

# Untersuchung der Auswirkung eines kalten Nahwärmenetzes auf den Treibhauseffekt mithilfe einer Ökobilanz – technischer Bericht

Edonita Maxharraj, Johannes Linus Cuypers<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen (Mathieustraße 30, 52074 Aachen)  
RWTH Aachen University

Januar 2024

Diese Publikation ist im Rahmen der Masterarbeit von Edonita Maxharraj entstanden. Die Arbeit wurde am Lehrstuhl für Energieeffizientes Bauen<sup>1</sup> der RWTH Aachen unter Betreuung von Linus Cuypers und Prüfung durch Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph van Treeck und apl. Prof. Dr.-Ing. Jérôme Frisch geschrieben.

## Kurzfassung

Die Versorgung von Haushalten mit kalter Nahwärme gilt als umwelt- und klimafreundliche Lösung. In dieser Veröffentlichung wird die Auswirkung des Kalten Nahwärmenetzes im Wohnquartier „Großer Garten“ in Schifferstadt auf den Treibhauseffekt bei dessen Herstellung und Entsorgung mithilfe einer Ökobilanz bewertet. Die funktionelle Einheit ist die Quartiersinfrastruktur zur Bereitstellung des erforderlichen Wärmebedarfs für Heizung und Warmwasser im Projektquartier über eine 50-jährige Lebensdauer. Für den definierten Untersuchungsrahmen ergibt sich für das Netz ein Treibhauspotenzial von 378,12 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. Die Hauptquelle der Klimabelastung sind mit einem Anteil von 44,50 % am Gesamttreibhauspotential die Wärmepumpen in den Haushalten. Für eine abschließende Bewertung des Netzes muss in zukünftigen Untersuchungen die Nutzungsphase ergänzt werden.

## 1 Einleitung

Zur Eindämmung der Folgen des Klimawandels sind die Vertragsstaaten des Pariser Klimaabkommens von 2015 bestrebt, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 °C, verglichen zur vorindustriellen Zeit, zu begrenzen [1]. Dazu gibt es diverse politische Vorgaben [2; 3]. Ein Großteil des Energiebedarfs von Gebäuden ist derzeit auf die Wärmeversorgung zurückzuführen (ca. 68 % des Endenergieverbrauchs auf Raumwärme und ca. 16 % auf Bereitstellung von Warmwasser [4]). Um Gebäude möglichst energieeffizient zu gestalten, müssen deshalb insbesondere die Wärmeversorgung optimiert und Konzepte implementiert werden, die sich durch einen hohen Anteil erneuerbarer Energien

auszeichnen.

Kalte Nahwärmenetze (KNWN) gelten als klimaschonende Technologie zur Bereitstellung des Wärmebedarfs in Quartieren. In der vorliegenden Publikation soll mithilfe einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 die Auswirkungen auf den Treibhauseffekt für das existierende KNWN in Schifferstadt ermittelt werden.

## 2 Zieldefinition und Untersuchungsrahmen

Das Ziel der Ökobilanzstudie ist die Darstellung der potenziellen Auswirkungen des KNWN in Schifferstadt auf den Treibhauseffekt über einen festgelegten Zeitraum. Um die Vergleichbarkeit mit Ökobilanzen von alternativen Heizsystemen sicherzustellen, werden Ansätze zur Ökobilanzierung von Gebäuden angewendet.

### 2.1 Vorstellung des untersuchten Produktsystems bzw. des Projektquartiers

Gegenstand der Untersuchung ist das KNWN in Schifferstadt. Es versorgt das Wohnquartier „Großer Garten“ in der Max-Ernst-Straße und wird von den Stadtwerken Schifferstadt<sup>2</sup> betrieben. In der Abbildung 1 ist der grundlegende Aufbau des KNWN in Schifferstadt dargestellt. Als Wärmequelle nutzt das Netz oberflächennahe Geothermie. Dafür wurde von Juli bis September 2016 in direkter Nähe zum Quartier ein zentrales Erdsondenfeld, bestehend aus 28 Doppel-U-Rohr-Sonden, mit einer Endtiefe von bis zu 97 m angelegt. Das Wärmeträgermedium in den Erdsonden, ein Wasser-Glykol-Gemisch, entzieht dem Erdreich Wärme. Ein Hauptverteilerschacht verbindet das Erdsondenfeld mit dem Verteilungsnetz. Der erwärmte Wärmeträger zirkuliert in einem 650 m langem Ringleitungsnetz, wodurch die gewonnene Energie aus der Erdsondenanlage zu den Verbrauchern gelangt. Jeder Haushalt ist mit einer Wärmepumpe ausgestattet, die die Temperatur auf das gewünschte Niveau anhebt. Insgesamt sind derzeit 41 Haushalte angeschlossen, darunter 29 Einfamilienhäuser und 12 Reihenhäu-

<sup>1</sup><https://www.e3d.rwth-aachen.de/>

<sup>2</sup><https://www.sw-schifferstadt.de/>

ser. Mithilfe des KNWN wird eine Gesamtfläche von 7928 m<sup>2</sup> beheizt. Zur Kühlung der Gebäude wird ein zur Wärmepumpe parallel geschalteter Wärmeübertrager genutzt, welcher Wärme aus der Fußbodenheizung in das Netz überträgt.

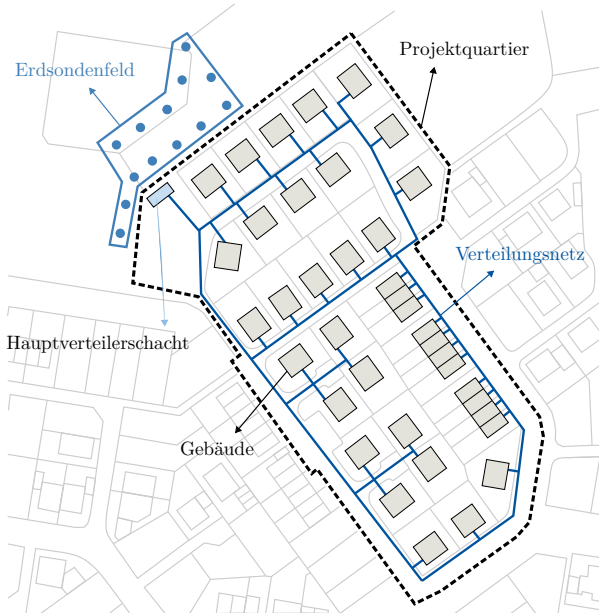


Abbildung 1: Kaltes Nahwärmenetz in Schifferstadt (Eigene Darstellung nach [5])

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Eckdaten zum KNWN in Schifferstadt aufgeführt.

Tabelle 1: Eckdaten zum kalten Nahwärmenetz in Schifferstadt [5], [6], [7]

<b>Ort</b>	Max-Ernst-Straße, Schifferstadt
<b>Betreiber</b>	Stadtwerke Schifferstadt
<b>Erstellungszeitraum</b>	Juli bis September 2016
<b>Inbetriebnahme</b>	2016
<b>Wärmequelle</b>	Oberflächennahme Geothermie
<b>Erdwärmesonden</b>	28 Doppel-U-Rohr-Sonden
<b>Bohrtiefe</b>	95 m / 97 m
<b>Versorgte Gebäude</b>	41 (29 Einzel-/ 12 Reihenhäuser)
<b>Gesamtheizfläche</b>	7928 m <sup>2</sup>
<b>Länge Verteilungsnetz</b>	650 m
<b>Vorlauftemperaturen</b>	14 °C - 16 °C (Sommer) / 5 °C - 10 °C (Winter)
<b>Wärmeträger</b>	Wasser-Glykol-Gemisch

## 2.2 Annahmen und Ansätze zur Erstellung der Ökobilanz

Zur Festlegung des Untersuchungsrahmens wurden unter anderem auf Grundlage einer Literaturrecherche Annahmen getroffen. Dafür wurden bisherige Ökobilanzstudien von Heizsystemen, Wärmenetzen und Erdwärmekollektoren auf verschiedene Aspekte hin untersucht. Eine Übersicht der untersuchten Studien und ihren zugrunde liegenden Heizsystemen ist in Tabelle 2 zu finden. Insgesamt konnten große Unterschiede in der Herangehensweise zur Erstellung von Ökobilanzen von (geothermischen) Heizsystemen festgestellt werden. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt

zusammenfassen:

- Produktsysteme werden oftmals in Subsysteme unterteilt, um Dominanzen in den Ökobilanzergebnissen feststellen zu können. Besonders häufig werden die Wärmeerzeugung und das Verteilungsnetz als Subsysteme definiert.
- Bei der Festlegung der Systemgrenzen, der Lebensdauern und der funktionellen Einheit kann kein eindeutiger Ansatz abgeleitet werden. Es sind unterschiedliche Varianten möglich, die von der beabsichtigten Anwendung der Ökobilanzstudie und der Datenverfügbarkeit abhängen.
- Die Erstellung einer Ökobilanz erfolgt üblicherweise mit einer Software unter Einbindung einer Ökobilanz-Datenbank.
- Es ist eine ganzheitliche Betrachtung der potenziellen Umweltwirkungen anzustreben. Sofern Lebenszyklusphasen ausgeschlossen werden, werden dennoch die dazu verfügbaren Daten für die jeweiligen Produkte aus Ökobilanz-Datenbanken verwendet.
- Die Wirkungsabschätzung erfolgt üblicherweise mit mehreren Midpoint-Indikatoren.
- Kleinere Systemkomponenten werden aufgrund potenziell geringer Umweltwirkungen ausgeschlossen. Eine Möglichkeit der Prüfung ist die sog. „1 % und 5 %-Masseregel“.
- Es wird angenommen, dass die Umweltwirkung proportional zur Tiefe der Erdsonde oder Brunnenanlage und zur Länge der Rohrleitungen steht.
- Zukünftige Veränderungen in den potenziellen Umweltauswirkungen von Produkten und Prozessen sollten durch verfügbare Szenario-Datensätze bestmöglich erfasst werden.

Darüber hinaus werden Ansätze zur Ökobilanzierung von Gebäuden angewendet. Umweltbezogene Informationen von Produkten werden meist in Abhängigkeit der Lebenszyklusphasen angegeben. Die DIN EN 15978 liefert standardisierte Lebenszyklusphasen für Gebäude (vgl. Abbildung 2). Die Lebenszyklusphasen stellen einen Ansatz zur ganzheitlichen Betrachtung der potenziellen Umweltwirkungen dar. Der Lebensweg eines Gebäudes setzt sich aus der Herstellungsphase (A1-A3), der Errichtungsphase (A4-A5), der Nutzungsphase (B1-B7) und der Entsorgungsphase (C1-C4) zusammen. Die Lebensphasen sind wiederum in einzelne Module gegliedert. Die Module stellen verschiedene Prozesse innerhalb der Grenzen der Lebensphasen dar. So setzt sich beispielsweise die Errichtungsphase (A) aus den Modulen Transport (A4) und Einbau (A5) zusammen. In einem ergänzenden Modul D werden Umweltvorteile quantifiziert, die durch Recycling- und Rückgewinnungsprozesse erzielt werden können. Das Modul D wird gemäß der DIN EN 15978 jedoch nicht innerhalb des Lebenszyklus betrachtet und somit nicht mit den Umweltwirkungen der vorangegangenen Prozesse verrechnet. Dadurch

Tabelle 2: Übersicht der untersuchten Ökobilanzstudien

Autor Erscheinungsjahr	Ort	Gegenstand der Untersuchung
<b>Ökobilanzstudien von Wärmesystemen</b>		
Mahon et al. 2022 [8]	Tallaght (Irland)	Drei KS: Abwärmegespeiste Wärmepumpen und Biomasse, ein IS: Gaskessel
Jeandaux et al. 2021 [9]	-	Acht Heizsysteme (fünf KS und drei IS)
Famiglietti et al. 2021 [10]	Mailand (Italien)	Vier Heizsysteme: 3DH vs. 4DH und Wärmepumpen Gegenwart vs. Zukunft
Diaz et al. 2020 [11]	Gulbene (Litauen)	Senkung der Netztemperaturen: 3DH vs. 4DH
Feofilovs et al. 2019 [12]	Gulbene (Litauen)	Vier Heizsysteme: 4DH, 4DH mit Solarthermie, 3DH, altes 3DH mit Brennholzkessel
Oliver-Solà et al. 2009 [13]	Spanien	KS: zentrale KWK-Anlage
<b>Ökobilanzstudien mit dem Fokus auf geothermische Wärmesysteme</b>		
Douziech et al. 2021 [14]	Rittershoffen (Frankreich)	Geothermalkraftwerk vs. Erdgas
Pratiwi und Trutnevyte 2021 [15]	Genf (Schweiz)	Sechs Konfigurationen: DHC mit und ohne Wärmepumpe; oberflächennahe, mitteltiefe oder tiefe Geothermie
Bartolozzi et al. 2017 [16]	Toskana (Italien)	Drei KS: Biomasse & Oberflächennahe Geothermie & zentraler Gaskessel und ein IS auf Basis von Erdgas
Karlsdottir et al. 2014 [17]	Stykkis- hól- mur (Island)	DHC auf Basis von Geothermie
Chiavetta et al. 2011 [18]	Bologna (Italien)	IS: Wärmesystem mit Erdwärmesonde vs. Solarthermie

KS: Kollektivsysteme, IS: Individualsysteme, DHC: District Heating Cooling, 3DH: Wärmenetz der 3. Generation, 4DH: Wärmenetz der 4. Generation

soll für Transparenz gesorgt werden, wo und in welchem Umfang Umweltbelastungen entstehen. [19]

Zur Beurteilung der Umweltwirkungen von Bauprodukten geben Hersteller Umweltproduktdeklarationen (engl. Environmental Product Declarations, EPDs) heraus, die in der DIN EN 15804 festgelegt sind. Die Datensätze von EPDs beziehen sich immer auf eine funktionelle Einheit, auch Referenzfluss genannt, beispielsweise 1 kg, 1 m<sup>2</sup> oder 1 Stück eines Baustoffs oder eines Produkts. Die Umweltdaten werden jeweils für die oben vorgestellten Lebenszyklusphasen für verschiedene Wirkungsindikatoren (z. B. GWP, AP, EP) angegeben. [20]

Ein grundlegender Ansatz zur Ökobilanzierung, die aus der Analyse bisheriger Studien hervorging, ist die Nutzung einer Ökobilanz-Datenbank. Die ÖKO-BAUDAT ist eine Baustoffdatenbank, die kostenfrei zugänglich ist und vereinheitlichte Daten für die Öko-

bilanzierung von Gebäuden bereitstellt. Sie wird durch das Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) zur Verfügung gestellt und wird regelmäßig aktualisiert. Die Datenbank umfasst derzeit über 1.400 Datensätze. Darunter fallen sowohl generische als auch unternehmensspezifische Datensätze aus EPDs, die die Anforderungen der EN 15804 erfüllen. [21]

### 2.3 Systemgrenzen

Die vorliegende Ökobilanzstudie untersucht die im Rahmen der Herstellung, Errichtung und Entsorgung anfallenden Stoff- und Energieflüsse sowie das Recyclingpotenzial des Heizsystems. Die Nutzungsphase wird außerhalb der Systemgrenzen gelegt. Grund dafür ist das Fehlen von Daten für den Betrieb.

Die Prozesse im Rahmen des Moduls C1 „Rückbau“ werden lediglich in die Ökobilanz aufgenommen, wenn

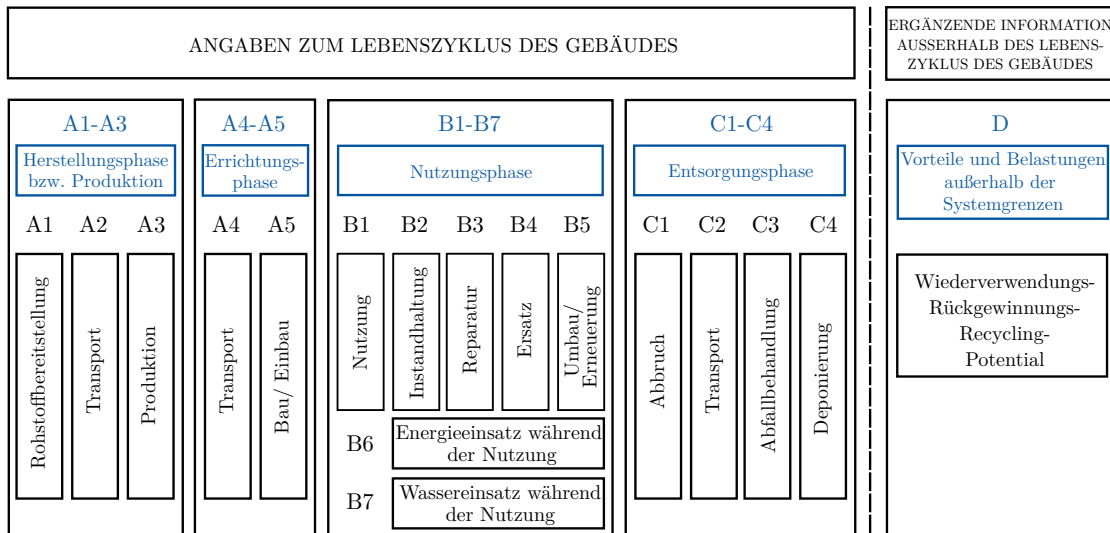


Abbildung 2: Gebäudelebenszyklusphasen nach DIN 15978 [19]

Indikatorwerte in den entsprechenden EPDs vorliegen. Sollten keine Werte zur Verfügung stehen, bleiben die Prozesse unberücksichtigt, da ansonsten keine zuverlässigen Aussagen über die entsprechenden Umweltwirkungen getroffen werden können.

Zur Festlegung der räumlichen und technischen Systemgrenzen des Produktes wurden folgende Abschneidekriterien definiert:

- Die Herstellung von Betriebsmitteln und die Infrastruktur, die nicht Teil des Systems „KNWN“ ist, werden von der Untersuchung ausgeschlossen. Dafür spricht, dass sie nur zeitweilig und in einer Vielzahl von Prozessen auch außerhalb des untersuchten Produktsystems zum Einsatz kommen. Somit werden Trinkwasser- und Stromleitungen nicht betrachtet. Leitungen, die dem Transport des Wärmeträgermediums dienen, gehören zum untersuchten Produktsystem und liegen somit innerhalb der Systemgrenzen.
- Die Baustellenvorbereitung sowie die Arbeiten zur Prüfung der Eignung des Standortes für die vorgesehene Nutzung werden nicht untersucht. Ebenso bleiben Arbeiten zur Prüfung des ordnungsgemäßen Einbaus der Bauprodukte (z. B. Druckprüfungen) unberücksichtigt.
- Für einige Prozesse wurde die 1% und 5%-Masseregeln angewendet: Es dürfen Inputs vernachlässigt werden, wenn sie weniger als 1% der Masse des Outputs eines Prozesses ausmachen. Gleichzeitig beträgt die Summe der vernachlässigten Stoffmassen nicht mehr als 5% des Outputs. [22, S. 55]
- Verpackungsmaterialien der eingekauften Bauprodukte und Baustoffe sind teilweise in den EPDs berücksichtigt. Darüber hinaus bleiben sie unberücksichtigt.
- Das Produktsystem endet in den Heizräumen der

Haushalte. Demnach werden Versorgungsleitungen im Gebäude und Heizkörper nicht berücksichtigt.

- Komponenten, die für die Wärmeversorgung der 41 Haushalte im Projektquartier und für eine effiziente Funktionsfähigkeit der Anlage nicht zwingend erforderlich sind, werden nicht betrachtet.
- Lebensphasen, Module sowie einzelne Bauteile oder Baustoffe, zu denen keine Daten beschaffbar sind, werden ausgeschlossen.

Laut einem Bericht zum ressourcenschonenden Bauen der Europäischen Kommission sollte die Lebensdauer von Wohngebäuden in einer Ökobilanz mit 50 Jahren angesetzt werden [23, S. 37]. Um die Vergleichbarkeit mit Ökobilanzstudien von Gebäuden zu ermöglichen, wird die Lebensdauer des KNWN ebenfalls mit 50 Jahren angenommen.

Soweit möglich werden die Sachbilanzdaten aus dem Jahr der Konstruktion des KNWN in Schifferstadt (2016) erfasst. Die Daten aus der ÖKOBAUDAT sind repräsentativ für das Jahr 2021, der aktuellen Fassung zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Ökobilanz.

## 2.4 Produktsystem

Nun sollen die festgelegten Systemgrenzen auf das zu untersuchende Produktsystem angewendet werden.

In Abbildung 3 sind die Systemgrenzen für das KNWN in Schifferstadt dargestellt. Die Erfassung der Daten und die anschließende Wirkungsabschätzung erfolgen separat für die Bereiche „Konstruktion“ sowie „Entsorgung und Recycling“. Die Konstruktion beinhaltet alle erforderlichen Prozesse, die zur Herstellung des KNWN in Schifferstadt erforderlich waren. Dazu gehören die Herstellung der benötigten Bauprodukte, der Transport dieser zur Baustelle sowie der Einbau der Komponenten zur Errichtung der Anlage. Darüber hinaus entstanden bereits während der Konstruktion Abfälle, die entsorgt werden mussten (Module C2-C4).

Umweltwirkungen, die durch den Austausch von Bauteilen entstehen, werden üblicherweise den Modulen B4 „Ersatz“ und B5 „Umbau/Erneuerung“ zugeschrieben. Entgegen der DIN EN 15978 werden die Herstellung und der Einbau der Austauschprodukte über die Module A1-A5 erfasst. Dies lässt sich darin begründen, dass durch den Ersatz die Umweltwirkungen für die entsprechenden Herstellungs- und Errichtungsprozesse wie bei der erstmaligen Konstruktion anfallen.

Zur systematischen Erfassung der Stoff- und Energieflüsse wurde das Produktsystem in folgende Subsysteme unterteilt:

- **Erdsondenfeld:** Das Erdsondenfeld reicht von den Erdwärmesonden bis einschließlich dem Hauptverteilerschacht.
- **Verteilungsnetz:** Das Verteilungsnetz beginnt nach dem Hauptverteilerschacht und endet an den Grundstücksgrenzen der angeschlossenen Gebäude.
- **Gebäudekomponenten:** Die Gebäudekomponenten werden ab der Grundstücksgrenze bis zu den Heizräumen der Haushalte erfasst.

Bei Erreichen der 50-jährigen Lebensdauer des KNWN oder nach dem Austausch einzelner Komponenten fallen Rückbauarbeiten zur Zerlegung und für den Abriss des KNWN an. Diese bleiben unberücksichtigt, sofern keine Daten dazu in den jeweiligen EPDs vorliegen (Modul C1). Im Anschluss an den Rückbau findet die Entsorgung oder das Recycling der Komponenten statt.

Sämtlichen Lebensphasen und Arbeitsgängen unterliegen Hintergrundprozesse, wie der Rohstoffgewinnung, der Verarbeitung von Materialien, Transporten oder der Bereitstellung von Energie und Wasser. Diese werden ebenfalls für die jeweiligen Prozesse erfasst.

## 2.5 Funktionelle Einheit

Der Ausschluss der Nutzungsphase verhindert, dass der eigentliche Nutzen des KNWN, die Bereitstellung von Wärme und Kälte, quantifiziert wird. Als funktionelle Einheit wird deswegen die Quartiersinfrastruktur festgelegt, die zur Bereitstellung des erforderlichen Wärmebedarfs für Heizung und Warmwasser im Projektquartier über eine 50-jährige Lebensdauer erforderlich ist.

## 2.6 Anforderungen an die Datenqualität

Zur Erreichung des festgelegten Ziels der Studie wurden Anforderungen an die Eignung der Daten gestellt. Da es sich bei dem KNWN um ein existierendes System handelt, sind für die Ökobilanzierung grundsätzlich fallspezifische Daten bzw. Primärdaten einzuholen. Insgesamt soll ein Datensatz zusammengestellt werden, der das Heizsystem in Schifferstadt angemessen repräsentiert. Nach der DIN EN ISO 14044 gilt, dass die Daten so vollständig, präzise, konsistent und nachvollziehbar sein sollen wie möglich. Die Erfüllung dieser Anforderungen wird dadurch erschwert, dass

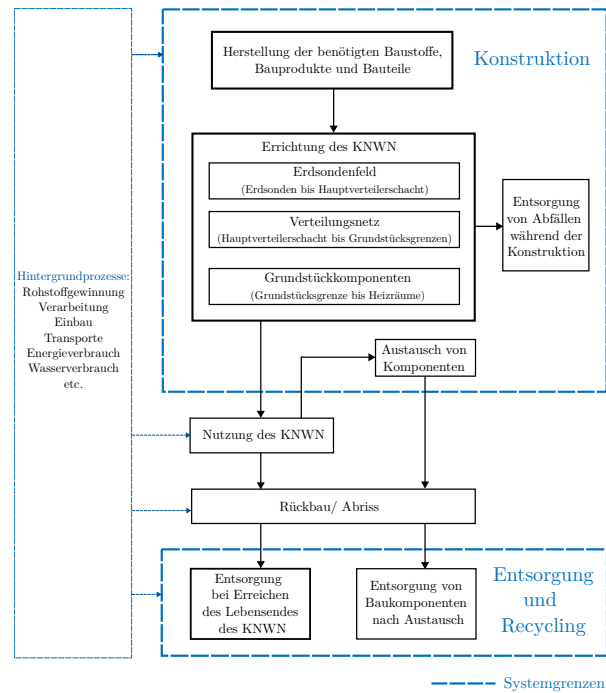


Abbildung 3: Systemgrenzen für die Ökobilanzierung des kalten Nahwärmenetzes in Schifferstadt

nicht immer fallspezifische Daten vorliegen und aus mehreren Daten gewählt werden muss. Daher wurde vorab das Vorgehen der Datenerhebung festgelegt. Es soll zur bestmöglichen Erfüllung der gestellten Anforderungen und zur Reproduzierbarkeit für zukünftige Untersuchungen beitragen.

## 2.7 Vorgehen bei der Datenerhebung

Für die Sachbilanzierung sind unterschiedliche Daten erforderlich, vordergründig die verbauten Baustoffe und Produkte, Angaben zu den verwendeten Mengen (Masse, Volumen, Stückzahl), Herstellungs- und Einbauverfahren und die Transportstrecken. Die Daten können auf diverse Arten erhoben werden und lassen sich wie in Abbildung 4 dargestellt priorisieren.

Gemessene Daten werden grundsätzlich priorisiert. Da die gesammelten Daten teilweise inkonsistent sind, wurden nach Ansicht der AutorInnen vertrauenswürdige Quellen bevorzugt. Die Datengrundlage, die somit als höchst präzise betrachtet wird, sind Unterlagen, die von den Stadtwerken Schifferstadt bereitgestellt wurden (Pläne, Berichte, Skizzen etc.). An dieser Stelle wird angenommen, dass die Vertrauenswürdigkeit durch das schriftliche Vorliegen der Daten in offiziellen Dokumenten gestärkt wird. Nachfolgend werden Daten bevorzugt, die aus Gesprächen mit einem Baubeteiligten gewonnen wurden. Darauf folgen Herstellerangaben, die unter anderem aus technischen Datenblättern und auf Anfrage eingeholt werden. Sind innerhalb einer Quelle (z. B. Protokollen) verschiedene Angaben gemacht worden oder Zahlenspannen angegeben (z. B. Dichte liegt zwischen  $50 \text{ kg/m}^3$  und  $60 \text{ kg/m}^3$ ), wird jener Wert gewählt, der zu den höhe-

ren Emissionen führt.

Sind gemessene Daten nicht verfügbar, werden ähnliche Produkte herangezogen, zu denen Daten eingeholt werden können. Diese sollen mittels bekannter Informationen an die projektspezifischen Bedingungen in Schifferstadt angepasst werden. Wenn keine vergleichbaren Produkte auffindbar sind, werden die benötigten Daten auf Grundlage geeigneter Literatur errechnet. Die letzte Möglichkeit, die in der Datensammlung vorgesehen ist, ist das Schätzen von Daten auf Basis sinnvoller und nachvollziehbarer Annahmen. Es wird empfohlen, konservativ angesetzte Schätzwerte zu verwenden [24, S. 39].

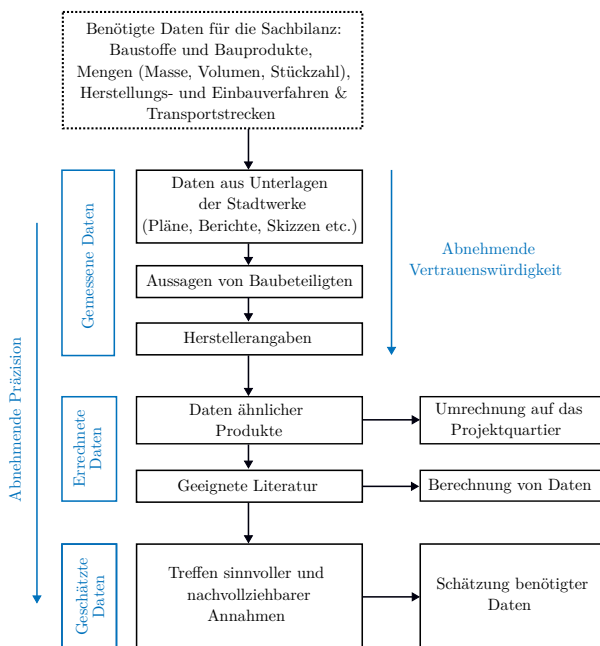


Abbildung 4: Priorisierung der Sachbilanzdaten für das kalte Nahwärmenetz

Zur Erhebung von Daten zur Umweltwirkung von Bauprodukten wird zunächst die Verfügbarkeit von produktspezifischen EPDs geprüft. Sollten die Hersteller der in Schifferstadt verbauten Produkte bislang keine EPDs zur Verfügung stellen, werden die Datensätze aus der ÖKOBAUDAT verwendet. Wenn auch dort keine geeigneten Datensätze hinterlegt sind, wird auf die öffentliche Bibliothek „ProBas“ zurückgegriffen. Sie wird vom Umweltbundesamt angeboten und stellt prozessorientierte Basisdaten (ProBas) zur Verfügung.

## 2.8 Zusammenfassung

In Tabelle 3 sind die wichtigsten Entscheidungen bezüglich der Zieldefinition und des Untersuchungsrahmens zusammengefasst.

## 3 Sachbilanz

Eine Übersicht zu den Sachbilanzdaten, ihrer Herkunft und den Mengenerrechnungen kann in den Tabellen 11 und 12 im Anhang entnommen werden. Die Mengenangaben stimmen mit den Referenzflüssen der jeweils

verwendeten Datensätze aus der ÖKOBAUDAT überein. Dadurch können in der Wirkungsabschätzung die Indikatorwerte direkt mit den Sachbilanzdaten verrechnet werden.

### 3.1 Konstruktion des kalten Nahwärmenetzes

Die Beschreibung der Konstruktion des KNWN und der damit einhergehenden Stoff- und Energieflüsse erfolgt separat für die Subsysteme „Erdsondenfeld“, „Verteilungsnetz“ und „Gebäudekomponenten“.

Für das Modul A4 „Transporte“ werden die spezifischen Transportstrecken über die Hersteller und Lieferanten der Bauprodukte ermittelt. Sind die Lieferanten nicht bekannt, werden statistische Werte des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) verwendet, die das Verkehrsgeschehen in Deutschland und in der EU abbilden. Es wird angenommen, dass sämtliche Transportwege mit dem LKW zurückgelegt werden (ÖKOBAUDAT: LKW). Leere Rückfahrten der LKW bleiben unberücksichtigt. Aufgrund der Vielzahl an Transporten werden diese nachfolgend nicht weiter ausgeführt. Sie sind detailliert in den Tabellen 11 und 12 im Anhang zu finden.

Die ÖKOBAUDAT bietet nicht immer exakt die gesuchten Bauprodukte an. In solchen Fällen werden naheliegende Datensätze gewählt. Wenn beispielsweise kein Datensatz zu einem Ventil aus Messing vorhanden ist, wird das Bauteil über die Masse des verarbeiteten Messings mithilfe des Datensatzes „Messing-Bauteil“ aufgenommen.

### Erdsondenfeld

Das Erdsondenfeld besteht aus 28 Erdwärmesonden, Anbindeleitungen, zwei Nebenverteilerschächten, Hauptanbindungsleitungen und einem Hauptverteilerschacht. Bei den Anbindeleitungen handelt es sich um die Vor- und Rückläufe der Erdsonden zu den Nebenverteilerschächten. Die Hauptanbindungsleitungen stellen die Vor- und Rückläufe von den beiden Nebenverteilerschächten zum Hauptverteilerschacht dar, und umfassen darüber hinaus auch Leitungen für eine geplante Erweiterungsstufe. Die Leitungen zur Erweiterung liegen gemäß der festgelegten Abschneidekriterien außerhalb der Systemgrenzen, da sie zur Wärmeversorgung des Quartiers und für die Funktionsfähigkeit der Anlage derzeit nicht erforderlich sind.

Die Erfassung der Stoff- und Energieflüsse zur Konstruktion des Erdsondenfeldes beginnt mit den Erdsondenbohrungen (Tab. 4). Dafür wurde ein Doppelrotorkopf-Bohrgerät mit einem äußeren Bohrgestänge (Durchmesser: 178 mm) und einem inneren Bohrgestänge (Durchmesser: 152 mm) verwendet. Insgesamt wurden 27 Bohrungen mit einer Endtiefe von 95 m und eine Bohrung mit einer Endtiefe von 97 m in einem Zeitraum von 12 Tagen durchgeführt. Der Bohrprozess wird über den Kraftstoffverbrauch des Bohrgeräts (pro Tag 100 L) in die Sachbilanz aufgenommen.

Tabelle 3: Zusammenfassung von Zieldefinition und Untersuchungsrahmen

Kriterium	Beschreibung
<b>Ziel der Studie</b>	Darstellung der potenziellen Auswirkungen des KNWN in Schifferstadt auf den Treibhauseffekt über einen festgelegten Zeitraum
<b>Lebensdauer des KNWN</b>	50 Jahre
<b>Zeitraumen: Sachbilanzdaten</b>	2016
<b>Zeitraumen: Indikatorwerte</b>	2021
<b>Berücksichtigte Phasen</b>	Herstellungsphase, Errichtungsphase, Entsorgungsphase, Recycling
<b>Unberücksichtigte Module</b>	Nutzung (B1), Instandhaltung (B2), Reparatur (B3), Energie- und Wassereinsatz (B6-B7), Abbruch (C1)
<b>Funktionelle Einheit</b>	Quartiersinfrastruktur, die zur Bereitstellung des erforderlichen Wärmebedarfs für Heizung und Warmwasser im Projektquartier über eine 50-jährige Lebensdauer erforderlich ist
<b>Datenanforderungen</b>	repräsentativ, vollständig, präzise, konsistent, nachvollziehbar, reproduzierbar
<b>Quellen: Sachbilanzdaten</b>	Unterlagen der Stadtwerke Schifferstadt, Aussagen von Baubeteiligten, Herstellerangaben, Berechnungen, Schätzungen
<b>Quellen: Umweltwirkungen</b>	EPDs, ÖKOBAUDAT, ProBas

Die ÖKOBAUDAT enthält keine Datensätze für Diesel oder Benzin. Zur Ermittlung der Umweltwirkung von Diesel wird auf den Datensatz „Bagger 100 kW Aushub“ zurückgegriffen. Der Datensatz berücksichtigt nur den Dieselverbrauch zum Aushub von 1 m<sup>3</sup> Sandboden. Für 1 m<sup>3</sup> Sandboden werden 0,3091 kg Diesel verbraucht, was einem GWP von 1,294 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv. entspricht. Die Umrechnung auf 1 kg Diesel ergibt ein GWP von 4,186 347 kg CO<sub>2</sub>-Äquiv.

Zur Unterstützung des Bohrvorgangs wurde eine Spülung aus Wasser und Carboxy-Methyl-Cellulose (CMC) eingesetzt. Die benötigte Menge an Klarwasser für die Spülung ergibt sich aus den Bohrlochgehalten und einer 1,5-fachen Spülreserve [25, S. 66]. Da keine Daten zur Umweltwirkung von CMC verfügbar sind, muss auf ein alternatives Produkt ausgewichen werden. An Stelle des CMC wird daher Aktivbentonit in die Sachbilanz aufgenommen, welcher vom selben Hersteller angeboten wird. Der Spülungszusatz wird üblicherweise in Abhängigkeit des anstehenden Bodens und des Bohrverfahrens gewählt [25, S. 33]. Es wird angenommen, dass das Alternativprodukt für die Bedingungen in Schifferstadt geeignet ist. Die Menge an Spülungszusatz errechnet sich aus der Klarwassermenge und dem vom Hersteller angegebenen Mischverhältnis (für Bentonit: 20 kg/m<sup>3</sup>).

Die Daten zur Umweltwirkung des Bentonits wurden aus der Bibliothek ProBas entnommen. Es handelt sich

um einen Datensatz mit einem zeitlichen Bezug von 1999 bis 2004. Dementsprechend kann nicht gewährleistet werden, dass der Datensatz die Bedingungen des Untersuchungsobjektes angemessen repräsentiert. Aufgrund der mangelnden Datenlage wird der Datensatz dennoch verwendet.

Das Bohrklein wurde komplett entsorgt. Das Volumen wird aus den eingebrachten Tiefen der Bohrgestänge und den Bohrdurchmessern berechnet. Eine Darstellung der Bohrlöcher ist im Anhang, Abbildung 8 zu finden. Der Boden setzt sich im Wesentlichen aus Sanden, Schluffen und Tonen zusammen, deren Lagerungsdichten zwischen 0,93 g/cm<sup>3</sup> und 1,72 g/cm<sup>3</sup> liegen [26, S. 226]. Gemäß dem festgelegten Vorgehen bei der Datenerhebung wird zur Berechnung der Masse eine Dichte von 1,72 g/cm<sup>3</sup> angesetzt. Die Spülungszusätze CMC und Bentonit dürfen bei günstigen Untergrundverhältnissen versickert werden [27]. Es besteht die Annahme, dass diese vorliegen und somit eine Entsorgung des Spülungszusatzes entfällt.

Tabelle 4: Sachbilanzdaten für das Herstellen der Erdsondenbohrungen

Komponente	Material/Prozess	Menge	Einheit
Bohren	Diesel	1.014	kg
Bohrspülung	Bentonit	2.666,6	kg
Bohrspülung	Wasser	133.330	kg
Bohrklein	Entsorgung	91.727,6	kg

Nach der Herstellung der Bohrlöcher wurden die Erdsonden eingebracht (Tab. 5). Bei den eingebauten Erdwärmesonden handelt es sich um Doppel-U-Sonden bestehend aus HDPE. Da ein Mangel an Umweltdaten im Bereich der Geothermie in der ÖKOBAUDAT besteht, wurden die Erdsonden über die Masse an verarbeitetem HDPE in die Sachbilanz aufgenommen. Die einfache Konstruktion der Erdsonden und die bekannten Rohrmaße ermöglichen eine relativ genaue Berechnung der Masse. Die Bohrlöcher waren zum Zeitpunkt des Einbringens der Erdwärmesonden mit Bohrspülung gefüllt. Um das Einbringen zu erleichtern, wurden an den Sondenfüßen Gewichte befestigt. Für jedes Bohrloch wurde ein 20 kg-Stahlgewicht benötigt, welches beim Vorgang des Einsetzens verloren geht. Damit die Sonden nach dem Einführen nicht aneinander liegen, werden üblicherweise sog. Zentrierstücke eingesetzt [25, S. 51]. Aufgrund ihres geringen Gewichts werden diese vernachlässigt.

Tabelle 5: Sachbilanzdaten für das Einbringen der Erdwärmesonden

Komponente	Material/Prozess	Menge	Einheit
Erdsonden	HDPE	3102,4	kg
Einzugsgewichte	Stahl	700	kg

Sobald die Erdsonden eingebaut wurden, musste das Bohrloch verfüllt werden (Tab. 6). Die Verfüllung dient unter anderem dazu, den Wärmetransport zwischen dem Wärmeträgermedium in den Erdsonden und dem Erdreich zu gewährleisten [25, S. 51]. Dafür wurde bereits beim Einsetzen der Erdsonden ein Injektionsrohr aus PE 100 in das Bohrloch mitgeführt und dort nach dem Verpressvorgang belassen. Es wird angenommen, dass die Injektionsrohre jeweils einen Überstand von einem Meter haben.

Als Verfüllbaustoff wurde eine Suspension aus Portlandzement und Kalksteinen eingesetzt. Der Hersteller gab auf Anfrage an, dass Kalksteine verschiedener Fraktionen mit über 65 % den Hauptbestandteil des Trockenbaustoffs bilden. Laut Hersteller ist die Festigkeit der Verfüllung in der Geothermie von untergeordneter Bedeutung, weshalb Portlandzement lediglich einen Anteil von < 20 % aufweist. Den Rest des Verfüllbaustoffs bilden Tonmehle, Bentonit, natürlicher Graphit und Additive, die die Wärmeleitfähigkeit und Frostbeständigkeit regulieren. Die Gesamtmenge an verbrauchtem Verpressmaterial liegt bei 69,5 t. Zur Berechnung des Anteils an Trockenmasse wurde auf Basis der Unterlagen der Stadtwerke ein Wasserfeststoffwert (W/F-Wert) von 0,64 und eine Dichte von 1,5 t/m<sup>3</sup> angesetzt.

Die ÖKOBAUDAT bietet keine Datensätze zu den einzelnen Komponenten des Verfüllbaustoffs (Portlandzement und Kalkstein) an. Stattdessen wurde der naheliegendste Datensatz „Kalkzementmörtel“ gewählt. Dieser bildet die Trockenmasse aus den Haupt-

bestandteilen Sand, Zement und Kalk ab.

Die Verfüllsuspension wurde auf der Baustelle mit einer Chargen-Kolloidalmischanlage angerührt. Über die vom Hersteller angegebene Mischleistung des Geräts wurde eine Gesamt-Mischzeit von 15,45 Stunden berechnet. Die Aufnahme des Mischprozesses in die Sachbilanz erfolgt über den Stromverbrauch, welche mit der Herstellerangabe zur Leistungsaufnahme der Anlage ermittelt wurde.

Das Verfüllen der Bohrlöcher erfolgte im Kontraktorverfahren über das eingeführte Injektionsrohr. Die Verpressleistung des Geräts liegt bei 32 Litern pro Minute. Mithilfe dieser Angabe wurde eine Gesamt-Verpressdauer von 24,14 Stunden ermittelt. Der Verpressvorgang wird ebenfalls über den Stromverbrauch in den Datensatz aufgenommen.

Tabelle 6: Sachbilanzdaten für das Verfüllen der Bohrlöcher

Komponente	Material/Prozess	Menge	Einheit
Injektionsrohr	HDPE	511,1	kg
Verfüllbaustoff	Trockenmasse	19,235	m <sup>3</sup>
Verfüllbaustoff	Wasser	27,115	kg
Betrieb Mischanlage	Strom	190,04	kWh
Verpressen	Strom	296,92	kWh

Die HDPE-Leitungen innerhalb des Erdsondenfeldes setzen sich aus den Anbindeleitungen (40 mm x 3,7 mm) und den Hauptanbindungsleitungen (90 mm x 8,2 mm) zusammen (Tab. 7). Laut Aussage eines Baubeteiligten wurden die Erdwärmesonden einzeln zu den Nebenverteilerschächten geführt und dort teilweise in Schlaufen gelegt, bevor sie an die Verteilerschächte angeschlossen wurden. Der Abgleich der Längen soll eine gleichmäßige Durchströmung der Leitungen gewährleisten. Die Längen der Anbindeleitungen liegen jeweils zwischen 17 m und 25 m im Vorlauf. Gemäß dem Vorgehen bei der Datenerhebung aus Kapitel 2 wird eine Länge von 25 m angesetzt. Die Länge der Hauptanbindungsleitungen liegt im Vorlauf ebenfalls jeweils bei 25 m. Bei den Rohrleitungen bleiben kleinere Bauteile wie Formstücke und Armaturen gemäß der 1 %-Masseregeln unberücksichtigt.

Die Gehäuse der drei Verteilerschächte bestehen aus PE und wiegen pro Schacht 400 kg. Hinzu kommen jeweils 200 kg für die Einbauten. Bei den Einbauten handelt es sich um Regulier- und Absperrventile, Mikroblassenabscheider, Großentlüfter, Manometer, Thermometer und Druckausgleichsbehälter [6]. Es konnten keine zuverlässigen Daten zu den spezifischen Massen der Einbauten beschafft werden. Eine Recherche ergab, dass hauptsächlich Messing, Kunststoff und Edelstahl verbaut sind. Die Massen der einzelnen Materialien wurden auf je 200 kg geschätzt und in die Datensammlung aufgenommen.

Im Rahmen des Moduls A5 „Einbau“ fielen eine Reihe von Erdbauarbeiten und Arbeiten zur Produktherstellung vor Ort an. Jegliche Fahrten der Baumaschinen

auf der Baustelle, z. B. zum Transport von Baumaterial, werden nicht berücksichtigt, da vernachlässigbare Umweltwirkungen zu erwarten sind.

- **Grabenaushub:** Die Berechnung des Grabenvolumens erfolgt mittels der Gesamtgrabenlänge (260 m) und des Grabenprofils (0,8 m x 1 m). Der Aushub für die drei Schächte wird aufaddiert.
- **Herstellung der Rohrbettung:** Die Leitungen wurden in einem 1 m x 0,3 m großen Sandbett verlegt. Die Herstellung der Rohrbettung wird vereinfachend als Grabenverfüllung berechnet.
- **Rohrverlegung:** Da es sich um Kunststoffrohre von relativ geringem Gewicht handelt, besteht die Annahme, dass der Maschineneinsatz zum Herablassen der Rohre in den Graben vernachlässigbar ist. Das Verbinden der Rohre erfolgte in Schifferstadt mittels der Heizwendel-Schweißtechnik (Elektroschweißmuffen) [6]. Da die Umweltwirkungen beim Einbau der Rohre hauptsächlich auf die Erdarbeiten (Aushub, Verfüllung) zurückzuführen sind [28], wird das Schweißen vernachlässigt.
- **Grabenverfüllung:** Der Graben wurde zum einen mit dem Sandbett verfüllt. Zum anderen wird angenommen, dass der zuvor ausgehobene Boden für die restliche Verfüllung verwendet wurde. Für die Verfüllung mit Aushub wird die Verdrängung durch Sand, Rohre und Schächte berücksichtigt. Da die ÖKOBAUDAT lediglich einen Datensatz für den Aushub bereitstellt, wird die Grabenverfüllung vereinfachend als Grabenaushub betrachtet.
- **Grabenverdichtung:** Die Grabenverdichtung wird über den Kraftstoffverbrauch des Verdichtungsgerätes erfasst. Da die eingesetzte Maschine in Schifferstadt nicht bekannt ist, wurde eine leichte Vibrationsplatte der Firma BOMAG als Referenzgerät gewählt [29]. Unter der Annahme, dass mittelmäßige Baustellen- und Betriebsbedingungen herrschen, ergibt sich für das gewählte Gerät nach [30, S. 1140] eine Nutzleistung von 17,47 m<sup>3</sup>/h. Daraus folgt ein Aufwandswert von 0,06 h/m<sup>3</sup>, eine Geräteinsatzzeit von 12,34 h und schließlich ein Dieserverbrauch von ca. 23 kg.

Bedingt durch die Sandbettung und das Einlegen der Rohre und Schächte entsteht verdrängter Boden. Da keine Informationen zur weiteren Verwendung des Bodens vorliegen, wird eine vollständige Entsorgung angenommen.

### Verteilungsnetz

Die Sachbilanzdaten zum Verteilungsnetz (Tab. 8) ergeben sich analog zu den Leitungen innerhalb des Erdsondenfeldes. Auch hier handelt es sich um HDPE-Rohre mit den Maßen 110 mm x 10 mm. Die Gesamtlänge der Vor- und Rücklaufleitungen bis zu den Grundstücksgrenzen beträgt 1300 m.

### Gebäudekomponenten

Jeder der 41 Haushalte ist mit einer Wärmepumpe

(WP) und einem Pufferspeicher unterschiedlicher Leistung und Größe ausgestattet (Tab. 9). Bei 11 Haushalten ist zusätzlich je eine Frischwasserstation eingebaut. Gemäß der festgelegten Abschneidekriterien werden nur Komponenten berücksichtigt, die für die effiziente Funktionsfähigkeit der Anlage zwingend erforderlich sind. Da nicht alle Haushalte über eine Frischwasserstation verfügen, ist anzunehmen, dass es sich bei der Integration dieser Anlagen um individuelle Entscheidungen der Endkunden handelt. Folglich gehören die Frischwasserstationen nicht zum untersuchten Produktsystem.

Die Hausanschlüsse betragen im Vorlauf 328 m (8 m pro Haushalt). Die Berechnung der Daten zu den Erdbauarbeiten und den benötigten Baustoffen erfolgt analog zu den Leitungen im Erdsondenfeld.

### Lebensdauer der Bauteile

Zur Ermittlung der Austauschmaßnahmen werden Daten zu den Bauteillebensdauern benötigt. Diese werden, falls vorhanden, den entsprechenden EPDs der ÖKOBAUDAT entnommen, die wiederum aus VDI-Richtlinien hervorgehen. Wird dort keine Angabe zur Lebensdauer gemacht, werden die vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) [31] herausgegebenen Werte übernommen. Liefert keine der beiden Quellen Angaben zu den benötigten Bauteillebensdauern, wird alternative Literatur verwendet.

Bauteile, die eine Lebensdauer von unter 50 Jahren aufweisen, werden entsprechend ausgetauscht. Alle Bauteile, die eine Lebensdauer von über 50 Jahren aufweisen, und Ersatzprodukte, deren Lebensdauern innerhalb des verbliebenen Nutzungszeitraums des KNWN nicht voll ausgeschöpft werden, werden nicht anteilig berechnet, sondern gehen voll in die Ökobilanz ein.

Die Bauteillebensdauern sind in der Tabelle 10 zu finden. Da sowohl die ÖKOBAUDAT als auch das BBSR keine Lebensdauern zu Erdwärmesonden bereitstellen, wird an dieser Stelle auf eine alternative Datenquelle ausgewichen. Der Bundesverband Wärmepumpe e.V. gibt für zertifizierte Erdwärmesonden eine Lebensdauer von 100 Jahren an [32]. Da in Schifferstadt entsprechende Zertifikate vorliegen, wird diese Angabe übernommen. Da die Qualität des Betriebs von Erdsonden maßgeblich vom umliegenden Verfüllbaustoff abhängig ist [33], wird hier ebenfalls eine Lebensdauer von 100 Jahren angenommen. Die Nutzungsdauer von PE-Rohren kann auch mit 100 Jahren angesetzt werden [34]. Für die Verteilerschächte konnte keine zuverlässige Angabe zur Lebensdauer erhoben werden. Da entlang des Rohrleitungsnetzes keine Austausche während der 50-jährigen Nutzungsdauer notwendig sind, wird davon ausgegangen, dass es bei den Verteilerschächten ebenfalls zu keinem Austausch in dieser Zeit kommt. In Anlehnung an eine Ökobilanzstudie für ein PE-Rohrsystem für die Trinkwasserversorgung [28] werden die Erdbauarbeiten nur zur erstmaligen

Tabelle 7: Sachbilanzdaten für die Leitungsverlegung im Erdsondenfeld

Komponente	Material/Energie	Menge	Einheit
Anbindeleitungen (1340 m)	PE	570,84	kg
Hauptanbindungsleitungen (100 m)	PE	210	kg
Verteilerschächte - Gehäuse	PE	1.200	kg
Verteilerschächte - Einbauten	Messing	200	kg
Verteilerschächte - Einbauten	Edelstahl	200	kg
Verteilerschächte - Einbauten	PE	200	kg
Grabenaushub	Bagger	218,96	m <sup>3</sup>
Rohrbettung	Sand	144.300	kg
Grabenverfüllung	Bagger	205,68	m <sup>3</sup>
Grabenverdichtung	Diesel	22,95	kg
Aushub	Entsorgung	157.001,6	kg

Tabelle 8: Sachbilanzdaten für das Verteilungsnetz

Komponente	Material/Energie	Menge	Einheit
Leitungen	PE	4.043	kg
Grabenaushub	Bagger	520	m <sup>3</sup>
Rohrbettung	Sand	360.750	kg
Grabenverfüllung	Bagger	507,65	m <sup>3</sup>
Grabenverdichtung	Diesel	56,73	kg
Aushub	Entsorgung	356.642	kg

Tabelle 9: Sachbilanzdaten für die Gebäudekomponenten

Komponente	Material/Energie	Menge	Einheit
Wärmeerzeuger	WP < 10 kW	23	Stück
Wärmeerzeuger	WP < 20 kW	18	Stück
Pufferspeicher	Stahl	3.473,5	kg
Leitungen	PE	2.040,16	kg
Grabenaushub	Bagger	262,4	m <sup>3</sup>
Rohrbettung	Sand	182.040	kg
Grabenverfüllung	Bagger	256,17	m <sup>3</sup>
Grabenverdichtung	Diesel	28,59	kg
Aushub	Entsorgung	179.963,6	kg

Errichtung des Gesamtsystems angesetzt. Somit besteht die Notwendigkeit von Austauschmaßnahmen lediglich bei den Kundenanlagen (Wärmepumpen und Pufferspeicher).

### 3.2 Entsorgung und Recycling des kalten Nahwärmenetzes

Wie in der Abbildung 3 ersichtlich wurde, sind Entsorgungs- und Recyclingprozesse zum einen durch den Austausch von Komponenten und zum anderen durch das Erreichen der 50-jährigen Lebensdauer des Gesamtsystems erforderlich. Letzteres schließt auch Systemkomponenten ein, die ihre Lebensdauer noch nicht voll ausgeschöpft haben. Dies betrifft beispielsweise die Wärmepumpen und die Pufferspeicher, die zum Zeitpunkt der Abfallbehandlung des Gesamtsystems bereits zweimal ausgetauscht wurden und bei denen die Ersatzprodukte eine Nutzungsdauer von nur 10 Jahren erreichen. Deren Abfallbehandlung geht nicht anteilig, sondern voll in die Ökobilanz ein. Die Mengen für die Entsorgungs- und Recyclingprozesse ergeben sich aus den Sachbilanzdaten zur Konstruktion

Tabelle 10: Bauteillebensdauern für das kalte Nahwärmenetz

Bauteil/Material	Lebensdauer in Jahren	Quelle
Erdwärmesonden	100	[32]
Verfüllbaustoff	100	Annahme
PE-Rohre	100	[34]
Verteilerschächte	mind. 50	Annahme
Grabenarbeiten	mind. 50	[28]
Wärmepumpen	20	ÖKOBAUDAT
Pufferspeicher	20	ÖKOBAUDAT

und aus der Anzahl der erforderlichen Austauschmaßnahmen. Es wird angenommen, dass alle Materialien und Bauprodukte für die Entsorgung und das Recycling zurückgewonnen werden.

In der ÖKOBAUDAT liegen für die Bauprodukte meist entsprechende Umweltwirkungen zu den Modulen C3 und C4 vor. Wenn keine Werte enthalten sind, werden naheliegende Datensätze aus der Datenbank-Kategorie „End of Life“ gewählt. Sind beispielsweise keine Werte zur Entsorgung eines bestimmten Edelstahl-Bauteils in dem jeweiligen EDP gegeben, wird der generische Datensatz „End of Life von Edelstahl“ verwendet. Bietet die Datenbank nichts Naheliegenderes an, werden die generischen Datensätze „Bauschutt-aufbereitung“ (C3) und „Bauschutt-Deponierung“ (C4) gewählt.

## 4 Wirkungsabschätzung

Eine Übersicht zu den verwendeten Datensätzen aus der ÖKOBAUDAT und ProBas befindet sich im Anhang in Tabelle 13. Die Verrechnung der Stoff- und Energiemengen mit den Indikatorwerten für die Bereiche „Konstruktion“ sowie „Entsorgung und Recycling“ kann den Tabellen 14 und 15 im Anhang entnommen werden.

### 4.1 Subsysteme

Die Abbildung 5 zeigt das aus der Berechnung resultierende Treibhauspotential des KNWN und seiner

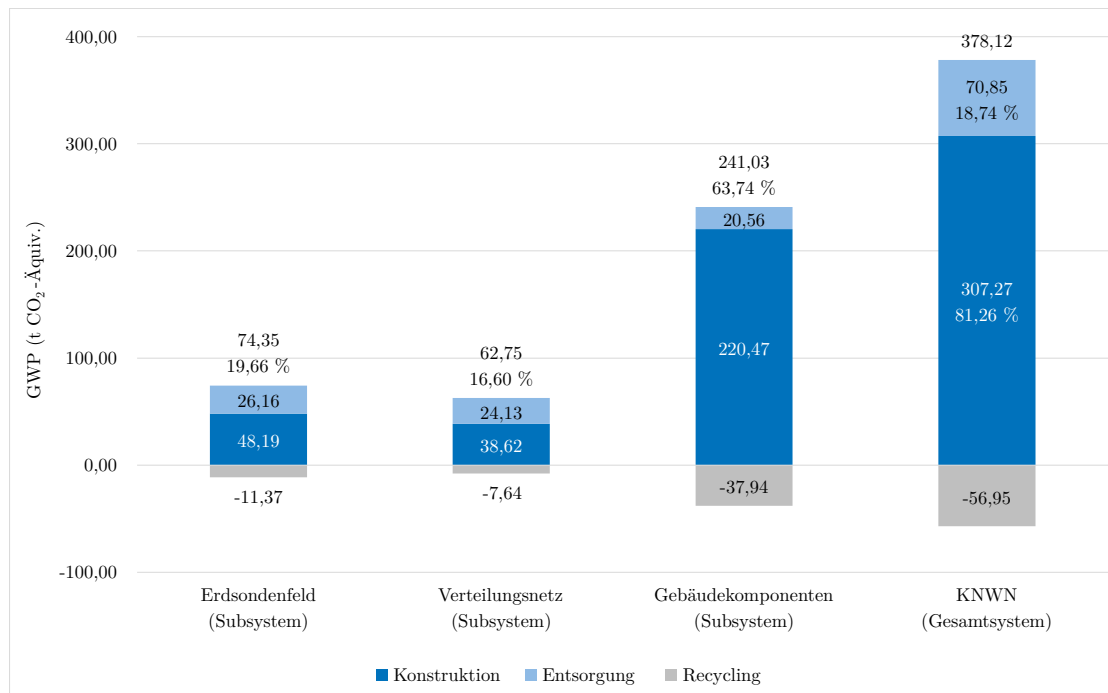


Abbildung 5: Wirkungsabschätzung des kalten Nahwärmenetzes und seiner Subsysteme

Subsysteme über eine Lebensdauer von 50 Jahren. Es sind die GWPs aus den Bereichen „Konstruktion“, „Entsorgung“ und „Recycling“ sowie das resultierende GWP aus den Bereichen „Konstruktion“ und „Entsorgung“ aufgeführt.

Bei alleiniger Betrachtung der Konstruktion geht ein GWP von 307,27 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. hervor. Die Gebäudekomponenten machen dabei mit 71,75 % eindeutig den größten Anteil aus. Darauf folgen das Erdsondenfeld mit 15,68 % und das Verteilungsnetz mit 12,57 %.

Für die Entsorgung des gesamten KNWN ergibt sich ein GWP von 70,85 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. Der Anteil des Erdsondenfeldes an der Entsorgung liegt bei 36,92 %, des Verteilungsnetzes bei 34,06 % und der Gebäudekomponenten bei 29,02 %.

Aus der Konstruktion und der Entsorgung resultiert ein Gesamt-GWP für das KNWN von 378,12 t CO<sub>2</sub>-Äquiv., welches sich zu 81,26 % aus der Konstruktion und zu 18,74 % aus der Entsorgung ergibt. Im Falle des vollständigen Recyclings aller Komponenten des KNWN reduziert sich das GWP um 56,95 t CO<sub>2</sub>-Äquiv., was einer prozentualen Reduktion von 15,06 % entspricht.

Die starke Dominanz der Gebäudekomponenten mit einem Anteil von 63,74 % am Gesamt-GWP des KNWN lässt sich im Wesentlichen auf die Austausche zurückführen. Wie in der Sachbilanz in Kapitel 3 erläutert, weisen lediglich die Wärmepumpen und Pufferspeicher eine Lebensdauer von unter 50 Jahren auf und müssen während der gesamten Nutzungsdauer des KNWN zweimal ausgetauscht werden. Diese Austausche leisten somit die Hauptbeiträge zu den Gebäudekomponenten. Der Anteil der Austausche am Gesamt-GWP

beträgt 36,72 %.

#### 4.2 Komponenten des KNWN

Zur genaueren Identifizierung von Hauptquellen des GWPs wurde das KNWN in weitere Komponenten untergliedert. In einem nächsten Schritt soll daher auf die Wirkungsabschätzung folgender Komponenten eingegangen werden: Bohrarbeiten, Einbringen der Erdwärmesonden, Verpressarbeiten, Baustoffe des Rohrnetzes (Leitungen, Verteilerschächte, Sandbett), Erdbauarbeiten (Aushub, Verfüllung, Verdichtung, Entsorgung des Aushubs) und Anlagentechnik (Wärmepumpen und Pufferspeicher). Ihre GWPs, die sich aus der Konstruktion sowie aus der Entsorgung ergeben, sind der Abbildung 6 zu entnehmen. Die Recyclingpotentiale sind gesondert dargestellt.

Es lässt sich festhalten, dass die Anlagentechnik in den Haushalten mit einem Anteil von über 55 % am GWP des gesamten KNWN eine starke Dominanz im Vergleich zu den übrigen Komponenten aufweist. Bei weiterer Differenzierung ergibt sich für die Wärmepumpen ein Anteil von 44,50 % und für die Pufferspeicher ein Anteil von 10,87 % am GWP des KNWN. Demnach stellen die Wärmepumpen die Haupteinflussquelle auf das GWP des gesamten Systems dar.

Nach der Anlagentechnik weisen die Baustoffe des Rohrnetzes das höchste GWP auf. Ihr Anteil am GWP des KNWN beträgt 28,08 %. Darauf folgen das Einbringen der Erdwärmesonden (7,01 %), die Erdbauarbeiten (5,05 %), die Verpressarbeiten (2,69 %) und die Bohrarbeiten (1,80 %). Somit weisen die Bohrarbeiten den geringsten GWP unter allen definierten Komponenten des KNWN auf.

Die Recyclingpotentiale der Komponenten sind un-

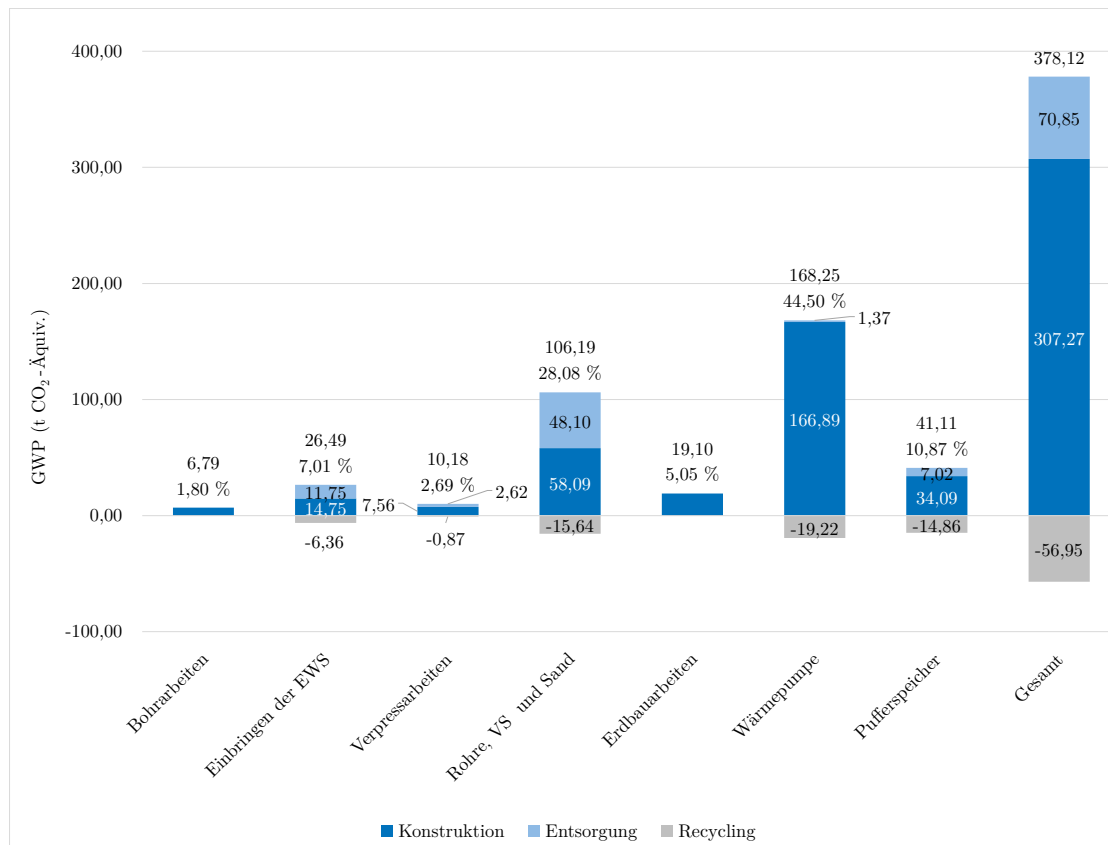


Abbildung 6: Wirkungsabschätzung einzelner Komponenten des kalten Nahwärmenetzes

terschiedlich ausgeprägt. Die höchsten Nettovorteile können durch das Recycling der Wärmepumpen und Pufferspeicher in den Haushalten erzielt werden, gefolgt von den Baustoffen des Rohrnetzes, den Baustoffen zum Einbringen der Erdwärmesonden und dem Verpressmaterial.

### 4.3 Lebenszyklusmodule

Nachdem eine Wirkungsabschätzung anhand der Subsysteme und der einzelnen Komponenten des KNWN durchgeführt wurde, sollen die potenziellen Umweltwirkungen auch anhand der Lebenszyklusmodule aufgeführt werden. Die resultierenden GWPs der Lebenszyklusmodule A1-A5, C1-C4 und D sind der Abbildung 7 zu entnehmen. Mit ca. 278 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. und einem Anteil von ca. 74% am GWP des gesamten KNWN (ohne Modul D) dominieren eindeutig die Module A1-A3. In der ÖKOBAUDAT werden für die Mehrheit der Produkte die Daten lediglich gebündelt für diese drei Module angegeben, weshalb hier nicht weiter differenziert werden kann.

Die Module A4, A5, C1 und C2 sind mit GWPs von jeweils kleiner als 9 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. und einem Gesamtanteil von ca. 5% vergleichsweise von geringer Bedeutung für das GWP des KNWN. Es sei nochmal auf den Ausschluss des Moduls C1 „Abbruch“ hingewiesen (siehe Kapitel 2). Da allerdings in der ÖKOBAUDAT Daten zu diesem Modul vorliegen, wurden sie in die Ökobilanz aufgenommen. Jedoch enthalten nur we-

nige Bauprodukte Angaben diesbezüglich, weshalb das Modul C1 dementsprechend das niedrigste GWP aufweist.

Unter den Modulen im Rahmen der Entsorgungsphase C dominiert mit knapp 60 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. das Modul C3 (entspricht einem Anteil von 15,69%), gefolgt von dem Modul C4 mit ca. 21 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. (Anteil von 5,51%). Das Modul D würde eine Absenkung des resultierenden GWPs aus den vorherigen Modulen um knapp 57 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. bzw. um 15,06% verursachen. Die Größenordnung des Moduls D liegt im Bereich des Moduls C3, womit sie sich in der Gesamtverrechnung beinahe vollständig aufheben würden.

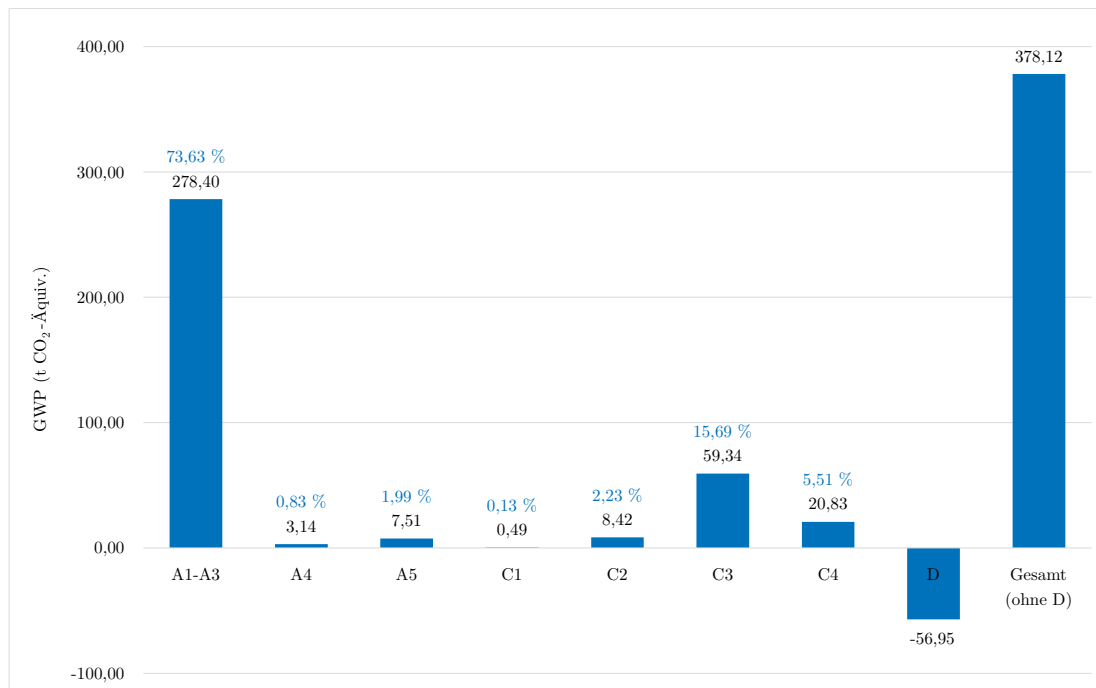


Abbildung 7: Wirkungsabschätzung des kalten Nahwärmenetzes anhand der Lebenszyklusmodule

## 5 Auswertung der Ergebnisse

Gemäß DIN EN ISO 14040 und 14044 umfasst die Auswertungsphase einer Ökobilanz die Identifizierung signifikanter Parameter, die Beurteilung der Ergebnisse aus der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung sowie die Aufführung von Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen.

### 5.1 Identifizierung signifikanter Parameter

Aus der Wirkungsabschätzung geht hervor, dass keines der definierten Subsysteme für die Umweltwirkung des Gesamtsystems vernachlässigbar ist. Zwar dominiert das Subsystem „Gebäudekomponenten“ mit einem Anteil von über 60 % am GWP des gesamten KNWN. Jedoch tragen sowohl das Verteilungsnetz als auch das Erdsondenfeld ebenfalls bedeutend zum Gesamt-GWP bei.

Das untersuchte Heizsystem wird hinsichtlich des GWPs signifikant von der Anlagentechnik in den Haushalten geprägt. Über die Hälfte des resultierenden GWPs ist allein auf die Anlagentechnik zurückzuführen. In erster Linie handelt es sich dabei um die Wärmepumpen, die mit einem Anteil von ca. 45 % am Gesamt-GWP sehr hohe Einzelbeiträge leisten. Bemerkenswert ist, dass dieser Anteil auch unter Berücksichtigung der Nettovorteile aus Recyclingprozessen ähnlich hoch ausfallen würde. Die Berücksichtigung von Nettovorteilen aus dem Recycling würde das GWP der Wärmepumpen um 11,43 % reduzieren.

Weiterhin hat sich eine starke Dominanz der Herstellungsphase bzw. der Lebenszyklusmodule A1-A3 gezeigt. Somit können die Wärmeerzeuger in den Haushalten und insbesondere ihre Herstellung als signifi-

kante Parameter festgehalten werden.

Von besonderer Relevanz ist, dass jeder Haushalt mit je einem Wärmeerzeuger ausgestattet ist. Daher steigen die entsprechenden Umweltbelastungen proportional zu der Anzahl an Haushalten an. Dies ist von hoher Wichtigkeit, da es sich bei dem Heizsystem um eine kollektive Form der Wärmeversorgung handelt. Das Erdsondenfeld und das Verteilungsnetz, welche von den Endkunden geteilt werden, sind zwar nicht vernachlässigbar, doch wird die Umweltbelastung des KNWN erheblich von der Anzahl der angeschlossenen Haushalte und somit von den Komponenten, die nicht geteilt werden, bestimmt.

Ferner ist auch die Bedeutung der Austausch hervorzuheben. Für das KNWN resultieren mindestens ein Drittel der Umweltbelastungen aus den Austauschprodukten. Dabei ist hervorzuheben, dass die Wärmepumpen mit 20 Jahren verglichen zu den anderen Komponenten geringe Lebensdauern aufweisen. Dies ist für das KNWN von hoher Relevanz, da für die Mehrheit der Systemkomponenten, die von den Endkunden geteilt werden, 100-jährige Nutzungsdauern angegeben werden (Erdwärmesonden, Rohrleitungen). Demnach beeinflusst neben der Anzahl der angeschlossenen Haushalte auch die Anzahl an notwendigen Austauschmaßnahmen das Umweltprofil des KNWN erheblich. Folglich stellt die Lebensdauer der Wärmepumpen in den Haushalten einen weiteren signifikanten Parameter für das KNWN dar.

### 5.2 Beurteilung der Ökobilanzergebnisse

Zur Beurteilung der Aussagekraft der Ökobilanzergebnisse erfolgt eine Prüfung der Vollständigkeit, Sensitivität und Konsistenz.

Das KNWN wurde hinsichtlich der Zieldefinition und der festgelegten Systemgrenzen vollständig erfasst. Es wurden keine bekannten Energie- und Stoffströme, für die relevante Umweltwirkungen zu erwarten sind, vernachlässigt.

Im Rahmen der Sensitivitätsprüfung wurden zunächst jene Daten gefiltert, die Unsicherheiten aufweisen. In dieser Prüfung werden Sachbilanzdaten als unsicher angenommen, wenn sie aus Schätzungen hervorgingen. Datensätze zu der Umweltwirkung von Produkten werden als unsicher eingestuft, wenn sie veraltet sind oder die Vergleichbarkeit mit den tatsächlich eingesetzten Produkten nicht hinreichend beurteilt werden kann. Die unsicheren Daten wurden anschließend variiert, um deren Einfluss auf das Endergebnis der jeweiligen Ökobilanz zu beurteilen. Folgende Daten des KNWN wurden auf ihre Sensitivität untersucht:

- **Spülungszusatz:** Die Aufnahme des Spülungszusatzes wurde als unsicher eingestuft, da aufgrund fehlender Daten zur Umweltwirkung des CMC-Produktes das alternative Produkt Bentonit angesetzt wurde. Gleichzeitig konnte für Bentonit lediglich ein veralteter Datensatz für die Umweltwirkung erhoben werden. An dieser Stelle wurde der Einfluss des Produktausschlusses geprüft. Dieser hätte mit einer Minderung des Endergebnisses von 0,02% keine relevante Bedeutung für das KNWN.
- **Verpressbaustoff:** Zur Einschätzung der Umweltwirkung des Verpressbaustoffs wurde in der ÖKOBAUDAT der naheliegendste Datensatz „Kalkzementmörtel“ gewählt. Jedoch enthält die EPD keine Angaben zur Zusammensetzung des zugrundeliegenden Produktes, weshalb die Vergleichbarkeit mit dem tatsächlich verwendeten Produkt nicht hinreichend beurteilt werden kann. Ein 50-prozentiger Aufschlag zum Volumen des Verpressbaustoffs erhöht das Gesamt-GWP des Systems um 0,78%. Der Unterschied hat ebenfalls eine minimale Ergebnisrelevanz.
- **Verteilerschächte:** Weiterhin wurden aufgrund der Notwendigkeit von Materialschätzungen die Verteilerschächte als unsicher eingestuft. Ferner besteht eine Unsicherheit hinsichtlich der angenommenen Lebensdauer der Verteilerschächte. Durch die getroffene Annahme bestand keine Notwendigkeit, das Produkt auszutauschen. Würden die Verteilerschächte (Gehäuse und Einbauten) während der 50-jährigen Nutzungsdauer des KNWN zumindest einmal ausgetauscht werden, wäre mit einer 3,18-prozentigen Erhöhung des Endergebnisses der Einfluss gering. Da die Schätzungen und Annahmen für die Verteilerschächte keine hohe Signifikanz haben, brauchen diese Daten laut Frischknecht [24, S. 39] nicht weiter ver-

feinert werden.

Zur abschließenden Beurteilung des Einflusses der im vorherigen Abschnitt herausgearbeiteten signifikanten Parameter werden auch diese nachfolgend variiert. Es ging hervor, dass die Anzahl der Haushalte sowie die Herstellung und Lebensdauer der Wärmepumpen in den Haushalten von entscheidender Bedeutung für das Umweltprofil des KNWN sind. Daher wird zur Prüfung der Sensitivität die Anzahl der Wärmepumpen für das KNWN über ihre Lebensdauer variiert. Die aus der ÖKOBAUDAT entnommene Lebensdauer von 20 Jahren resultiert in zwei Austauschmaßnahmen während einer 50-jährigen Nutzung des KNWN. Eine Erhöhung der Lebensdauer auf 25 Jahre bewirkt nicht nur, dass die Wärmepumpen lediglich einmal ausgetauscht werden müssen, sondern auch, dass die Lebensdauern der Austauschprodukte zum Zeitpunkt der Abfallbehandlung des Gesamtsystems voll ausgeschöpft werden. Diese Variation führt zu einer Reduktion des Endergebnisses um ca. 56 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. bzw. um 14,83%.

Einen gegenteiligen Effekt hat die Verkürzung der Nutzungsdauer der Wärmepumpen. Die mögliche Nutzungsdauer von Bauteilen wird von den Endkunden teilweise nicht voll ausgeschöpft, weil sie ihren Ansprüchen nicht mehr genügen oder sie mit anderen Bauteilen ausgetauscht werden [35, S. 85]. Werden die Wärmepumpen 15 statt der in der Ökobilanz angesetzten 20 Jahre genutzt, müssten sie während der 50-jährigen Nutzung des KNWN einmal mehr ausgetauscht werden. Die oben aufgeführten 56 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. würden das KNWN in diesem Fall zusätzlich hinsichtlich der Umweltwirkung belasten.

Eine Variation der Lebensdauer der Wärmepumpen von fünf Jahren resultiert demnach in eine fast 15-prozentige Änderung des resultierenden GWPs. In beiden Fällen, ob Reduktion oder Erhöhung, wird die Änderung des Endergebnisses als signifikant angesehen. Dies hebt die Bedeutung der Wärmepumpen sowie ihrer Nutzungsdauer für das Umweltprofil des KNWN. Im Rahmen der Konsistenzprüfung konnten keine Mängel festgestellt werden. Alle getroffenen Annahmen, Systemgrenzen und Datenanforderungen wurden einheitlich angewendet.

Insgesamt haben die Prüfungen ergeben, dass die Ökobilanzergebnisse hinreichend belastbar sind. Jene Daten, die Unsicherheiten bezüglich der Repräsentativität und der Präzision aufweisen, beeinflussen die Endergebnisse nur minimal. Die Daten und folglich die Ökobilanzergebnisse repräsentieren somit die Gegebenheiten des Heizsystems in Schifferstadt angemessen.

### 5.3 Diskussion

Das Ergebnis dieser Ökobilanz muss vor dem Hintergrund der Methode und ihrer Ausführung bewertet werden. Im Folgenden werden die Eigenschaften der Ökobilanzierung und dieser Ökobilanz, welche das Er-

gebnis in seiner Aussagekraft limitieren, diskutiert. Die Diskussion soll die von der DIN EN ISO 14040/44 geforderten Einschränkungen der Studie liefern.

Das berechnete Treibhauspotential hängt stark von der Zielsetzung und dem gewählten Untersuchungsrahmen der Studie ab. Die Nutzung des KNWN wurde in dieser Veröffentlichung nicht behandelt. Energiesysteme wirken sich während der Nutzung aber i.d.R. am stärksten auf das Klima aus [11; 12; 8; 9]. Die Untersuchung von Errichtung und Entsorgung des Netzes hat also keine Aussagekraft über die Klimawirkung des Gesamtsystems. Die gewählte Lebensdauer des Netzes von 50 Jahren ist in der Literatur üblich, allerdings nicht realistisch. Für KNWN ist, abgeleitet von der Langlebigkeit der Leitungen (vgl. Tabelle 10), eine deutlich längere Nutzung zu erwarten. Dies führt zu häufigeren Austauschen über den Lebensweg und einer signifikanteren Nutzungsphase.

Die Sachbilanz wurde nicht herstellungsbegleitend aufgestellt und weist inhärent Unsicherheiten hinsichtlich Vollständigkeit und Genauigkeiten auf. Diese lassen sich nicht abschätzen, da vergleichbare Studien fehlen und die angesetzten Mengen nicht überprüft werden können. Durch die akribische Auswertung der verfügbaren Informationen kann aber erwartet werden, dass der Fehler gering ausfällt. Einige Vereinfachungen, die für das Netz getroffen wurden, lassen sich dennoch festhalten. So wurden nur verbaute Materialien in Betracht gezogen. Materialien, die genutzt, aber nicht verbaut wurden, wie bspw. Reststücke von Leitungen, wurden nicht berücksichtigt. Formteile, wie Verbindungsstücke zwischen den Rohren, Revisionsschächte und Abzweigungen wurden vereinfacht als Rohre modelliert. Diese Annahmen machen das Ergebnis ungenauer, sind vor dem Hintergrund der großen Klimawirkung der Anlagentechnik in den Häusern allerdings von untergeordneter Bedeutung. Folglich ist die Austauschzeit der Wärmepumpen, wie im vorherigen Unterkapitel gezeigt, eine besonders ergebnissensitive Eingangsgröße. Die angesetzten 20 Jahre sind ein gängiger Literaturwert. Dieser entspringt allerdings, nach Kenntnisstand der AutorInnen, aus Normen zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Anlagen [36] und wurde entsprechend nach u.U. unpassenden Kriterien festgelegt. Da Wärmepumpen eine Entwicklungstechnologie mit wachsendem Markt sind [37], lassen sich allerdings schwer bessere Schätzungen tätigen. Bei KNWN ist außerdem die Lebensphase der Entsorgung schwer einzuschätzen. Es gibt wenige Beispiele für zurückgebaute Nahwärmnetze und i.d.R. verbleiben Teile der Anlagen im Boden oder werden umgenutzt. Für die Abschätzung der Wirkung auf den Klimawandel wurde GWP100 nach den Berechnungsregeln des Intergovernmental Panel on Climate Change 1995 [38] als Indikator genutzt. Dieser ist im Gebäudebereich üblich, da er in den Umweltproduktdeklarationen für Bauprodukte angegeben wird [20]. Der Indikator steht

aber auch in der Kritik, da er die zeitliche Verteilung der Emissionen nicht abbildet (bspw. [39], [40]). So werden die Emissionen so berücksichtigt, als würden sie zeitgleich ausgestoßen. Die zeitliche Verteilung wird nicht berücksichtigt, obwohl sie einen Einfluss auf die globale Erwärmung hat [41]. Das GWP100 drückt die Änderung des Strahlungsantriebs über 100 Jahre aus. Dieser Zeitraum steht nach Auffassung einiger Autoren im Konflikt mit der Dringlichkeit des Problems, sowie politischen Zielen, die i.d.R. einen kürzeren Zeithorizont haben [42]. Für die Nutzung alternativer, dynamischer Umweltindikatoren, wie jener von Kendall [41] oder Levaseur [40], sind allerdings detaillierte Informationen zu Herstellungs- und Entsorgungsprozessen notwendig, die in dieser Form für das KNWN in Schifferstadt nicht vorliegen. Die Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre steht darüber hinaus in keinem linearen Zusammenhang mit dem globalen Temperaturanstieg. Bei Überschreiten bestimmter Temperaturen kommt es zu selbstverstärkenden Vorgängen. Die Temperaturen steigen weiter, selbst wenn keine anthropogenen Treibhausgase mehr verursacht werden [43, S. 8]. Eine weitere Fehlerquelle liegt in der Nutzung von EPD. Diese sind nur eine Schätzung der tatsächlichen Wirkung der einzelnen Produkte. In den meisten Fällen sind sie generisch und entsprechend mit einem Sicherheitszuschlag zwischen 10 und 30 Prozent versehen [21].

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Mit der vorliegenden Arbeit wurde das Ziel verfolgt, die Auswirkung des KNWN in Schifferstadt auf den Treibhauseffekt über eine 50-jährige Nutzungsdauer aufzuzeigen. Die Untersuchung der potenziellen Umweltwirkungen des Heizsystems erfolgte mittels der Methode der Ökobilanzierung gemäß DIN EN ISO 14040 und 14044. Die Ergebnisse der darin aufgeführten vier Phasen einer Ökobilanz werden mit den nachfolgenden Schlussfolgerungen und Empfehlungen vollständig dargelegt.

Die funktionelle Einheit ist die Quartiersinfrastruktur zur Bereitstellung des erforderlichen Wärmebedarfs im Projektquartier. Unter Berücksichtigung der Herstellungs-, Errichtungs- und Entsorgungsphase ergibt sich für das KNWN ein GWP von 378,12 t CO<sub>2</sub>-Äquiv. Unter der zusätzlichen Berücksichtigung des Recyclings aller Baukomponenten ergeben sich Netto-vorteile in Höhe von 56,95 t CO<sub>2</sub>-Äquiv.

Welche potenziellen Umweltauswirkungen das KNWN in Schifferstadt hat, konnte in dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden. Eine Reihe von vorherigen Ökobilanzstudien kommt zu dem Schluss, dass die Umweltbelastungen von Heizsystemen hauptsächlich auf deren Betrieb zurückzuführen sind, welcher aufgrund von mangelnden Daten in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt wurde. Für eine abschließende Beurteilung der Umweltwirkung des KNWN in Schifferstadt ist der vorliegenden Arbeit daher bei

ausreichender Datenverfügbarkeit die Nutzungsphase des Heizsystems zu ergänzen. Aufgrund des CO<sub>2</sub>-freien Stromeinsatzes für den Betrieb der Anlagentechnik in Schifferstadt ist der Ökobilanz des KNWN lediglich die Umweltwirkung des Ethylenglykols im Wärmeträgermedium zu ergänzen. Zudem sollten in weiterführenden Untersuchungen die Auswirkungen der Kühlfunktion des KNWN auf den Treibhauseffekt geprüft werden.

Die Ökobilanzergebnisse der vorliegenden Arbeit lassen trotz aller Annahmen und Einschränkungen eine Einschätzung zu, welche Subsysteme und Komponenten der Quartiersinfrastruktur sowie Prozesse die Haupteinflussquellen auf das GWP des KNWN darstellen.

Die Anteile der definierten Subsysteme „Erdsondenfeld“ (19,66 %), „Verteilungsnetz“ (16,60 %) und „Gebäudekomponenten“ (63,74 %) am GWP des KNWN sind alle von Relevanz. Maßgebend beeinflusst wird die Umweltwirkung von der Anlagentechnik (Wärmeerzeuger und Pufferspeicher) in den Haushalten. Insbesondere die Wärmepumpen liefern mit einem Anteil von 44,50 % am GWP des Gesamtsystems vergleichsweise hohe Einzelbeiträge zur Umweltbelastung des KNWN. Somit wird die Umweltwirkung des Gesamtsystems maßgeblich von einem Produkt bestimmt.

Die Dominanz der Wärmepumpen lässt sich unter anderem auf ihre Lebensdauer zurückführen. Verglichen mit den Komponenten des Erdsondenfeldes und des Verteilungsnetzes, die 100-jährige Lebensdauern verzeichnen, weisen sowohl die Wärmepumpen als auch die Pufferspeicher mit 20 Jahren deutlich kürzere Lebensdauern auf. Weitere Faktoren, die für den Einfluss der Wärmepumpen auf die Umweltwirkung des KNWN von Bedeutung sind, stellen ihre Herstellung sowie die Anzahl der zu versorgenden Haushalte dar. Letzteres ist hinsichtlich einer zukünftigen Erweiterung des KNWN in Schifferstadt von Relevanz.

Aufgrund der Signifikanz der Wärmepumpen in Kombination mit den Unsicherheiten der Methodik der Ökobilanzierung sollte der Einfluss der Wärmepumpen in weiterführenden Forschungen untersucht werden. Diese sollten insbesondere die Lebensdauer der Wärmepumpen enthalten, da sie die Anzahl der benötigten Produkte neben der Anzahl angeschlossener Haushalte an das KNWN maßgeblich beeinflussen. Zudem hat die Sensitivitätsanalyse hervorgebracht, dass bereits ein Unterschied von fünf Jahren in der Nutzungsdauer der Wärmepumpen zu einer ca. 15 prozentigen Änderung des Endergebnisses führt.

Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass einzelne Lebenszyklusmodule wie A4 „Transport“, A5 „Einbau“ und C2 „Transport“ einen vergleichsweise unbedeutenden Einfluss auf das Endergebnis haben. Von hoher Relevanz sind dagegen die möglichen Nettovorteile aus dem Recycling der Baukomponenten, die das resultierende GWP des KNWN aus allen an-

deren untersuchten Modulen um ca. 15 % reduzieren würde. Inwiefern Baukomponenten des Nahwärmenetzes zurückgebaut und anschließend recycelt werden können, sollte ebenfalls weiter untersucht und in den Ökobilanzberechnungen berücksichtigt werden.

Für eine umfassende Beurteilung im Sinne des Nachhaltigkeitsgedanken sind künftige Untersuchungen des KNWN hinsichtlich der Wirkung in weiteren Umweltkategorien sowie Untersuchungen aus sozialen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten notwendig.

## Danksagungen

Die AutorInnen bedanken sich bei den Stadtwerken Schifferstadt und insbesondere Herrn Baumann für ihre Unterstützung bei der Erstellung dieser Ökobilanz. Zudem gilt unser Dank dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz für die finanzielle Förderung des Forschungsprojekts GeoWärmeWende<sup>3</sup> (Projektkennziffer 03EN3059), in welchem diese Ökobilanz erstellt wurde.

## Literatur

- [1] UMWELTBUNDESAMT: *Klimarahmenkonvention*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/klimarahmenkonvention>. Version: 2022
- [2] EUROPEAN COMMISSION: *European Green Deal: EU agrees stronger rules to boost energy efficiency*. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_23\\_1581](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_1581). Version: 2023
- [3] EUROPEAN COMMISSION: *Nearly zero-energy buildings*. [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en). Version: 2023
- [4] UMWELTBUNDESAMT: *Energieverbrauch privater Haushalte*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/energieverbrauch-privater-haushalte#endenergieverbrauch-der-privaten-haushalte>. Version: 2020
- [5] STADTWERKE SCHIFFERSTADT: *"Kalte Nahwärme" in Schifferstadt: Umsetzung der Wärmeversorgung in einem Neubaugebiet-Praxisbericht*. [https://www.gruene-mutterstadt.de/WordPress/wordpress/wp-content/uploads/2021-11-10\\_KNW-Schifferstadt\\_Praxis\\_Gutes-Leben-Mutterstadt\\_101121-1.pdf](https://www.gruene-mutterstadt.de/WordPress/wordpress/wp-content/uploads/2021-11-10_KNW-Schifferstadt_Praxis_Gutes-Leben-Mutterstadt_101121-1.pdf). Version: 2021
- [6] HAGELAUER + SCHEUERER GEOCONSULT GMBH: *Abschlussdokumentation: Projekt: Geothermische Nahwärmeversorgungsanlage Max-Ernst-Straße, 67105 Schifferstadt – Abschlussdokumentation*. 2016

<sup>3</sup><https://www.geowaermewende.de/>

- [7] GB-VERMESSUNG INGENIEURBÜRO: *Bestandsplan Nahewärme*. 2016
- [8] MAHON, Conall ; MEDIBOYINA, Maneesh K. ; GARTLAND, Donna ; MURPHY, Fionnuala: Life cycle assessment of Irish district heating systems: a comparison of waste heat pump, biomass-based and conventional gas boiler. In: *Clean Technologies and Environmental Policy* 24 (2022), Nr. 5, 1437–1451.  
doi: 10.1007/s10098-021-02257-y. – ISSN: 1618–954X
- [9] JEANDAUX, Camille ; VIDEAU, Jean-Baptiste ; PRIEUR-VERNAT, Anne: Life Cycle Assessment of District Heating Systems in Europe: Case Study and Recommendations. In: *Sustainability* 13 (2021), Nr. 20, S. 11256.  
doi: 10.3390/su132011256
- [10] FAMIGLIETTI, Jacopo ; GEREVINI, Luisa ; SPIRITO, Giulia ; POZZI, Marianna ; DÉNARIÉ, Alice ; SCOCCIA, Rossano ; MOTTA, Mario: Environmental Life Cycle Assessment scenarios for a district heating network. An Italian case study. In: *Energy Reports* 7 (2021), S. 368–379.  
doi: 10.1016/j.egy.2021.08.094. – ISSN: 23524847
- [11] DIAZ, Fabian ; PAKERE, Ieva ; ROMAGNOLI, Francesco: Life Cycle Assessment of Low Temperature District Heating System in Gulbene Region. In: *Environmental and Climate Technologies* 24 (2020), Nr. 2, S. 285–299.  
doi: 10.2478/rtuct-2020-0073
- [12] FEOFILOVS, Maksims ; PAKERE, Ieva ; ROMAGNOLI, Francesco: Life Cycle Assessment of Different Low-Temperature District Heating Development Scenarios: A Case Study of Municipality in Latvia. In: *Environmental and Climate Technologies* 23 (2019), Nr. 2, S. 272–290.  
doi: 10.2478/rtuct-2019-0068
- [13] OLIVER-SOLÀ, Jordi ; GABARRELL, Xavier ; RIERADEVALL, Joan: Environmental impacts of the infrastructure for district heating in urban neighbourhoods. In: *Energy Policy* 37 (2009), Nr. 11, S. 4711–4719.  
doi: 10.1016/j.enpol.2009.06.025. – ISSN: 03014215
- [14] DOUZIECH, Mélanie ; TOSTI, Lorenzo ; FERRARA, Nicola ; PARISI, Maria L. ; PÉREZ-LÓPEZ, Paula ; RAVIER, Guillaume: Applying Harmonised Geothermal Life Cycle Assessment Guidelines to the Rittershoffen Geothermal Heat Plant. In: *Energy* 14 (2021), Nr. 13, S. 3820.  
doi: 10.3390/en14133820
- [15] PRATIWI, Astu S. ; TRUTNEVYTE, Evelina: Life cycle assessment of shallow to medium-depth geothermal heating and cooling networks in the State of Geneva. In: *Geothermics* 90 (2021), S. 101988.  
doi: 10.1016/j.geothermics.2020.101988. – ISSN: 03756505
- [16] BARTOLOZZI, Irene ; RIZZI, Francesco ; FREY, Marco: Are district heating systems and renewable energy sources always an environmental win-win solution? A life cycle assessment case study in Tuscany, Italy. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80 (2017), S. 408–420.  
doi: 10.1016/j.rser.2017.05.231. – ISSN: 13640321
- [17] KARLSDÓTTIR, Marta ; FERACOR, James ; PÁLSSON, Halldór ; PALSSON, Olafur: GEOTHERMAL DISTRICT HEATING SYSTEM IN ICELAND: A LIFE CYCLE PERSPECTIVE WITH FOCUS ON PRIMARY ENERGY EFFICIENCY AND CO2 EMISSIONS. (2014)
- [18] CHIAVETTA, Cristian ; TINTI, Francesco ; BONOLI, Alessandra: Comparative life cycle assessment of renewable energy systems for heating and cooling. In: *Procedia Engineering* 21 (2011), S. 591–597.  
doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.2054. – ISSN: 18777058
- [19] DIN: *DIN EN 15978: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden -Berechnungsmethode*. Berlin, 2012
- [20] DIN: *DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen -Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*. Berlin, 2022
- [21] BMWSB: *ÖKOBAUDAT: Informationsportal Nachhaltiges Bauen*. <https://www.oekobaudat.de/>. Version: o. J.
- [22] KLÖPFFER, Walter ; GRAHL, Birgit: *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim : WILEY-VCH, 2007. ISBN: 978–3–527–32043–1
- [23] GERVÁSIO, Helena ; DIMOVA, Silvia: *Model for life cycle assessment (LCA) of buildings: EFIREsources: resource efficient construction towards sustainable design*. Version: 2018 (JRC technical reports)
- [24] FRISCHKNECHT, Rolf: *Lehrbuch der Ökobilanzierung*. Berlin and Heidelberg : Springer Spektrum, 2020 (Lehrbuch).  
doi: 10.1007/978-3-662-54763-2. ISBN: 978–3–662–54762–5
- [25] GRZEBIELA, Robert: *Das Einbringen von Erdsonden zur Nutzung der Erdwärme als Unternehmensmodell in der Baubranche*. Hamburg : Diplomica-Verl., 2008. ISBN: 9783836666084

- [26] AMELUNG, Wulf ; BLUME, Hans-Peter ; FLEI-GE, Heinrich ; HORN, Rainer ; KANDELER, Ellen ; KÖGEL-KNABNER, Ingrid ; KRETZSCHMAR, Ruben ; STAHR, Karl ; WILKE, Berndt-Michael: *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde*. 17., überarbeitete und ergänzte Auflage. Berlin : Springer Spektrum, 2018 (Lehrbuch). doi: 10.1007/978-3-662-55871-3. ISBN: 978-3-662-55870-6
- [27] MEKUN: *Hinweise zur Entsorgung von Bohrgut: (Stand: 03.06.2019)*. [https://www.kreis-oh.de/media/custom/2454\\_1670\\_1.PDF?1562242610#:~:text=Bohrsp%C3%BClung%2C%20die%20nicht%20diesen%20Anforderun,aus%2D%20reichend%20bemessenen%20Auffangvorrichtung%20aufzufangen.](https://www.kreis-oh.de/media/custom/2454_1670_1.PDF?1562242610#:~:text=Bohrsp%C3%BClung%2C%20die%20nicht%20diesen%20Anforderun,aus%2D%20reichend%20bemessenen%20Auffangvorrichtung%20aufzufangen.) Version: 2019
- [28] SPIRINCKX, CAROLIN AND VANDERREYDT, IVE AND VERCALSTEREN, AN AND BOONEN, KATRIEN : *Ökobilanz (Life Cycle Assessment) eines PE Rohrsystems für die Trinkwasserversorgung nach EN 12201*. [https://www.krv.de/system/files/joomla/PE\\_Third\\_Party\\_Report\\_DE\\_Vers.1.pdf](https://www.krv.de/system/files/joomla/PE_Third_Party_Report_DE_Vers.1.pdf). Version: 2011
- [29] BOMAG GMBH: *REVERSIERBARE VIBRATIONSPLETTEN BPR 70/70 D, BPR 100/80 D*. [https://www.bomag.com/dam/BOMAG/Other/Data\\_Sheets/Data\\_Sheets\\_D/Datasheet\\_BPR7070D\\_BPR10080D\\_PRD69264010\\_SA03.pdf](https://www.bomag.com/dam/BOMAG/Other/Data_Sheets/Data_Sheets_D/Datasheet_BPR7070D_BPR10080D_PRD69264010_SA03.pdf). Version: o. J.
- [30] KRAUSE, Thomas (Hrsg.) ; ULKE, Bernd (Hrsg.): *Zahlentafeln für den Baubetrieb*. 9., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2016. doi: 10.1007/978-3-658-02838-1. ISBN: 978-3-658-02837-4
- [31] BBSR: *Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)*. [https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff\\_gebauededaten/BNB\\_Nutzungsdauern\\_von\\_Bauteilen\\_2017-02-24.pdf](https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/baustoff_gebauededaten/BNB_Nutzungsdauern_von_Bauteilen_2017-02-24.pdf). Version: 2017
- [32] BUNDESVERBAND WÄRMEPUMPE E.V.: *Leitfaden Erdwärme: Grundlagenwissen und Praxistipps*. [https://www.waermepumpe.de/uploads/tx\\_bcpagelip/Leitfaden\\_Erdwaerme\\_2018\\_Web.pdf](https://www.waermepumpe.de/uploads/tx_bcpagelip/Leitfaden_Erdwaerme_2018_Web.pdf). Version: 2018
- [33] VDI: *VDI 4640 Blatt 2: Thermische Nutzung des Untergrunds: Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen*. Berlin, 2019
- [34] HESSEL, Joachim: 100 Jahre Nutzungsdauer von Rohren aus Polyethylen. In: *3R international* 46 (2007), 242–246
- [35] KÖNIG, Holger ; KOHLER, Niklaus ; KREISSIG, Johannes ; LÜTZKENDORF, Thomas: *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung: Grundlagen, Berechnung, Planungswerkzeuge*. 1. Aufl. München : Inst. für Int. Architektur-Dokumentation Ed. Detail, 2009 (Edition Detail Green Books). ISBN: 978-3-920034-30-0
- [36] VDI: *VDI 2067 Blatt 1: Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen: Grundlagen und Kostenberechnung*. Berlin, 2012
- [37] BUNDESAMT, Statistisches: *Vierteljährliche Produktionserhebung im Bereich Verarbeitendes Gewerbe, Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden*. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online?operation=statistic&levelindex=&levelid=&code=42131&option=variable&info=off#abreadcrumb>
- [38] CLIMATE CHANGE, Intergovernmental P.: *Climate change 1995: the science of climate change*. Cambridge university press. ISBN: 978-0-521-56433-5
- [39] KENDALL, Alissa ; CHANG, Brenda ; SHARPE, Benjamin: Accounting for Time-Dependent Effects in Biofuel Life Cycle Greenhouse Gas Emissions Calculations. 43, Nr. 18, 7142–7147. doi: 10.1021/es900529u. – ISSN: 0013-936X, 1520-5851
- [40] LEVASSEUR, Annie ; LESAGE, Pascal ; MARGNI, Manuele ; DESCHÊNES, Louise ; SAMSON, Réjean: Considering Time in LCA: Dynamic LCA and Its Application to Global Warming Impact Assessments. 44, Nr. 8, 3169–3174. doi: 10.1021/es9030003. – ISSN: 0013-936X, 1520-5851
- [41] KENDALL, Alissa: Time-adjusted global warming potentials for LCA and carbon footprints. 17, Nr. 8, 1042–1049. doi: 10.1007/s11367-012-0436-5. – ISSN: 0948-3349, 1614-7502
- [42] LUEDDECKENS, Stefan ; SALING, Peter ; GUENTHER, Edeltraud: Temporal issues in life cycle assessment—a systematic review. 25, Nr. 8, 1385–1401. doi: 10.1007/s11367-020-01757-1. – ISSN: 0948-3349, 1614-7502
- [43] TRAYDL-HOFFMANN, Claudia (Hrsg.) ; SCHULZ, Christian M. (Hrsg.) ; HERRMANN, Martin (Hrsg.) ; SIMON, Babette (Hrsg.) ; BAUER, Johannes M. (Hrsg.): *Planetary Health: Klima, Umwelt und Gesundheit im Anthropozän*. Berlin : Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 2021. ISBN: 978-3-95466-673-7

- [44] BMDV: *Verkehr in Zahlen 2022/2023: 51. Jahrgang.* [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2022-2023-pdf.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2022-2023-pdf.pdf?__blob=publicationFile). Version: 2022
- [45] HÜTTE BOHRTECHNIK GMBH: *HBR 205 GT: Bohrerät für Geothermische Bohrungen.* <https://enco-bohrtechnik.de/wp-content/uploads/2021/03/HBR205GT1.pdf>. Version: 2016
- [46] GERD BAUMANN ; EDONITA MAXHARRAJ (Hrsg.): *Kaltes Nahwärmenetz in Schifferstadt: Telefongespräch.* 25.01.2023
- [47] DIN: *DIN EN 590: Kraftstoffe -Dieselkraftstoff-Anforderungen und Prüfverfahren.* Berlin, 2022
- [48] GERD BAUMANN ; EDONITA MAXHARRAJ (Hrsg.): *Kaltes Nahwärmenetz in Schifferstadt: E-Mail.* 23.02.2023
- [49] STÜWA KONRAD STÜKERJÜRGEN GMBH: *Aktivbentonit IBECO S.* <https://www.stuewa.de/de/produkte/bohrspuelungsmittel/bohrspuelungsmittel/aktivbentonit-ibeco-s>. Version: o. J.
- [50] FRANK GMBH: *Energie aus Erdreich, Abwasser und Gewässern: FRANK GET-System.* [https://www.frank-gmbh.de/de-wAssets/docs/download-deutsch/geothermie/uebersicht\\_geothermie\\_deutsch\\_e\\_mail.pdf](https://www.frank-gmbh.de/de-wAssets/docs/download-deutsch/geothermie/uebersicht_geothermie_deutsch_e_mail.pdf). Version: o. J.
- [51] SOILUTION GMBH ; EDONITA MAXHARRAJ (Hrsg.): *Zusammensetzung des Produktes Soilt-hermflow K: E-Mail.* 18.01.2023
- [52] GERTEC MASCHINEN- UND ANLAGENBAU GMBH: *Produktinformation Injektionsstation IS-35-E.* 2022
- [53] FRANK GMBH: *FRANK Verteilerschächte auf einem Blick.* <https://www.frank-gmbh.de/de/produkte/geothermie/verteilerschaechte.php>. Version: o. J.
- [54] CALEFFI HYDRONIC SOLUTIONS: *Mikroblasenabscheider 3/4" - 2".* <https://www.caleffi.com/germany/de/catalogue/discalr-mikroblasenabscheider-34-2-551005>. Version: o. J.
- [55] BAUFORMEL VERLAG GMBH: *Umrechnung von Schüttgütern.* <https://www.bauformeln.de/baubetrieb/aufmass-und-abrechnung/umrechnung-von-schuetttguetern/>. Version: 2019
- [56] UMWELTBUNDESAMT: *Prozessdetails: Bentonit.* <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/prozessdetails.php?id=%7B8134CC95-DA9F-4670-BB70-BB2A0A04C6E4%7D>. Version: o. J.

# Appendix

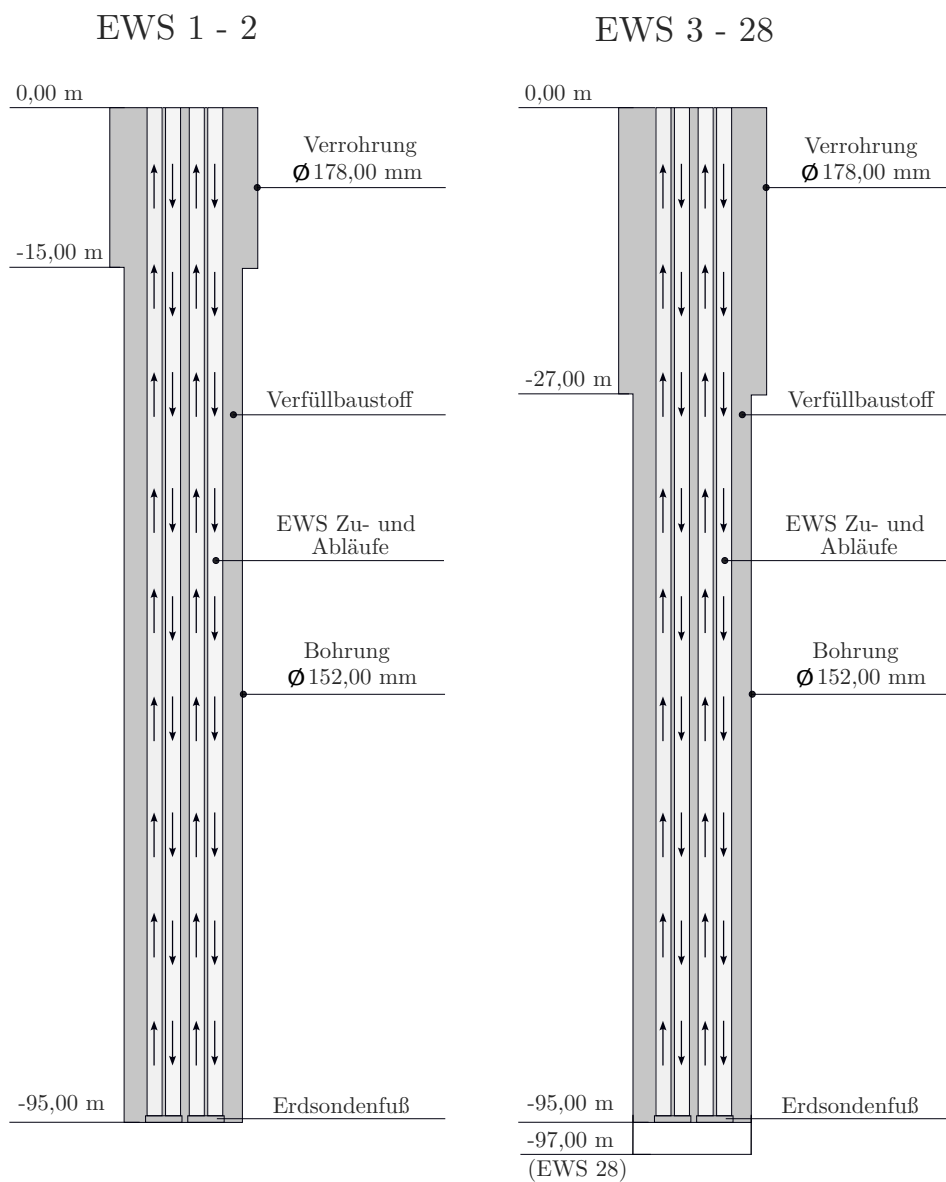


Abbildung 8: Bohrprofile und Erdwärmesonden in Schifferstadt (Eigene Darstellung nach [6])

*Tabelle 11: Sachbilanz: Transportstrecken für das KNWN*

<b>Produkt</b>	<b>Hersteller/Lieferant</b>	<b>Entfernung zum Projektquartier</b>
Bohrmaschine	Bohrunternehmen Geowell Erdwärme GmbH & Co. [6] Richtbergstraße 5 97493 Bergheinfeld	ca. 210 km
StüwaFlow	STÜWA Konrad Stükerjürgen GmbH [6] Außenlager: Klein Nidesheimer Str. 34 67240 Bobenheim – Roxheim	ca. 30 km
Entsorgung Aushub	entfällt	77 km [44, S. 265]
Erdwärmesonden Einbringgewichte Injektionsrohr Rohrleitungen Verteilerschächte	FRANK GmbH [6] Abholungen & Lieferungen 61200 Wölfersheim	ca. 160 km
Verfüllbaustoff	Soilution GmbH [6] Burgstraße 30 59423 Unna	ca. 340 km
Mischanlage	GERTEC Maschinen- und Anlagenbau GmbH [6] Gewerbepark 3 87477 Sulzberg	ca. 313 km
Sand	Erdbau Hauck GmbH & Co. KG [6] Rudolf-Diesel-Str. 2 67105 Schifferstadt	ca. 4 km
Wärmepumpen Pufferspeicher	WATERKOTTE GmbH [7] Gewerkenstr. 15 44628 Herne	ca. 350 km
Sonstige Maschinen und Ausrüstung	entfällt	160 km [44, S. 265]

Tabelle 12: Sachbilanz: Daten und Mengenberechnungen für das KNWN in Schifferstadt

Produkt/ Prozess	Daten [Quelle]	Berechnungen
<b>Erdsondenfeld</b>		
<b>Bohrarbeiten (Erdsondenfeld)</b>		
Bohren	Gerät: Doppelrotorkopf-Bohrgerät Typ Hütte HBR 205 GT [6] Kraftstoff: Diesel [45] Gesamtkraftstoffverbrauch: 1.200 L [46]	Diesel: $0,845 \text{ kg} = 1 \text{ L}$ [47] $1.200 \text{ L} \cdot 0,845 \frac{\text{kg}}{\text{L}} = \mathbf{1.014 \text{ kg}}$
Transport der Bohrmaschine	Bereitstellung des Geräts: Bohrunternehmen Geowell Erdwärme GmbH & Co [48] Transportweg: ca. 210 km [Tab. 11] Gewicht des Geräts: 17,2 t [45]	$17,2 \text{ t} \cdot 210 \text{ km} = \mathbf{3.612 \text{ tkm}}$
Spülmittelzusatz	Produkt: StüwaFlow PAC [6] Inhalt: reines CMC [6] Alternatives Produkt vom selben Hersteller: Aktivbentonit [49] Menge Klarwasser: Bohrlöchlösung x 2,5 (Spülreserve) [25, S. 66] Mischverhältnis: $20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ [49] Gesamtaushub: $53,33 \text{ m}^3$ (s. u.)	Klarwasser: $53,33 \text{ m}^3 \cdot 2,5 = 133,33 \text{ m}^3$ $133,33 \text{ m}^3 \cdot 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{133.330 \text{ kg}}$ Bentonit: $20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 133,33 \text{ m}^3 = \mathbf{2.666,6 \text{ kg}}$
Lieferung des Spülmittelzusatzes	Transportweg: ca. 30 km [Tab. 11]	$\frac{2.666,6 \text{ kg}}{25 \text{ kg}} = 107 \text{ Säcke}$ $107 \text{ Säcke} \cdot 25 \text{ kg} = 2.675 \text{ kg} = 2,675 \text{ t}$ $2,675 \text{ t} \cdot 30 \text{ km} = \mathbf{80,25 \text{ tkm}}$
Entsorgung nichtgenutzten Bohrkleins	Menge: kompletter Bohraushub [46] Zusammensetzung Boden: Sande, Schluffe, Tone [6] Dichte des Bodens: $0,93 - 1,72 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ [26, S. 226] → Wähle: $\rho_{\text{Boden}} = 1,72 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ $= 1.720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Volumen Bohraushub: (siehe Abbildung 8) EWS 1-2: $\pi \cdot \frac{(0,178\text{m})^2}{4} \cdot 15 \text{ m} + \pi \cdot \frac{(0,152\text{m})^2}{4} \cdot (95 - 15) \text{ m} = 1,82 \text{ m}^3$ EWS 3-27: $\pi \cdot \frac{(0,178\text{m})^2}{4} \cdot 27 \text{ m} + \pi \cdot \frac{(0,152\text{m})^2}{4} \cdot (95 - 27) \text{ m} = 1,91 \text{ m}^3$ EWS 28: $\pi \cdot \frac{(0,178\text{m})^2}{4} \cdot 27 \text{ m} + \pi \cdot \frac{(0,152\text{m})^2}{4} \cdot (97 - 27) \text{ m} = 1,94 \text{ m}^3$ Gesamtaushub: $2 \cdot 1,82 \text{ m}^3 + 25 \cdot 1,91 \text{ m}^3$ $+ 1 \cdot 1,94 \text{ m}^3 = 53,33 \text{ m}^3$ Masse: $53,33 \text{ m}^3 \cdot 1.720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{91.727,6 \text{ kg}}$
Transport nichtgenutzten Aushubs zur Entsorgungsstelle	Transportweg für Abfälle (2016): 77 km [44, S. 265]	$91,73 \text{ t} \cdot 77 \text{ km} = \mathbf{7.063,21 \text{ tkm}}$
<b>Einbringen der EWS (Erdsondenfeld)</b>		
Erdwärme- sonden (EWS)	Typ: Doppel-U-Sonden [6] Maße: 32 x 3,0 mm, SDR 11 [6] Material: HDPE 100- RC [6] Anzahl: 28 Stück [6] Länge vor Einbau: 100 m [6] Masse von PE: $0,277 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$ [ÖBD, lineare Interpolation]	$28 \cdot 100 \text{ m} \cdot 4 = 11.200 \text{ m}$ $11.200 \text{ m} \cdot 0,277 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = \mathbf{3.102,4 \text{ kg}}$

*Sachbilanz: Daten und Mengenerrechnungen für das KNWN in Schifferstadt*

Produkt/ Prozess	Daten [Quelle]	Berechnungen
Einzugs- gewichte (EG)	Anzahl: 28 Stück [48] Gewicht: jew. 25 kg [48] Material: Stahl [50]	$28 \cdot 25 \text{ kg} = \mathbf{700 \text{ kg}}$
Lieferung der EWS & EG	Lieferant: FRANK GmbH [6] Transportweg: ca. 160 km [Tab. 11]	$(3,102 \text{ t} + 0,7 \text{ t}) \cdot 160 \text{ km} = \mathbf{608,32 \text{ tkm}}$
<b>Verpressarbeiten (Erdsondenfeld)</b>		
Injektionsrohr	Maße: 32 x 1,9 mm [6] Länge: 1 x 97 m, 27 x 95 m + jeweils 1 m Überstand [Annahme] Material: PE 100 [50] Masse: $0,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$ [ÖBD, lineare Extrapolation]	$1 \cdot 98 \text{ m} + 27 \cdot 96 \text{ m} = 2.690 \text{ m}$ $2.690 \text{ m} \cdot 0,19 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = \mathbf{511,1 \text{ kg}}$
Lieferung der Injektionsrohre	Lieferant: FRANK GmbH [Annahme] Transportweg: ca. 160 km [Tab. 11]	$0,511 \text{ t} \cdot 160 \text{ km} = \mathbf{81,76 \text{ tkm}}$
Verpressmaterial (Soilthermflow K)	Suspensionsmenge: 69,525 t [6] W/F-Wert: 0,64-0,8 [6] → Wähle: 0,64 (80 L auf 125 kg) Dichte: $1,5 - 1,6 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$ [6] → Wähle: $1,5 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$ Zusammensetzung [51]: < 20 % Portlandzement > 65 % Kalksteine Rest: Tonmehle, Bentonite, Natürlicher Graphit, Additive	Anteil Wasser: $\frac{80 \text{ L}}{80 \text{ L} + 125 \text{ L}} = 0,39$ Anteil Trockenmasse: $1 - 0,39 = 0,61$ Wassermenge: $69,525 \text{ kg} \cdot 0,39 = \mathbf{27,115 \text{ kg}}$ Feststoffmenge: $69,525 \text{ kg} \cdot 0,61 = 42,410 \text{ kg}$ Annahme für Berechnung: $\rho_{Sus} = \frac{\sum m_i}{\sum V_i}$ Ermittlung des Feststoffvolumens: Dichte Suspension: $\rho_{Sus} = 1,5 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} = 1.500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ Dichte Wasser: $\rho_W = 1.000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ [Annahme] Volumen Wasser: $V_W = \frac{m_W}{\rho_W} = \frac{27,115}{1.000} = 27,115 \text{ m}^3$ Volumen Suspension: $V_{Sus} = \frac{m_{Sus}}{\rho_{Sus}} = \frac{69,525}{1.500} = 46,35 \text{ m}^3$ Volumen Feststoff: $V_F = V_{Sus} - V_W$ $= 46,35 \text{ m}^3 - 27,115 \text{ m}^3 = \mathbf{19,235 \text{ m}^3}$
Lieferung des Verfüllbaustoffs	Lieferant: Soilution GmbH [6] Transportstrecke: ca. 340 km [Tab. 11]	$42,41 \text{ t} \cdot 340 \text{ km} = \mathbf{14.419,4 \text{ tkm}}$
Anrühren der Verfüllsuspension (Strom)	Gerät: Chargen-Kolloidalmischanlage, Typ Gertec IS-35-E (vor Ort) [6] Leistungsaufnahme: 12,3 kW [52] Mischleistung: $3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ [52]	Mischzeit: $\frac{46,35 \text{ m}^3}{3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}} = 15,45 \text{ h}$ $12,3 \text{ kW} \cdot 15,45 \text{ h} = \mathbf{190,04 \text{ kWh}}$
Transport der Mischanlage zur Baustelle	Gerätgewicht: 445 kg [52] Transportweg: ca. 313 km [Tab. 11]	$0,445 \text{ t} \cdot 313 \text{ km} = \mathbf{139,285 \text{ tkm}}$
Verpressen der Bohrlöcher (Strom)	Gerät: Gertec IS-35-E [6] Verpressleistung (2-stufig): $32 / 65 \frac{\text{L}}{\text{min}}$ [6] → Wähle: $32 \frac{\text{L}}{\text{min}}$	Dichte Suspension: $1,5 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} = 1,5 \frac{\text{kg}}{\text{L}}$ $\frac{69,525 \text{ kg}}{1,5 \frac{\text{kg}}{\text{L}}} = 46,350 \text{ L}$ Verpressdauer: $\frac{46,350 \text{ L}}{32 \frac{\text{L}}{\text{min}}} = 1,448,4 \text{ min} = 24,14 \text{ h}$ $12,3 \text{ kW} \cdot 24,14 \text{ h} = \mathbf{296,92 \text{ kWh}}$
<b>Leitungsverlegung (Erdsondenfeld)</b>		

*Sachbilanz: Daten und Mengenerrechnungen für das KNWN in Schifferstadt*

Produkt/ Prozess	Daten [Quelle]	Berechnungen
Anbindeleitungen (AL) der EWS	Material: HDPE 100- RC [6] Maße: 40 x 3,7 mm [6] Länge: 2 x 10 m & 26 x 17-25 m im Vorlauf [46] Masse: 0,426 $\frac{\text{kg}}{\text{m}}$ [ÖBD]	$2 \cdot 10 \text{ m} + 26 \cdot 25 \text{ m} = 670 \text{ m}$ (Vorlauf) Vor- und Rückläufe: $2 \cdot 670 \text{ m} = 1.340 \text{ m}$ $1340 \cdot 0,426 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = \mathbf{570,84 \text{ kg}}$
Hauptanbindungs- leitungen (HL)	Material: HDPE 100-RC [6] Maße: 90 x 8,2 mm [6] Vorlaufänge: jew. 20-25 m [46] Masse: 2,1 $\frac{\text{kg}}{\text{m}}$ [ÖBD]	$2 \cdot 2 \text{ Richtungen} \cdot 25 \text{ m} = 100 \text{ m}$ $100 \text{ m} \cdot 2,1 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = \mathbf{210 \text{ kg}}$
Verteilerschächte (Gehäuse)	Gesamtanzahl: 3 Stück [6] Nebenverteilerschächte (NVS): 2 Stück, FRANK Verteilerschacht Typ L-1400-T mit 14 Kreisen [6] Hauptverteilerschacht (HVS): 1 Stück, Sonderanfertigung ähnlich dem Typ L-1800-T [6] Material: PE [53] Gewicht: jew. 400 kg [46]	$3 \cdot 400 \text{ kg} = \mathbf{1.200 \text{ kg}}$
Verteilerschächte (Einbauten & Abdeckung)	Gewicht: jew. 200 kg [46] Mikroblasenabscheider (ÄP: [54]) SpiroTop Großentlüfter [6] Materialien: überwiegend Messing, Kunststoff und Edelstahl	Schätzung für alle Verteilerschächte: Messing: <b>200 kg</b> Kunststoff: <b>200 kg</b> Edelstahl: <b>200 kg</b>
Lieferung aller Rohre und Verteilerschächte	Lieferant: FRANK GmbH [Annahme] Transportweg: ca. 160 km [Tab. 11]	$(0,571 \text{ t} + 0,21 \text{ t} + 1,2 \text{ t} + 0,6 \text{ t}) \cdot 160 \text{ km}$ $= \mathbf{412,96 \text{ tkm}}$
Erdarbeiten: Aushub	Gesamtgrabenlänge: 260 m [6] Annahme: Gesamtgrabenlänge enthält nicht den Aushub für Schächte Grabenprofil: 800 x 1.000 mm [46] Verlegungstiefe: 600 - 800 mm [46] NVS: d= 1,43 m; H = 1,75 m [6] HVS: d= 2,0 m; H = 1,7 m [6]	Aushubvolumen Rohre: $0,8 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 260 \text{ m} = 208 \text{ m}^3$ Aushubvolumen Verteilerschächte (VS): $V_{\text{NVS}} = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot H = \pi \cdot \frac{(1,43 \text{ m})^2}{4} \cdot 1,75 \text{ m}$ $= 2,81 \text{ m}^3$ $V_{\text{HVS}} = \pi \cdot \frac{(2,0 \text{ m})^2}{4} \cdot 1,7 \text{ m} = 5,34 \text{ m}^3$ $V_{\text{VS}} = 2 \cdot 2,81 \text{ m}^3 + 1 \cdot 5,34 \text{ m}^3 = 10,96 \text{ m}^3$ Gesamtaushubvolumen: $208 \text{ m}^3 + 10,96 \text{ m}^3 = \mathbf{218,96 \text{ m}^3}$
Rohrbettung (Sand)	Sandbett (SB): 1000 x 300 mm [46] Dichte von Sand 0-2 (verdichtet): $1,85 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$ [55]	$1 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 260 \text{ m} = 78 \text{ m}^3$ $78 \text{ m}^3 \cdot 1850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{144.300 \text{ kg}}$
Lieferung des Sandes	Lieferant: Erdbau Hauck GmbH & Co. KG [48] Transportweg: ca. 4 km [Tab. 11]	$144,3 \text{ t} \cdot 4 \text{ km} = \mathbf{577,2 \text{ tkm}}$

*Sachbilanz: Daten und Mengenberechnungen für das KNWN in Schifferstadt*

Produkt/ Prozess	Daten [Quelle]	Berechnungen
Erdarbeiten: Grabenverfüllung	Annahme: Wiederverwendung des Bodenaushubs	Verdrängung durch AL, HL und VS: AL: $\pi \cdot \frac{(d_{AL})^2}{4} \cdot l_{AL} = 1,68 \text{ m}^3$ HL: $\pi \cdot \frac{(d_{HL})^2}{4} \cdot l_{HL} = 0,64 \text{ m}^3$ Verdrängung: $1,68 \text{ m}^3 + 0,64 \text{ m}^3 + 10,96 \text{ m}^3 = 13,28 \text{ m}^3$ Grabenverfüllung (Sand + Aushub): $218,96 \text{ m}^3 - 13,28 \text{ m}^3 = \mathbf{205,68 \text{ m}^3}$
Erdarbeiten: Grabenverdichtung (Diesel)	spezifische Geräte nicht bekannt Gewähltes Referenzobjekt: BPR 100/80 D der Firma BOMAG (leichte Vibrationsplatte) Arbeitsbreite: $b = 80 \text{ cm}$ [29] Arbeitsgewichtigkeit: $v = 28 \frac{\text{m}}{\text{min}}$ [29] Dieselverbrauch: $2,2 \frac{\text{l}}{\text{h}} = 1,86 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$ [29] Wirksame Arbeitsbreite [30, S. 1140]: $b' = 0,8 \cdot b = 64 \text{ cm}$ Zahl der Übergänge: $z = 10$ [30, S.1141] Schichthöhe: $h = 25 \text{ cm}$ [30, S. 1141] Nutzleistungsfaktor: $f_E = 0,65$ unter der Annahme, dass mittelmäßige Baustellen- und Betriebsbedingungen herrschen [30, S. 1074]	Grundleistung [30, S. 1140]: $Q_{BV} = b' \cdot v \cdot \frac{1}{z} \cdot h = 26,88 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ Nutzleistung [30, S. 1140]: $Q_{AV} = Q_{BV} \cdot f_E = 17,47 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ Aufandswert: $W_{Verdichten} = \frac{1}{Q_{AV}} = 0,0572 \frac{\text{h}}{\text{m}^3} \approx 0,06 \frac{\text{h}}{\text{m}^3}$ Arbeitsdauer: $205,68 \text{ m}^3 \cdot 0,06 \frac{\text{h}}{\text{m}^3} = 12,34 \text{ h}$ Dieselverbrauch: $1,86 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 12,34 \text{ h} = \mathbf{22,95 \text{ kg}}$
Entsorgung nichtgenutzten Aushubs	Annahme: komplette Entsorgung Entsorgung = Verdrängung durch Sand, AL, HL & VS	$78 \text{ m}^3 + 13,28 \text{ m}^3 = 91,28 \text{ m}^3$ $91,28 \text{ m}^3 \cdot \rho_{Boden} = \mathbf{157.001,6 \text{ kg}}$
Transport zur Entsorgungsstelle	Transportweg für Abfälle (2016): 77 km [44, S. 265]	$157,0 \text{ t} \cdot 77 \text{ km} = \mathbf{12.089 \text{ tkm}}$
<b>Verteilungsnetz (VN)</b>		
Vor- und Rück- laufleitungen	Material: HDPE 100-RC [6] Maße: 110 x 10 mm [6] Vorlauflänge: 650 m [46] Vor- und Rückläufe = 1.300 m Masse: $3,11 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$ [ÖBD]	$1.300 \text{ m} \cdot 3,11 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = \mathbf{4.043 \text{ kg}}$
Lieferung der Rohre	Lieferant: FRANK GmbH [Annahme] Transportweg: ca. 160 km [Tab. 11]	$4,043 \text{ t} \cdot 160 \text{ km} = \mathbf{646,88 \text{ tkm}}$
Erdarbeiten: Aushub	Gesamtgrabenlänge: 650 m [46] Grabenprofil: 800 x 1.000 mm [46]	$0,8 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 650 \text{ m} = \mathbf{520 \text{ m}^3}$
Rohrbettung (Sand)	Sandbett (SB): 1.000 x 300 mm [46] Dichte von Sand 0-2 (verdichtet): $1,85 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$ [55]	$1 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 650 \text{ m} = 195 \text{ m}^3$ $195 \text{ m}^3 \cdot 1.850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{360.750 \text{ kg}}$
Lieferung des Sandes	Lieferant: Erdbau Hauck GmbH & Co. KG [48] Transportweg: ca. 4 km [Tab. 11]	$360,75 \text{ t} \cdot 4 \text{ km} = \mathbf{1.443 \text{ tkm}}$

*Sachbilanz: Daten und Mengenberechnungen für das KNWN in Schifferstadt*

Produkt/ Prozess	Daten [Quelle]	Berechnungen
Erdarbeiten: Grabenverfüllung	Annahme: Wiederverwendung des Bodenaushubs	Verdrängung durch Rohre: $\pi \cdot \frac{(0,11 \text{ m})^2}{4} \cdot 1.300 \text{ m} = 12,35 \text{ m}^3$ Grabenverfüllung (Sand + Aushub): $520 \text{ m}^3 - 12,35 \text{ m}^3 = \mathbf{507,65 \text{ m}^3}$
Erdarbeiten: Grabenverdichtung (Diesel)	Aufwandswert $W_{Verdichten}$ : s.o.	$507,65 \text{ m}^3 \cdot 0,06 \frac{\text{h}}{\text{m}^3} = 30,5 \text{ h}$ Dieselverbrauch: $1,86 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 30,5 \text{ h} = \mathbf{56,73 \text{ kg}}$
Entsorgung nichtgenutzten Aushubs	Annahme: komplette Entsorgung Entsorgung = Verdrängung durch Sand und Rohre	$12,35 \text{ m}^3 + 195 \text{ m}^3 = 207,35 \text{ m}^3$ $207,35 \text{ m}^3 \cdot 1,720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{356.642 \text{ kg}}$
Transport zur Entsorgungsstelle	Transportweg für Abfälle (2016): 77 km [44, S. 265]	$356,642 \text{ t} \cdot 77 \text{ km} = \mathbf{27.461,4 \text{ tkm}}$
<b>Gebäudekomponenten (GK)</b>		
Wärmepumpen (WP)	Lieferant: WATERKOTTE GmbH [7] Ausstattung der Haushalte [7]: 1 x Eco Touch DS 5020.5 Ai NC ( $Q_{WP} = 15,0 \text{ kW}$ ; 186 kg) 1 x Eco Touch DS 5018.5 Ai NC ( $Q_{WP} = 13,2 \text{ kW}$ ; 219 kg) 4 x Eco Touch DS 5017.5 Ai NC ( $Q_{WP} = 13,3 \text{ kW}$ ; 180 kg) 3 x Eco Touch DS 5010.5 Ai NC ( $Q_{WP} = 7,6 \text{ kW}$ ; 163 kg) 3 x Eco Touch DS 5014.5 Ai NC ( $Q_{WP} = 10,3 \text{ kW}$ ; 171 kg) 3 x Eco Touch DS 5014.5 Ai NC ( $Q_{WP} = 10,2 \text{ kW}$ ; 171 kg) 6 x BasicLine 5010.5 Ail NC ( $Q_{WP} = 10,1 \text{ kW}$ ; 208 kg) 8 x BasicLine 5008.5 Ail NC ( $Q_{WP} = 7,6 \text{ kW}$ ; 208 kg) 12 x BasicLine 5005.5 Ail NC ( $Q_{WP} = 4,8 \text{ kW}$ ; 192 kg) WP < 10 kW = <b>23 Stück</b> WP < 20 kW = <b>18 Stück</b> Gesamtgewicht: 7.856 kg	
Pufferspeicher	Material: Stahl [46] Ausstattung der Haushalte [7]: 28 x 200 L 5 x 300 L 10 x 390 L 10 x 500 L Massen [ÖBD]: 200 L = 56,0 kg 300 L = 59,5 kg 390 L = 72,5 kg (lineare Interpolation) 500 L = 88,3 kg	$28 \cdot 56,0 \text{ kg} + 5 \cdot 59,5 \text{ kg} + 10 \cdot 72,5 \text{ kg} + 10 \cdot 88,3 \text{ kg} = \mathbf{3.473,5 \text{ kg}}$
Lieferung der WP und Pufferspeicher	Lieferant: Waterkotte GmbH [7] Transportweg: ca. 350 km [Tab. 11]	$(7,856 \text{ t} + 3,474 \text{ t}) \cdot 350 \text{ km} = \mathbf{3.965,5 \text{ tkm}}$
Gebäudeanschluss Rohrleitungen	Material: HDPE 100-RC [6] Maße: 110 x 10 mm [6] Vorlauflänge: 8 m pro Haushalt [46] Masse: $3,11 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$ [ÖBD]	Gesamtlänge Vorläufe: $8 \text{ m} \cdot 41 = 328 \text{ m}$ Gesamtlänge Vor- und Rückläufe: 656 m $656 \text{ m} \cdot 3,11 \frac{\text{kg}}{\text{m}} = \mathbf{2.040,16 \text{ kg}}$
Lieferung der Rohre	Lieferant: FRANK GmbH [Annahme] Transportweg: ca. 160 km [Tab. 11]	$2,04 \text{ t} \cdot 160 \text{ km} = \mathbf{326,4 \text{ tkm}}$

*Sachbilanz: Daten und Mengenberechnungen für das KNWN in Schifferstadt*

<b>Produkt/ Prozess</b>	<b>Daten [Quelle]</b>	<b>Berechnungen</b>
Erdarbeiten: Aushub	Gesamtgrabenlänge: 328 m Grabenprofil: 800 x 1.000 mm [46]	$0,8 \text{ m} \cdot 1 \text{ m} \cdot 328 \text{ m} = \mathbf{262,4 \text{ m}^3}$
Rohrbettung (Sand)	Sandbett (SB): 1.000 x 300 mm [46] Dichte von Sand 0-2 (verdichtet): $1,85 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$ [55]	$1 \text{ m} \cdot 0,3 \text{ m} \cdot 328 \text{ m} = 98,4 \text{ m}^3$ $98,4 \text{ m}^3 \cdot 1,850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{182.040 \text{ kg}}$
Lieferung des Sandes	Lieferant: Erdbau Hauck GmbH & Co. KG [48] Transportweg: ca. 4 km [Tab. 11]	$182,04 \text{ t} \cdot 4 \text{ km} = \mathbf{728,16 \text{ tkm}}$
Erdarbeiten: Grabenverfüllung	Annahme: Wiederverwendung des Bodenaushubs	Verdrängung durch Rohre: $\pi \cdot \frac{(0,11 \text{ m})^2}{4} \cdot 656 \text{ m} = 6,23 \text{ m}^3$ Grabenverfüllung (Sand + Aushub): $262,4 \text{ m}^3 - 6,23 \text{ m}^3 = \mathbf{256,17 \text{ m}^3}$
Erdarbeiten: Grabenverdichtung (Diesel)	Aufandswert $W_{\text{Verdichten}}$ : s.o.	$256,17 \text{ m}^3 \cdot 0,06 \frac{\text{h}}{\text{m}^3} = 15,37 \text{ h}$ Dieselverbrauch: $1,86 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \cdot 15,37 \text{ h} = \mathbf{28,59 \text{ kg}}$
Entsorgung nichtgenutzten Aushubs	Annahme: komplette Entsorgung Entsorgung = Verdrängung durch Sand und Rohre	$98,4 \text{ m}^3 + 6,23 \text{ m}^3 = 104,63 \text{ m}^3$ $104,63 \text{ m}^3 \cdot 1,720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \mathbf{179.963,6 \text{ kg}}$
Transport zur Entsorgungsstelle	Transportweg für Abfälle (2016): 77 km [44, S. 265]	$179,964 \text{ t} \cdot 77 \text{ km} = \mathbf{13.857,2 \text{ tkm}}$

ÖBD = ÖKOBAUDAT, ÄP = Ähnliche Produkte, L = Liter, l = Länge, h = Stunden, H = Höhe

Tabelle 13: Verwendete Datensätze aus der ÖKOBAUDAT und ProBas

Nr.	Datensatz	Referenz- fluss	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äquiv.]									
			A1-A3	A4	A5	B6	C1	C2	C3	C4	D	
1.	Diesel [siehe Abschnitt 3]	kg			4,186347							
2.	LKW Transport	tkm		0,08969								
3.	Bentonit [56]	kg	0,0252									
4.	Trinkwasser	kg	0,000128									
5.	Bauschutttaufbereitung	kg						0,002663				
6.	Bauschuttdeponierung	kg							0,01364			
7.	Trinkwasserrohr PE-X	kg	4,103				0	0,002785	3,768	[6.]		-1,706
8.	Stahl Schmiedebauteil	kg	2,808				0,0007189	0,002785	[5.]	[25.]		-1,519
9.	Kalkzementmörtel	m <sup>3</sup>	202					6,274	[5.]	29,47		
10.	Strom Mix 2015	kWh			0,5397							
11.	Messing-Bauteil	kg	1,386				0	0,002785	[5.]	[6.]		0,02593
12.	Edelstahlblech	kg	3,427				0	0,002553	[5.]	[26.]		-0,6631
13.	Aushub Bagger 100 kW	m <sup>3</sup>			1,294							
14.	Sand 0/2 getrocknet	kg	0,03326				0,0007189	0,002785	0,007337	[6.]		-0,002054
15.	Strom-Wärmepumpe (Sole- Wasser, Erdsonde) 10 kW	Stk.	855,8					4,026	4,353	0,03002		-156,3
16.	Strom-Wärmepumpe (Sole- Wasser, Erdsonde) 20 kW	Stk.	1.997					10,17	4,353	0,03002		-156,3
17.	Pufferspeicher (Stahl)	kg	3,169					0,009295	0,6634	[25.]		-1,426

Datenquelle: ÖKOBAUDAT, Ausnahme: Bentonit aus ProBas, GWPs beziehen sich auf den jeweiligen Referenzfluss

Tabelle 14: Wirkungsabschätzung: Konstruktion des KNWN

Material/ Energie/ Prozess	Menge	RF	Daten- satz Tab. 13	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.] für die Menge						Summe ohne A kg CO <sub>2</sub> -Äq.	A	Summe mit A kg CO <sub>2</sub> -Äq.	
				A1-A3	A4	A5	C2	C3	C4				
<b>Erdsondenfeld</b>													
<b>Bohrarbeiten</b>													
Diesel	1.014	kg	1.	0	0	4.244,96	0	0	0	0	4.244,96	0	4.244,96
Transport Bohrmaschine	3.612	tkm	2.	0	323,96	0	0	0	0	0	323,96	0	323,96
Bentonit (Spülung)	2.666,6	kg	3.	67,20	0	0	0	0	0	0	67,20	0	67,20
Wasser (Spülung)	133.330	kg	4.	17,07	0	0	0	0	0	0	17,07	0	17,07
Lieferung Spülungszusatz	80,25	tkm	2.	0	7,20	0	0	0	0	0	7,20	0	7,20
Entsorgung Aushub	91.727,6	kg	5. & 6.	0	0	0	0	244,27	1.251,16	0	1.495,43	0	1.495,43
Transport zur Entsorgung	7.063,21	tkm	2.	0	0	0	633,50	0	0	0	633,50	0	633,50
Summe: Bohrarbeiten										<b>6.789,32</b>		<b>6.789,32</b>	
<b>Einbringen der EWS</b>													
EWS: PE-X	3.102,4	kg	7.	12.729,15	0	0	0	0	0	0	12.729,15	0	12.729,15
Stahl (Einzugsgewichte, EG)	700	kg	8.	1.965,60	0	0	0	0	0	0	1.965,60	0	1.965,60
Lieferung EWS & EG	608,32	tkm	2.	0	54,56	0	0	0	0	0	54,96	0	54,96
Summe: Einbringen der EWS										<b>14.749,31</b>		<b>14.749,31</b>	
<b>Verpressarbeiten</b>													
PE-X (Injektionsrohr)	511,1	kg	7.	2.097,04	0	0	0	0	0	0	2.097,04	0	2.097,04
Lieferung Injektionsrohr	81,76	tkm	2.	0	7,33	0	0	0	0	0	7,33	0	7,33
Suspension: Trockenbaustoff	19,235	m <sup>3</sup>	9.	3.885,47	0	0	0	0	0	0	3.885,47	0	3.885,47
Suspension: Wasser	27.115	kg	4.	3,47	0	0	0	0	0	0	3,47	0	3,47
Lieferung Verfüllbaustoff	14.419,4	tkm	2.	0	1.293,28	0	0	0	0	0	1.293,28	0	1.293,28
Anrühren Verfüllbaustoff	190,04	kWh	10.	0	0	102,56	0	0	0	0	102,56	0	102,56
Transport Mischanlage	139,285	tkm	2.	0	12,49	0	0	0	0	0	12,49	0	12,49
Verpressen	296,92	kWh	10.	0	0	160,25	0	0	0	0	160,25	0	160,25
Summe: Verpressarbeiten										<b>7.561,89</b>		<b>7.561,89</b>	
<b>Leitungsverlegung im Erdsondenfeld</b>													
Anbindeleitungen: PE-X	570,84	kg	7.	2.342,16	0	0	0	0	0	0	2.342,16	0	2.342,16
Verteilerschächte (Gehäuse)	1.200	kg	7.	4.923,60	0	0	0	0	0	0	4.923,60	0	4.923,60
Schachteinbauten: PE-X	200	kg	7.	820,60	0	0	0	0	0	0	820,60	0	820,60
Schachteinbauten: Messing	200	kg	11.	277,20	0	0	0	0	0	0	277,20	0	277,20
Schachteinbauten: Edelstahl	200	kg	12.	685,40	0	0	0	0	0	0	685,40	0	685,40
Hauptleitungen: PE-X	210	kg	7.	861,63	0	0	0	0	0	0	861,63	0	861,63
Lieferung Rohre & Schächte	412,96	tkm	2.	0	37,04	0	0	0	0	0	37,04	0	37,04
Grabenaushub	218,96	m <sup>3</sup>	13.	0	0	283,33	0	0	0	0	283,33	0	283,33
Sand 0-2 mm	144.300	kg	14.	4.799,42	0	0	0	0	0	0	4.799,42	0	4.799,42
Lieferung Sand	577,2	tkm	2.	0	51,77	0	0	0	0	0	51,77	0	51,77
Grabenverfüllung	205,68	m <sup>3</sup>	13.	0	0	266,15	0	0	0	0	266,15	0	266,15
Grabenverdichtung: Diesel	22,95	kg	1.	0	0	96,08	0	0	0	0	96,08	0	96,08
Entsorgung Aushub	157.001,6	kg	5. & 6.	0	0	0	0	418,10	2.141,50	0	2.559,60	0	2.559,60
Transport zur Entsorgung	12.089	tkm	2.	0	0	0	1.084,26	0	0	0	1.084,26	0	1.084,26
Summe: Leitungsverlegung im Erdsondenfeld										<b>19.088,24</b>		<b>19.088,24</b>	
<b>Summe: Erdsondenfeld</b>										<b>48.188,76</b>		<b>48.188,76</b>	
<b>Verteilungsnetz</b>													
Rohrleitungen: PE-X	4.043	kg	7.	16.588,43	0	0	0	0	0	0	16.588,43	0	16.588,43
Lieferung Rohre	646,88	tkm	2.	0	58,02	0	0	0	0	0	58,02	0	58,02

Wirkungsabschätzung: Konstruktion des KNWN

Material/ Energie/ Prozess	Menge	RF	Daten- satz Tab. 13	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.] für die Menge						Summe ohne A kg CO <sub>2</sub> -Äq.	A	Summe mit A kg CO <sub>2</sub> -Äq.
				A1-A3	A4	A5	C2	C3	C4			
Grabenaushub	520	m <sup>3</sup>	13.	0	0	672,88	0	0	0	672,88		672,88
Sand 0-2 mm	360.750	kg	14.	11.998,55	0	0	0	0	0	11.998,55	0	11.998,55
Lieferung Sand	1.443	tkm	2.	0	129,42	0	0	0	0	129,42		129,42
Grabenverfüllung	507,65	m <sup>3</sup>	13.	0	0	656,90	0	0	0	656,90		656,90
Grabenverdichtung: Diesel	56,73	kg	1.	0	0	237,49	0	0	0	237,49		237,49
Entsorgung Aushub	356.642	kg	5. & 6.	0	0	0	0	949,74	4.864,60	5.814,34		5.814,34
Transport zur Entsorgung	27.461,4	tkm	2.	0	0	0	2.463,01	0	0	2.463,01		2.463,01
<b>Summe: Verteilungsnetz</b>										<b>38.619,04</b>		<b>38.619,04</b>
<b>Gebäudekomponenten</b>												
WP < 10 kW	23	Stk.	15.	19.683,4	0	0	0	0	0	19.683,40	2	59.050,20
WP < 20 kW	18	Stk.	16.	35.946,00	0	0	0	0	0	35.946,00	2	107.838,00
Pufferspeicher (Stahl)	3.473,5	kg	17.	11.007,52	0	0	0	0	0	11.007,52	2	33.002,56
Lieferung WP & PS	3.965,5	tkm	2.	0	355,67	0	0	0	0	355,67	2	1067,01
Leitungen: PE-X	2.040,16	kg	7.	8.370,78	0	0	0	0	0	8.370,78	0	8.370,78
Lieferung Rohre	326,4	tkm	2.	0	29,27	0	0	0	0	29,27		29,27
Grabenaushub	262,4	m <sup>3</sup>	13.	0	0	339,55	0	0	0	339,55		339,55
Sand 0-2 mm	182.040	kg	14.	6.054,65	0	0	0	0	0	6.054,65	0	6.054,65
Lieferung Sand	728,16	tkm	2.	0	65,31	0	0	0	0	65,31		65,31
Grabenverfüllung	256,17	m <sup>3</sup>	13.	0	0	331,48	0	0	0	331,48		331,48
Grabenverdichtung: Diesel	28,59	kg	1.	0	0	119,69	0	0	0	119,69		119,69
Entsorgung Aushub	179.963,6	kg	5. & 6.	0	0	0	0	479,24	2.454,70	2.933,94		2.933,94
Transport zur Entsorgung	13.857,2	tkm	2.	0	0	0	1.242,85	0	0	1.242,85		1.242,85
<b>Summe: Gebäudekomponenten</b>										<b>86.480,11</b>		<b>220.465,29</b>
<b>Summe: Konstruktion</b>				145.124,34	2.425,32	7.511,32	5.423,62	2.091,35	10.711,96	<b>173.287,91</b>		<b>307.273,09</b>

RF = Referenzfluss, Datensatz: siehe Tab. 13, A = Austausch während 50-jähriger Nutzung, WP = Wärmepumpe, PS = Pufferspeicher

Tabelle 15: Wirkungsabschätzung: Entsorgung und Recycling des KNWN

Entsorgung von	Menge	RF	Daten- satz Tab. 13	GWP [kg CO <sub>2</sub> -Äq.] für die Menge					Summe ohne A kg CO <sub>2</sub> -Äq.	A	Summe mit A kg CO <sub>2</sub> -Äq.
				C1	C2	C3	C4	D			
<b>Erdsondenfeld</b>											
<b>Einbringen der EWS</b>											
EWS: PE-X	3.102,40	kg	7.	0	8,64	11.689,84	42,32	-5.292,69	11.740,80	0	11.740,80
Einzugsgewichte (Stahl)	700,00	kg	8.	0,5	1,95	1,86	0,48	-1.063,3	4,79	0	4,79
Summe: Einbringen der EWS									<b>11.745,59</b>		<b>11.745,59</b>
<b>Verpressarbeiten</b>											
Injektionsrohr	511,1	kg	7.	0	1,42	1.925,82	6,97	-871,94	1.934,21	0	1.934,21
Verpressmaterial	19,235	m <sup>3</sup>	9.	0	120,68	0,05	566,86	0	687,59	0	687,59
Summe: Verpressarbeiten									<b>2.621,80</b>		<b>2.621,80</b>
<b>Leitungsverlegung im Erdsondenfeld</b>											
Leitungen und Schächte (PE-X)	2.180,84	kg	7.	0	6,07	8.217,41	29,75	-3.720,51	8.253,23	0	8.253,23
Schachteinbauten: Messing	200	kg	11.	0	0,56	0,53	2,73	5,19	3,82	0	3,82
Schachteinbauten: Edelstahl	200	kg	12.	0	0,51	0,53	0,14	-132,62	1,18	0	1,18
Sand 0-2 mm	144.300	kg	14.	103,74	401,88	1.058,73	1.968,25	-296,39	3.532,60	0	3.532,60
Summe: Leitungsverlegung im Erdsondenfeld									<b>11.790,83</b>		<b>11.790,83</b>
<b>Summe: Erdsondenfeld</b>									<b>26.158,22</b>		<b>26.158,22</b>
<b>Verteilungsnetz</b>											
Leitungen: PE-X	4.043	kg	7.	0	11,26	15.234,02	55,15	-6.897,36	15.300,43	0	15.300,43
Sand 0-2 mm	360.750	kg	14.	259,34	1.004,69	2.646,82	4.920,63	-740,98	8.831,48	0	8.831,48
<b>Summe: Verteilungsnetz</b>									<b>24.131,91</b>		<b>24.131,91</b>
<b>Gebäudekomponenten</b>											
Wärmepumpen < 10 kW	23	Stk.	15.	0	92,60	100,12	0,69	-3.594,9	193,41	2	580,23
Wärmepumpen < 20 kW	18	Stk.	16.	0	183,06	78,35	0,54	-2.813,4	261,95	2	785,85
Pufferspeicher (Stahl)	3.473,5	kg	17.	0	32,29	2.304,32	2,37	-4.953,21	2.338,98	2	7.016,94
Leitungen: PE-X	2.040,16	kg	7.	0	5,68	7.687,32	27,83	-3.480,51	7.720,83	0	7.720,83
Sand 0-2 mm	182.040	kg	14.	130,87	506,98	1.335,63	2.483,03	-373,91	4.456,51	0	4.456,51
<b>Summe: Gebäudekomponenten</b>									<b>14.971,68</b>		<b>20.560,36</b>
<b>Summe: Entsorgung &amp; Recycling</b>				494,45	2.378,27	52.281,35	10.107,74	-34.226,53	<b>65.261,81</b>		<b>70.850,49</b>

RF = Referenzfluss, Datensatz: siehe Tab. 13, A = Austausch während 50-jähriger Nutzung, Summen ohne D