch Gleichung (6) wiedergegeben,

$$\Delta Q = \int_{T_1}^{T_{ph}} C_s(T) dT + L + \int_{T_{ph}}^{T_2} C_l(T) dT \tag{6}$$

(Index S für solid/fest, Index l für liquid/flüssig) mit den Wärmespeicherkapazitäten

$$C(t) = m c_p(t) \tag{7}$$

und der latenten Wärme  $L$  (Schmelzenthalpie).

Die Schmelzenthalpie und somit die latente Speicherfähigkeit des Erdbodens nimmt mit steigendem Wassergehalt zu. Aufgrund der Temperaturleitfähigkeit des Erdreiches sind Phasenwechseleffekte nur bis zu einer Tiefe von circa 1 m zu erwarten.

Für die numerische Umsetzung wird im Programm wird jedem Berechnungselement des Gitters die latente Wärme  $L_{x,y,z}$ , die aktuell gespeicherte latente Wärme  $L_{eff\ x,y,z}$  und die Liquid Fraction  $LF_{x,y,z}$  (von fest  $\rightarrow$   $LF=0$  bis flüssig  $\rightarrow$   $LF=1$ ) zugeordnet. Die zeitliche Änderung der aktuell gespeicherten latenten Wärme ergibt sich aus der Summe der einwirkenden Wärmeströme. Es gilt:

$$L_{eff\ x,y,z}^{t+1} = L_{eff\ x,y,z}^t + \frac{\Delta t \sum(\Delta \dot{Q})}{m_{x,y,z}} \quad (8)$$

Für die Liquid Fraction  $LF$  gilt:

$$LF_{x,y,z} = \frac{L_{eff\ x,y,z}}{L_{x,y,z}} \quad (9)$$

Bei jedem neuen Berechnungszeitschritt wird zunächst die aktuelle Phase des Berechnungselementes überprüft:

Wenn die Temperatur  $T_{x,y,z}^t$  unterhalb des Schmelzpunktes liegt und gleichzeitig  $LF_{x,y,z} = 0$  ist liegt die feste Phase vor, wenn  $T_{x,y,z}^t$  oberhalb des Schmelzpunktes liegt und  $LF_{x,y,z} = 1$  ist liegt die flüssige Phase vor. Die zu erwartende neue Temperatur  $T_{x,y,z}^{t+1}$  wird in beiden Fällen über Gleichung (5) berechnet. Wird die Schmelztemperatur hierbei nicht erreicht oder über- bzw. unterschritten so wird diese Temperatur als neue Temperatur des Berechnungselementes übernommen (sensible Wärmespeicherung).

Wird dagegen der Bereich der Latentwärmespeicherung erreicht, so wird  $T_{x,y,z}^{t+1}$  gleich der Schmelztemperatur gesetzt, und über Gleichung (8) wird die aktuelle eingespeicherte Latente Wärme und über Gleichung (9) die Liquid Fraction berechnet. Dieser Latentwärmespeichermodus wird so lange beibehalten, bis wieder der Bereich der sensiblen Wärmespeicherung erreicht wird, also  $LF_{x,y,z}$  und  $T_{x,y,z}$  entsprechende Werte annehmen.

Die Temperaturabhängigkeit der verwendeten Wärmekapazitäten wird im Programm vereinfachend vernachlässigt. Ebenfalls unberücksichtigt bleiben Strömungseffekte durch evtl. Feuchtetransport im Boden.

Um den zeitabhängigen Energieeintrag auf die Bodenoberfläche rechnerisch abbilden zu können, wird im erstellten Berechnungsmodell vereinfachend die Sonnenlufttemperatur verwendet. Bei der Sonnenlufttemperatur handelt es sich um die Superposition zwischen solarer Einstrahlung und Außenlufttemperatur. Für die Berechnung der Sonnenlufttemperatur  $T_{SL}$  auf der Bodenoberfläche gilt:

$$T_{SL}(t) = T_a(t) + \frac{\alpha_s I_{sol}(t)}{\alpha_a} \quad (10)$$

$T_a$  ist hierbei die Außenlufttemperatur,  $I_{sol}$  die globale solare Einstrahlung,  $\alpha_s$  der solare Absorptionsgrad und  $\alpha_a$  der Wärmeübergangskoeffizient an der Bodenoberfläche. Die Temperaturdifferenz zwischen Sonnenlufttemperatur und Bodenoberfläche beeinflusst den resultierenden Wärmestrom.

Bei der Wärmeübertragung in der Anergieringleitung wird im Modell zwischen zwei Betriebsarten unterschieden: Stillstand (Massenstrom = 0), und aktiver Betrieb (Massenstrom  $\neq 0$ ). Im aktiven Betrieb tritt im Rohr erzwungene Konvektion auf. Der resultierende konvektive Wärmeübergangskoeffizient ergibt sich aus der Superposition zwischen Temperatur- und

Geschwindigkeitsfeld. Die Steigerung gegenüber reiner Wärmeleitung wird durch die dimensionslose Nusseltzahl wiedergegeben:

$$\alpha_{konv} = \frac{Nu \lambda}{d_i} \quad (11)$$

Je nach Strömungsgeschwindigkeit wird hierbei zwischen laminarer und turbulenter Strömung unterschieden. Die Berechnung der dimensionslosen Nußeltzahl für ein Rohr mit dem Innendurchmesser  $d_i$  und der Länge  $L$  erfolgt im laminaren Fall ( $Re \leq 2300$ ) durch

$$Nu = \left( 49.28 + 4.173 Re Pr \frac{d_i}{L} \right)^{0.333}, \quad (12)$$

mit der Reynoldszahl  $Re$  ( $v$  = Strömungsgeschwindigkeit  $v$ ,  $\nu$  = kinematische Viskosität)

$$Re = \frac{v d_i}{\nu} \quad (13)$$

und der Prandtlzahl

$$Pr = \frac{v \rho c_p}{\lambda} \quad (14)$$

Die Prandtlzahl ist durch die kinematische Viskosität  $\nu$ , die Dichte des Fluids  $\rho$ , die spezifische Wärmekapazität  $c_{sp}$  sowie die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  definiert.

Im turbulenten Strömungsbereich ( $Re \geq 10000$ ) berechnet sich die Nußeltzahl über

$$Nu = \frac{B (Re - 1000) Pr}{1 + 12,7 B^{1/2} (Pr^{0.667} - 1)} \left( 1 + \left( \frac{d_i}{L} \right)^{0.667} \right) \quad (15)$$

mit  $B$  gleich

$$B = (5,09 \log(Re) - 4,24)^{-2} \quad (16)$$

Im Übergangsbereich ( $2300 < Re < 10000$ ) wird in dieser Arbeit mit

$$Nu = (1 - \gamma) Nu_{lam}[Re = 2300] + \gamma Nu_{tur}[Re = 10000] \quad (17)$$

gearbeitet, wobei für  $\gamma$  die folgende Beziehung gilt:

$$\gamma = \frac{Re - 2300}{10^4 - 2300} \quad (18)$$

Ist der Durchfluss 0 ( $Re = 0$ ) wird vereinfachend reine Wärmeleitung ( $Nu = 1$ ) angenommen. Dadurch werden eventuelle Effekte durch freie Konvektion im Fluid der Anergieringleitungen im erstellten Modell vernachlässigt. Auch kapazitive Effekte der Rohrwandung bleiben unberücksichtigt.

Mit den getroffenen Vereinfachungen kann das dynamische Verhalten in der Anergieringleitung sowohl im Stillstand als auch im durchströmten Fall über die folgende Gleichung berechnet werden:

$$T_{pipe(x,y,z)}^{t+1} = T_{pipe(x,y,z)}^t + (T_{pipe(x,y,z-1)}^{t+1} - T_{pipe(x,y,z)}^t) \frac{h_f \Delta t}{m c_p} + \left( \frac{1}{4} (T_{earth(x,y-1,z)}^t + 2 T_{earth(x+1,y,z)}^t + T_{earth(x,y+1,z)}^t) - T_{pipe(x,y,z)}^t \right) \frac{h_\alpha \Delta t}{m c_p} \quad (19)$$

wobei die thermische Leitfähigkeit  $h_f$  im Fluid wird über die folgende Beziehung berechnet wird:

$$h_f = c_p \dot{m} \tag{20}$$

Die Masse im Berechnungselement ergibt sich zu

$$m = 2 \pi r^2 \Delta z \rho_f . \tag{21}$$

Die thermische Leitfähigkeit vom Fluid an das Erdreich berechnet sich zu:

$$h_a = \left( \frac{d_a}{\alpha_{konv} d_i} + \frac{d_a}{2 \lambda_R} \ln \left( \frac{d_a}{d_i} \right) + \frac{d_{eff}}{2 \lambda_g} \ln \left( \frac{d_{eff}}{d_a} \right) \right)^{-1} , \tag{22}$$

unter Verwendung der effektiven Dicke

$$d_{eff} = d_a + \frac{\Delta x + \Delta y}{2} . \tag{23}$$

Bei der Modellierung des Anergierings (Abbildung 19) wird davon ausgegangen, dass sich die Temperaturverteilung im Erdboden mit zunehmendem Abstand von der Rohrleitung der Temperaturverteilung von ungestörtem Erdreich annähert. Dieser Abstand ( $x_{max}$ ) wird im numerischen Model vorgegeben und muss so gewählt werden, dass der thermische Einfluss durch die Rohrleitung im Abstand  $x_{max}$  vernachlässigbar klein ist (die Größe von  $x_{max}$  hängt also von der Temperaturleitfähigkeit des Bodens ab). Die Randbedingungen auf den Begrenzungsflächen in Y-Richtung werden im Modell als adiabat angenommen (Abbildung 19). Um die Berechnungsaufwand zu reduzieren, wird in der vertikalen Schnittebene durch die Rohrachse eine Modellsymmetrie angenommen. Durch diese Maßnahme kann die Anzahl der Berechnungsknoten nahezu um die Hälfte reduziert werden.

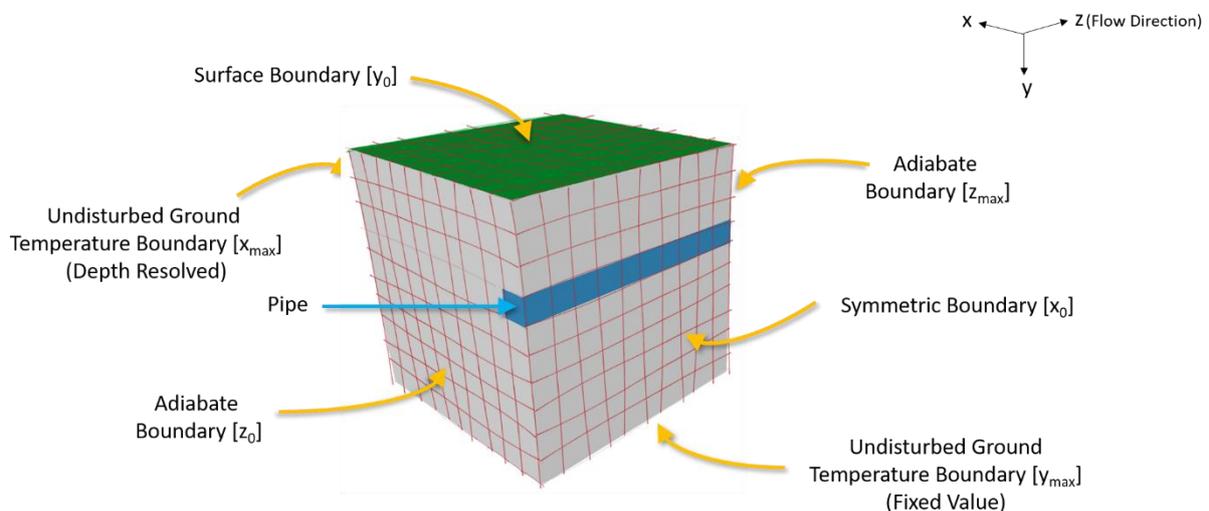


Abbildung 19: Skizze des numerischen Finite-Differenzen-Modells für die Anergieringleitung. Die roten Striche skizzieren das kubische Berechnungsgitter. Blau eingezeichnet ist die Anergieringleitung. Der kreisförmige Rohrquerschnitt wird hierbei vereinfachend durch ein Quadrat mit gleichem Flächeninhalt approximiert. Um den Berechnungsaufwand zu reduzieren, wird von einer, zur vertikalen Schnittfläche längs der Rohrachse symmetrischen, Temperaturverteilung ausgegangen.

Die Programmierung des Anergieringmodells ist in MATLAB 2021b erfolgt. Mögliche Ausgabegrößen der transienten thermischen Simulation sind im Prinzip alle für die Berechnung benötigten Größen. In Abbildung 20 sind exemplarisch einige Rechenergebnisse dargestellt.

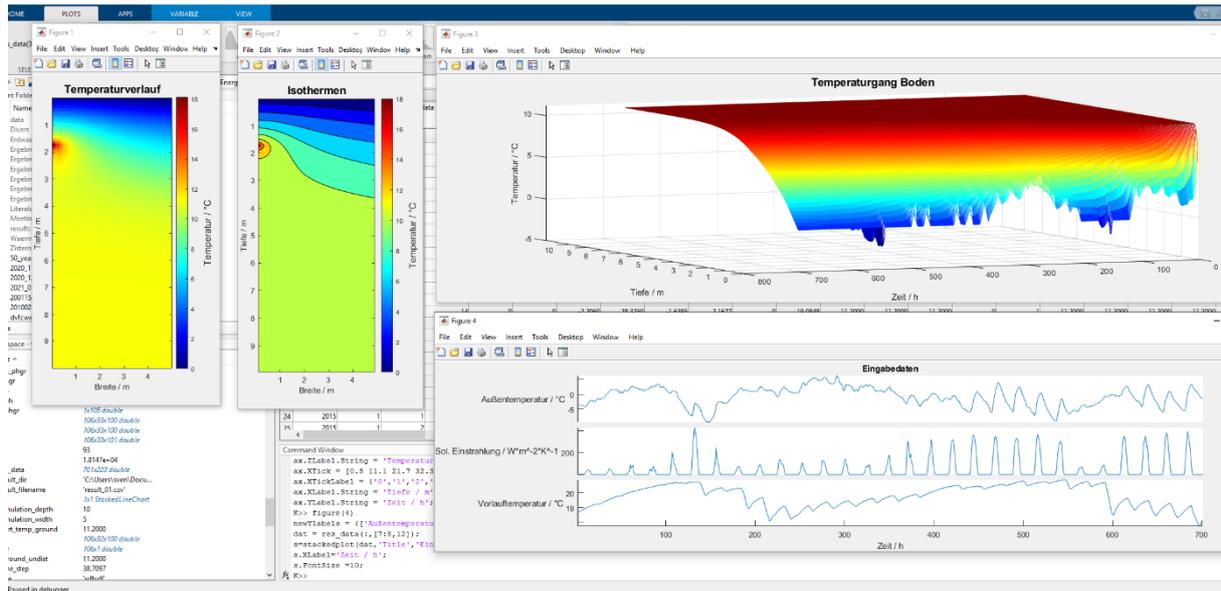


Abbildung 20: Screenshot mit simulierten Teilergebnissen des Anergierings. Oben links: Temperaturverlauf in der X-Y Ebene. Oben rechts: Transienter Temperaturgang im ungestörten Erdreich. Unten rechts: Randbedingungen der Simulation.

Durch die flexible Finite-Differenzen-Struktur ist eine gute Erweiterbarkeit des erstellten Modells auf Mehrleitungssysteme gegeben.

### 3.3 Entwicklung eines detaillierten Simulationsmodells für die energetische Nutzung von Zisternen (AP 2.2)

Die Zisternen im ecoSquare Projekt sollen nicht nur für das Regenwassermanagement verwendet werden, sondern auch als thermischer Energiespeicher im kalten Nahwärmenetz dienen. Um die Zisternen auch thermisch nutzen zu können ist eine Wärmeübertragung zwischen dem kalten Nahwärmenetz und dem Nutzwasser der Zisterne erforderlich. Diese Wärmeübertragung soll nach Möglichkeit sowohl technisch einfach nachrüstbar als auch kostengünstig sein. Die eingesetzten Zisternen basieren auf dem Rigofill-System der Fränkische Rohrwerke GmbH & Co. Kg (siehe Abbildung 21).

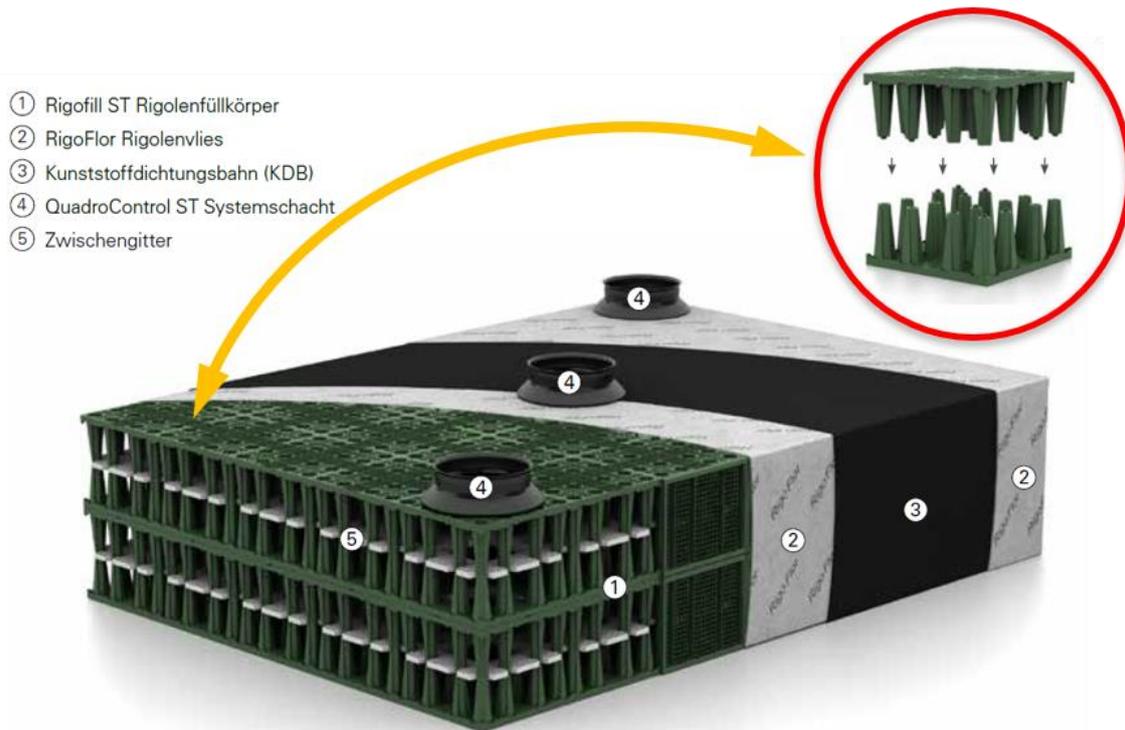


Abbildung 21: Technische Umsetzung der Zisternen im ecoSquare Projekt (basierend auf Grafiken der Fränkische Rohrwerke GmbH & Co. KG): Der Zisternenkorpus wird aus den einzelnen Rigolenfüllkörpern (1) zusammengesetzt. Diese bestehen jeweils aus zwei Halbschalen (oben rechts). Der Zisternenkorpus wird zunächst von einem Rigolenvlies (2) umhüllt und über eine Kunststoffdichtungsbahn (3) abgedichtet. Über entsprechende Systemschächte (4) kann auf das Speichervolumen zugegriffen werden. (Quelle: Fränkische Rohrwerke GmbH & Co. KG)

Eine einfache technische Möglichkeit für die Nachrüstung eines Wärmeübertrages stellen z. B. Wärmeübertrager-Rohrschlangen dar, welche im Speichertank bestehend aus Rigolenfüllkörpern versenkt werden. Eine mögliche Anordnung der Wärmeübertrager-Rohrschlangen ist in Abbildung 22 zu sehen.

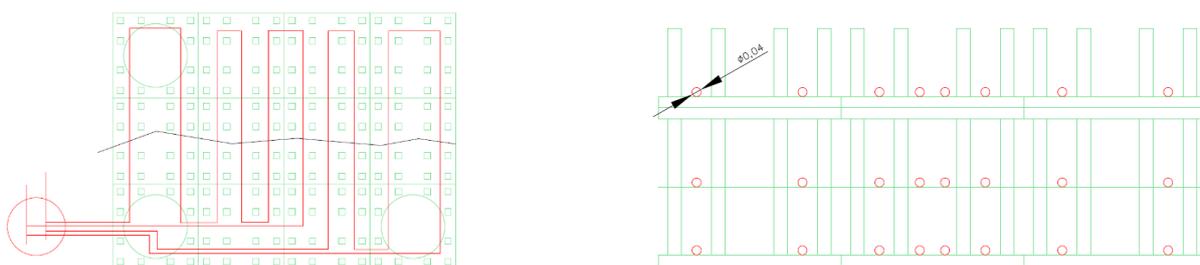


Abbildung 22: TGA-Planausschnitt (vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt) der Zisterne Z2 bestehend aus Rigolen-Füllkörpern (grün) und Wärmeübertrager-Rohrschlangen (rot). In der Draufsicht (links) ist die Verlegung von zwei parallelgeschalteten Rohrschlangen in der horizontalen Ebene zu sehen, in der Seitenansicht (rechts) die 3 Etagen der Rigolen-Füllkörper (in jeder Etage mit zwei parallelgeschalteten Wärmeübertrager-Rohrschlangen, wie auch in der Draufsicht zu sehen). (Quelle: NATRUSTROM AG)

Die Wärmeübertragung findet hierbei über die an den Anergierung angebundene Wärmeübertrager-Rohrschlangen an das Zisternenwasser statt. Wird der Zisterne im Sommer z. B. Wasser für Bewässerungszwecke entnommen, so sinkt der Zisternenfüllstand. Durch die Wasserabsenkung können Teile der Wärmeübertrager-Rohrschlangen nur teilweise, oder auch gar nicht, vom Zisternenwasser bedeckt sein. Der Wärmeaustausch findet dann mit der

angrenzenden Luftschicht statt. Ein Wiederauffüllen der Zisterne kann z. B. durch Regenwasser erfolgen. An die Zisternen selbst sind hierzu zahlreiche Wasserabläufe von teils begrünten Dachflächen angeschlossen. Das Regenwasser wird hierbei über entsprechende Zulaufstutzen in die Zisterne geleitet (siehe Abbildung 23).



Abbildung 23: Verortung einer Zisterne (Planzeichnung vom Auftraggeber zur Verfügung gestellt). Eingezeichnet sind die vertikalen Wartungsschächte sowie die Regenwasserzulaufe in die Zisterne. (Quelle: Fränkische Rohrwerke GmbH & Co. KG)

Auch eine technische Wassernachspeisung über Trinkwasser ist angedacht, um längere Dürreperioden überbrücken zu können. Die Temperaturschichtung in der Zisterne selbst wird vor allem durch die Art der Wärmeübertragung ans kalte Nahwärmenetz und die Wassernachspeisung beeinflusst. Die zu- und abfließenden Enthalpieströme beeinflussen die Temperaturschichtung. Weitere Einflüsse entstehen durch den Wärmeaustausch mit dem angrenzenden Erdreich. Aufgrund der geringen Bodentiefe tritt auch bei der Zisterne eine Überlagerung zu den transienten vertikalen Wärmetransporteffekten auf.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein entsprechendes numerisches Modell in zwei unterschiedlichen Modellvarianten für die Zisterne erstellt. Variante 1 basiert hierbei auf den integrierten Wärmeübertrager-Rohrschlangen, Variante 2 nutzt einen externen Plattenwärmetauscher für die Wärmeübertragung. Das erstellte Modell ist in der Lage, für beide Modellvarianten den Wärme- und Stofftransport entsprechend abzubilden. Ebenfalls modelliert wird der Wärmetransport ins Erdreich (inklusive Phasenwechsel und Energietransport an der Bodenoberfläche) sowie die hierbei auftretenden thermischen Wechselwirkungen mit der Zisterne.

Der Rechenaufwand des numerischen Modells wird reduziert, in dem bei der Modellierung vereinfachend davon ausgegangen wird, dass die Zisterne eine stehende Zylinderform aufweist. Durch die Zylinderform kann die numerische Betrachtung vereinfachend durch ein zweidimensionales Modell erfolgen. Damit Abweichungen zur kubischen Variante möglichst klein ausfallen, wird für die Grundfläche ein Kreis mit gleichem Flächeninhalt angenommen. Hierdurch bleiben Volumen und Höhe der Zisterne unverändert.

Durch die Transformation in ein rotationssymmetrisches Modell lässt sich der instationäre Wärmetransport im Erdreich vereinfachend durch die Fourier'sche Differenzialgleichung in Zylinderkoordinaten (Radius  $r$ , Höhe  $y$ ) beschreiben:

$$\frac{\partial T(r,y)}{\partial t} = a \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\dot{Q}(r,y,T,t)}{\rho c} . \quad (24)$$

Die numerische Umsetzung des Wärmetransportes im Erdreich erfolgt auch hier durch ein Finite-Differenzen-Berechnungsverfahren. Um die Zylindergeometrie abzubilden, erfolgt die Diskretisierung über ein Berechnungsgitter basierend auf einzelnen konzentrischen Ringen, wie in Abbildung 24 zu sehen.

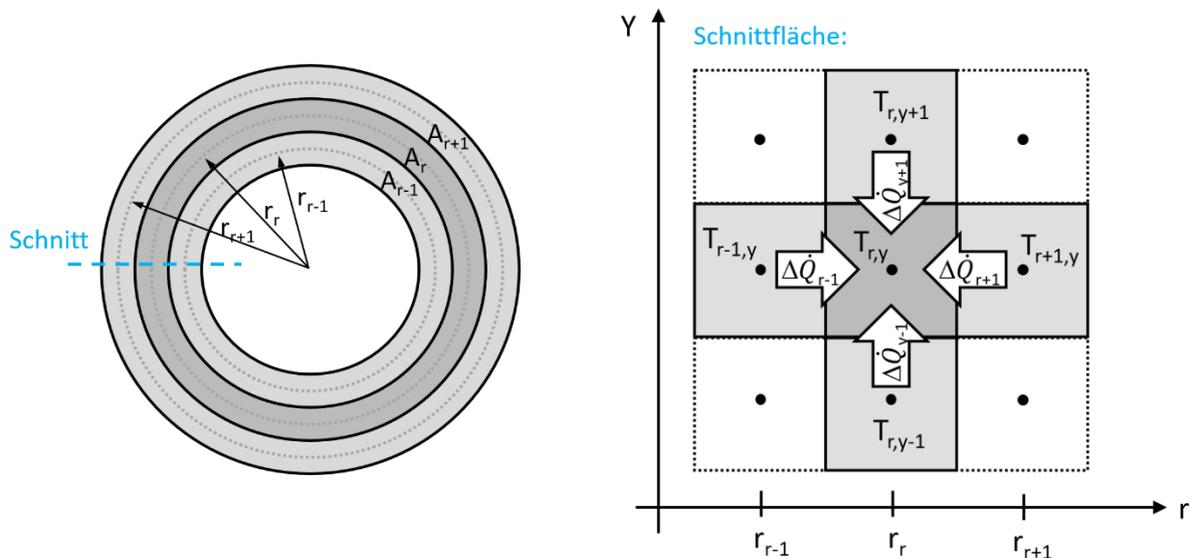


Abbildung 24: Das numerische FD-Berechnungsgitter des rotationssymmetrischen Modells besteht hierbei aus konzentrischen Ringen (links), welche in der Y-R-Schnittebene (rechts) ein zweidimensionales Gitter bestehend aus einzelnen Quadranten bilden. Zwischen den benachbarten ringförmigen Berechnungselementen fließen in radialer Richtung die Wärmeströme  $\Delta \dot{Q}_{r-1}$  und  $\Delta \dot{Q}_{r+1}$  und in axialer Richtung die Wärmeströme  $\Delta \dot{Q}_{y-1}$  und  $\Delta \dot{Q}_{y+1}$ .

Die Wärmeströme zwischen benachbarten Berechnungselementen in radialer Richtung ergeben sich wie folgt (isotrope Betrachtung):

$$\dot{Q}_{r-1} = 2 \pi \lambda \Delta y \frac{T_{y,r-1} - T_{y,r}}{\ln\left(\frac{r_r}{r_{r-1}}\right)} \quad (25)$$

$$\dot{Q}_{r+1} = 2 \pi \lambda \Delta y \frac{T_{y,r} - T_{y,r+1}}{\ln\left(\frac{r_{r+1}}{r_r}\right)} . \quad (26)$$

In vertikaler Y-Richtung ergeben sich die Wärmeströme analog zu:

$$\dot{Q}_{y-1} = A_r \lambda \frac{T_{y-1,r} - T_{y,r}}{\Delta y} \quad (27)$$

$$\dot{Q}_{y+1} = A_r \lambda \frac{T_{y+1,r} - T_{y,r}}{\Delta y} , \tag{28}$$

wobei  $A_r$  die entsprechende Ring- bzw. Kreisfläche zwischen den angrenzenden Berechnungselementen und  $r$  den Radius darstellt. Die dynamische Temperaturänderung eines Berechnungselementes ergibt sich somit zu:

$$T_{y,r}^{t+1} = T_{y,r}^t + \frac{\Delta t}{\rho c A_r \Delta y} \left( \Delta \dot{Q}_{r+1} + \Delta \dot{Q}_{r-1} + \Delta \dot{Q}_{y+1} + \Delta \dot{Q}_{y-1} + \Delta \dot{Q}_{Quelle\ y,r} \right) . \tag{29}$$

Auch bei der numerischen Umsetzung des Zisternenmodells wird der Energietransport an der Bodenoberfläche und der Phasenwechsel im Erdreich berücksichtigt. Es gelten hierbei die gleichen physikalischen Grundlagen, die bereits bei der Modellierung des Anergieringes zur Anwendung gekommen sind. Es wird an dieser Stelle auf die entsprechenden Gleichungen des vorherigen Abschnittes verwiesen. Für den Einsatz im Zisternenmodell ist lediglich eine Anpassung der entsprechenden Gleichungen auf die jeweiligen geometrischen Gegebenheiten des Berechnungsgitters erfolgt.

Um den Massen- und Stofftransport in Speichertank der Zisterne numerisch berechnen zu können, wird die Zisterne als Schichtenspeicher modelliert. Für eine vereinfachte Darstellung des Schichtenspeichers ist es ausreichend, eine Gitterdiskretisierung in vertikaler Y-Richtung vorzunehmen. Die Berechnungselemente im Zisternentank bestehen also aus zylinderförmigen Scheiben mit der Höhe  $\Delta y$ , dem Zisternendurchmesser  $d_z$ , der Masse  $m_y$  und der Temperatur  $T_y$  wie in Abbildung 25 dargestellt.

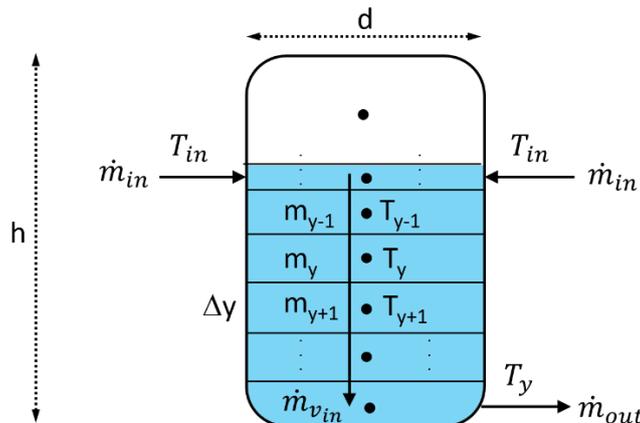


Abbildung 25: Schematische Darstellung des Zisternentanks mit den einzelnen Berechnungselementen (Layers) in vertikaler Richtung (äquidistante Einteilung in den zu 100 % gefüllten Layers). Jedem diskreten Berechnungselement wird die Masse  $m_y$ , die Elementhöhe  $\Delta y$  und die Temperatur  $T_y$  zugeordnet. Je nach Füllstand kann die Wärmeleitfähigkeit, Elementmasse und auch die Füllhöhe eines Layers variieren.

Die dynamische Wärme- und Stoffübertragung in einem einzelnen Berechnungselement (Layer) des Schichtenspeichers ergibt sich zu

$$m_y c_p \frac{dT_y}{dt} = \sum \dot{m}_{in} c_p T_{in} - \sum \dot{m}_{out} c_p T_y - \dot{m}_{vout} c_p T_{vout} + \dot{m}_{vin} c_p T_{vin} + \frac{1}{R_{y \rightarrow y-1}} (T_{y-1} - T_y) - \frac{1}{R_{y+1 \rightarrow y}} (T_y - T_{y-1}) - UA_y (T_y - T_a) + \Delta Q_{Quelle\ y} . \tag{30}$$

Hierbei ist  $T_{v_{in}}$  und  $T_{v_{out}}$  die Ein- bzw. Auslasstemperatur zwischen benachbarten Layern bei vorhanden sein einer Vertikalströmung:

$$T_{v_{out}} = \begin{cases} T_y & \text{if } \dot{m}_{v_{out}} > 0 \\ T_{y+1} & \text{if } \dot{m}_{v_{out}} < 0 \end{cases}, \quad T_{v_{in}} = \begin{cases} T_{y-1} & \text{if } \dot{m}_{v_{in}} > 0 \\ T_y & \text{if } \dot{m}_{v_{in}} < 0 \end{cases} \quad (31)$$

Für den thermischen Widerstand R zwischen benachbarten Layern gilt:

$$R_{y \rightarrow y-1} = \begin{cases} \frac{\Delta y}{\pi r^2 \lambda} & \text{if } T_{y-1} \leq T_y \\ \frac{\Delta y}{\pi r^2 \lambda * inv} & \text{if } T_{y-1} > T_y \end{cases}, \quad R_{y+1 \rightarrow y} = \begin{cases} \frac{\Delta y}{\pi r^2 \lambda} & \text{if } T_{y+1} \geq T_y \\ \frac{\Delta y}{\pi r^2 \lambda * inv} & \text{if } T_{y+1} < T_y \end{cases} \quad (32)$$

Der Faktor *inv* gibt hierbei die effektive Steigerung gegenüber reiner Wärmeleitung im Falle einer Schichtinversion an.

$\dot{m}_{v_{in}}$  und  $\dot{m}_{v_{out}}$  sind gegebenenfalls auftretende Massenströme in vertikaler Richtung, die zwischen einzelnen Layern fließen. Mit  $\dot{m}_{in}$  und  $\dot{m}_{out}$  werden die Massenströme bezeichnet, welche direkt in oder aus dem Zisternentank fließen. Abbildung 26 verdeutlicht nochmals grafisch die Zusammenhänge für einen einzelnen Layer.

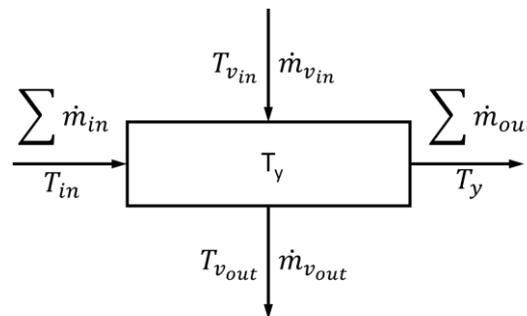


Abbildung 26: Symbolische Darstellung der Bilanzmassenströme eines einzelnen Berechnungselementes mit der Temperatur  $T_y$ . In das Berechnungselement fließende externe Massenströme sind mit dem Index  $\dot{m}_{in}$  gekennzeichnet, austretende externe Entnahme-Massenströme mit dem Index  $\dot{m}_{out}$ . Zwischen den einzelnen Berechnungsknoten können in vertikaler Richtung die Massenströme  $\dot{m}_{v_{in}}$  und  $\dot{m}_{v_{out}}$  auftreten, die Richtung kann gegenüber der Darstellung auch wechseln.

Der vorletzte Term in Gleichung (30) beschreibt den Wärmetransport durch die Zisternenwand über den Wärmedurchgangskoeffizienten U. Kapazitive Effekte der Zisternenwandung werden vernachlässigt.

Im Gegensatz zu konventionellen Schichtenspeichermodellen, kann der Füllstand im hier dargestellten Modell durch Regenwasserentnahme, bzw. Nachspeisung schwanken. Die übliche Volumen- bzw. Massenströmbilanz, welche besagt, dass die Summe aller zu- und abfließenden Massenströme für ein einzelnes Berechnungselement bzw. den Schichtenspeicher gleich groß sind, ist hierdurch ungültig. So kann sich z. B. im Regenfall die Masse des obersten wasserführenden Layers steigen. Im Fall der Regenwasserentnahme am Tankboden reduziert sich dagegen die Masse des obersten wasserführenden Layers, eine Vertikalströmung nach unten bildet sich aus. In Variante 2 des Zisternenmodells können zusätzliche externe Massenströme auftreten, welche die Systemgrenzen schneiden. Auch eine Überlagerung der Einzeleffekte bei zeitgleicher Betriebsweise ist möglich.

Um die dynamische Massenänderung in den entsprechenden Layern berücksichtigen zu können wird die zeitabhängige Füllstandsänderung im Schichtenspeicher benötigt. Der Füllstand  $h_w$  in der Zisterne errechnet sich zu:

$$h_w^{t+1} = \frac{\sum m_{H_2O_y} + (\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out}) \Delta t}{\rho \pi r_z^2} \quad (33)$$

Über die Füllstandshöhe kann auf den Füllstand im obersten wasserführenden Layer rückgerechnet werden.

Die luftführende Schicht wird in der Simulation vereinfachend zu einem Layer zusammengefasst.

Um die Wärmeübertragung der Rohrschlangen-Wärmeübertrager an das Zisternenwasser berechnen zu können wird bei der Modellierung auf freie Konvektion am horizontalen Zylinder zurückgegriffen. In Abbildung 27 ist die prinzipielle Wärmeübertragung dargestellt.

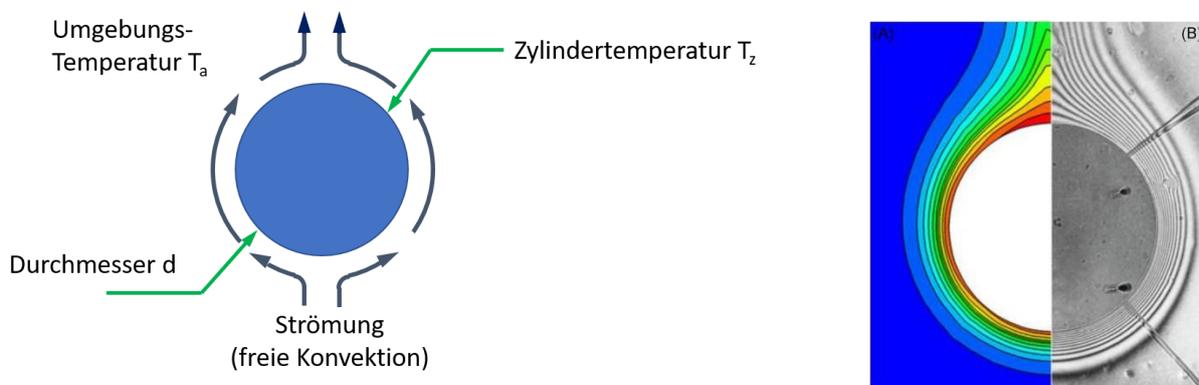


Abbildung 27: Linke Abbildung: Das an den horizontalen Zylinder angrenzende Fluid erwärmt sich wodurch seine Dichte sinkt. Hierdurch entsteht eine nach oben gerichtete Strömung an der Zylinderwand (der Prozess ist reversibel). Rechte Abbildung: Interferenzaufnahme Bei Freier Konvektion am horizontalen Zylinder (rechte Hälfte der Abbildung) und simulierte Isothermen (linke Hälfte der Abbildung) für die freie Konvektion<sup>1</sup>.

Für die freie Konvektion am horizontalen Zylinder gilt:

$$Nu = 0.36 + 0.518 \frac{Ra}{\left(1 + \left(\frac{0.559}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{16/9}} \quad (34)$$

und der Rayleigh Zahl Ra

$$Ra = Gr Pr \quad (35)$$

mit Prandtlzahl Pr und Grashofzahl

$$Gr = \frac{g \beta d_a^3 \Delta T}{\nu^2} \quad (36)$$

<sup>1</sup> He, Zhaohui, et al. "Natural convection heat transfer from a horizontal cylinder using holographic interferometry." Heat Transfer—Asian Research 48.1 (2019): 115-126.

Die oben aufgeführten Näherungsformeln für die freie Konvektion am horizontalen Zylinder gelten nur, wenn sich die Strömung frei ausbilden kann. Aufgrund des schwankenden Zisternenfüllstandes treten im Praxisbetrieb aber Störeinflüsse durch Randeffekte auf, wie in Abbildung 28 zu sehen:

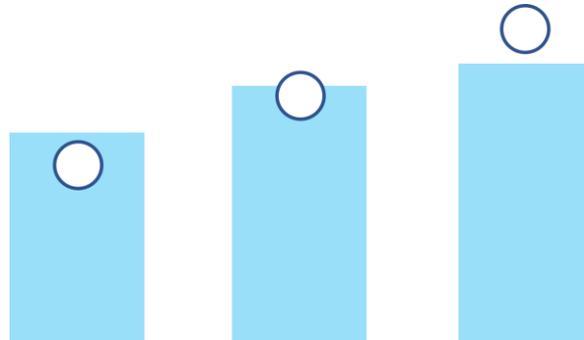


Abbildung 28: Links: Die Wasseroberkante liegt knapp über der Wärmetauscher-Rohrschlange. Hierdurch erhöht sich der Strömungswiderstand für die freie Konvektion am Zylinder. Mitte: Bei entsprechendem Füllstand erfährt die Wärmeübertrager-Rohrschlange nur eine teilweise Benetzung. Rechts: Die Wasseroberkante liegt knapp unter der Wärmetauscher-Rohrschlange. Hierdurch erhöht sich der Strömungswiderstand für die freie Konvektion am Zylinder.

Eine detaillierte Strömungssimulation der in Abbildung 28 gezeigten Sonderfälle mit entsprechend rechnerischer Anpassung der aus der Literatur bekannten Näherungsformeln ist nicht durchgeführt worden. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass eine idealisierte Strömung vorliegt und die Wärmeübertragung entsprechend dem Anteil der Benetzung an Luft und Wasser erfolgt. Im Rohr selbst erfolgt der Wärmetransport über erzwungene Konvektion. Es gelten die im Abschnitt für den Anergiering dargestellten Gleichungen. Der Wärmedurchgang durch das Wärmetauscherrohr wird über eine entsprechende Reihenschaltung abgebildet. Um die Temperaturentwicklung im Rohr zu berechnen, wird die Temperaturänderung entlang des Rohres betrachtet. Thermische Effekte durch Biegeradien oder Wechselwirkungen zwischen einzelnen Rohrsegmenten werden in dieser Arbeit vernachlässigt. Es wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die über die Wärmeübertrager-Rohrschlangen zu- bzw. abgeführte Energie gleichmäßig an den entsprechenden Layer abgegeben wird. Die zu- bzw. abgeführte Leistung der  $n$  parallelen Wärmeübertrager-Rohrschlangen in einem Layer ergibt sich somit zu

$$\Delta \dot{Q}_{Quelle\ y} = n \dot{m} c_p (T_{RI} - T_{VI}) .$$

Für Variante 2 entfällt die Wärmeübertragung durch die Rohrschlangen, das Wasser für den externen Wärmeübertrager wird unmittelbar dem Tankvolumen entnommen.

Das in diesem Bericht erstellte numerische Zisternenmodell mit dem Gitternetz für die Berechnung und den entsprechenden Randbedingungen ist in Abbildung 29 dargestellt.

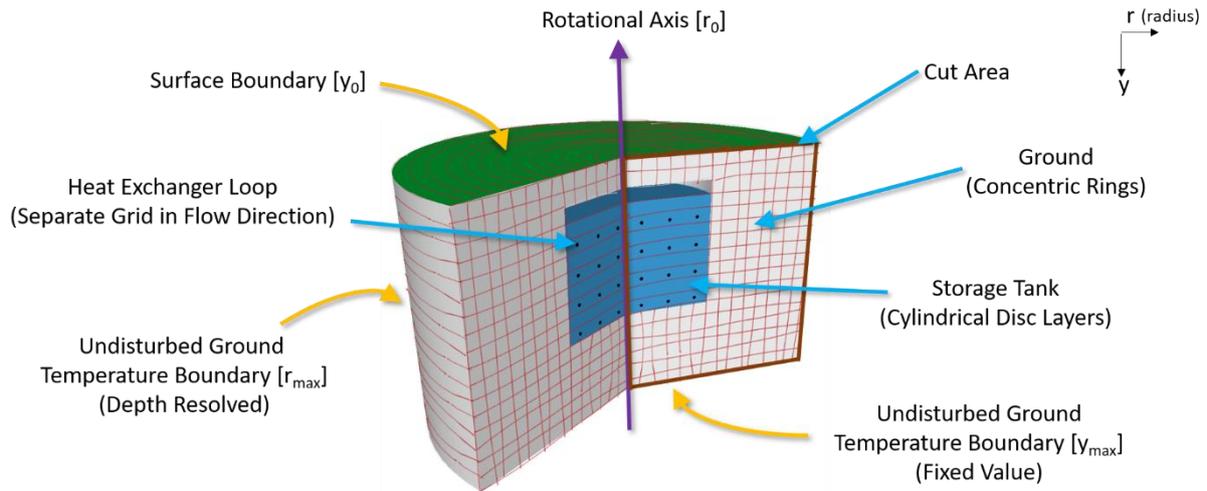


Abbildung 29: Skizzierte Schnittdarstellung des numerischen Zisternenmodells. Die roten Linien stellen das Berechnungsgitter des rotationssymmetrischen FD-Modells dar (konzentrische Ringe, bzw. Zylinderscheiben). Auf dem zylindrischen Modellrand wird die tiefenaufgelöste Temperaturverteilung des ungestörten Erdreiches zum entsprechenden Zeitpunkt vorgegeben. Die Randbedingung der Oberfläche ergibt sich aus der aktuellen Wetterlage. Am unteren Modellrand wird eine konstante Temperatur angenommen. Aufgrund der Rotationssymmetrie des Modells ist es ausreichend, die zweidimensionale Temperaturverteilung in der Schnittebene (braun eingefasst) zu berechnen. Für die Temperatur im Rohrschlangen-Wärmeübertrager wird ein separates Netz herangezogen (ohne grafische Darstellung).

Die Programmierung des Zisternenmodells ist in MATLAB erfolgt. Mögliche Ausgabegrößen der transienten thermischen Simulation sind im Prinzip alle für die Berechnung benötigten Größen.

### 3.4 Simulationsmodell für das Quartier / Ersatzschaltbild

Um erste energetische Betrachtungen für den Annergierung und die thermisch aktivierten Zisternen durchführen zu können wurde zunächst ein vereinfachtes Simulationsmodell des Quartiers erstellt. Hierbei wurden die einzelnen Energieabnehmer zu einem Gesamtabnehmer zusammengefasst (siehe Abbildung 30). Auch die vorhandenen Energiezentralen sind zu einer Gesamtenergiezentrale zusammengefasst worden. Diese Energiezentrale besteht aus einer intermittierend angesteuerten Wärmepumpe, sowie je einen einzelnen Pufferspeicher für den Kälte- und Heizkreislauf. An die Pufferspeicher der Energiezentrale ist der Annergierung angebunden. Hierbei wird im erstellten Modell zwischen einem warmen und kalten Ring unterschieden. Um hydraulische Druckdifferenzen zwischen Annergierung und den Energiequellen auszugleichen, erfolgt eine Anbindung der Energiequellen an den Annergierung über eine hydraulische Weiche. Je nach Variante des Zisternenmodells, erfolgt die thermische Anbindung der Zisterne über einen internen oder externen Wärmetauscher. Die Modellierung des Erdwärmesondenfeldes, der Hydraulischen Weiche und des Wärmetauschers ist ebenfalls in MATLAB erfolgt.

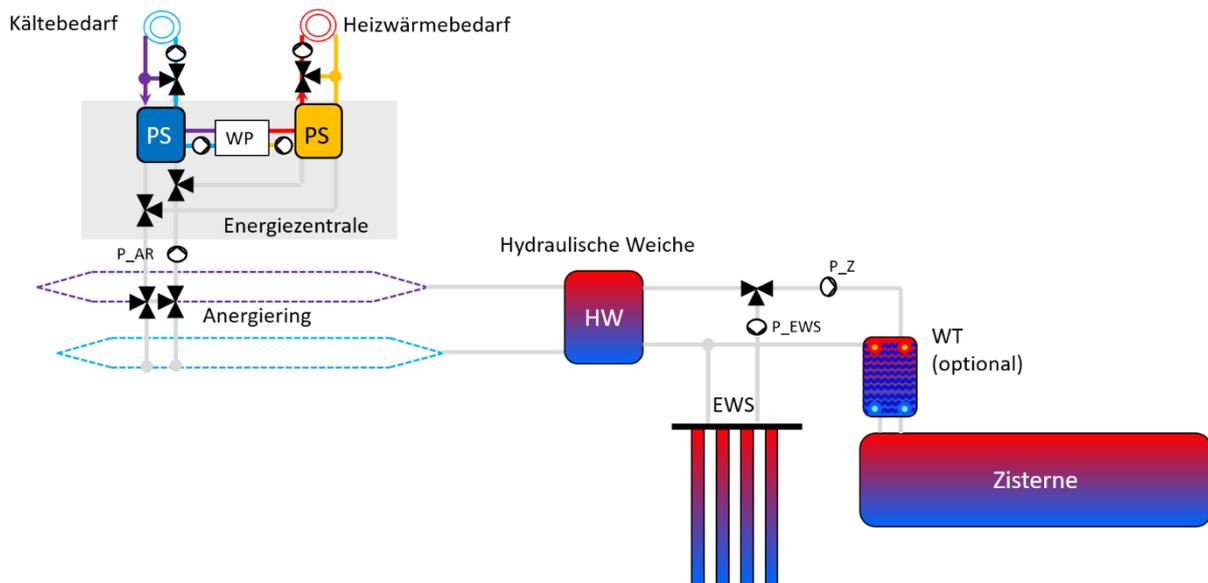


Abbildung 30: Abbildung des Quartiers, des Annergierings und seiner Komponenten in einem vereinfachten Simulationsmodell. Die drei vorhandenen Lastabnehmer und Energiezentralen sind jeweils zu einer einzelnen entsprechend dimensionierten Anlagenkomponente zusammengefasst, ebenso die beiden geplanten Zisternen. Der Annergiering basiert auf einem 4-Leitersystem und verbindet die Energiezentrale mit der Hydraulischen Weiche. Alle Simulationen in diesem Bericht wurden mit diesem vereinfachten Simulationsmodell durchgeführt. Abkürzungen: PS = Pufferspeicher, HW = Hydraulische Weiche, EWS = Erdwärmesondenfeld, WT = Wärmetauscher, AR = Annergiering und P = Pumpe.

### 3.5 Entwicklung Regelungsstrategie Annergiering und Zisterne (AP 2.4)

#### 3.5.1 Top-Down-Regelung

Für die Ansteuerung des Annergierings wurde eine regelbasierte Top-Down-Regelungsstrategie erstellt, welche den Energieeinsatz zum Betreiben der einzelnen Gewerke möglichst niedrig halten soll. Bei der Umsetzung wurden hierbei unterschiedliche Hierarchie-Ebenen definiert, welche für jeden Zeitschritt von oben nach unten abgearbeitet werden und in Abhängigkeit von dem aktuellen Systemzustand einzelne Gewerke in die Energieversorgung mit einbeziehen. In Abbildung 31 sind die einzelnen Hierarchie-Ebenen (Stufen) der Regelung dargestellt.

**Top-Down Regelung:**

- I. Energiebedarf nur über Pufferspeicher (PS) ohne WP
- II. Energiebedarf nur über PS und Ring
- III. Energiebedarf nur über PS und WP
- IV. Energiebedarf nur über PS, WP, HW und Zis/EWS/RKW

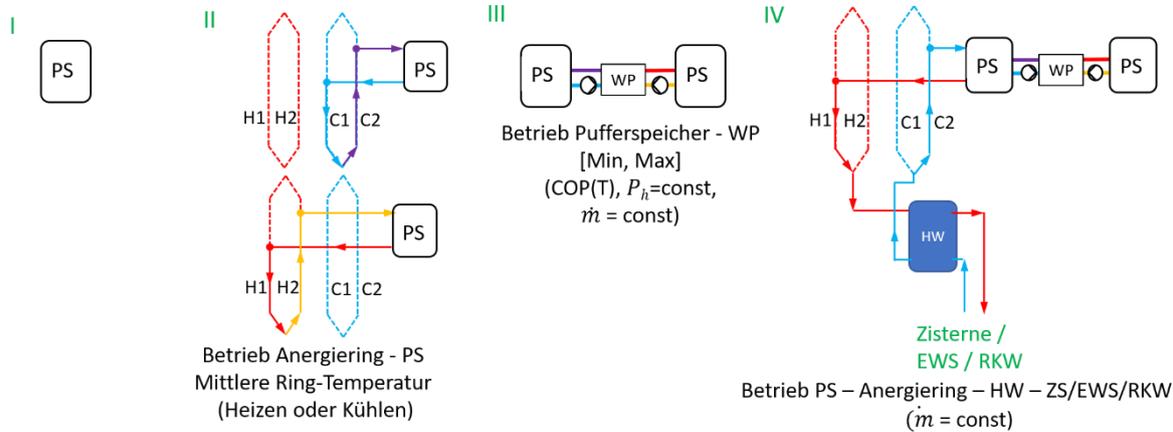


Abbildung 31: Dargestellt sind die einzelnen Hierarchie-Ebenen (Stufe 1 bis 4) der Top-Down-Regelung. Der warme und kalte Anengiering wird hierbei jeweils in die Segmente H1, H2 sowie C1 und C2 gesplittet. Abkürzungen: PS = Pufferspeicher, HW = Hydraulische Weiche, EWS = Erdwärmesondenfeld, RKW = Rückkühlwerk, H1, H2, C1 und C2 sind Anengieringsegmente.

In Stufe 1 wird der Wärme- oder Kältebedarf des Quartiers nach Möglichkeit nur über die entsprechenden Pufferspeicher (PS) gedeckt. Prüfkriterium ist hierbei, ob sich die aktuelle Speichertemperatur in den vorgegebenen Sollwertschranken bewegt.

Ist das Temperaturniveau in den Pufferspeichern nicht ausreichend, so wird in Stufe 2 das Speichervolumen der Anengieringleitungen hinzugezogen. Der Anengiering ist dabei über den Pufferspeicher an die Verbraucher angebunden. Prüfkriterium ist die aktuelle Temperatur in den Anengieringsegmenten H1, H2 bzw. C1 und C2.

Kann auch über Stufe 2 der Energiebedarf nicht gedeckt werden, so wird Stufe 3 geprüft. In Stufe 3 wird die Wärmepumpe zur Deckung des Heizenergiebedarfes herangezogen. Prüfkriterium ist hierbei allein ein Unterschreiten der Speichertemperatur-Sollwertschranken des warmen Pufferspeichers.

In Stufe 4 müssen zusätzlich die Zisternen, das Erdwärmesondenfeld (EWS) oder das Rückkühlwerk (RKW) zugeschaltet werden, um die Sollwertschranken des kalten Pufferspeichers bei gleichzeitig aktiver WP einzuhalten. Soweit möglich, wird entweder die Zisterne oder das EWS als Energiequelle bevorzugt (Prüfkriterium Tanktemperatur Zisterne).

**3.5.2 Vergleich der Zisternenmodelle / unterschiedliche Regelungsstrategien**

Um die beiden Varianten der Zisternenmodelle auf ihre Einsatztauglichkeit hin zu untersuchen, und um beide Varianten zu vergleichen, wurde die entwickelte Top-Down-Regelungsstrategie modifiziert. Während für Zisternen-Variante 2 mit externem Wärmeübertrager die Regelung wie dargestellt übernommen wurde, ist für den Betrieb von Variante 1 eine andere Regelungsstrategie erforderlich.

Ursache hierfür ist das unterschiedliche Wärmeübertragungsverhalten der beiden Modelvarianten. In Variante 1 wird die Wärmeübertragung durch die freie Konvektion an der Zylinderaußenwand der Wärmeübertrager-Rohrschlangen limitiert. Ursache ist die geringe

Strömungsgeschwindigkeit am Zylinder, welche zu einem relativ geringen Wärmeübergangskoeffizienten, und somit zu einem hohen thermischen Widerstand führt. Da es sich bei der Wärmeübertragung vom Wärmetauscherfluid im Rohr an das Wasser im Zisternentank um eine Reihenschaltung handelt (Annahme: erzwungene Konvektion im Rohr, Wärmeleitung in der Rohrwand, freie Konvektion am Rohr), ist der höchste Widerstand die limitierende Größe. Die thermische Leistung von Zisternenvariante 1 wird hierdurch deutlich reduziert. Die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf ist so gering, dass ein Betrieb in Stufe 4 ohne zusätzliche Energiequelle (EWS oder Rückkühlwerk) praktisch nicht möglich ist, ohne dass das Sollwertschrankenkriterium der Pufferspeicher verletzt wird (durch die Parallelschaltung der einzelnen Wärmeübertrager-Rohrschlangen wird dieser Effekt noch verstärkt). Um dennoch einen Vergleich zwischen Zisternenvariante 1 und 2 über die Top-Down Regelungsstrategie durchführen zu können, läuft Zisterne 1 parallel zum EWS während bei Zisternenvariante 2 entweder die Zisterne oder das EWS läuft. Auf diese Art und Weise kann ein Vergleich bei gleichem Massenstrom (hier 10 kg/s) erfolgen. Kriterium für den Betrieb der Zisterne mit Modellvariante 1 ist hierbei nicht die Temperatur im Tank der Zisterne, sondern die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf- und Tanktemperatur. Ist im Heizfall (bei gegebenen Massenstrom) eine positive Entnahmeleistung zu erwarten so wird die Zisterne betrieben. Im Kühlfall dagegen, erfolgt der Zisternenbetrieb, wenn eine negative Entnahmeleistung zu erwarten ist (bei gegebenen Massenstrom).

In Abbildung 32 ist die Entnahmeleistung der beiden Zisternenvarianten für ein Kalenderjahr dargestellt (Randbedingungen: Testreferenzjahr, keine Regenwasserzufuhr und Entnahme). Während bei Zisternenvariante 2 Leistungsspitzen von über 100 kW auftreten (blau), liegt die Leistungsentnahme bei Variante 1 bei knapp 10 kW (grün). Deutlich ist zu erkennen, dass bei Modellvariante 2 die Leistung vor allem in der Übergangszeit von Winter auf Sommer und umgekehrt entnommen wird, während die Zisterne bei Modellvariante 1 deutlich häufiger betrieben wird. Dies ist auf die unterschiedliche Regelungsstrategie und die entsprechenden Temperaturen im Zisternentank zurückzuführen, wie in Abbildung 33 zu sehen. Während sich bei Modellvariante 2 (blau) die mittlere Tanktemperatur an die Sollwertschranken der Pufferspeicher annähert, ändert sich bei Modellvariante 1 (grün) die mittlere Tanktemperatur aufgrund der geringen Entnahmeleistung nur sehr langsam.

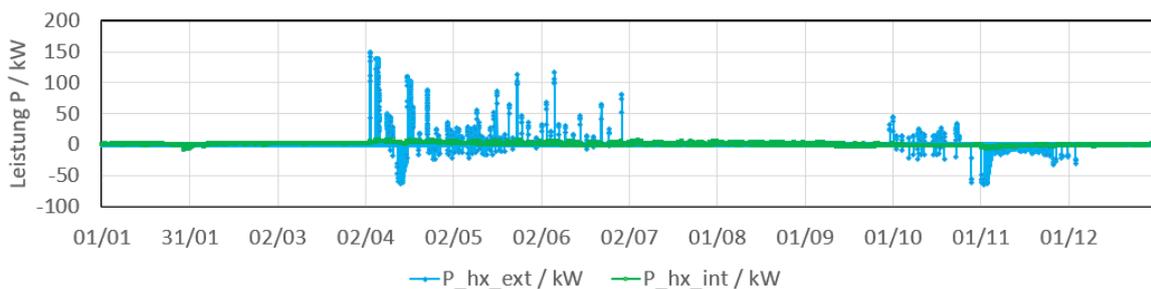


Abbildung 32: Vergleich der simulierten Leistungsentnahme beider Zisternenvarianten für ein Kalenderjahr. Der grün geplottete Verlauf gibt die Entnahmeleistung von Modell-Variante 1 mit internen Wärmeübertrager-Rohrschlangen wieder, der blau dargestellte Verlauf zeigt die Entnahmeleistung von Modell-Variante 2.

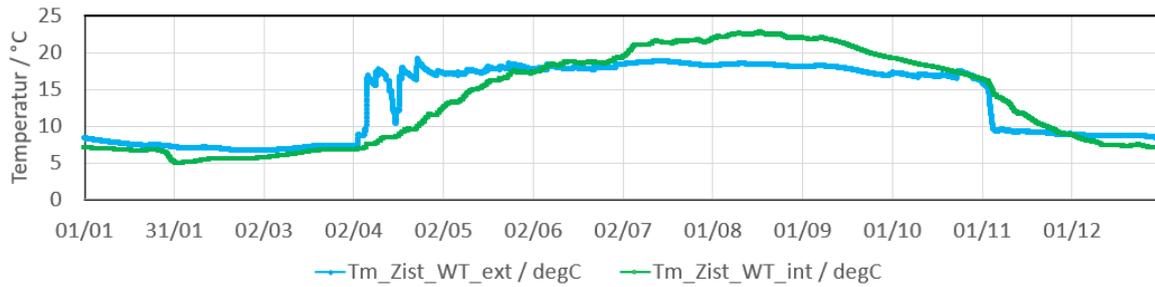


Abbildung 33: Temperaturgang der mittleren Zisternentemperatur eines Kalenderjahres für Zisternenvariante 1 (grün) und Zisternenvariante 2 (blau). Die „Rechteckplateau-Funktion“ von Variante 2 entsteht durch die Top-Down Regelung. Diese versucht in der warmen Jahreszeit über die Zisterne zu kühlen. Dies ist effektiv nur möglich, solange die Temperatur in der Zisterne die obere Sollwertschranke für den kalten Pufferspeicher nicht überschreitet. In der kalten Jahreszeit liegen die Verhältnisse umgekehrt.

Die Ergebnisse zeigen, dass über Variante 2 der Zisterne im Gegensatz zu Variante 1 die Leistung bedarfsgerecht entnommen werden kann. Die geringe Leistungsentnahme und Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf bei Variante 1 führen in der Summe dazu, dass eine dynamische thermische Verwendung im ecoSquare Projekt nicht gegeben ist. Aus diesem Grund werden die nachfolgenden Betrachtungen ausschließlich mit Zisternenvariante 2 (externer Wärmeübertrager) durchgeführt.

Um einen ersten Eindruck über das thermische Einsatzpotential der Zisternen zu erhalten, wurden Simulationen mit und ohne Zisterneneinsatz durchgeführt. Auch hier wurde wieder auf die Top-Down Regelungsstrategie zurückgegriffen. Bei der Variante mit Zisterne wird in Stufe 4 der Top-Down Regelung der Energiebedarf entweder über die Zisterne oder über das Erdwärmesondenfeld gedeckt. Bei der untersuchten Variante ohne Zisternen dagegen wird in Stufe 4 immer über das Erdwärmesondenfeld gearbeitet.

Simuliert wurde jeweils ein ganzes Jahr. Von besonderem Interesse ist neben der Energiebilanz, die System-Jahresarbeitszahl SJAZ:

$$SJAZ = \frac{Q_{\text{Quartier}}}{Q_{\text{el}}} \quad (37)$$

Die Systemjahresarbeitszahl beschreibt das energetische Nutzen- zu Aufwandsverhältnis für das Gesamtsystem im Betrachtungszeitraum von einem Jahr.  $Q_{\text{Quartier}}$  ist hierbei der Energiebedarf des Quartiers (Heiz- und Kühlenergie). Der Aufwand an elektrischer Energie  $Q_{\text{el}}$ , welcher bei der Energiebereitstellung  $Q_{\text{Quartier}}$  für den Anlagenbetrieb erbracht werden muss, ergibt sich aus Summe des Strombedarfes aller Einzelkomponenten (hydraulische Pumpen Zisterne, Annergierung, Energiezentrale sowie dem Strom für die Wärmepumpen).

Die wesentlichen Ergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst (die Werte ohne Zisterne sind rot hinterlegt, die Werte mit thermischer Zisternennutzung sind grün hinterlegt).

Tabelle 3: Simulationsergebnisse mit thermisch aktvierten Zisternen (grün) und ohne Zisternennutzung (rot).

	Hydraulische Pumpen				WP	System:
	Zisterne:	EWS:	Anergiering:	Energiezentrale:	WP:	
Betriebsstunden / h:	0.0	6602.8	5955.3	8759.8	1275.8	SJAZ: 6.20
Strombedarf / kWh:	0.0	23109.9	6326.3	26467.6	53853.8	
Betriebsstunden / h:	232.0	5804.3	5932.8	8759.8	1275.8	SJAZ: 6.34
Strombedarf / kWh:	498.8	20315.2	6304.3	26467.6	53841.9	

Die Gesamtnutzungsdauer der Zisterne liegt bei 232 Stunden. Diese relativ kurze Zeitspanne ist auf den Einsatz der Top-Down Regelung zurückzuführen. Zu Beginn der Kühlperiode wird das Zisternenvolumen genutzt, bis die Wassertemperatur einen für die Kühlung zuträglichen Schwellenwert überschreitet (siehe auch Abbildung 33 blaue Kurve). Da die Zisterne selbst Kälte oder Wärme nur durch den Wärmeaustausch mit dem angrenzenden Erdreich generieren kann, erfolgt im Sommerperiode ein leichter Anstieg der Wassertemperatur. Die im Zisternenvolumen gespeicherte Wärme kann hierdurch erst wieder beim Wechsel auf die Heizperiode thermisch genutzt werden. Durch die thermische Nutzung wird dem Zisternenwasser so lange Energie entzogen, bis ein nutzbares Temperaturniveau unterschritten wird.

Der Einsatz der Wärmepumpe orientiert sich allein am Heizbedarf des Quartiers, der Strombedarf und die Betriebsstunden sind hierdurch die beiden untersuchten Varianten gleich groß. Beim Strombedarf ergeben sich allenfalls marginale Unterschiede aufgrund leichter Abweichungen in der Temperatur des kalten Pufferspeichers. Auch die Unterschiede beim Betrieb des Anergierings zwischen den beiden simulierten Varianten sind zu vernachlässigen.

Deutlicher fällt dagegen der Unterschied bei der Nutzung des Erdwärmesondenfeldes aus. Hier können bei der thermischen Zisternennutzung ungefähr 800 Betriebsstunden eingespart werden, wodurch der Strombedarf, welcher für die Engergieversorgung des Quartiers aufgebracht werden muss, reduziert wird. Durch die Stromreduktion steigt die Systemjahresarbeitszahl SJAZ von 6,2 auf 6,34. Für das Gesamtsystem ergibt sich eine Stromeinsparung von 2,4 MWh (2,2%).

Um einen detaillierteren Einblick in die Ergebnisse zu erhalten, wurden die entsprechenden Energieanteile der Einzelkomponenten analysiert, und für die bessere Veranschaulichung in Sankey-Diagrammen dargestellt. In Abbildung 34 sind zunächst die aggregierten Sankey Diagramme mit und ohne Zisternennutzung dargestellt.

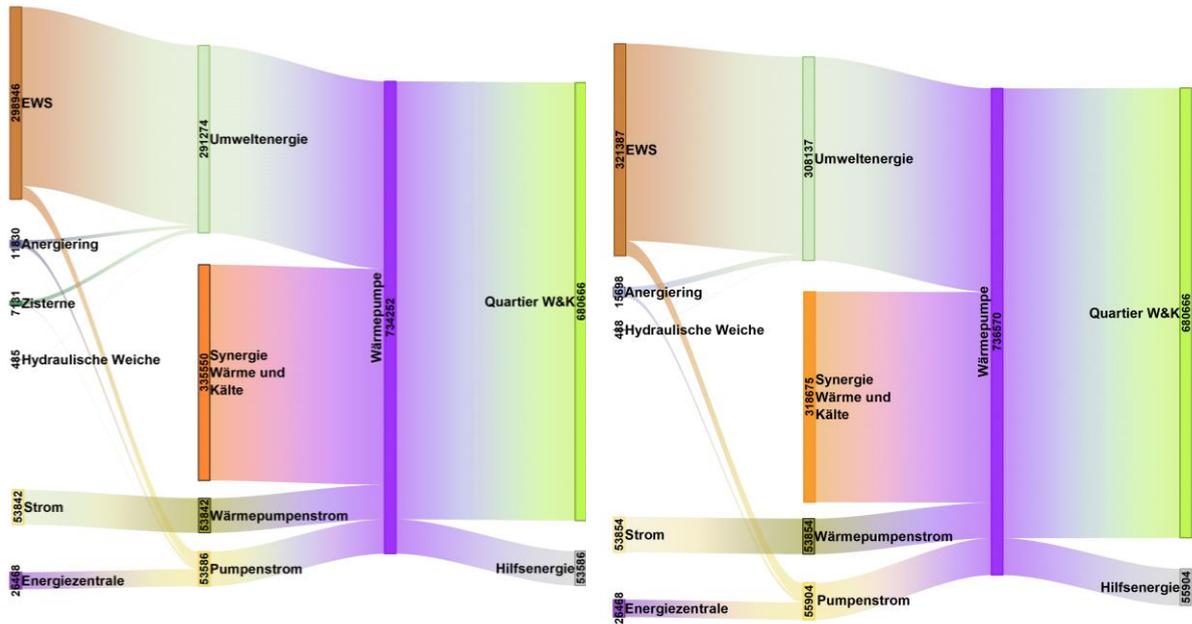
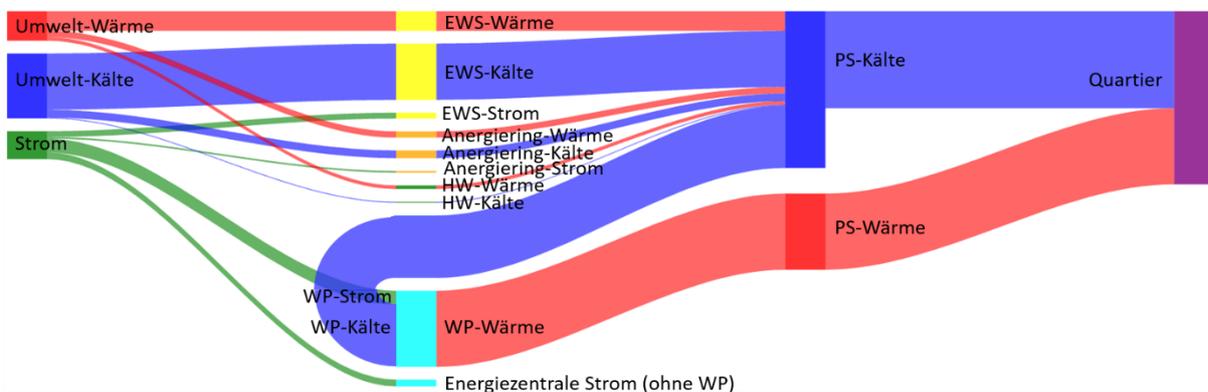


Abbildung 34: Aggregierte Sankey Diagramme für die Quartiersversorgung. Links mit thermischer Zisternennutzung, rechts ohne.

Für eine detailliertere Betrachtung wurde eine Aufteilung der Energieströme in Wärme und Kälte vorgenommen sowie den einzelnen Umweltenergiequellen zugeordnet (Abbildung 35). Es zeigt sich, dass der Energiebedarf des Quartiers in beiden Varianten in erster Linie durch die Wärmepumpe und das Erdwärmesondenfeld abgedeckt wird. Durch den Einsatz der Energiezentralen kann sowohl die erzeugte Heizwärme als auch die anfallende Kälte der Wärmepumpe für die Energieversorgung herangezogen werden (Doppelnutzen). Damit die Temperatur des kalten Pufferspeichers nicht unter die Mindestanforderung absinkt, muss dem Speicher im Winter Wärme zugeführt werden. Die Wärmezufuhr erfolgt in erster Linie über das Erdwärmesondenfeld, aber auch die Zisterne kann Wärme beisteuern. Im Sankey-Diagramm aus Abbildung 35 ist diese Wärmezufuhr in den kalten Pufferspeicher durch die roten Wärmeströme aus den Anlagenkomponenten ersichtlich. Im Sommer dagegen wird der kalte Pufferspeicher aktiv gekühlt (blaue Ströme aus den Anlagenkomponenten). Die vom Quartier bezogene Kälte (blau) ergibt sich aus der Aufbilanzierung der Wärme- und Kälteströme in den kalten Pufferspeicher (PS-Kälte).



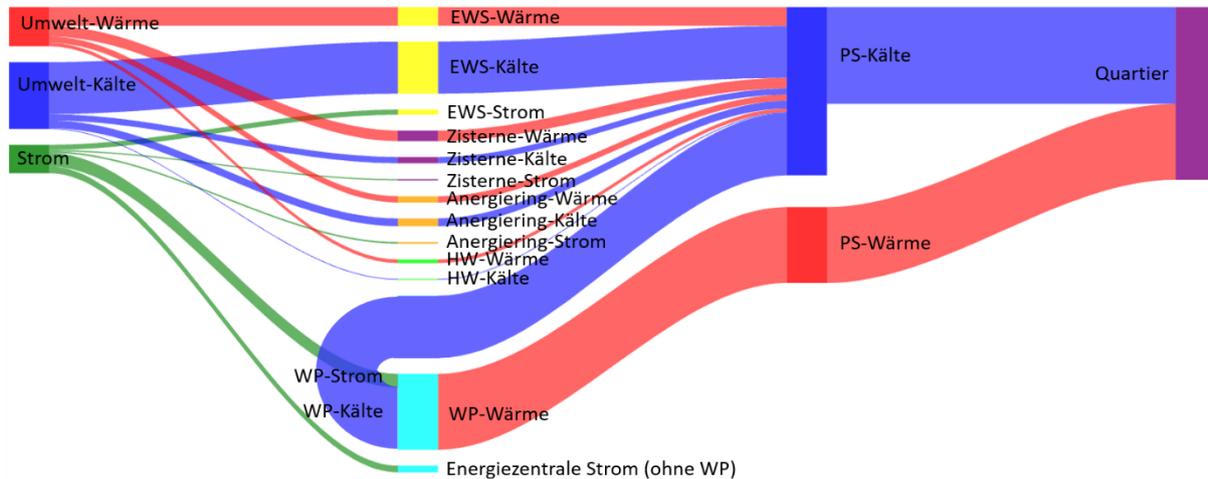


Abbildung 35: Analyse der Energieanteile der Einzelkomponenten des kalten Nahwärmenetzes ohne thermische Zisternennutzung (oben) und mit thermischer Zisternennutzung (unten) in einem Jahr. Rot dargestellte Energieströme sind Wärme, blaue sind Kälte und grüne sind Strom. (Für eine bessere Sichtbarkeit wurden die Energieströme des Anergierings und der Zisterne mit dem Faktor 20 und die der Hydraulischen Weiche mit dem Faktor 30 multipliziert). Die auf den PS-Kälte zulaufenden Wärme- und Kältemengen ergeben aufbilanziert den Kältebedarf des Quartiers.

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss beachtet werden, dass durch die Top-Down Regelung die thermische Lastverschiebung der Zisterne kaum genutzt wird. Da sich aber gerade aus der zeitlichen thermischen Lastverschiebung der wesentliche Nutzwert der Zisterne ergibt, ist weiteres Energieeinsparpotential vorhanden. Zum Beispiel kann das Zisternenvolumen genutzt werden, um Kälte aus einem Rückkühlwerk oder einer passiven Infrarot Nachtkühlung zwischenzuspeichern. Die Einspeicherung kann hier z. B. in der Nacht erfolgen (hoher Wirkungsgrad) um evtl. auftretende Kühllastspitzen am Tag abdecken zu können (Zeitversatz). Eine solche Funktionalität kann z. B. über vorrausschauende Regelungen mit KI realisiert werden. Durch die intelligente Ansteuerung wird die Anlageneffizienz weiter erhöht und die Netzdienlichkeit gesteigert.

### 3.6 Vorbereitende Maßnahmen bzw. Handlungsempfehlungen für die Zukunft (AP 2.5)

Um die erstellten numerischen Zisternen-Modelle validieren zu können, wird eine Messdatenerfassung wie in Abbildung 36 und Abbildung 37 vorgeschlagen:

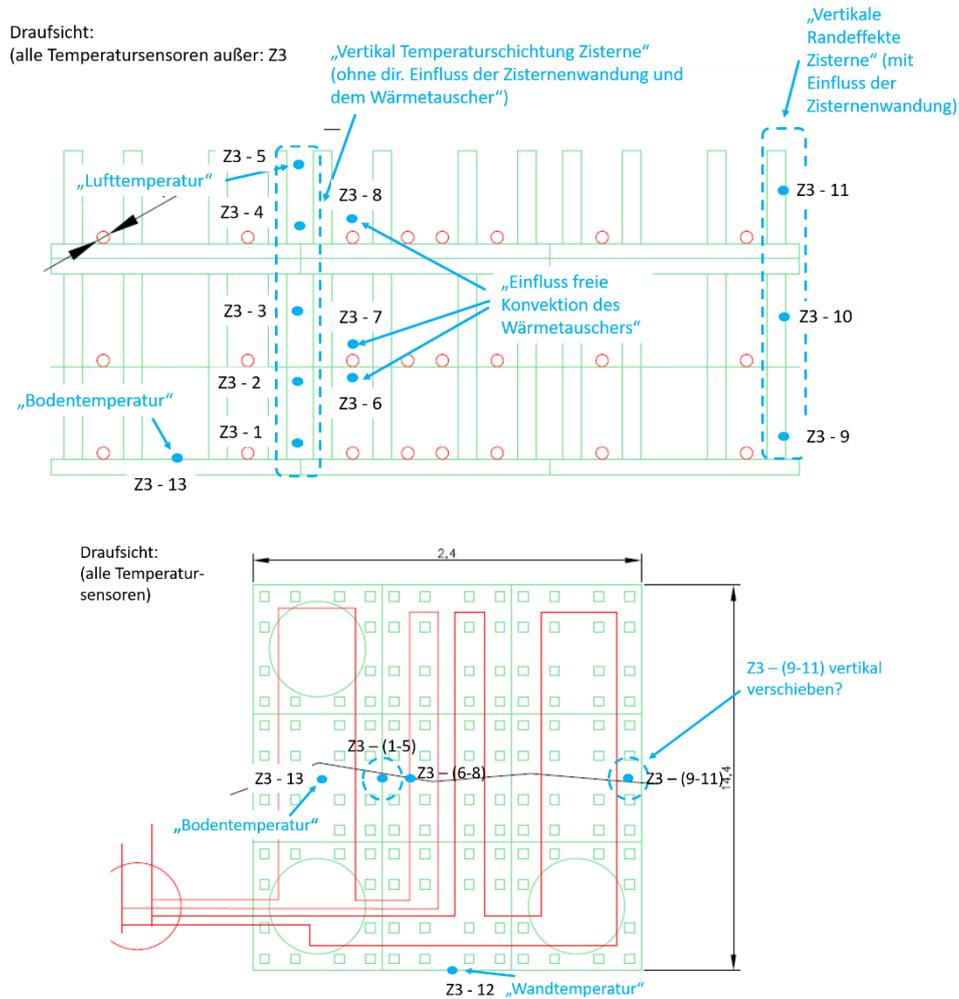
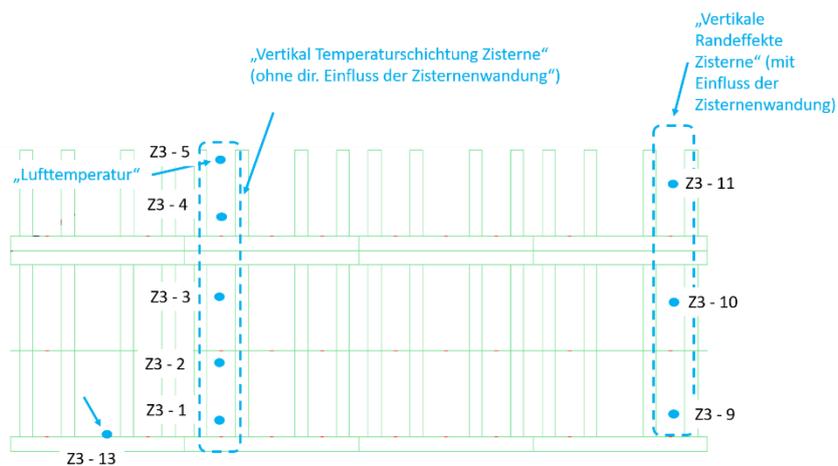


Abbildung 36: Exemplarischer Lageplan der benötigten Temperaturmessstellen für Zisternenvariante 1 in der Seitenansicht (oben) und der Draufsicht (unten). Die hellblauen Punkte symbolisieren entsprechende Temperaturmessstellen. Je nach Lage der Wasser-Entnahmestelle und Zisternengröße müssen die Sensoren 9 bis 11 entsprechend verschoben werden.



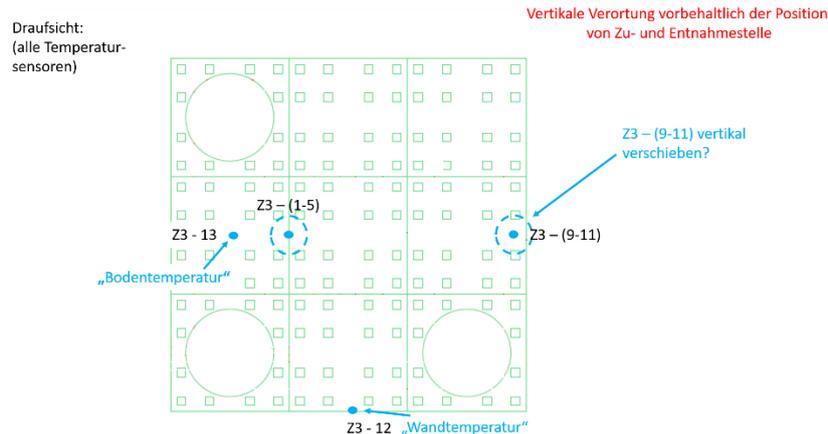


Abbildung 37: Exemplarischer Lageplan der benötigten Temperaturmessstellen für Zisternenvariante 2 Temperaturmessstellen für Zisternenvariante 1 in der Seitenansicht (oben) und der Draufsicht (unten). Je nach Lage der Wasser-Entnahmestellen und Zisternengröße müssen die Sensoren 9 bis 11 entsprechend verschoben werden.

Mit dieser Anordnung lässt sich die sowohl die Temperaturschichtung als auch die Homogenität des Temperaturfeldes überprüfen. Zur Feinvalidierung ist eine ortsaufgelöste Temperaturmessung (z. B. faseroptische Temperaturmessung) erforderlich.

Für die Validierung des numerischen Anergieringmodells sollte die Vor- und Rücklauftemperatur an den einzelnen Anergieringsegmenten gemessen werden. Für eine Validierung des Wärmeüberganges der Anergieringleitungen an das Umgebende Erdreich wird eine Messstellenanordnung wie in Abbildung 38 gezeigt präferiert.

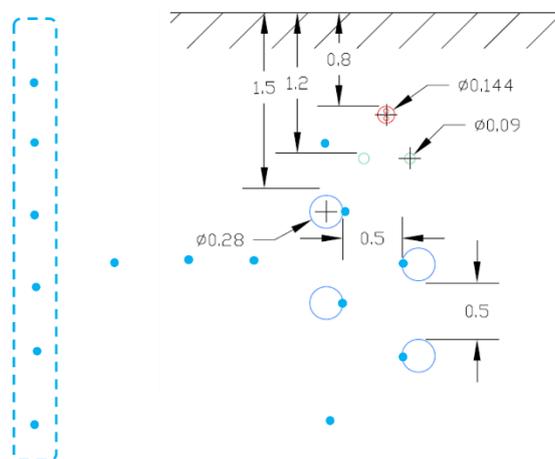


Abbildung 38: Exemplarischer Lageplan der Temperaturmessstellen (hellblau) relativ zu den Anergieringleitungen.

Ebenfalls interessant ist die tiefenaufgelöste Temperatur des Erdreiches (Sensormontage bei anfallenden Erdarbeiten, um Kosten zu senken) und die höhenaufgelöste Temperatur in der Hydraulischen Weiche (Temperaturschichtung).

Um die thermischen Lastverschiebungen im Anergiering nachverfolgen zu können, sollten alle Komponenten mit entsprechenden Wärmemengenzählern ausgestattet sein, welche in der Lage sind, sowohl Wärme- als auch Kältemengen zu erfassen.

### 3.7 Nachträgliche Änderung der Grundlagen

Bei der Grundlagenermittlung für die thermischen Simulationen wurden die Zisternen Z1 und Z2 als geplante thermisch zu aktivierenden Zisternen fokussiert (vgl. Tabelle 2 und Abbildung 10). Im Rahmen der parallel ablaufenden kontinuierlichen Planungen für die Wärmeversorgung durch den vsl. Wärme-Contractor hat sich für die Zisterne Z2 gezeigt, dass diese mit erhöhtem baulichem Aufwand umzusetzen und die thermische Anbindung perspektivisch unwirtschaftlich sei. Somit wurde das Augenmerk der thermischen Nutzung auf die Zisternen Z1 (unverändert) und Z3 gelegt. Das gesamte Zisternenvolumen für die Simulationen erhöht sich demnach im Gegensatz zu den Angaben aus Tabelle 2 von 102,6 m³ auf 136,8 m³ aufgrund der Änderung von Z2 (34,2 m³) auf Z3 (60,0 m³).

Mit den geänderten Grundlagen wurden weitere Simulationen durchgeführt, die trotz der Volumenänderung um +33 % keine signifikanten Abweichungen gegenüber den vorherigen Simulationsergebnissen aufwiesen. Im Vergleich zu den Zahlenwerten aus Tabelle 3 zeigen die Ergebnisse aus den Neuberechnungen (vgl. Tabelle 4), dass in geringem Maße die Betriebsstunden/Strombedarfe für die Zisternenpumpen gestiegen bzw. bei den Erdwärmesondenpumpen gefallen sind. Die Zunahme der System-Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen spielt sich in der dritten Nachkommastelle statt und ist demnach vernachlässigbar.

	Hydraulische Pumpen				WP
	Zisterne:	EWS:	Anergierung:	Energiezentrale:	WP:
Betriebsstunden / h:	0.0	6602.8	5955.3	8759.8	1275.8
Strombedarf / kWh:	0.0	23109.9	6326.3	26467.6	53853.8
Betriebsstunden / h:	245.2	5791.2	5938.2	8759.8	1275.8
Strombedarf / kWh:	527.1	20269.1	6308.7	26467.6	53837.3

	System:
SJAZ:	6.20
SJAZ:	6.34

Tabelle 4: Simulationsergebnisse mit thermisch aktivierten Zisternen (grün) und ohne Zisternennutzung (rot) nach Anpassung des Gesamt-Zisternenvolumens von ursprünglich 102,6 m³ auf 136,8 m³.

## 4 Wirtschaftlichkeitsanalyse

Zur Bewertung der ökonomischen Auswirkungen der Effizienzsteigerung durch thermische Aktivierung der Zisternen erfolgt eine Wirtschaftlichkeitsberechnung hinsichtlich der Opportunitätskosten für Strombezug. Im Quartier ecoSquare erfolgt die Stromlieferung in einer Kundenanlage sowohl durch dezentrale Erzeugungsanlagen (BHKW und PV) als auch durch Netzstrombezug aus dem vorgelagerten Mittelspannungsnetz. Damit bilden sich die arbeitsbezogenen Stromgestehungskosten als Mischpreis aus vor-Ort-Lieferung und Netzbezug. Die Beurteilung der eingesparten Stromkosten erfolgt daher zunächst auf Grundlage des Strompreismixes im Quartier. Anschließend wird der Einfluss der spezifischen Stromkosten auf die Einsparungen durch die thermische Zisternennutzung im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse betrachtet. Die Untersuchung erfolgt anhand der Jahresbilanz mit einem spezifischen Strom-Arbeitspreis von 11,43 ct/kWh. Als gesamter Betrachtungszeitraum wird eine Laufzeit von 20 Jahren entsprechend des Förderregime des Erneuerbare-Energien-Gesetzes gewählt.

Tabelle 5: Differenzkostenrechnung bzgl. Strombezug mit und ohne thermische Zisternennutzung.

Variante	SJAZ	Strombedarf	Stromkosten
Referenz (Ohne Zisternen)	6,20	109.757,60 kWh/a	12.545,29 €/a
Aktiviert (Mit Zisternen)	6,34	107.427,80 kWh/a	12.278,99 €/a
<b>Differenz</b>	0,14	2.329,80 kWh/a	266,29 €/a

Über einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren ergeben sich somit Einsparpotenziale durch die Betriebsoptimierung von 5.326 €. Im Hinblick auf die Entwicklungen auf den Energiemärkten sowie der regulatorischen Rahmenbedingungen werden in Abbildung 39 die kumulierten Einsparungen über den Stromkosten dargestellt:

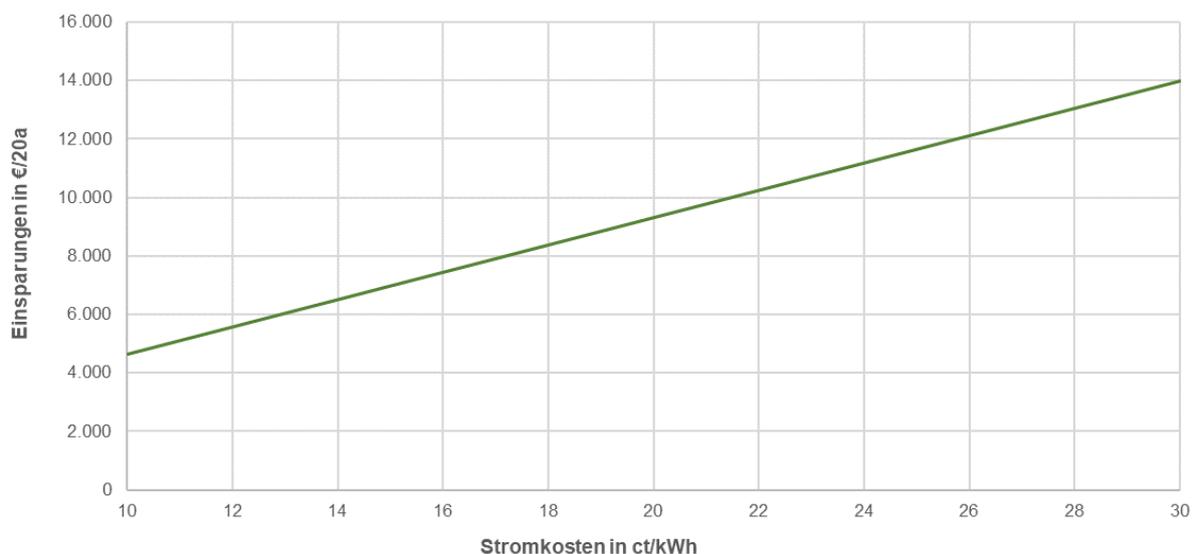


Abbildung 39: Kumulierte Einsparungen durch thermische Aktivierung der Zisternen über den spezifischen Stromkosten.

Der lineare Zusammenhang verdeutlicht, dass sich die Auswirkungen der Effizienzsteigerung auf die Wirtschaftlichkeit des Projektes mit steigenden Strompreisen deutlich erhöhen. Ebenso kann abgeleitet werden, dass weitere effizienzsteigernde Maßnahmen (z. B. verbesserte

Vorlauftemperaturen im Primärkreis durch höhere Regenwassertemperaturen, Absenkung der Vorlauftemperaturen im Sekundärkreis des Gebäudesystems, etc.) in einer Parallelverschiebung des Abhängigkeitsdiagramms in Ordinate-Richtung resultieren würde.

Die aufgezeigte Effizienzsteigerung in Bezug auf Antriebsenergie für den Verdichter der Wärmepumpe und der Umwälzpumpen resultiert in Kosteneinsparungen aufgrund des geringeren Strombedarfes. Aufgrund der energiewirtschaftlichen Konfiguration innerhalb des Quartiers kann durch einen hohen Eigenstromanteil in den Wärmepumpen/Umwälzpumpen sowie der Netzentgelte auf Mittelspannungsebene für Netzstrombezug ein sehr geringer, arbeitsbezogener Strompreis ausgegangen werden. Mit dieser Prämisse ergibt sich pro Jahr lediglich ein monetärer Vorteil von 266 €, womit die kumulierten Kostensenkungspotenziale von 5.326 € im Betrachtungszeitraum von 20 Jahren die Mehraufwendungen zur thermischen Aktivierung der Zisternen tendenziell egalisieren. Die derzeit angenommenen Investitionskosten für die thermohydraulische Einbindung der Zisternen belaufen sich hingegen auf etwa 101.000 € (obere Abschätzung), woraus eine unwirtschaftliche Amortisationszeit von 379 Jahren resultiert. Selbst bei einem vorausgesetzten Strompreis von 30 ct/kWh ergibt sich lediglich eine Kostensenkung von 13.978 € im Zeitraum von 20 Jahren. Daraus ableiten lassen sich zwei Handlungsempfehlungen:

- Regelungstechnische Optimierung des Gesamtsystems und der aktivierten Zisternen zur weiteren Effizienzsteigerung (Bsp. Berücksichtigung von Lastverschiebungen zwischen den Energiezentralen)
- Planerische und konstruktive Vereinfachung und Standardisierung der thermohydraulischen Einbindung der Zisternen zur Senkung der Investitionskosten
- Kombination mit erneuerbaren Kühlsystemen (z. B. PVT-Kollektoren) zu (nächtlichen) Beladung der Zisternen mit Kälte

In Analogie zu neuen Technologien im frühen Entwicklungsstadium sind daher bis zur Erreichung einer Marktreife und einer Integration in den Stand der Technik monetäre Anreizeffekte durch investive Förderungen erforderlich, um das volle Potenzial der doppelten Flächennutzung in urbanen Quartieren zu entfalten und somit einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors zu erreichen.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Entwässerungsplanung für eine innovative Regenwassernutzung im Quartier ecoSquare konnte im Rahmen des Projektes erfolgreich umgesetzt werden. Der Prozess der integralen Planung mit iterativen Abstimmungen mit sämtlichen Akteuren bzgl. der Dimensionierung und Verortung von Anlagen und Leitungen zur Be- und Entwässerung sowie zur thermischen Versorgung des Quartiers führte zu einer konsistenten kollisionsfreien Ausführungsplanung des Gesamtsystems zur Regenwasserbewirtschaftung.

Auf diesem Weg ist die Basis für die Umsetzung eines innovativen Regenwassermanagements sichergestellt. Die von der Stadt Bamberg geforderte Einhaltung eines 30-jährigen Ereignisses hinsichtlich des Überflutungsschutzes wurde durch Entwässerungssimulationen nachgewiesen. Die für das Regenwasser-Management vorgesehene übergeordnete, intelligente und vorausschauende Steuerung des Gesamtsystems bewirkt darüber hinaus auch die Einhaltung eines 100-jährigen Ereignisses.

Die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse zur Methodik des integralen Planungsprozesses sind auf weitere Quartiersprojekte mit innovativer Regenwasserbewirtschaftung übertragbar.

Die Anlagendimensionierungen der Zisternen, die aus der Entwässerungsplanung resultieren, stellen die Basis zur Modellierung der Zisternenkörper dar. In Anlehnung an die Planungen zur Wärmeversorgung des Quartiers wurden für die Entwicklung der Zisternenmodelle zwei von drei geplanten Zisternen zur thermischen Aktivierung bzgl. ihres nutzbaren Speichervolumens betrachtet. Es wurde ein substituiertes thermisches Modell für die Zisternen als niedrig-exergetischer Speicher umgesetzt und validiert. Für die Art der thermischen Aktivierung wurden zwei Vergleichsmodelle (1. Rohrsystem als Wärmeübertrager in der Zisterne liegend und 2. Direkte Nutzung des Regenwassers mittels externem Platten-Wärmeübertrager) bzgl. der thermischen Leistungsfähigkeit verglichen. Die Nutzung eines externen Platten-Wärmeübertragers zeigte hierbei aufgrund der hocheffizienten Wärmeübertragung wesentlich höhere thermische Leistungen.

Um den techno-ökonomischen Mehrwert der thermischen Zisternennutzung ermitteln zu können, musste ein holistisches Gesamtsystem modelliert werden. Hierfür wurden Modelle für das Anergienetz, das u. a. die Wärmeübertragung mit dem temperaturdynamischen Erdreich simulieren kann, für die Energiezentralen mit Wärmepumpen sowie für das vordimensionierte Erdwärmesondenfeld, welches erfolgreich anhand bereits vorliegender Lastgänge validiert werden konnte, erfolgreich entwickelt und verknüpft. Weiter wurde für das Gesamtsystem ein Regelungskonzept für einen effizienten Anlagenbetrieb erstellt. Als Effizienz-Indikator wurde die System-Jahresarbeitszahl der Wärmepumpen unter Einbezug aller Umwälzpumpen gewählt.

Es wurden Vergleichssimulationen durchgeführt, um gegenüber einer Berechnung ohne eine thermische Zisternennutzung den Einfluss dieser auf die Energieeffizienz des Gesamtsystems zu ermitteln. Dabei zeigte sich eine Stromeinsparung um 2,2 % bzw. einer Reduktion der SJAZ von 6,20 auf 6,34. Diese relativ geringfügige Optimierung rührt daher, dass lediglich ein Fokus auf thermische Energiegewinnung gegenüber dem umliegenden Erdreich gelegt wurde. Das wesentlich höhere Potenzial des thermischen Zisternenbetriebs liegt in der Forcierung zeitlicher Lastverschiebungen (bspw. netzdienlicher Betrieb, Kälteerzeugung bei günstigen Witterungsverhältnissen) und örtliche Lastverschiebung (Überschuss-Bedarfs-Ausgleich zwischen den durch das Anergienetz thermische verbundenen Energiezentralen). Zudem muss das holistische Modell des thermischen Versorgungssystems des Quartiers in Anlehnung an die derzeitige Energiezentralenplanung konkretisiert werden. Derartige

Detaillierungen und Ergänzungen des Gesamtmodells sowie die Realisierung der Entwässerungsplanung und ein langfristiges Regenwasser- und Energiemonitoring sollen im Rahmen F&E-Folgeprojektes umgesetzt werden.

Aus einer abschließenden Wirtschaftlichkeitsanalyse zur Ermittlung monetärer Vorteile durch die Erweiterung der thermischen Quartiersversorgung um thermischen Zisternennutzung ging hervor, dass sich die Betriebskosten durch simulativ ermittelte, geringe Stromeinsparungen folglich reduzieren. Für eine Betrachtungszeitraum von 20 Jahren ergeben sich in der Bilanz 5.326 € aufgrund einer jährlichen Einsparung von 266 €. Da allerdings die – wegen des niedrigen Entwicklungsstandes – hoch angesetzte Schätzung für die Investitionskosten der thermischen Zisternennutzung zu einer unverhältnismäßigen Amortisationszeit führt, wird deutlich, dass die getroffenen Annahmen in den thermischen Simulationen bzw. der Detailgrad des Gesamtsystems nicht genügen, um valide Aussagen zu Strom- und Kosteneinsparungen zu treffen: Neben Energiegewinnung müssen die energetischen Vorteile der Zisternen durch zeitliche sowie örtliche Lastverschiebungen und durch netzdienliche Betriebsweise modelliert werden. Diese Maßnahmen sollen perspektivisch im Rahmen eines F&E-Folgeprojektes Anwendung finden. Darüber hinaus sind für die Amortisation investive Förderungen für das innovative System sowie wirtschaftlichen Lösung durch Erhöhung des Entwicklungsstandes/Marktreife (z. B. durch planerische und konstruktive Vereinfachung und Standardisierung oder regelungstechnische Optimierung des Gesamtsystems) unabdingbar.