



**MOST EASY, EFFICIENT AND LOW COST
GEOTHERMAL SYSTEMS FOR RETROFITTING
CIVIL AND HISTORICAL BUILDINGS**

2018 - 2023

1

2

3

4

5

6

7

Dimensionierung von GSHP und hybriden Technologien

Autoren: GEO4CIVHIC-Konsortium

Koordination Projekt: Adriana BERNARDI

Koordination Band: Javier URCHUEGUIA

www.geo4civhic.eu

Das GEO4CIVHIC-Projekt wurde durch das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizon 2020 der Europäischen Union unter der Fördervereinbarung Nr. 792355 gefördert.





Bei der Weitergabe von Ergebnissen ist darauf hinzuweisen, dass sie nur die Meinung des Verfassers wiedergeben und dass die Agentur nicht für die Verwendung der darin enthaltenen Informationen verantwortlich ist.

REDAKTIONEN:

Adriana Bernardi

Doinița - Iuliana Cucuțeanu

VORWORT



Die oberflächennahe geothermische Energie ist eine stabile und zuverlässige erneuerbare Energiequelle, die immer und überall verfügbar ist. Die oberflächennahe Geothermie und ihre Kopplung mit anderen erneuerbaren Energiequellen verfügt über ein sehr großes Potenzial, das jedoch in einigen Ländern noch nicht voll ausgeschöpft wird und eine weitere Verbreitung erfordert. Ziel der sieben erstellten Bände ist die weitere Verbreitung der oberflächennahen Geothermie.

Die sieben Bände:

VOLUME 1 - Energiebedarf und technische Lösungen für effiziente Gebäude

VOLUME 2 - Geologie und Kartierung

VOLUME 3 - Bohrverfahren, Maschinen und Wärmetauscher

VOLUME 4 - Technologie geothermischer Wärmepumpen

VOLUME 5 - Dimensionierung von GSHP- und Hybridtechnologien

VOLUME 6 - Umwelt und Normen

VOLUME 7 - Historische und Weltkulturerbe Gebäude

Diese Bände beschreiben und fassen die Forschungsaktivitäten von der Innovation bis zur Umsetzung und die Erfahrungen aus den Jahren 2015 bis 2023 im Rahmen von zwei europäischen Projekten zusammen: "**Einfachste, effizienteste und kostengünstigste geothermische Systeme für die Nachrüstung ziviler und historischer Gebäude**" (GEO4CIVHIC) und "**Kostengünstige und effiziente Anwendung von zuverlässigen Erdwärmetauschern und -pumpen**" (Cheap-GSHPs).

Sie sind eine wertvolle Informationsquelle zur Unterstützung und Stärkung der Fähigkeiten von Fachleuten, Studenten und anderen wichtigen Interessengruppen (z. B. Entscheidungsträger der öffentlichen Hand, Endverbraucher, Investoren usw.) bei der Anwendung geothermischer Systeme zur Heizung und Kühlung von Gebäuden im Bereich der Energieeinsparung.

In den sieben Bänden werden die wichtigsten Ergebnisse beschrieben, beginnend mit den Grundprinzipien, Hindernissen, Ansätzen, Methoden, Innovationen sowie den Rechtsvorschriften, die der Anwendung oberflächennaher geothermischer Energie in allen Arten von Gebäuden zugrunde liegen. Die Anwendung der oberflächennahen Geothermie in historischen Gebäuden ist mit vielen Hindernissen und sehr strengen Vorschriften verbunden. Diese Probleme wurden während GEO4CIVHIC erfolgreich gelöst. Dies ist ein wichtiger Durchbruch in der Frage des Heizens/Kühlens und der Energieeinsparung in diesen besonderen Gebäuden.

Diese Bände wurden erstellt, um die nationale Ausbildung in ganz Europa zu unterstützen. Insbesondere die Lektionen innerhalb der vier neuen "European Centres of Excellence for Shallow Geothermal Application in Civil and Historic Buildings", die während GEO4CIVHIC an den Universitäten von Italien, Deutschland, Spanien und Rumänien eingerichtet wurden. Es ist ein hochrangiger Ausbildungsplan vorgesehen, um neue Experten auszubilden, die in der Folge neue Fähigkeiten und Arbeitsplätze garantieren werden.

Darüber hinaus könnten diese vier europäischen Exzellenzzentren zu einem dynamischen Instrument nicht nur für die Ausbildung, sondern auch für die Verbesserung der Rechtsvorschriften in ganz Europa werden, eine Möglichkeit, die Kommunikation zwischen Fachleuten zu fördern und letztlich den langfristigen Fortschritt im Bereich der oberflächennahen Geothermie zu verbessern.



Jeder Band ist spezifischen Zielen gewidmet, darunter dem Energiebedarf und technischen Lösungen für effiziente Gebäude, den geologischen Aspekten der europäischen Böden, innovativen Lösungen für Wärmetauscher, Bohrgeräten und Wärmepumpen und schließlich den rechtlichen, ökologischen und wirtschaftlichen Aspekten.

Der Inhalt der Bände ist das Ergebnis anspruchsvoller wissenschaftlicher Forschung, technologischer Entwicklung, Experimente vor Ort und Demonstrationen, die von den Partnern der beiden europäischen H2020-Forschungsprojekte im Laufe von acht Jahren Zusammenarbeit, Diskussionen und Verpflichtungen durchgeführt wurden.

Der Zeitraum, in dem sich das Projekt GEO4CIVHIC entwickelte, war sehr schwierig (Pandemie, Postpandemie usw.). Dadurch wurden sowohl die Forschungstätigkeit als auch die Durchführung und Verwaltung des Projekts erheblich behindert. Insbesondere die Aktivitäten an den Demostandorten in ganz Europa (Italien, Belgien, Malta, Irland) waren für die Teammitglieder sehr anstrengend, aber letztendlich wurden diese Herausforderungen erfolgreich bewältigt.

Die Schwierigkeiten des Projekts brachten ein starkes Team von Forschern aus ganz Europa zusammen. Diese Spezialisten werden auch in Zukunft eine wichtige Rolle in der Wissenschaft der oberflächennahen Geothermie spielen, abgesehen von den engen Freundschaften, die während der Jahre der beiden Projekte entstanden sind.

Als Koordinator beider Projekte möchte ich allen für ihre Bemühungen danken und dafür, dass sie fest an die oberflächennahe Geothermie geglaubt haben, die im Bereich der Energieeinsparung in ganz Europa, losgelöst von fossilen Brennstoffen, von großem Nutzen sein wird.

Ein herzliches Dankeschön geht schließlich an die Europäische Kommission, die durch die Finanzierung dieser beiden Projekte einen großen Schritt nach vorn bei der Erforschung effizienterer und kostengünstigerer Technologien im Bereich der oberflächennahen Geothermie ermöglicht hat.

Adriana Bernardi

**Koordinatorin der EU-Projekte GEO4CIVHIC und Cheap-GSHPs
Forschungsdirektorin bei CNR-ISAC**

Volume

5

GEO4CIVHIC Project

Training Manual

Sizing GSHP and hybrid technologies

Authors: GEO4CIVHIC Consortium

Project Coordinator: Adriana BERNARDI

Volume Coordinator: Javier URCHUEGUIA

INHALT

ABSTRACT	8
NOMENKLATUR	9
1. ANALYTISCHES WERKZEUG UND EMPFEHLUNGEN FÜR DIE THERMISCHEN AUSWIRKUNGEN VON NACHBARSCHAFTLICHEN GSHE-FELDERN MIT GESCHLOSSENEM KREISLAUF	10
1.1. Stand der Technik bei Simulationsmodellen und Normen	10
1.2. Im Rahmen des GEO4CIVHIC-Projekts entwickeltes und verwendetes Tool	11
1.3. Ergebnisse und Empfehlungen aus dem Projekt GEO4CIVHIC	11
2. LEITLINIEN FÜR EINEN ANGEPASSTEN THERMAL RESPONSE TEST (TRT): METHODIK UND NEUE ERGEBNISSE AM KUNSTSTOFF-KOAXIAL-PROTOTYP	12
2.1. Aktueller Stand der TRT-Methoden	12
2.2. Innovativer Ansatz innerhalb von GEO4CIVHIC	12
2.3. Anwendung des neuen C2RLS TRT-Schemas auf die koaxiale GEO4CIVHIC-Testbohrung im UPV-Testgelände	13
2.3.1. Erläuterung des Versuchsaufbaus.....	13
2.3.2. Anwendung des C2RLS-Modells auf die experimentellen Daten und die daraus resultierende Parameterschätzung.....	14
3. WERKZEUGE ZUR VORPLANUNG UND ÜBERWACHUNG VON ERDWÄRMEPUMPENANLAGEN	15
3.1. Neue Software und Designwerkzeuge für die Planung von oberflächennahen geothermischen Systemen (DSS)	15
3.1.1. Vorentwurfswerkzeug: Cheap-GSHPs Entscheidungshilfesystem.....	15
3.1.2. Vorentwurfswerkzeug: GEO4CIVHIC Entscheidungshilfesystem	16
3.2. Design- und Überwachungsinstrumente für oberflächennahe geothermische Anlagen in bestehenden Gebäuden	17
4. DIMENSIONIERUNG VON HYBRIDSYSTEMEN UND INTEGRATION MIT ANDEREN ERNEUERBAREN ENERGIESYSTEMEN (EE)	19
4.1. Innovative hybride Hochtemperatur-Wärmepumpen für renovierte zivile und historische Gebäude für hohe und mittlere Temperaturen	21
4.2. Synergie mit anderen EE-Technologien und Regelungsstrategien für Multi-Source-Systeme durch die Integration von geothermischer Energie mit anderen EE	24
5. ÖKOLOGISCHE, ENERGETISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG	25
5.1. Definition der Einzel- und Mehrnutzerreferenzgebäude (Maße und Materialien) als Grundlage für die energetischen und wirtschaftlichen Analysen	25
5.1.1. Definition der Gebäudetypen.....	25
5.1.2. Definition der Archetypen	25
5.2. Kosten-Nutzen-Analysen für die optimierten Lösungen in Multi-Source-Systemen	27
5.3. Marktbewertungsaktivitäten und Geschäftsinnovationsmodelle für jede Lösung und jeden Gebäudetyp	28
5.3.1. Kostenanalyse der Archetypen	29
5.4. Umweltauswirkungen von GEO4CIVHIC-Technologien an Fallstudienstandorten	31
5.4.1. Einleitung	31
5.4.2. Methodik.....	31
5.4.3. Identifizierung von Rezeptoren	33
5.4.4. Auswirkungen und Empfehlungen	33

6. ÜBUNG / TEST	34
6.1. Thermische Eigenschaften der Gebäude	34
6.2. Energie-Simulationen	34
6.3. Ergebnisse	34
7. SCHLUSSFOLGERUNGEN	36
REFERENZEN	37



ZIFFERN

Abbildung 2-1. Die für den Versand vorbereiteten koaxialen Kunststoffrohre (PCHE)	13
Abbildung 2-2. BHE-Verteilung auf dem Feld	14
Abbildung 2-3. Äquivalente Position der Sensoren im BHE-Kopf (als Beispiel)	14
Abbildung 2-4. Gemessene vs. durch das C2RLS-Modell angepasste Temperaturkurve	15
Abbildung 3-1. Verhältnis der Energien, die für die verschiedenen SCOP-Berechnungen verwendet wurden	17
Abbildung 3-2. Anordnung der Sensoren für die Energiemessung in einer Wärmepumpe	18
Abbildung 3-3. Beispiel für die Überwachung einer realen Wärmepumpe mit geothermischer Quelle	19
Abbildung 4-1. Beheizung von Gebäuden: traditionelle Lösung	20
Abbildung 4-2. Beheizung von Gebäuden: Wärmepumpenlösung	20
Abbildung 4-3. CO ₂ Emissionen pro thermische kWh bei Wärmepumpen	21
Abbildung 4-4. Diagramm eines Halbkaskadenzyklus	23
Abbildung 5-1. Grundriss des allgemeinen Stockwerks für das Mehrfamilienhaus	26
Abbildung 5-2. Grundriss des Reiheneinfamilienhauses	27
Abbildung 5-3. Analytierte Fälle: Ausgangszustand (A), Standardlösung für die tiefgreifende Nachrüstung (B), GSHP oder Hybridlösung für die tiefgreifende Nachrüstung (C)	30
Abbildung 5-4. Die Kostenanalyse der verschiedenen Fallzahlen für verschiedene Barwertzeiträume	30
Abbildung 5-5. Bewertungsmatrix für die Risikobewertung, die für die Umsetzung der UVP-Rahmenmethodik verwendet wurde	32
Abbildung 5-6. Beispiel eines aktuellen Risikoregisters zur Bewertung des Risikoniveaus und der Umsetzung angemessener Abhilfemaßnahmen	33
Abbildung 5-7. Arbeitsablauf der UVP-Folgenabschätzung	33
Abbildung 6-1. Energiebedarf für Heizung und Kühlung für Athen	35
Abbildung 6-2. Energiebedarf für Heizung und Kühlung für Straßburg	35
Abbildung 6-3. Energiebedarf für Heizung und Kühlung für Helsinki	35

TABELLEN

Tabelle 2-1. Die Ergebnisse der Parameterschätzung mit dem C2RLS-Modell	15
Tabelle 4-1. Plug & Play-Wärmepumpe: NWW006HL - Padua	22
Tabelle 4-2. Doppelte Verbrauchertemperatur-Wärmepumpe: CDH012HS - Belgien	22
Tabelle 4-3. Kältemittel-Wärmepumpe mit niedrigem GWP-Wert und doppelter Quelle: ETH010HL - Malta	22
Tabelle 4-4. CO ₂ -Kältemittel-Wärmepumpe mit doppelter Quelle: CDM035HS - Ferrara	23
Tabelle 4-5. Hochtemperatur-Wärmepumpe mit kleinem DT - Halbkaskadenzyklus: CDH015KL - Irland	23
Tabelle 5-1. Hauptmerkmale der Gebäudegeometrie	26
Tabelle 5-2. Amortisationszeit für die vier Simulationen	27
Tabelle 5-3. Primärenergie-Strom-Umwandlungsfaktoren (PEF) und Strompreise in den betrachteten Fällen	28
Tabelle 5-4. Überblick über die UVP-Methodik	32
Tabelle -61. Durchschnittliche U-Werte basierend auf der statistischen Analyse der TABULA-Datenbank	34



ABSTRACT

Wärmepumpen sind eine ausgereifte Technologie, die in Kombination mit erneuerbaren Energien eine CO₂-arme Heiz- und Kühllösung darstellen. Sie gelten daher als Schlüsseltechnologie zur Dekarbonisierung der Raumklimatisierung in Gebäuden, um die Netto-Null-Ziele zu erreichen. In diesem Band versuchen wir, einige Aktivitäten des GEO4CIVHIC-Projekts kurz darzustellen.

Wir befassen uns mit analytischen Methoden zur Bewertung der thermischen Interferenz zwischen geothermischen Systemen, die in unmittelbarer Nähe zueinander installiert sind. Ebenso bieten wir Anleitungen für einen maßgeschneiderten thermal response test (TRT) und stellen Werkzeuge für die Vorplanung, Dimensionierung und Überwachung der oberflächennahen geothermischen Systeme vor. Außerdem untersuchen wir Synergien mit anderen Technologien für erneuerbare Energien (EE), einschließlich Hybridvarianten, sowie die Entwicklung von Steuerungsstrategien. Darüber hinaus analysieren wir verschiedene im Rahmen des Projekts erstellte Fallstudien in Bezug auf Energie und Wirtschaftlichkeit, aber auch Umweltfaktoren.

Zum Schluss finden Sie eine praktische Übung, mit der Sie Ihr Wissen testen können. Das Dokument endet mit den wichtigsten Schlussfolgerungen. Wir hoffen, dass diese Informationen Ihnen einen hilfreichen Überblick über das GEO4CIVHIC-Projekt und seine Aktivitäten geben.

NOMENKLATUR

Abkürzungen

<i>EWT</i>	Erdwärmetauscher
<i>EED</i>	Erdenergiedesigner
<i>WWWP</i>	Grundwasserwärmepumpe
<i>ETHICAL</i>	einfache Auswertung thermischer Störungen
<i>TRT</i>	Thermal Response Test
<i>ILS</i>	unendliche Linien-Quelle
<i>C2RLS</i>	zusammengesetzte Zwei-Regionen-Linien-Quelle
<i>FLS</i>	endliche Linienquelle
<i>MLS</i>	bewegliche Linienquelle
<i>PCHE</i>	Kunststoff-Koaxial-Wärmetauscher
<i>EEA</i>	Erneuerbare-Energie-Anlage
<i>EWP</i>	Erdwärmepumpe
<i>MCDA</i>	multikriterielle Entscheidungsanalyse
<i>ERWT</i>	Erdreichwärmetauscher
<i>LWWP</i>	Luft-Wasser-Wärmepumpe
<i>KPIs</i>	wichtige Leistungsindikatoren
<i>SEER</i>	saisonaler Energiewirkungsgrad
<i>GWP</i>	Erderwärmungspotenzial
<i>RH</i>	relative Luftfeuchtigkeit
<i>HHWW</i>	Haushaltswarmwasser
<i>nZEB</i>	Niedrigstenergiegebäude
<i>PV</i>	Fotovoltaik
<i>HVAC</i>	Heizung, Lüftung und Klimatisierung
<i>PCM</i>	Phasenwechselmaterial
<i>PEF</i>	Primärenergiefaktor
<i>NPV</i>	Nettgegenwartswert
<i>CBA</i>	Kosten-Nutzen-Analyse
<i>EIA</i>	Umweltverträglichkeitsprüfung
<i>SCOP</i>	saisonaler Leistungskoeffizient

1. ANALYTISCHES WERKZEUG UND EMPFEHLUNGEN FÜR DIE THERMISCHEN AUSWIRKUNGEN VON GSHE-NACHBARSCHAFTSFELDERN MIT GESCHLOSSENEM KREISLAUF

1.1. Stand der Technik bei Simulationsmodellen und Normen

Die am häufigsten verwendete oberflächennahe Geothermie-Technologie ist das geschlossene Kreislaufsystem mit vertikalen Bohrloch-Erdwärmetauschern (EWT). Für diese Systeme gibt es viele Werkzeuge und Modelle zur Simulation. Es ist entscheidend, das thermische Verhalten dieser Systeme langfristig (also über mehrere Jahre hinweg) zu untersuchen. Nur spezielle Werkzeuge können den Betriebsmodus dieser Systeme berechnen, wobei sie die Vielzahl und Komplexität der Parameter über die Jahre berücksichtigen. Dieser Aspekt ist für einen effizienten und langlebigen Betrieb der geplanten Anlagen von entscheidender Bedeutung. Wenn die Gesamtlänge der Erdwärmetauscher unterschätzt wird, wird die Energieeffizienz der Wärmepumpe beeinträchtigt. Wird sie hingegen überschätzt, steigen die Anfangskosten der Anlage unnötigerweise an.

Es ist daher wichtig, die Möglichkeit einer thermischen Interferenz zwischen benachbarten Geothermie-Systemen zu berücksichtigen und zu antizipieren. Wenn diese nicht in Erwägung gezogen wird, könnte sie alle Systeme beeinträchtigen. Bei geographisch eng beieinander liegenden Geothermie-Systemen kommt es tatsächlich zu einer thermischen Interferenz. Dies führt zu einer Temperaturveränderung im Erdreich rund um die vertikalen Erdwärmetauscher. Im Vergleich zu einer Situation ohne thermische Interferenz ist der Wärmeaustausch zwischen EWT-Systemen und dem umgebenden Erdreich negativ beeinträchtigt. Ohne geeignete Vorkehrungen wird die Temperatur der Flüssigkeit im EWT durch das von dem benachbarten System gekühlte oder erwärmte Erdvolumen zu stark abgekühlt oder überhitzt. Der Temperaturunterschied zwischen Flüssigkeit und Erde sollte daher im Vergleich zu Fällen ohne thermische Interferenz ziemlich gleich bleiben.

Die Modelle der unendlichen und endlichen Linienquelle stellen das Bohrloch als Linie dar, die einen konstanten, gleichmäßigen Wärmefluss abgibt oder aufnimmt. Eine weitere häufig angewandte Methode ist die zylindrische Wärmequelle, die üblicherweise zur Analyse der thermischen Leistung von Energiepfählen verwendet wird. Die TRNSYS-Simulationsumgebung für Bohrloch-Wärmetauscher verwendet den von Hellström vorgeschlagenen Ansatz. Die EnergyPlus-Software simuliert die Bohrloch-Wärmetauscher und verwendet langzeitige g-Funktionen, die direkt von den Nutzern bereitgestellt werden können. Andere Softwarepakete wie EED (earth energy designer), EWS, GLHEPRO und PILESIM basieren auf den Arbeiten von Eskilson und Hellström.

Die meisten Simulations-Tools vernachlässigen die Auswirkungen der Bewegung des Grundwasserleiters auf den Wärmeübertrag, da dessen Beitrag üblicherweise durch eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Bodens berücksichtigt wird. Diese Annahme ist jedoch nur bei geringen Geschwindigkeiten des Aquifers akzeptabel. Einige analytische Modelle können das thermische Verhalten von Erdwärmetauscherinstallationen analysieren, wobei sie Einzelsysteme mit Grundwasserfluss berücksichtigen. In der Literatur wurden theoretische Forschungsbeiträge zu diesem speziellen Thema vorgeschlagen, die sich auf analytische und numerische Ansätze konzentrieren. Die am weitesten verbreiteten analytischen Methoden leiten sich aus dem Modell der beweglichen unendlichen Linienquelle ab, das das thermische Feld eines einheitlichen Mediums beschreibt, welches durch eine feststehende Wärmequelle bewegt wird. Numerische Methoden berücksichtigen weniger vereinfachte Modelle und verfolgen die Lösung durch verschiedene Ansätze, die auf der Lösung eines Systems von diskretisierten Gleichungen basieren. Die Literatur dokumentiert Unmengen erfolgreicher Anwendungsbeispiele.

Einzelsysteme von Grundwasserpumpen können ebenfalls durch analytische Modelle simuliert werden. Wenn der Fokus jedoch auf der Interferenz zwischen benachbarten und größeren Systemen liegt, werden normalerweise numerische Modelle bevorzugt.

Ein Hauptkriterium für das Design von vertikalen EWT ist ein gegebener Grenzwert für die minimale oder maximale Betriebstemperatur der in den EWT zirkulierenden Flüssigkeit. Die Betriebstemperaturen können entweder durch numerische Simulationen berechnet werden, die sehr flexibel sind, aber einen hohen Rechen- und Speicheraufwand erfordern, oder durch (halb-) analytische Modelle. Letztere bieten kompakte Lösungen, die nur für bestimmte Bedingungen gültig sind und oft konzeptionelle Vereinfachungen der tatsächlichen Gegebenheiten darstellen. In der Entwurfsphase ist es normalerweise sehr schwierig, Nachbarschaftseffekte mit Standard-Designsoftware und -Vorschriften zu berechnen, teilweise weil die verfügbaren Informationen über benachbarte Systeme sehr begrenzt sind, aber auch weil Standard-Tools nicht dafür ausgelegt sind, mit verschiedenen Arten von Systemen umzugehen.

Thermische Systeme können unterschiedliche Energieprofile, verschiedene Bohrlochtiefen oder räumliche Konfigurationen und Abstände aufweisen; diese spezifischen Besonderheiten können viele Schwierigkeiten bei der standardisierten Dimensionierung verursachen.

Normalerweise betrachten die wichtigsten nationalen und internationalen Standards oder Handbücher, die sich mit der Dimensionierung von EWT befassen (z.B. VDI 4640-2, SN 546 384/6, UNE 100715-1, EN 15450 sowie die von ASHRAE und IGSHPA), isolierte Systeme ohne Installation anderer nahegelegener Systeme. Der SN 546 384/6 von 2021 verlangt die Berücksichtigung aktueller und zukünftiger geothermischer Anlagen, legt einen Energiedichte-Ansatz fest und setzt Regenerations- und Überdimensionierungsbeschränkungen. Es obliegt jedoch dem Planer, eventuelle thermische Auswirkungen von Anlagen in der Nähe zu bewerten.

Die Standards sind sich jedoch einig, dass die Systemdimensionierung unbedingt das Einfrieren des umgebenden Bodens vermeiden muss, indem sie Temperaturwerte vorschreiben, die innerhalb bestimmter Grenzen bleiben müssen (typischerweise mindestens $-1,5^{\circ}\text{C}$ für die durchschnittliche Vor- und Rücklauftemperatur der Flüssigkeit in den EWT). Diese Grenze muss während der Dimensionierungsphase berücksichtigt werden, um sie während der folgenden Betriebsjahre des Systems festzulegen (z.B. verlangt der schweizerische SN 546 384/6, dass diese Grenze in den ersten 50 Betriebsjahren nicht überschritten wird).

Wie in Band 6 dieses Handbuchs beschrieben, besteht eine gängige und einfache Methode darin, Fälle mit und ohne thermische Interferenz zu vergleichen. Dies dient dazu, die abnehmende Temperatur der EWT-Flüssigkeit zu bewerten, nachdem die Interferenz einer nahegelegenen höheren Temperaturgrenze aufgetreten ist, um das Einfrieren des umgebenden Bodens zu verhindern ($-1.5^{\circ}\text{C} + |\Delta T_{\text{penalization}}|$), wobei $\Delta T_{\text{penalization}}$ der Temperaturabfall der EWT-Flüssigkeit aufgrund der Anwesenheit einer nahegelegenen Installation ist.

1.2. Im Rahmen des GEO4CIVHIC-Projekts entwickeltes und verwendetes Tool

Aktuell existieren nur wenige Werkzeuge, die Systeme zur Vermeidung oder Begrenzung thermischer Effekte aufgrund von gegenseitigen Störungen zwischen eng nebeneinander liegenden Kreisläufen bewerten können. Diese Werkzeuge sind häufig teuer und kompliziert in der Handhabung. Im Rahmen des GEO4CIVHIC-Projekts wurde jedoch ein praktisches und einfaches Werkzeug für die vorläufige Dimensionierung von Geothermie entwickelt und vorgestellt. Dieses als ETHICAL bezeichnete Werkzeug basiert auf einer analytischen Lösung (bewegliches und gemeinsames unendliches Linienquellenmodell), die in Visual Basic in eine Excel-Datei implementiert wurde. Die Benutzerfreundlichkeit und klare Verfahrensweise macht es einfach zu verwenden, ohne dass komplizierte Computercodes oder Einstellberechnungen erforderlich sind. Es dient zur Problemlösung und kann dabei helfen, mögliche technische Probleme zwischen nahegelegenen Geothermiesystemen auf städtischer Ebene zu bewerten und zu begrenzen. Aufgrund seiner Einfachheit und Schnelligkeit wird dieses Werkzeug sowohl Behörden als auch Beratern empfohlen, obwohl eine grundlegende Schulung empfohlen wird.

Mit ETHICAL lässt sich der thermische Effekt für verschiedene Geothermiesysteme berechnen, die sich in der Anzahl und Tiefe der Bohrlöcher, den Parametern der verwendeten EWT, dem Energiebedarfsprofil und den Abständen zwischen verschiedenen EWT-Systemen unterscheiden.

Im Detail wurden zwei Werkzeuge entwickelt: eines ohne fließenden Aquifer (kein Advektionseffekt) und das andere mit der Möglichkeit, einfache Parameter einzustellen, die das Vorhandensein von bewegtem Grundwasser berücksichtigen.

Die Werkzeuge können über die folgenden Links geöffnet und heruntergeladen werden (klicken Sie darauf oder kopieren Sie sie in Ihren Browser):

- geo4civhic.eu/files/ETHICAL_WithoutMovingAquifer.xlsm
- geo4civhic.eu/files/ETHICAL_ActiveMovingAquifer.xlsm

Im Deliverable 6.3 wird auch erklärt, wie die 'konstante Linienquelle' berechnet wird, einschließlich Berechnungsbeispielen. Die Berechnung der thermischen Interferenz und damit der Effekt auf das Wärmeträgerfluid des EWT wurde auf einen Pilotfall angewendet. Die Ergebnisse zeigten den thermischen Interferenzeffekt bei Variation mehrerer Parameter (Abstand zwischen Anlagen, thermische Leitfähigkeit des Bodens, Größe benachbarter Geothermiesysteme, unterschiedliche Wärmeentzugsraten). Die Ergebnisse sind in 3.1.1 von Deliverable 6.3 beschrieben. Die Simulationen wurden mit dem TRNSBM-Modul durchgeführt, das die TRNSYS-Version des SBM-Programms (Superposition-Bohrlochmodell) ist. Einige dieser Ergebnisse wurden auch mit dem ETHICAL-Werkzeug verglichen, wobei eine gute Übereinstimmung festgestellt wurde.

1.3. Ergebnisse und Empfehlungen aus dem Projekt GEO4CIVHIC

Die häufig angewandte Regel "Wer zuerst kommt, mahlt zuerst" trifft nicht immer zu. Während neue geothermische Anlagen die bereits existierenden berücksichtigen können, ist es im Allgemeinen schwierig oder unmöglich, dasselbe umgekehrt zu tun. Jedes Geothermiesystem muss stets die Mindest- und Maximaltemperaturen des Fluids in den erdgekoppelten Wärmepumpen berücksichtigen. Daher ist es von großer Bedeutung, bei der Planung und Dimensionierung von Anlagen auch zukünftige Systeme in der Nähe zu berücksichtigen und eventuelle Anpassungsmaßnahmen zu bedenken, um bestehende Anlagen nicht zu beeinträchtigen.

Gemäß Deliverable 6.3 lässt sich durch den Einsatz kleinerer, konstanter linearer Wärmequellen die Auswirkung reduzieren. Es zeigt sich weiterhin, dass bei einer höheren Sondendichte und Anzahl von Anlagen die pro Installation nutzbare geothermische Ressource abnimmt.

Um diesen Effekt zu begrenzen, ohne die Heizleistung für die Nutzer zu beeinträchtigen, ist es möglich, den Boden thermisch aufzuladen. Eine weitere Möglichkeit ist die Erhöhung der Gesamtblöhlänge, um die Mindesttemperatur des Fluids zu erhöhen. Beide Effekte sind in Deliverable 6.3 (Seite 42 und 54) erläutert und tragen dazu bei, die konstante Linienquellenextraktion aus dem Boden zu reduzieren.

Auch in warmen Klimazonen, in denen die Wärmeeinspeisung gegenüber der Wärmeextraktion überwiegt, sind diese Überlegungen anwendbar. Hier besteht die entscheidende Herausforderung in der Unterkühlung des Bodens und der damit verbundenen Gefahr des Einfrierens. Moderne Wärmepumpen können mit Blockiersystemen ausgestattet werden, die das Einfrieren des Bodens verhindern. Das minimiert das Frost-Risiko, kann jedoch die Heizleistung des Gebäudes reduzieren oder unterbrechen.

Bei der Überhitzung des Bodens ist es wichtig, die maximal zulässige Temperatur zu beachten, die sich nach der Dichte der Materialien und dem Verdampfer der Kältemaschine richtet (Temperaturen über 40°C sind in der Regel nicht empfehlenswert). Ein Konzept der $\Delta T_{\text{penalization}}$ kann definiert und für Überhitzungszustände angewendet werden.

Unter Berücksichtigung dieser Überlegungen sind folgende drei Kriterien zur Reduzierung der thermischen Beeinträchtigung zwischen nahe gelegenen Geothermiesystemen mit EWT geeignet:

1. Wenn die Systeme weniger als 50 % der Bohrlänge voneinander entfernt sind (der Abstand wird als der nächstgelegene Punkt zwischen den Sonden berechnet, siehe z. B. Abb. 6 und 7 in Deliverable 6.3), ist es noch möglich, dass ein gewisser negativer thermischer Effekt zwischen geothermischen Systemen auftritt. Es wird empfohlen, Mindestabstände zwischen geothermischen Systemen festzulegen, jenseits derer thermische Interferenzen beurteilt werden.
2. Bei der Dimensionierung die Mindesttemperatur der Flüssigkeit ordnungsgemäß erhöhen, um die langfristigen Auswirkungen der benachbarten Systeme zu berücksichtigen. Dies kann durch eine Vergrößerung der Gesamtlänge der Bohrung erfolgen, wenn eine Änderung der jährlichen Wärmeentnahme möglich ist.
3. Begrenzung der jährlichen Entnahme der geothermischen Ressource pro Anlage. Dies kann durch die jährliche Aufladung des Erdreichs geschehen, wodurch das Erdreich wieder aufgeladen und die jährliche Wärmeentnahme verringert wird.

Natürlich können die Möglichkeiten gleichzeitig und kombiniert eingesetzt werden, wobei darauf zu achten ist, dass das gewünschte und optimale Ergebnis erhalten bleibt.

2. LEITLINIEN FÜR EINEN ANGEPASTEN THERMAL RESPONSE TEST (TRT): METHODIK UND NEUE ERGEBNISSE AM KUNSTSTOFF-KOAXIAL-PROTOTYP

2.1. Aktueller Stand der TRT-Methoden

Die Kelvin-Linienquellen-Theorie, bekannt als unendliche Linienquellen-Modell (ILS) (Gehlin 1998, Sanner et al. 2013), gehört zu den frühesten und am häufigsten verwendeten Modellen. Sie zeichnet sich durch ihre Einfachheit und Schnelligkeit aus (Witte et al. 2002). Die beiden existierenden Standards für TRT, EN ISO 17628 und VDI 4640-5, schlagen dieses Modell vor, wobei VDI 4640-5 weitere Methoden erwähnt. Es gibt auch ausgefeiltere Modelle, die Advektion berücksichtigen (Molina-Giraldo 2011, Magraner et al. 2021) oder halb-numerische elektrische Analogien verwenden (De Carli et al. 2010, Cazorla-Marín et al. 2021). Doch fehlende Daten begrenzen meist ihre praktische Anwendbarkeit.

Jedoch gibt es bei einigen dieser Modelle, wie beispielsweise beim ILS, erhebliche Schwierigkeiten. So streuen die geschätzten Werte für die EWT-Parameter und die Bodeneigenschaften und hängen stark vom gewählten Datenfenster

ab. Das führt zu Willkürlichkeit in den Schätzungen. Hinzu kommt eine hohe Korrelation zwischen den Parametern, die zu einer mehrdeutigen Parameteridentifikation führt. Dass die Modelle nur in Zeitintervallen funktionieren, die durch spezifische Zeitskalen nach unten begrenzt sind – meist im Bereich von 6 bis 20 Stunden – stellt eine weitere Herausforderung dar. Denn dies erfordert das Verwerfen von zuvor gesammelten, aber nicht nutzbaren Daten.

Andere Ansätze, die von einem homogenen Feld ausgehen, wie die Modelle der endlichen Linienquelle (FLS) und der beweglichen Linienquelle (MLS), unterliegen denselben kurzfristigen Einschränkungen. Währenddessen neigen anspruchsvollere halb-numerische Ansätze dazu, viele interne Modellparameter (in Form von Widerständen) zu benötigen. Sie erzeugen zwar eine gute Übereinstimmung mit experimentellen Daten, liefern jedoch keinen klaren Einblick in die physikalischen Prozesse innerhalb der EWT.

2.2. Innovativer Ansatz im Rahmen von GEO4CIVHIC

Einige Autoren verfolgten eine andere Strategie im Kontext der TRT-Analyse (Beier und Smith 2003, Li und Lai 2013, Li und Lai 2015). Diese stammt aus einer klassischen Lösung für das Problem des unzentrierten ILS Wärmeleitungstransfers zwischen zwei zylindrischen Bereichen, die im klassischen Lehrbuch von Carslaw und Jaeger (1986) zu finden ist. Hierbei wird das Wärmeleitungsproblem für zwei Zonen gelöst: Innerhalb und außerhalb des Bohrradius. Die entstehende Darstellung der Temperaturänderung im kurz- und langfristigen Zeitverlauf ist nahezu vollständig. Sie ist abhängig von vier Variablen (die Leitfähigkeit und Diffusivität des Bodens und des Grouts), statt der üblichen zwei Parameter im ILS. Dadurch werden Einblicke in die Eigenschaften des Grouts ermöglicht.

Diese Rahmenbedingungen für zwei zylindrische Linienquellen (C2RLS) stellen daher eine vielversprechende Lösung für das Kurzzeitskalenproblem der herkömmlichen TRT-Praxis dar. Sie helfen auch dabei, bedeutende Parameter im Zusammenhang mit dem Grout, wie die Leitfähigkeit und Diffusivität, zu ermitteln. Als Nachteil ist ihre ursprüngliche Formulierung im Vergleich zu den ILS-, FLS- und MLS-Methoden komplexer, was eine bedeutende Barriere für ihre Verwendung darstellen könnte. Trotz ihrer theoretischen Stichhaltigkeit wurde C2RLS bisher nicht breit in der Praxis angewendet.

Unsere Studie wurde durch die Notwendigkeit motiviert, potenzielle Veränderungen durch die Verwendung verschiedener Kunststoffmaterialien, geometrischer Anordnungen und Grout-Rezepturen in verschiedenen EWT zu bewerten. Diese neuen Materialien und Konfigurationen sind Ergebnisse des europäischen H2020-Projekts GEOCOND und wurden auf unserem Testfeld an der UPV (Badenes et al. 2017, Urchueguía et al. 2018, Badenes et al. 2020) sowie an anderen Projekten in Europa installiert.

Um dieses Ziel zu erreichen, haben wir die C2RLS-Formulierung angepasst, um nützliche Informationen über den Boden und das Hinterfüllmaterial aus einer Kombination von stabilen und instabilen Wärmeinjektionsimpulsen zu gewinnen. Die erhaltenen Parameter korrelieren direkt mit tatsächlichen physikalischen Größen. Unsere Methode ermöglicht es, Plausibilitätskriterien zu formulieren, um Lösungen zu identifizieren, die nicht nur die Temperaturverläufe adäquat voraussagen, sondern auch aussagekräftige Ergebnisse liefern.

Das resultierende Framework wurde realisiert und auf die aktuelle Situation angewendet. Dabei zeigte sich, dass die praktische Anwendung des C2RLS-Frameworks, wie es in unserer GEO4CIVHIC-Forschung angepasst wurde, erhebliche Vorteile gegenüber den aktuellen Modellen bietet und weitreichend und praktisch für die TRT-Praxis anwendbar ist.

Zusammengefasst bieten sich folgende Vorteile:

1. Wir schätzen Parameter, die sonst schwer zu ermitteln sind, wie Diffusivität, Wärmekapazität und Leitfähigkeit von Boden und Grout und den Wärmewiderstand der Rohre. Diese bieten zusätzliche Informationen für weitere Verbesserungen, Charakterisierung und Verifizierung.
2. Alle Parameter korrelieren mit tatsächlichen, messbaren Eigenschaften des Bodens, was eine unabhängige kritische Überprüfung und den Vergleich mit alternativen Schätzungsmethoden ermöglicht. Unter den geschätzten Parametern befinden sich die Diffusivität des Bodens und die ungestörte Bodentemperatur. Es besteht keine Notwendigkeit, auf einige vorherige unabhängige Schätzungen ihrer Werte zu vertrauen.
3. Die geschätzten Parameter liefern ein Modell, das genau die nichtstationäre Temperaturveränderung eines BHE vorhersagen kann, unterliegend jeder gegebenen nicht-stabilen Wärmeinjektionssequenz, wie in der beigefügten Abbildung gezeigt.

So bietet die Anwendung dieser Methodik auf das GEO4CIVHIC-Testbohrloch zusätzliche Informationen und Einblicke in die Eigenschaften der im Projekt entwickelten Materialien und eröffnet neue Denkansätze für zukünftige Verbesserungen der Standard-TRT-Evaluierungsmethoden.

2.3. Anwendung des neuen C2RLS TRT-Schemas auf die koaxiale GEO4CIVHIC-Testbohrung im UPV-Testgelände

2.3.1. Erläuterung zum Testaufbau

Ein zwölf Meter tiefer Kunststoff-Koaxialwärmetauscher (PCHE) (siehe Abbildung 2-1) mit den folgenden Spezifikationen wurde in einem Bohrloch mit einem Durchmesser von 0,14 m auf dem UPV-Testgelände installiert:

- Außenrohr: Außendurchmesser: 63 mm Wandstärke: 5,8 mm Wärmeleitfähigkeit: 1 W/(m.K)
- Innenrohr: Außendurchmesser: 32 mm Wandstärke: 2,9 mm Wärmeleitfähigkeit: 0,1 W/(m.K)

Das Innenrohr besteht aus einem zweischichtigen Verbund, der zum einen aus Standard-PE 100 und zum anderen aus einem PE 100-Schaum besteht, um eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit zu gewährleisten.



Abbildung 2-1. Die für den Versand vorbereiteten koaxialen Kunststoffrohre (PCHE)

Abbildung 2-2 zeigt die Verteilung der EWT im Testfeld, einschließlich der Entfernung zwischen den verschiedenen EWT in Metern. Der obere Teil des Bildes entspricht den sieben EWT, die für das GEOCOND-Projekt installiert wurden, in der Nähe des Bohrlochs, das dem Koaxialtauscher des GEO4CIVHIC-Projekts entspricht (in der Abbildung mit BHE G4C gekennzeichnet). Im unteren Teil der Abbildung sehen wir die Lage der drei Bohrlöcher, die mit dem Test im Rahmen eines früheren europäischen Projekts, Cheap-GSHPs, das zwischen 2015 und 2018 durchgeführt wurde, verbunden waren.

Abbildung 2-3 zeigt den Verbindungsteil des Einzel-U-Rohr-EWT, der dem koaxialen EWT ähnelt (der durch einen Schacht zugänglich ist), mit der Ausrüstung des thermischen Labors. Es verfügt über eine Luftspülung, ein Rückschlagventil und zwei Temperatursensoren, die an den Einlass- und Auslassrohren installiert sind, um die Temperaturunterschiede zwischen den Bohrlöchern zu messen, ein kritischer Faktor für die thermische Testleistung.

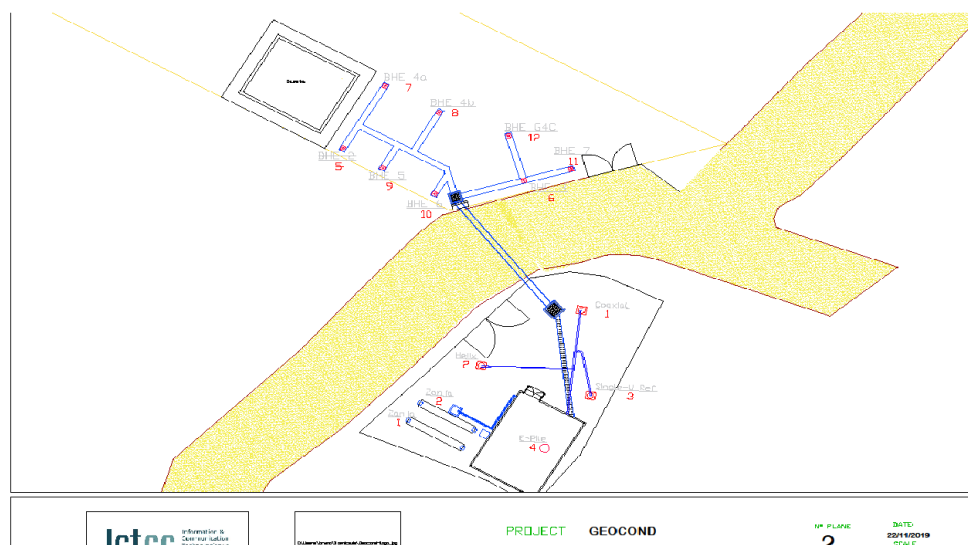


Abbildung 2-2. BHE-Verteilung auf dem Feld

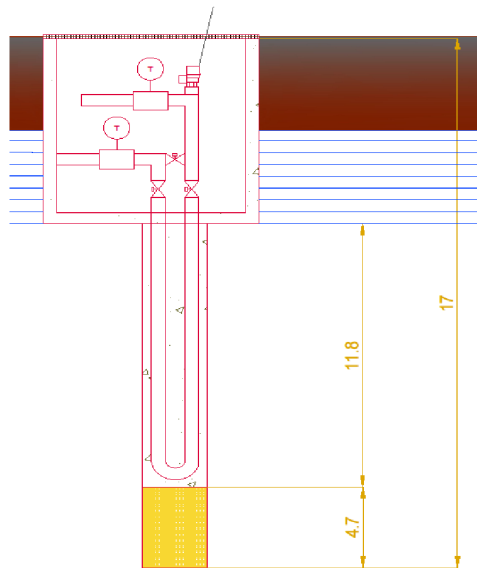


Abbildung 2-3. Äquivalente Position der Sensoren im BHE-Kopf (als Beispiel)

2.3.2. Anwendung des C2RLS-Modells auf die experimentellen Daten und die daraus resultierende Parameterschätzung

Die Ergebnisse des TRT und die nachfolgende Anpassung der experimentellen Resultate mit Hilfe der entwickelten Methodik sind in Abbildung 2-4 dargestellt. Die zugehörige Parameterschätzung wird in Tabelle 2-1 präsentiert. Die ermittelten Parameterwerte stimmen mit früheren Ergebnissen aus einer Reihe von Experimenten an Standard-EWT und EWT mit verbesserter Vergussmasse überein. Diese verwendeten den gleichen Typ wie der aktuell eingesetzte koaxiale Wärmetauscher (Urchueguía et al., in review). Die Werte für die Diffusivität bestätigen diese Resultate und zeigen, dass die aus den Tests gewonnenen Parameterwerte für Boden und Vergussmasse unabhängig von der Bohrlochgeometrie sind und somit charakteristisch für den verwendeten Boden und Vergussmasse.

Es fällt die hohe Bodenleitfähigkeit auf, die auch in vorherigen Tests mit herkömmlichen Auswertungsalgorithmen (ILS) und Simulationswerkzeugen (EED) beobachtet wurde. Derzeit wird untersucht, ob der spezifischen Hydrogeologie des Standortes geschuldet ein Grundwasserfluss vorhanden ist, der solch hohe, aber möglicherweise effektive oder scheinbare Leitfähigkeitswerte erzeugt.

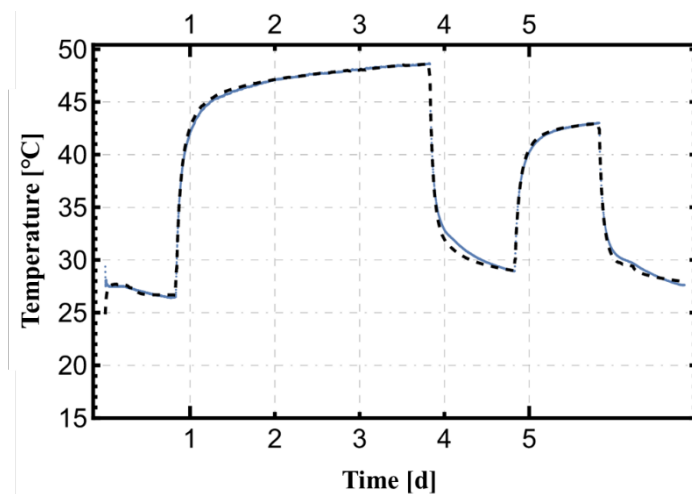


Abbildung 2-4. Mit dem C2RLS-Modell berechnete Kurve zwischen gemessener und angepasster Temperatur und geschätzten Parametern, die aus der Anpassung der experimentellen TRT-Daten an das Modell gewonnen wurden

Tabelle 2-1. Die Ergebnisse der Parameterschätzung mit dem C2RLS-Modell

Parameter	Wert	Einheit
Wärmeleitfähigkeit des Bodens	4.47	W/(m.K)
Wärmeleitfähigkeit des Mörtels	1.47	W/(m.K)
Diffusionsvermögen des Bodens	9.95×10^{-7}	m /s ²
Diffusionsfähigkeit des Mörtels	2.63×10^{-7}	m /s ²

3. WERKZEUGE FÜR DIE VORPLANUNG UND ÜBERWACHUNG VON ERDWÄRMEPUMPENANLAGEN

3.1. Neue Software und Planungswerkzeuge für die Planung von oberflächennahen geothermischen Systemen (DSS)

Dieser Abschnitt bietet einen Überblick über verschiedene Vor-Design-Tools für erste Untersuchungen von flachen geothermischen Systemen. Das Ziel dieser Tools ist es, eine Einschätzung der Dimensionierung und Leistung dieser Geothermie-Systeme für gegebene Anlagen zu erhalten.

Die präsentierten Tools wurden in den Projekten Cheap-GSHPs und GEO4CIVIC entwickelt und werden kostenlos online angeboten. Sie sind dazu gedacht, in einer Vorphase eingesetzt zu werden. Daher wurde besonderer Wert auf die Benutzerfreundlichkeit der Tools und die Art der Informationen gelegt, die von den Benutzern angefordert werden könnten. Die Berechnungen basieren im Allgemeinen auf einfachen Eingaben, die durch Schätzungen auf der Grundlage von Expertenwissen ergänzt werden. Dies bedeutet natürlich, dass die Ergebnisse der Berechnungen Schätzungen sind und die erzielten Resultate als vorläufige Analyse betrachtet werden sollten.

Die endgültige Installation eines Geothermie-Systems erfordert eine detaillierte Untersuchung des Standorts (einschließlich Expertenwissen, TRT-Tests usw.), sowie die Nutzung eines professionellen Design-Tools für die Dimensionierung des Systems. Ein kurzer Überblick über verfügbare Design-Tools wird ebenfalls in diesem Abschnitt gegeben.

3.1.1. Vorentwurfswerkzeug: Cheap-GSHPs Entscheidungshilfesystem

Dieses Entscheidungsunterstützungssystem ist ein webbasiertes Tool, entwickelt im Rahmen des Cheap-GSHPs-Projekts. Es zielt darauf ab, Laien einen Vergleich verschiedener geothermischer Technologien zu ermöglichen, die in ihren Einrichtungen installiert werden könnten.

Ausgehend von einfachen Ausgangsinformationen führt das Cheap-GSHPs-Tool zunächst einige Berechnungen durch, um den Energiebedarf des Gebäudes zu ermitteln. Anschließend wird die Dimensionierung mehrerer geothermischer Lösungen geschätzt, die aus der Kombination verschiedener geothermischer Technologien und zusätzlicher erneuerbarer Energieanlagen (EEA) bestehen. Jede Lösung wird anhand einer Liste von Kriterien (Kosten, Return on Investment, Lebenszyklusanalyse, Fläche) bewertet, entweder qualitativ oder quantitativ. Die Nutzer haben dann die Möglichkeit, die Lösungen nach ihren Präferenzen zu rangieren.

Die Berechnungen erfolgen nach folgenden Schritten:

1. Zunächst werden die Eigenschaften des Untergrunds bestimmt, basierend auf dem vom Benutzer angegebenen Standort, mithilfe der im Projekt erstellten paneuropäischen geologischen Datenbank für oberflächennahe geothermische Anlagen (Müller et al., 2018).
2. Danach werden Klimainformationen und der jährliche Energiebedarf des Gebäudes geschätzt. Dafür werden der Standort und der Gebäudetyp (aus einer vordefinierten Liste ausgewählt) berücksichtigt. Ein Referenzenergiebedarf ist für jeden Gebäudetyp und für 20 Referenzstandorte in Europa definiert. Für alle anderen Standorte wird eine Korrelation basierend auf der Köppen-Geiger-Klimaklasse (Kottek et al., 2006) angewendet, um die Klima- und Energiebedarfsberechnungen anzupassen (De Carli et al., 2018). Auch der Warmwasserbedarf wird basierend auf dem Gebäudetyp und den installierten Heizgeräten abgeschätzt.
3. Anschließend charakterisiert das Tool die realisierbaren Systeme von Erdwärmepumpen (EWP), basierend auf den Spitzenlasten für Heizung und Kühlung sowie auf den Wassertemperaturen in den Kreisläufen im Winter und Sommer.

4. Sobald die EWP-Systeme definiert sind, bestimmt das Tool die Größe und Charakteristik verschiedener Technologien von erdverbundenen Wärmetauschern (ERWT), basierend auf dem Energiebedarf, den Eigenschaften und der Temperatur des Untergrunds sowie der Charakterisierung der EWP. Zunächst wird die Gesamtlänge des Wärmetauschers für Kühlung und Heizung mit der ASHRAE-Methodik (Kavanaugh und Rafferty 1997) berechnet. Dann werden diese Längen verglichen, um den Bedarf an zusätzlicher Kühlung oder Heizung zu bewerten. Die Längen werden bei Bedarf angepasst und die Anzahl und Geometrie der Bohrlöcher bestimmt. Schließlich erfolgen erneut ASHRAE-Berechnungen, um die Abmessungen des GSHE zu optimieren, unter Berücksichtigung der Geometrie der Bohrlöcher.
5. Für Kombinationen von geothermischen Technologien, bei denen zusätzliche Systeme und EEA erforderlich sind, werden auch diese berechnet und charakterisiert.
6. Zuletzt bilden die Kombinationen der in Betracht gezogenen EWP, ERWT und die verschiedenen erneuerbaren und zusätzlichen Systeme einen Satz von Lösungen. Diese werden entweder qualitativ oder quantitativ anhand der o.g. Kriterien bewertet.

Das Tool präsentiert diese Bewertung der verschiedenen Lösungen und ermöglicht es den Nutzern, die relative Priorität der genannten Kriterien festzulegen. Als Antwort priorisiert das System die verschiedenen Lösungen und zeigt zuerst die Lösung an, die am besten den Präferenzen des Nutzers entspricht.

3.1.2. Vorentwurfswerkzeug: GEO4CIVHIC Entscheidungshilfesystem

Das GEO4CIVHIC-Tool ist ein webbasiertes Instrument, das darauf abzielt, die Einführung von geothermischen Sanierungsmaßnahmen in städtischen Umgebungen zu beschleunigen. Ziel ist es, eine Kosten- und Auswirkungsanalyse vor der Planung durchzuführen, um Gebäudebesitzer von der Installation von EWP-Systemen zu überzeugen und die Vorab-Diskussionen um eine solche Installation in einem Sanierungsprojekt zu erleichtern. Einerseits dient es Entscheidungsträgern, die Vorteile einer Investition in EWP zu verstehen, andererseits hilft es Experten, Projekte mit dieser Technologie zu vertragen.

Die Zielgruppe sind professionelle Nicht-Experten, Entscheidungsträger oder Experten, die Nicht-Experten-Anwender überzeugen wollen. Es werden Benutzer berücksichtigt, die zumindest grundlegende Kenntnisse im Bereich Technik/Bauwesen besitzen. Aus diesem Grund werden dem Benutzer in den Anfangsphasen der Berechnungen (Bodencharakterisierung, Klima und Energiebedarf) voreingestellte Schätzwerte vorgeschlagen, die er ändern und durch genauere Informationen ersetzen kann. Ebenso wird den Benutzern eine einfache Charakterisierung der geothermischen Technologien präsentiert, die in den Berechnungen verwendet werden. Diese können sie anpassen, wenn sie benutzerdefinierte Technologien in die Analyse einbeziehen möchten.

Das Tool führt die folgenden Berechnungen durch:

1. Zunächst werden die Benutzer aufgefordert, die Hauptlithologie und das geologische Unterumfeld des ausgewählten Standorts zu wählen. Hierbei helfen Bilder und Beschreibungen. Basierend auf diesen Entscheidungen wird dann die geschätzte Bodencharakterisierung (thermische Leitfähigkeit, Dichte und spezifische Wärme) des Standorts präsentiert.
2. Anschließend wird das Klima des ausgewählten Standorts (durchschnittliche Außentemperatur für jeden Monat des Jahres, Bodentemperatur) vorgestellt, basierend auf Daten von 26 Referenzstandorten für die verschiedenen Klimazonen Europas. Für andere Standorte wird die ähnlichste Option ausgewählt, basierend auf dem Standort und seiner Köppen-Geiger-Klasse (Kottek et al., 2006).
3. Nach der Klimateinstellung wird der Energiebedarf des Gebäudes geschätzt, einschließlich Heizung, Kühlung und Warmwasserbereitung. Das Tool schätzt den jährlichen Heiz- und Kühlbedarf sowie Spitzenwerte. Die Berechnung basiert auf dem Standort, dem Gebäudetyp, der Bauzeit und dem vom Benutzer ausgewählten Sanierungsszenario sowie den für die Projektarchetypen durchgeführten Energie-Simulationen (De Carli et al., 2019). Diese Schätzungen werden weiter durch eine Korrelation verfeinert, die die klimatischen Informationen des Standorts mit berücksichtigt.
4. Danach werden verschiedene mögliche geothermische Lösungen generiert, jede bestehend aus einer Kombination von EWP, ERWT und Bohrtechnologien. Die Auswahl der Bohrtechnologie erfolgt auf der Grundlage der im Projekt entwickelten multikriteriellen Entscheidungsanalyse (MCDA, Pasquali et al., GEO4CIVHIC-Projekt). Die am besten passende EWP für das Projekt wird aufgrund der Art der Endgeräte, des Dämmgrades und des Klimas des betrachteten Standorts ausgewählt, und ihre voreingestellte Charakterisierung wird für eine bessere Anpassung an das Projekt korrigiert. Schließlich wird eine Lösung für jede der vier betrachteten ERWT-Technologien vorgeschlagen: Einzel-U, Doppel-U, koaxial ohne Verfüllung und koaxial mit Verfüllung. Die Lösungen werden den Benutzern präsentiert, die bis zu drei davon für die Analyse auswählen können.

5. Sobald die Lösungen ausgewählt wurden, führt das Tool die geothermischen Berechnungen durch, die die Dimensionierung der ERWT (gesamte installierte Länge und Anzahl der Bohrlöcher) sowie die beste Strategie zum Lastausgleich (Notwendigkeit von Hilfssystemen) bestimmen, wobei der für das Bohrfeld verfügbare Raum berücksichtigt wird. Die Berechnungen folgen der ASHRAE-Methode (Kavanaugh und Rafferty 1997) und basieren auf der ausgewählten Wärmepumpe und der Bodencharakterisierung. Diese Methode ermöglicht die Berechnung der erforderlichen Bohrlöchlängen zur Deckung des Heiz- und Kühlbedarfs, wobei auch die Interferenzen zwischen den Bohrlöchern berücksichtigt werden. Angesichts des verfügbaren Raums ist es manchmal nicht möglich, alle notwendigen Elemente zu installieren. In diesen Fällen bestimmt das Tool, welche Hilfssysteme (Hybrid-Systeme oder Luft-Wasser-Wärmepumpen (LWWP)) installiert werden müssen.
6. Schließlich werden die berechneten Lösungen auf der Grundlage technischer, umweltbezogener und wirtschaftlicher Leistungsindikatoren (KPI) bewertet, die den Vergleich zwischen den Technologien und die Entscheidungsfindung erleichtern. Informationen über Risikominderungsmaßnahmen und potenzielle Hindernisse sind ebenfalls enthalten.

Das Tool präsentiert diese Ergebnisse numerisch und grafisch und ermöglicht das Herunterladen eines Berichts mit einer Zusammenfassung der analysierten Technologien und der erzielten Ergebnisse.

3.2. Planungs- und Überwachungsinstrumente für oberflächennahe geothermische Anlagen in bestehenden Gebäuden

Die Überwachung ist ein Prozess, der das Sammeln von Daten von einem System (Messung) und die Nutzung dieser Daten zur Erfassung der Systemleistung umfasst. Dies erfolgt mit zwei Hauptzielen: i) Bewertung der Effizienz des Systems und ii) Erkennung möglicher Fehlfunktionen, um diese schnellstmöglich zu beheben.

Die Auswertung eines EWP-Systems führt zur Definition von SCOP (saisonaler Leistungskoeffizient) und SEER (saisonaler Energiewirkungsgrad). Diese messen die Leistung einer reversiblen Wärmepumpe während des Winter- (gemessen mit SCOP) und Sommerbetriebs (gemessen mit SEER). Die Gleichungen [1] und [2] dienen zur Messung der Energieeffizienz der Wärmepumpe beim Heizen (Gleichung 1) und Kühlen (Gleichung 2).

$$SCOP = \frac{\text{abgegebene Wärme an das Gebäude [kWh]}}{\text{elektrischer Verbrauch der Wärmepumpe [kWh]}} \quad [1]$$

$$SEER = \frac{\text{aus dem Gebäude extrahierte Wärme [kWh]}}{\text{elektrischer Verbrauch der Wärmepumpe [kWh]}} \quad [2]$$

Abbildung 3-1 zeigt verschiedene Systemgrenzen zur Berechnung unterschiedlicher saisonaler Leistungskoeffizienten (nur für SCOP). Die Berücksichtigung des Energieverbrauchs weiterer Systemelemente führt zu niedrigerer Effizienz, ermöglicht jedoch mehr Kenntnis über die Effizienz der gesamten Anlage. Momentane Werte für COP und EER, die die Effizienz einer Wärmepumpe messen, können mit den Gleichungen [3] und [4] berechnet werden.

Es gibt mehrere Systemgrenzen zur Berechnung der verschiedenen Stufen des saisonalen Koeffizienten, wie in Abbildung 3-1 (nur im Fall von SCOP). Die Berücksichtigung des Energieverbrauchs von mehr Systemelementen führt zu niedrigeren Wirkungsgraden, verbessert aber die Kenntnisse über die Effizienz der gesamten Anlage. Die Momentanwerte für COP und EER, die die Effizienz einer Wärmepumpe messen, können mit den Gleichungen [3] und [4] berechnet werden.

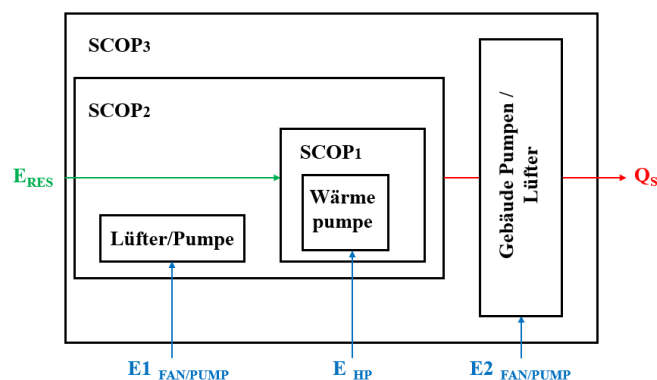


Abbildung 3 1. Verhältnis der verschiedenen Energien, die für die verschiedenen SCOP-Berechnungen verwendet werden: die Wärmeenergie, die dem Gebäude zugeführt wird (Q_s) und aus einer

erneuerbaren Quelle stammt (E_{RES}), und die Energie, die von der Wärmepumpe (E_{HP}) und Hilfelementen wie Gebläse und Pumpen ($E_{1_FAN/PUMP}$ und $E_{2_FAN/PUMP}$) verbraucht wird

$$COP = \frac{\text{im Kondensator freigesetzte thermische Leistung [kW]}}{\text{elektrische Leistung des Kompressors [kW]}} \quad [3]$$

$$EER = \frac{\text{im Verdampfer aufgenommene Kühlleistung [kW]}}{\text{elektrische Leistung des Kompressors [kW]}} \quad [4]$$

Um die Effizienz von Wärmepumpen zu bewerten, müssen wir die Energien, die auf das System einwirken, definieren und messen. Die Grundlage hierfür sind die Elemente in Abbildung 3-1. Die Effizienz (siehe Gleichungen [3] und [4]) wird als Verhältnis zwischen der vom Gebäude benötigten Wärmeleistung und der Leistung des Verdichters gemessen, die in der Regel durch elektrische Energie erzeugt wird.

Die im Wärmepumpenkompressor verwendete elektrische Energie kann entweder aus einer Photovoltaikanlage selbst erzeugt oder aus verschiedenen Quellen entsprechend dem nationalen Strommix importiert werden.. Die Entscheidung für die eine oder die andere Variante ist wichtig für die Betriebskosten der Anlage, da die erzeugte elektrische Energie die importierte Energie (und damit die relativen Kosten) senkt.

Die elektrische Energie wird gemessen, indem ein Energiezähler vor dem elektrischen Anschluss des zu überwachenden Systems angeschlossen wird. Es werden kontinuierlich Spannungs- und Stromdaten gesammelt und die Leistung ermittelt; das Integral dieser Daten über einen bestimmten Zeitraum ergibt die entsprechende Energie. Mehrere Energiezähler helfen, ein besseres Verständnis des Gesamtsystems zu erlangen.

Es sind zwei verschiedene thermische Energien zu messen: i) die vom Gebäude entzogene/zugeführte und ii) die mit der Umgebung ausgetauschte (siehe Abbildung 3-2). Die Wärmepumpe ist zwischen der Wärmequelle und der Wärmesenke, wobei das Gebäude im Heizmodus Senke im und im Kühlmodus Quelle.

Die Messung der thermischen Energie ist komplizierter als die der elektrischen, da eine Reihe von Temperaturen und ein Massenfluss benötigt werden. Ihr Produkt, zusätzlich zu den notwendigen Konstanten (z.B. Dichte und spezifische Wärme des Flusses), führt zur Leistung und bei Integration über eine Zeit zur relativen Energie. Dieses Integrationsverfahren vermindert die Genauigkeit der Energiemessung, da auch Fehler mit integriert werden. Um den Fehler zu reduzieren, sollten die Durchflussmesser und Temperatursensoren gut kalibriert und sehr genau sein.

Was die Messung des Massendurchflusses betrifft, so sind die beiden typischen Werte, die wir in den Zählern finden, die reine Geschwindigkeit und der Impulszähler. Der erste liefert einen Wert, der direkt mit der momentanen Geschwindigkeit des Durchflusses zusammenhängt; durch Integration dieses Wertes kann der Massendurchfluss ermittelt werden. Beim zweiten, dem Impulszähler, wird jedes Mal ein Impuls erzeugt, wenn eine bestimmte Durchflussmenge das Messelement passiert hat; durch Zählen dieser Impulse erhält man das Gesamtvolumen der durchlaufenen Flüssigkeit.

Es ist wichtig zu betonen, dass die erhaltene Energie das Ergebnis vorheriger Messungen ist; daher könnte ein gutes oder schlechtes Messsystem zu besseren oder schlechteren Energieergebnissen führen. Laut Abtasttheorem legt die Abtastperiode eine Grenze fest, innerhalb derer die Dynamik des Systems aus den gemessenen Daten reproduziert werden kann. Wenn zum Beispiel die Wärmepumpe in Zyklen von einer Minute arbeitet, d.h., sie kann in weniger als einer Minute von "aus" auf "an" und wieder auf "an" wechseln, müssen wir das System mit einer Abtastzeit von weniger als 30 Sekunden überwachen, um keine Aktivierung der Pumpe zu verpassen.

Weitere wichtige Parameter für einen besseren Überblick über das bewertete System sind die klimatischen Bedingungen (z. B. Umgebungs- und Bodentemperatur) und die Betriebsbedingungen der Wärmepumpe, wie z. B. Steuerungen und Alarmer, die die Bedeutung der von Energiezählern, Temperatursensoren und Durchflussmessern gesammelten Informationen verändern können.

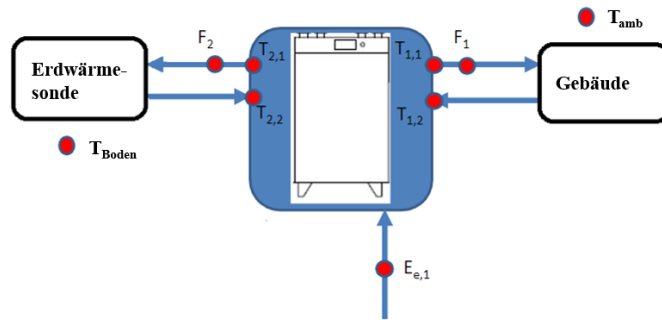


Abbildung 3-2. Anordnung der Sensoren für die Energiemessung in einer Wärmepumpe. Dabei ist E_{e,1} ein elektrischer Energiezähler; F1 und F2 sind Durchflussmesser; T1,1 und T1,2 sind die Ein- und Austrittstemperaturen auf der Gebäudeseite; T2,1 und T2,2 sind die Ein- und Austrittstemperaturen auf der Seite des externen Wärmetauschers; T_{amb} ist die externe Umgebungstemperatur und T_{ground} ist die Bodentemperatur

Die Daten in Abbildung 3-3 dienen als Beispiel für die Maßnahmen und Ergebnisse zur Bewertung des SCOP1 (siehe Abbildung 3-1), die aus dem Überwachungssystem stammen, das in der Warmwasser- und Klimaanlage einer Wohnanlage in Battel (Belgien) installiert ist. Die thermischen Energien werden aus den Temperatursensoren und Durchflussmessern berechnet; die Werte für die elektrische Energie stammen von den Stromzählern (in Bezug auf Abbildung 3-2 wird E_{compr} für den Kompressor verwendet); COP-Werte werden berechnet, um die Effizienz des Gebäudes auf täglicher Basis darzustellen.

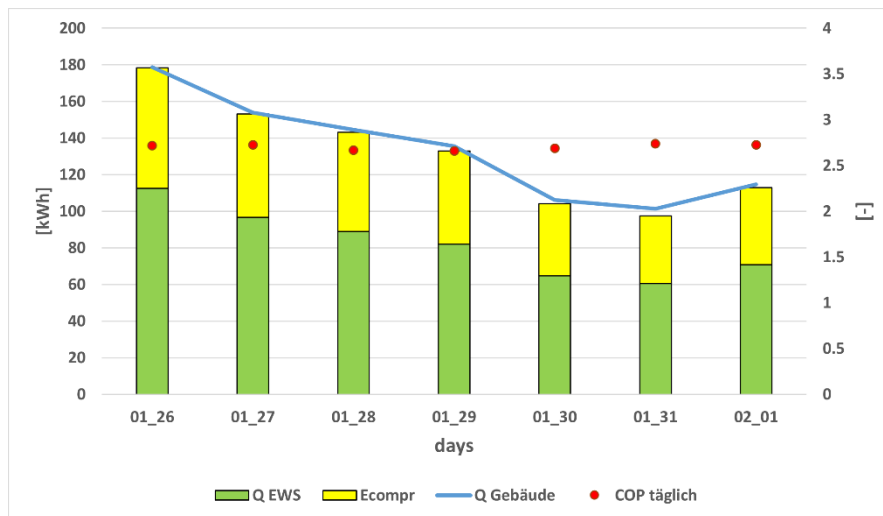


Abbildung 3-3. Beispiel für die Überwachung einer realen Wärmepumpe mit geothermischer Quelle. Der grüne Balken steht für die aus dem geothermischen Feld entnommene Energie und die gelben Balken für den Stromverbrauch des Wärmepumpenkompressors; die roten Punkte zeigen den täglichen COP der geothermischen Wärmepumpe (SCOP1 in Abbildung 3-1)

Die Daten aus Abbildung 3-3 können wie folgt erklärt werden:

- Im Winter entspricht die von der Wärmepumpe an das Gebäude abgegebene Wärme der aus dem Erdreich (oder der Luft) entnommenen Wärme plus der Arbeit des Kompressors. Wie in den Gleichungen dargestellt:

$$Q_{\text{Gebäude}} = E_{\text{compressor}} + Q_{\text{EWS}} \quad [5]$$

$$Q_{\text{EWS}} = Q_{\text{building}} * \frac{SCOP_1 - 1}{SCOP_1} \quad [6]$$

- Im Sommer sind die dem Gebäude entzogene Wärme und die Arbeit des Kompressors gleich der an den Boden (oder die Luft) abgegebenen Wärme, was sich wie folgt darstellt:

$$Q_{ews} = E_{compressor} + Q_{Gebäude} \quad [7]$$

$$Q_{ews} = Q_{Gebäude} * \frac{SCOP_1 + 1}{SCOP_1} \quad [8]$$

4. DIMENSIONIERUNG VON HYBRIDSYSTEMEN UND INTEGRATION MIT ANDEREN SYSTEMEN FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN (EEA)

Im letzten Jahrhundert war das am weitesten verbreitete Heizsystem für Wohngebäude und Gewerbeimmobilien der Heizkessel mit fossilen Brennstoffen. Heutzutage wird diese Art von Heiztechnologie aus ökonomischer und ökologischer Sicht jedoch immer weniger sinnvoll ist.

Heizung von Gebäuden: traditionelle Lösung

Das Funktionsprinzip herkömmlicher Heizkessel ist einfach: Das Methan (oder allgemein ein fossiler Brennstoff) wird gefördert oder produziert und in den Brenner geleitet, wo es zur Erzeugung von Wärme verbrannt wird. Diese erwärmt das im Kessel befindliche Wasser. Die Abgase aus der Verbrennung werden in die Atmosphäre abgegeben.

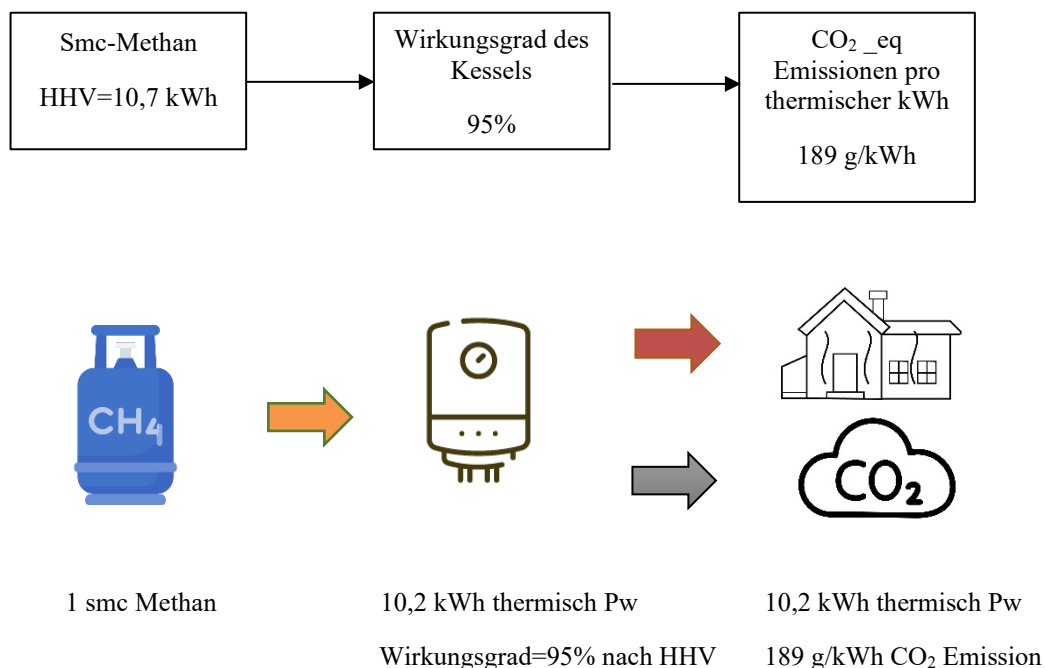


Abbildung 4-1. Heizung von Gebäuden: traditionelle Lösung

Bei Wärmepumpen ist der Energiefluss anders: Die gleiche Menge Methan wird an Kombikraftwerke weitergeleitet, wo sie zur Erzeugung von elektrischem Strom mit einem Wirkungsgrad von 40 % verwendet wird. Der Strom wird zur Versorgung der Wärmepumpe verwendet, die aus einer erneuerbaren Energiequelle (Luft oder Boden) mit einem COP=3 (3 Teile Heizenergie für 1 Teil elektrische Energie) Wärme erzeugen kann. Die CO₂-Emissionen₂ werden hierdurch um 17% reduziert.

Heute gibt es viele Wege, elektrische Energie zu erzeugen, die von Wärmepumpen genutzt werden kann.

Lösung mit Wärmepumpe

Elektrische Energie kann auf verschiedene Weisen erzeugt werden, einige von ihnen sind CO₂-neutral. Das Diagramm der Energieströme ist:

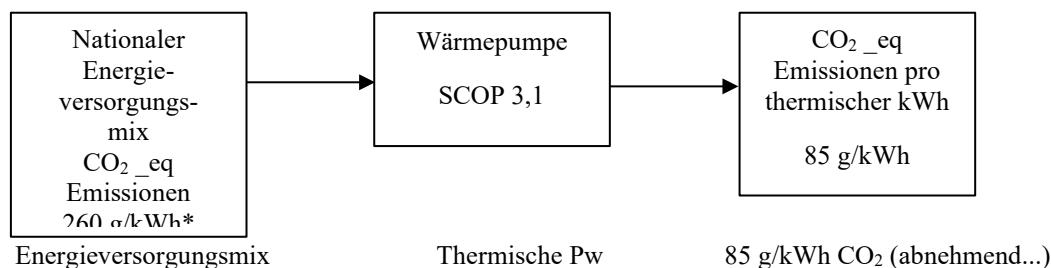


Abbildung 4- 2. Beheizung von Gebäuden: Wärmepumpenlösung

Durch die unterschiedlichen Arten der Energieerzeugung sind die CO₂-Emissionen deutlich niedriger als der frühere Wert von 189 g/kWh thermisch (in Italien lag dieser Wert 2021 bei 85 g/kWh therm.¹, in Deutschland 2017 bei 133 g/kWh therm., in Frankreich 2017 bei 17 g/kWh therm.). Und was am wichtigsten ist, sie können auf null fallen, wenn die Erzeugung von elektrischer Energie während ihres Lebenszyklus zu 100% erneuerbar ist.

Photovoltaikpaneele können effektiv mit einer Wärmepumpe gekoppelt werden: Wenn die Verfügbarkeit von Sonnenenergie während des Tages begrenzt ist, kann die Energie direkt in einem Warmwasserspeicher anstelle von Batterien gespeichert werden. Dieses Konzept könnte auf alle „nicht-dispatchfähigen Energieproduktionen“ ausgedehnt werden, um die Anzahl der Batterien, die Investitionskosten und die Auswirkungen der Energieerzeugung mit erneuerbaren Quellen zu reduzieren.

In der folgenden Tabelle sind die CO₂-Emissionen pro thermischer kWh, der saisonale COP für den vom EU-Reg. 811/2013 bestimmten Markt im Vergleich zur Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Stromerzeugung dargestellt. Das Beispiel bezieht sich auf Italien mit einer Luft/Wasser-Einheit der Klasse A gemäß EU-Reg. 811/2013.²

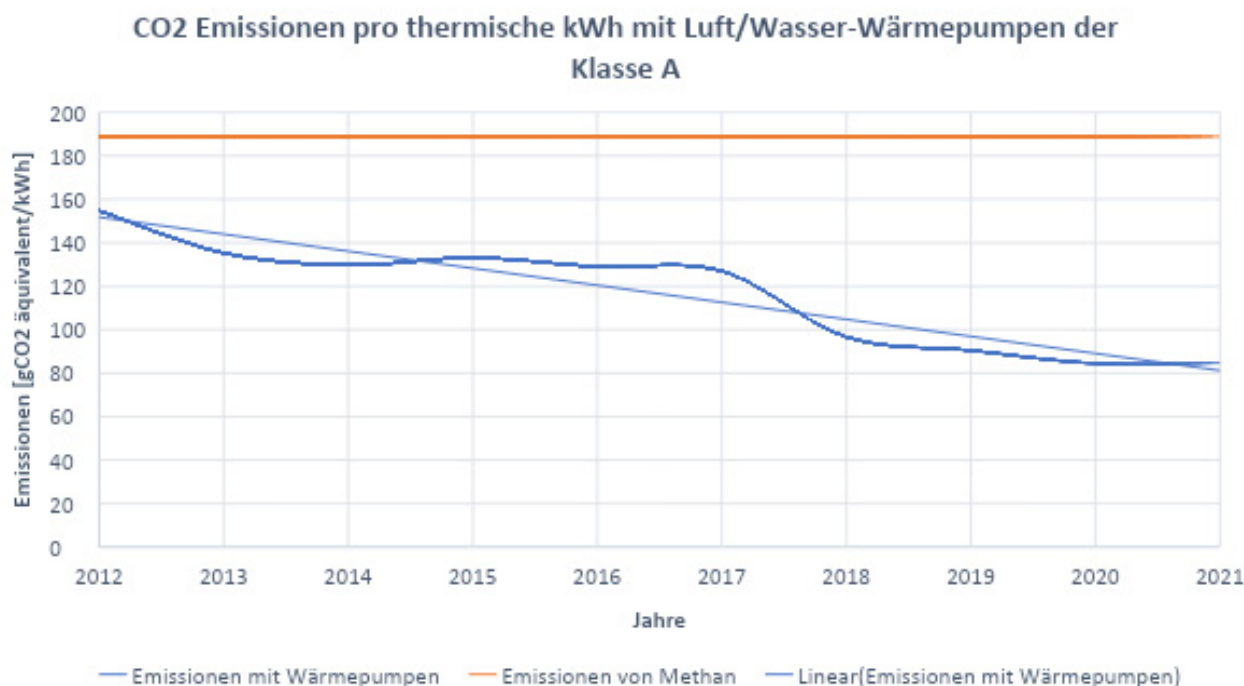


Abbildung 4-3. CO₂-Emissionen pro thermische kWh bei Wärmepumpen

¹ Daten für CO₂-Emissionen pro elektrische kWh in Europa: ISPRA 2019.

² Daten für CO₂-Emissionen pro elektrische kWh in Italien: ISPRA 2022. Daten für die Leistung von Luft/Wasser-Wärmepumpen: EU-Verordnung 811/2013. Die Berechnung berücksichtigt die Effizienz von Wärmepumpen der Klasse A aus dem Jahr 2018.

4.1. Innovative hybride Hochtemperatur-Wärmepumpen für renovierte zivile und historische Gebäude für hohe und mittlere Temperaturen

Eine der größten Herausforderungen bei der Sanierung der Heizsysteme bestehender Gebäude durch den Austausch von Kesseln mit Wärmepumpen ist die Umstellung des durch Radiatoren betriebenen Verteilungssystems. Die geringe Oberfläche herkömmlicher Radiatoren erfordert mittlere bis hohe Vorlauftemperaturen. Der COP einer Wärmepumpe ist umgekehrt proportional zur Differenz zwischen der Arbeitstemperatur des Mediums (Nutzerseite) und der Temperatur der Quelle. Daher ist es erforderlich, die Wärmepumpen so zu gestalten, dass sie bei hohen Temperaturen, hohen COP und niedrigem GWP-Kältemittel arbeiten können.

Geothermische Energie, die durch oberflächennahe Erdwärmetauscher gewonnen wird, bietet großartige Möglichkeiten für Kühl- und Heizsysteme. Der Boden hat ab einer Tiefe von 2m eine nahezu konstante Temperatur (entsprechend dem Jahresdurchschnitt), wodurch er als günstige Energiequelle für die Kühlung und Beheizung von Gebäuden in Verbindung mit Wärmepumpen genutzt werden kann.

Legende:

- **g.w.:** Glykolat-Wasser (15% Propylenglykol 85% Wasser)
- **GWP:** Globales Erwärmungspotenzial (100 Jahre)
- **RH:** relative Luftfeuchtigkeit [%]
- **Quelle(n):** Temperaturen und Feuchtigkeit der Flüssigkeiten auf der Verlustleistungsseite des Kreislaufs. "Quellen" im Falle einer Einheit mit zwei Quellen.
- **Benutzer:** Wassertemperaturen des benutzerseitigen Kreislaufs
- **w.:** Wasser
- Wenn unter "Quell Temperatur Sommer" keine Zahlen stehen, bedeutet dies, dass das Gerät nur im Heizmodus arbeitet.

Tabelle 4-1. Plug & Play-Wärmepumpe - Vergleich von Inverter- und On-Off-Technologie: NWW006HL - Padua

Flüssigkeit - GWP	Temperaturen Winter	Temperaturen Sommer	Kompressortyp	Warmwasserbereitung
R454B (GWP=466)	Quelle: 8-5°C g. w. Benutzer: 40-45°C w	Quelle: 20-25°C g. w. Benutzer: 12-7°C w	Rolle	Nein

Die Plug & Play-Geothermie-Wärmepumpe zielt darauf ab, die Installationskosten zu senken: Daher integriert die Einheit alle hydraulischen Komponenten, wie z.B. Pufferspeicher, Warmwasser-Schnellwärmetauscher, Ausdehnungsgefäße, Sicherheitsventile und Wärmetauscher zur Einbindung von Solarthermie.

In diesem Fall sind die Geräte mit R454B als neuem Kältemittel mit niedrigem GWP-Wert ausgestattet: Dieses Kältemittel gehört zur Klasse A2L (bedingt entflammbar), und aus diesem Grund wurde bei der Konstruktion des Geräts auch das Risiko der Innenraumaufstellung berücksichtigt.

- EINHEIT 1: invertergesteuerter Verdichter. Das System verfügt über die Fähigkeit zur Modulation bei Teillast, hat aber aufgrund des Wirkungsgrads des Wechselrichters einen niedrigeren Wert im Nennpunkt.
- EINHEIT 2: On-Off-Verdichter, bei dem die Geschwindigkeit durch die Festfrequenz des Netzes bestimmt wird.

Tabelle 4-2. Doppelte Verbrauchertemperatur-Wärmepumpe mit CO₂ als Kältemittel und Regenerationskreislauf: CDH012HS - Belgien

Flüssigkeit - GWP	Temperaturen Winter	Temperaturen Sommer	Kompressortyp	Warmwasserbereitung
R744 (GWP=1)	Quelle: 3-0°C g. w. Benutzer: 30-60°C w.	Quelle: 15-20°C g.w. Benutzer: 12-7°C w.	Rotationskolben	Ja

Die Notwendigkeit, bestehende Gebäude zu sanieren, bei denen ein Teil des Verteilungssystems mit Heizkörpern (im ältesten Teil) und ein Teil mit einer Fußbodenheizung (im neuesten Teil) ausgestattet ist, zeigt, dass die Wärmepumpe Warmwasser auf zwei Temperaturniveaus liefern muss.

Die Konstruktion des Geräts kann das Ziel erreichen, indem die Vorteile des CO₂ als Kältemittel genutzt werden, das mit hoher Effizienz arbeitet, wenn das System mit einem großen DT arbeitet. In diesem Fall geht die hohe Temperatur an die Heizkörper und die niedrige Temperatur an das Fußbodenheizungssystem.

Der Kältemittelkreislauf verfügt über einen spezifischen Wärmetauscher, um das Gas nach dem Verlustwärmetauscher abzukühlen, wobei die Überhitzung des aus dem Verdampfer austretenden Gases genutzt wird, um eine bessere Leistung zu erreichen, vor allem im Winterbetrieb.

Tabelle 4-3. Kältemittel-Wärmepumpe mit niedrigem GWP-Wert und doppelter Quelle: ETH010HL - Malta

Flüssigkeit - GWP	Temperaturen Winter	Temperaturen Sommer	Kompressortyp	Warmwasserbereitung
R454B (GWP=466)	Quellen: 8-5°C g. w. 7°C-87 RH Luft Benutzer: 40-45°C w.	Quellen: 20-25°C g.w. 35°C-50 RH Luft Benutzer: 12-7°C w.	Scroll	Nein

Dieser Prototyp verfügt über zwei verschiedene Verlustwärmetauscher: Platten für die geothermische Quelle und Rippenrohrschlangen für Luft. Dies ermöglicht eine Optimierung der Leistung und kann die geothermische Quelle erhalten.

Dieses Gerät verfügt über eine OR-Modality-Software. Die Software optimiert die Leistung durch Umschalten auf die beste Quelle, unter Berücksichtigung dessen, was am angenehmsten ist, sowohl im Sommer- als auch im Wintermodus.

Tabelle 4-4. CO₂ Kältemittel-Wärmepumpe mit doppelter Quelle: CDM035HS - Ferrara

Flüssigkeit - GWP	Temperaturen Winter	Temperaturen Sommer	Kompressortyp	Warmwasserbereitung
R744 (GWP=1)	Quellen: 8-5°C g.w. 7°C-87 RH Luft Benutzer: 30-60°C w.	Quellen: 20-25°C g.w. 35°C-50 RH Luft Benutzer: 12-7°C w.	Hubkolben	Nein

Dieses Gerät hat zwei Wärmetauscher mit den gleichen Vorteilen wie das vorherige. Die Besonderheit des CDM035HS ist, dass es im Sommer einen UND-Modus hat (Luft- und Erdwärmequellen werden in Reihe verwendet) und im Winter einen ODER-Modus (Luft- und Erdwärmequellen werden abwechselnd genutzt). Im ODER-Modus optimiert die Software die Leistung, indem sie die beste Quelle wählt, je nachdem, was am günstigsten ist. Dieses Gerät ist mit einem Pufferspeicher an Bord ausgestattet.

Tabelle 4- 5. Hochtemperatur-Wärmepumpe mit kleinem DT - Halbkaskadenzyklus: CDH015KL - Irland

Flüssigkeit - GWP	Temperaturen Winter	Quelle Temperatur Sommer	Kompressortyp	Warmwasserbereitung
R744 (GWP=1)	Quelle: 6-3°C g.w. Benutzer: 50-70°C w.	-	Schnecke + Rotationskolben	Ja

Dieser Zyklus ermöglicht eine Arbeitstemperatur des Wassers von 50-70°C in einem Halbkaskadenzyklus: Das Kältemittel des unteren Zyklus ist CO₂, das des oberen Zyklus ist R513A. In den kritischen CO₂ -Zyklen ist die Temperatur des aus dem Kompressor austretenden Gases hoch (über 120°C), so dass die Anlage diese hohe Temperatur zur Erwärmung des Wassers vor dem Kaskaden-Wärmetauscher (hier als "Kaskaden-Gaskühler" bezeichnet, dessen Aufgabe die Verbesserung der kritischen CO₂ -Gaskühlung ist) nutzt. Auf diese Weise wird eine signifikante Gaskühlung von CO₂ ermöglicht, wodurch der COP verbessert wird. Dies ist ein Konzeptschema dieses Zyklus:

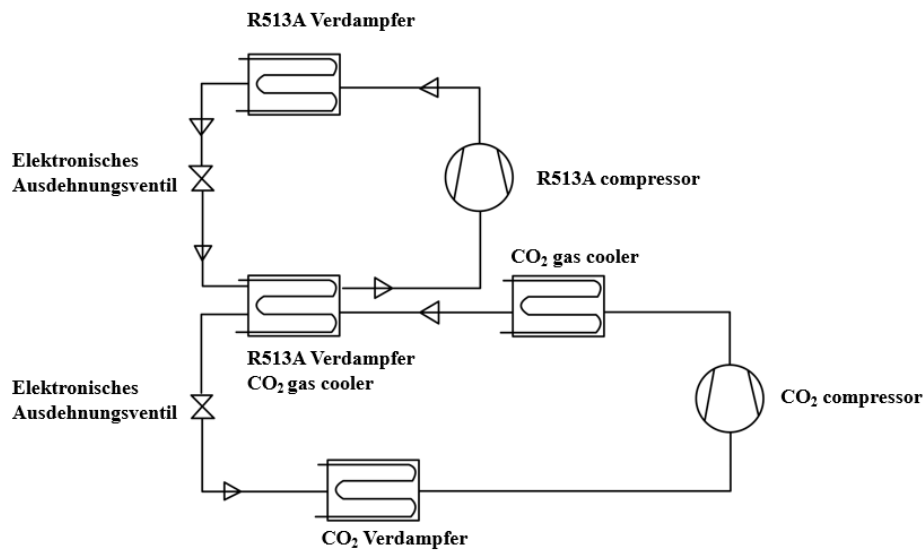


Abbildung 4-4. Diagramm des Halbkaskadenzyklus

Der Wirkungsgradsteigerung, die mit dem Halbkaskadenzyklus im Vergleich zum einfachen transkritischen CO₂-Zyklus erreicht wird, beträgt 14%.

4.2. Synergie mit anderen EE-Technologien und Regelungsstrategien für Multi-Source-Systeme durch die Integration von geothermischer Energie mit anderen EE

Gebäude mit nahezu null Energieverbrauch (nZEB) sind notwendig, um die CO₂-Reduktionsziele für 2050 zu erreichen. nZEBs müssen hocheffizient sein und ihren Energiebedarf hauptsächlich durch erneuerbare Energien decken. In Europa müssen seit 2020 alle neuen Gebäude nahezu energieneutral sein, und es werden Pläne umgesetzt, um bestehende Gebäude in nZEBs umzuwandeln. Der Trend geht hin zu positiven Energiegebäuden (Magrini et al., 2020).

Um die Ziele von nZEBs zu erreichen und die Amortisationszeit zu verkürzen, können erdgekoppelte Wärmepumpen (EWP) mit anderen erneuerbaren Energiequellen kombiniert werden. Diese kombinierten Systeme werden als Hybrid-EWP (HEWP) bezeichnet. Sie erfordern eine erweiterte Steuerung, um die verschiedenen Elemente optimal zu koordinieren und die Energieeinsparung zu maximieren. Sie sind auch nützlich, um Heiz- und Kühlbelastungen auszugleichen und langfristige Änderungen der Bodentemperatur zu vermeiden (Hackel und Pertzborn 2011; Yang und Wang 2012). Um den Strom für die Wärmepumpe zu gewinnen, kann diese mit einer lokalen erneuerbaren Energiequelle wie Photovoltaik (PV) oder Kleinwindkraft gekoppelt werden, um die CO₂-Emissionen des Pumpenbetriebs zu reduzieren. Weitere Elemente wie thermische oder elektrische Speicher können das System weiter verbessern.

Im Projekt GEO4CIVHIC wurde eine Analyse der Synergie von EWP mit anderen EEA (Wind, Solarthermie, Luft-Wasser-Wärmepumpen und hybriden PV-Thermielösungen) durchgeführt. Dies diente dazu, optimale Lösungen für die verschiedenen Gebäudetypen und Klimata zu definieren, die im Projekt berücksichtigt wurden. Das Ergebnis dieser Analyse wird im Folgenden präsentiert.

Die Analyse basiert auf Vergleichsergebnissen für ein typisches Reihenhaus in verschiedenen Klimazonen (Straßburg, Bilbao, Athen und Helsinki). Hierbei wurden sowohl sanierte als auch unsanierte Häuser berücksichtigt, um die Vorteile in Bezug auf Energie- und Kosteneinsparungen hervorzuheben, die mit einer gut konzipierten EWP in Kombination mit anderen erneuerbaren Energien erzielt werden können.

Wenn PV und EWP ohne Batteriespeicher gekoppelt sind, lassen sich ähnliche Schlussfolgerungen für die Fälle Straßburg, Bilbao und Athen ziehen. Solarstrom steht nicht zur Verfügung, wenn er vom Nutzer benötigt wird, sodass die Lastkurve vollständig durch den vom Netz gekauften elektrischen Strom gedeckt wird, während der erzeugte Solarstrom ins Netz eingespeist wird. Die geringere Sonneneinstrahlung in kälteren Klimazonen ist im Sommer deutlicher zu erkennen, wenn auch die Installation der Batterie nicht ausreicht, um den Energiebedarf zu decken und ein Teil der elektrischen Energie aus dem Netz bezogen wird. Die Simulation in Helsinki bestätigt, dass das PV-System ohne Energiespeicher nie eine gute Lösung für Energie-Selbstverbraucher ist. Denn die Installation der Batterie ermöglicht die Nutzung aller im Winter durch die PV erzeugten Solarenergie, während im Sommer der Überschuss an ins Netz eingespeistem Strom in den anderen beiden Städten geringer ist. Die Installation von PV-Panels hat dort einen großen Einfluss, wo die Sonneneinstrahlung höher ist. Der Batteriebetrieb ermöglicht die Nutzung von Solarenergie

auch bei Abwesenheit der Sonne und die Vorteile sind am deutlichsten für die Länder, in denen die Sonneneinstrahlung ausreicht, um die Batterie während der Tageslichtstunden vollständig aufzuladen..

Wenn das Erd- und das PVT-Feld als thermische Quellen für die Wärmepumpe gekoppelt sind und der Warmwasserproduktion sowohl während der Heiz- als auch der Kühljahreszeit Priorität eingeräumt wird, ist der direkte thermische Beitrag von den Solaranlagen, wie erwartet, höher in Gebieten mit mehr Sonneneinstrahlung. Im Detail erhöhte sich dieser Anteil von 27% für die Fallstudie Helsinki auf 34% in Straßburg und Bilbao und 64% in Athen.

Den höchsten Heizbedarf hat das historische Reihenhaus im kältesten Klima (Helsinki), während im milden Klima (Straßburg) ein höherer Anteil der Wärmepumpe für die Raumheizung und die Nutzung des Solarspeichers als Wärmequelle zu beobachten ist. In wärmeren Klimazonen wie Bilbao und Athen kann das PVT-Feld auch in den kälteren Monaten als Hauptwärmequelle für die Wärmepumpe genutzt werden, wenn auch mit unterschiedlichen Anteilen.

Die saisonalen Energieleistungen der Wärmepumpe wurden geschätzt und es zeigte sich, dass der SCOP der Wärmepumpe bei der Erzeugung von Warmwasser immer niedriger ist als der SCOP der Wärmepumpe für die Raumheizung, was auf die unterschiedliche Sollwerttemperatur (höher für die Warmwassererzeugung) zurückzuführen ist. Bei der Warmwasserbereitung in Helsinki ist der SCOP um bis zu 20 % höher (im historischen Gebäude), wenn das Solarfeld als Wärmequelle verwendet wird, verglichen mit der Verwendung des BHE-Feldes. Dieser Wert liegt bei 19 % für die Raumheizung, wenn man das bestehende, nachgerüstete Gebäude betrachtet. In wärmeren Klimazonen werden bei allen Gebäudetypen höhere SCOP-Werte erreicht, wenn das Erdreich als Hauptwärmequelle für die Raumheizung genutzt wird, wobei der Wert für das historische Gebäude bis zu 6 % höher liegt.

Betrachtet man die durch das Solarfeld erzeugte elektrische Energie und den von der Wärmepumpe verbrauchten Strom, so ist das Verhältnis der selbst genutzten Energie höher für unsanierte Gebäude. Der geringere Prozentsatz bei sanierten Gebäuden ist auf die geringere Wahrscheinlichkeit zurückzuführen, dass alle erzeugte Energie innerhalb des gleichen Zeitschritts genutzt werden kann, da der Energiebedarf aufgrund der angewendeten Sanierungslösungen geringer ist. Die höheren Werte entsprechen den wärmeren Klimazonen, da es darauf ankommt, ob Energieerzeugung und Deckung des Energieverbrauch innerhalb des gleichen Zeitschritts abgestimmt werden können.

Die Deckungsquote ist im Allgemeinen höher für sanierte Gebäude im Vergleich zu unsanierten. Bei einem Vergleich der drei klimatischen Bedingungen ist der Deckungswert für warme und milde Klimazonen (Athen, Bilbao und Straßburg) zwischen 46% und 67%, während Helsinki aufgrund des höheren Energiebedarfs und der geringeren Energieverfügbarkeit aus der Sonnenstrahlung einen niedrigeren Anteil aufweist.

Ein äquivalenter saisonaler *SCOP_{equivalent}* wurde für Heizung und Kühlung berechnet, wobei die von dem PVT-Feld erzeugte elektrische Energie und die von der Wärmepumpe sofort genutzte Energie berücksichtigt wurden, was die Effizienz des Systems erheblich erhöht, wenn man die selbst erzeugte Energie berücksichtigt.

Wie die verschiedenen untersuchten und vorgestellten Lösungen (siehe Abschnitt 5.2 für weitere Details) zeigen, können viele Strategien je nach Klima, Endverbrauch und Energiebedarf des Gebäudes, der sich aus dem Baujahr oder den angewendeten Sanierungsmaßnahmen ergibt, angewendet werden. Obwohl der Standort die Verfügbarkeit der Sonnenstrahlung erheblich beeinflusst, zeigen die Ergebnisse interessante Auswirkungen auf die Energieeinsparungen und die damit verbundenen Energiekosten und bestätigen das Potenzial der Installation von EWP in städtischen Zentren.

5. ÖKOLOGISCHE, ENERGETISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG

5.1. Definition der Referenz-Einzel- und Mehrnutzergebäude (Geometrien und Materialien) als Grundlage für die energetischen und wirtschaftlichen Analysen

5.1.1. Definition der Gebäudetypen

Das Projekt GEO4CIVHIC zielt darauf ab, Barrieren zu beseitigen und den Markt für erdgekoppelte Wärmepumpen (EWP) im Rahmen von Gebäudesanierungen in städtischen Umgebungen zu erweitern³. Eine Analyse typischer städtischer Strukturen wurde durchgeführt, um die gängigsten Hof- und Gartengrößen zu ermitteln. Um die Anwendung des Projekts zu erweitern, ist es wichtig, Archetypen innerhalb städtischer Umgebungen zu definieren. Diese erlauben eine bessere Einschätzung der Hindernisse und Vorschläge von Lösungen für die gegebene bauliche Umgebung.

Unser Hauptziel bei der Definition von Gebäudearchetypen ist es, die gängigsten Gebäudetypen in den städtischen Gebieten Europas darzustellen. So können wir abschätzen, inwiefern eine energetische Sanierung - ob oberflächlich

³ <http://geo4civhic.eu/>

oder tiefgreifend - in Bezug auf Gebäudehülle und/oder Heizungs-, Lüftungs- und Klimasysteme (HVAC) angewendet werden kann.

Der erste Schritt war die Auswertung vorhandener Literatur im Baubereich, um den durchschnittlichen Energiebedarf bestehender Gebäude in Europa zu ermitteln. Dieser variiert zwischen 20 kWh/(m² Jahr) und 200 kWh/(m² Jahr) abhängig vom Klima. Da 40% der existierenden Gebäude vor 1960 errichtet wurden, bietet der europäische Gebäudebestand ein hohes Potenzial für Energieeinsparungen.

Um eine geeignete Definition für historische und nicht historische Gebäude bereitzustellen, wurden zwei Normen herangezogen: die EN 16883 (2016), die einen Unterschied zwischen einem historischen Gebäude und einem Gebäude von kultureller Bedeutung unterstreicht, und die EN 15898 (2019), die festhält, dass ein historisches Gebäude nicht zwangsläufig als Kulturerbe eingestuft sein muss. Generell wird ein Gebäude, das älter als 50-70 Jahre ist, als *historisch* angesehen, auch wenn es architektonisch nicht von besonderer Bedeutung ist. Gebäude, die nach 1960 errichtet wurden, werden als *bestehende* Gebäude bezeichnet (weitere Informationen zu historischen Gebäuden finden Sie im Band 7 dieses Handbuchs).

Eine weitere Unterteilung erfolgt nach der Nutzung der Gebäude. In städtischen Umgebungen sind diese hauptsächlich Wohn- oder Geschäftsgebäude. Zudem wurde die Anzahl der Nutzer berücksichtigt, weshalb wir zwei mögliche Szenarien untersuchen: Ein Gebäude mit *mehreren Nutzern* (z. B. Wohnblock) und ein *Einzelnutzergebäude* (z. B. Einfamilienhaus).

Abschließend müssen die Wärmeübertragungselemente entsprechend berücksichtigt werden, da das Projekt EWP-Lösungen vorschlägt, die gegebenenfalls mit reversiblen Luft-Wasser-Wärmepumpen kombiniert werden können. Daher muss das Temperaturniveau, auf dem das Wasser im Gebäude arbeitet, effizient sein.

Zum Abschluss müssen die klimatischen Bedingungen ausgewählt werden, die die meisten klimatischen Bedingungen in Europa abdecken. Hierfür dienen die Ergebnisse des vorherigen Projekts (De Carli, Bernardi et al., 2018) als Ausgangspunkt für die Klimakategorisierung. Mithilfe einer statistischen Analyse wurden repräsentative Klimazonen identifiziert, die in der standardisierten saisonalen Effizienz der Wärmepumpen der Norm EN 14825 (2019) verwendet wurden, nämlich Athen (warmes Klima), Straßburg (gemäßigtes Klima) und Helsinki (kaltes Klima).

5.1.2. Definition der Archetypen

Die Topologie der Bauwerke unterscheidet sich hinsichtlich des Bauzeitalters und des möglichen Einsatzes im städtischen Kontext. Viele Gebäude wurden errichtet, bevor es überhaupt Regelungen oder Einschränkungen zum Energieverbrauch gab.

Zwei Datenbanken dienen als Referenz für die Analyse des Zustands europäischer Gebäude. Die erste stützt sich auf die COST-Aktion TU0901 (Rasmussen und Machimbarrena, 2014). Die zweite, das EU-Projekt TABULA - EPISCOPE, stellt eine Datenbank von typischen Verbrauchswerten bestehender Gebäude bereit (Ballarini und Corgnati 2014).

Verschiedene Parameter wie der U-Wert von opaken Hüllflächen und Fenstern, das Oberfläche/Volumen-Verhältnis und das Verhältnis von verglaster Fläche zur Bodenfläche wurden berücksichtigt. Hauptziel der Analyse war die Definition und Bewertung aktualisierter Gebäude-Archetypen entsprechend dem europäischen Gebäudebestand in städtischen Kontexten. Diese sind entscheidend für die korrekte Nutzung und Dimensionierung von Erdwärmeaustauschern in Stadtzentren.

In Bezug auf das städtische Umfeld zeigte die Analyse, dass vor allem lineare Gebäude prägend sind. Diese lassen sich in zwei Haupt-Archetypen unterteilen: das *Mehrfamilienhaus* und das *Reihenhaus*.

Eine statistische Analyse wurde durchgeführt. Dabei wurden die Haupteigenschaften der Gebäude (Geometrie und thermische Eigenschaften der Hülle) berücksichtigt und die Daten von TABULA in klimatische Makro-Bereiche gruppiert, d.h. warmes (Cfa und Csa nach der Köppen-Geiger-Skala), mildes (Cfb) und kaltes Klima (Dfb). Dadurch konnten Durchschnittswerte für die Hauptgeometriemerkmale geschätzt werden, wie in Tabelle 5-1 dargestellt. Die Gebäudegeometrien sind auch in den Abbildungen 5-1 und 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-1. Hauptmerkmale der Gebäudegeometrie

	Mehrfamilienhaus		Reihenhaus	
	historisch	bestehend	historisch	bestehend
Anzahl der Stockwerke	5	5	3	3
Höhe [m]	3.15	2.5	3.15	2.5
Verhältnis Fenster zu Wand	22%	19%	22%	19%
Oberfläche/Volumen [m] ⁻¹	0.56	0.56	0.9	0.97



Abbildung 5-1. Grundriss des allgemeinen Stockwerks für das Mehrfamilienhaus



Abbildung 5-2. Grundriss des Reiheneinfamilienhauses

5.2. Kosten-Nutzen-Analysen für die optimierten Lösungen in Multi-Source-Systemen

Die Installation eines Photovoltaiksystems erfordert durchschnittlich eine Erstinvestition von 5500 €⁴ (ohne Mehrwertsteuer). Dieser Preis berücksichtigt die Montage der PV-Module, des Wechselrichters, der Kabel, des Dachbefestigungssystems sowie aller unterstützenden Dienstleistungen und Installationskosten in vier Städten. Die Wirtschaftlichkeit dieser Lösung wird anhand der Amortisationszeit analysiert, das heißt, der Zeit, die benötigt wird, um die anfänglichen Investitionskosten durch die Einsparungen gegenüber der traditionellen Lösung auszugleichen. Je länger die Amortisationszeit, desto weniger attraktiv ist die PV-Lösung.

Es ist wichtig zu betonen, dass bei diesen Berechnungen nur der Stromverbrauch der erdgekoppelten Wärmepumpe (EWP) berücksichtigt wurde. Bei Einbeziehung des gesamten Stromverbrauchs wären die Ergebnisse deutlich geringer.

⁴ Diese Summe stammt aus einem Kostenvoranschlag eines italienischen Unternehmens, der die Kosten für die PV-Paneele, den Wechselrichter, die Batterie und alle Kosten im Zusammenhang mit der Support- und Installationsphase enthält.

Der durchschnittliche Strompreis in diesen Ländern beträgt 0.189 €/kWh⁵. Die Einsparungen durch die Verwendung des PV-Systems werden durch den Eigenverbrauchsindex dargestellt, der den Bedarf an zugekaufter elektrischer Energie reduziert.

Die längste Amortisationszeit findet sich in Helsinki (25,7 Jahre ohne Batterie und 23,4 Jahre mit Batterie), was auf den geringsten Eigenverbrauch von Energie zurückzuführen ist. Durch die Installation einer Batterie für eine Erstinvestition von 2000 €³ wird die Amortisationszeit in allen Städten reduziert. Im besten Fall sind also alle Kosten nach 15 Jahren amortisiert. Die Amortisationszeiten für die vier Simulationsmodelle sind in Tabelle 5-2 aufgeführt.

Tabelle 5 2- . Amortisationszeit in Jahren für die vier Simulationen unter Berücksichtigung der PV- und PV+ Batterielösungen im Vergleich zur traditionellen Option ohne PV

	Keine PV vs. PV (Jahre)	Keine PV vs. PV + Batterie (Jahre)
Athen	19.9	14.9
Straßburg	20.9	18.1
Bilbao	19.8	16.1
Helsinki	25.7	23.4

Die Regelungen für die Vergütung von in das Netz eingespeister oder daraus entnommener elektrischer Energie unterscheiden sich in den EU-Ländern. In einigen Ländern, wie den Niederlanden, erlauben Netto-Messregeln die Nutzung des Netzes als eine Art Speicher gegen eine Gebühr (bis 2020 galt dies auch für Belgien). In anderen Ländern, wie Italien, belohnt das *“scambio sul posto”*-Gesetz⁶ das Einspeisen von Elektrizität bis zu einem gewissen Grad. Diese Regeln werden in der folgenden Analyse ignoriert. Bevor jedoch Photovoltaiksysteme mit oder ohne Batterien installiert werden, muss der wirtschaftliche Nutzen unter Berücksichtigung der lokalen Vorschriften bewertet werden. Daher könnte die Amortisationszeit sogar noch kürzer sein, wenn die Vergütung für an das Netz verkaufte Energie in die Berechnung einbezogen wird.

Die Kosten-Nutzen-Analyse bezüglich solarthermischer Technologien wurde im Hinblick auf die Einsparungen durch den reduzierten Stromverbrauch der bewerteten GEO4CIVHIC-Systeme durchgeführt:

- Erdwärmepumpe (EWP) + solarthermische Kollektoren mit Standard-Pufferspeicher
- EWP + solarthermische Kollektoren mit 500-l-Pufferspeicher
- EWP + solarthermische Kollektoren mit Phasenwechselmaterial (PCM) zur thermischen Energiespeicherung

Die Systeme wurden mit einem Standard-System, bestehend aus Luft-Luft-Wärmepumpen in Kombination mit einer elektrischen Widerstandswasserheizung, verglichen. Die Vorteile wurden sowohl in Bezug auf den wirtschaftlichen Nutzen mit Amortisationszeit der Investitionen als auch auf die Einsparung von Primärenergie quantifiziert. Für die Analyse wurden die von Eurostat bereitgestellten Strompreise und Umrechnungsfaktoren für Primärenergie zu Strom (PEF) verwendet, wie in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 5-3. Primärenergie-Strom-Umwandlungsfaktoren (PEF) und Strompreise in den betrachteten Fällen

	Athen	Bilbao	Straßburg	Helsinki
PEF, kWh-th/kWh-e	2.18	2.24	2.83	2.02
Strompreis, €/kWh	0.1681	0.2239	0.1899	0.174

Die Installation des GEO4CIVHIC GSHP Systems in Kombination mit solarthermischen Anlagen führt zu beträchtlichen Einsparungen an Primärenergie, abhängig vom Gebäudetyp und den klimatischen Bedingungen. Auch die jährlichen wirtschaftlichen Einsparungen sind bedeutend, mit Amortisationszeiten zwischen 17 und 30 Jahren, abhängig vom Gebäudetyp, der Gebäudehüllenisololation und dem Klima.

⁵ Eurostat-Server:

https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy_prices/enprices.html?geos=&product=6000&consumer=HOUS_EHOLD&consoms=4161903&unit=KWH&taxs=I_TAX,X_TAX,X_VAT&nrg_prc=NETC,NRG_SUP,OTH,TAX_C AP,TAX_ENV,TAX_NUC,TAX_RNW,VAT¤cy=EUR&language=EN&detail=0&component=0&order=DESC&dataset=nrg_pc_204&time=2020S1&modalOption=0&chartOption=0&precision=1&modalOpen=0&modal=0

⁶ "Umtausch an Ort und Stelle"

Bei den betrachteten Systemen, bei denen es nachts keine Heiz-, Kühl- oder Warmwasserbedürfnisse gibt und ein einheitlicher Stromtarif angenommen wird, ergeben sich durch die Zugabe von thermischer Energiespeicherung -- sei es in Form eines 500-l-Wassertanks oder als PCM -- kaum Vorteile.

In Bezug auf Luft-Wasser-Wärmepumpen haben Simulationsergebnisse für die Kopplung von Erdwärmepumpen mit Luft-Wasser-Wärmepumpen folgende Ergebnisse gezeigt:

- Die Verwendung des Erdreichs als Quelle verbessert die Energieeinsparung (und somit die wirtschaftliche Einsparung) um 5% bis 15%, abhängig vom Szenario. In härteren Klimazonen (Helsinki, Straßburg) sind die Vorteile größer als in gemäßigteren Klimazonen (Bilbao).
- Die Nutzung einer Hybridstrategie (Luft- und Erdquelle) führt zu einer geringen Verbesserung der Energieleistung (und somit der wirtschaftlichen Einsparungen). Dabei sollte jedoch bedacht werden, dass der große wirtschaftliche Vorteil dieser Option darin liegt, dass durch die Nutzung der Luft als Quelle das Bohrfeld um bis zu 40% reduziert werden kann, was die Bohrkosten drastisch reduziert und somit die Investition der Anlage senkt.

Dennoch müssen weitergehende, fortschrittliche Steuerungsstrategien erforscht werden.

Im Fall von PV-Thermie-Systemen basierte die Kostenanalyse auf der gesparten Energie im Vergleich zwischen Systemen mit und ohne PVT-Anwendung. Der Durchschnittspreis der Energie aus dem Netz ist derselbe, der auch für die PV-Berechnungen verwendet wurde (Quelle: Eurostat), da die Energiebeiträge des PVT-Systems in elektrische Energie umgewandelt wurden.

Der vom PVT-System gedeckte Energieanteil entspricht auch der Kosteneinsparung im Vergleich zur Lösung ohne das PVT-System. Athen hat dabei die höchste Abdeckung. Tatsächlich deckt die vom PVT erzeugte Energie auf Zeitschrittbasis häufiger den vom Wärmepumpensystem benötigten Energiebedarf.

Sanierungslösungen bringen allgemein geringere Energieeinsparungen, da sie aufgrund der an der Gebäudehülle vorgenommenen Sanierungsmaßnahmen einen geringeren Energiebedarf haben und somit eine geringere Wahrscheinlichkeit besteht, dass die produzierte und benötigte Energie zum gleichen Zeitschritt übereinstimmt.

Der von der internen Ausstattung benötigte elektrische Energie wurde in einer ersten Annäherung nicht berücksichtigt, daher kann eine weitergehende Analyse durchgeführt werden, um den potenziell höheren Energieanteil zu ermitteln, der gedeckt werden muss.

5.3. Marktbewertungsaktivitäten und Geschäftsinnovationsmodelle für jede Lösung und jeden Gebäudetyp

In diesem Bericht wurde eine Kostenstudie für verschiedene Renovierungsstufen, Klimabedingungen und Bodenverhältnisse durchgeführt. Technische Partner haben nationale Kosten für jeden Aspekt bereitgestellt, einschließlich Material und Installation sowie laufende Betriebs- und Wartungskosten. Die Energiekosten berücksichtigen den Energieverbrauch des Gebäudes (Gas und/oder Strom) und die entsprechenden Preise basieren auf Eurostat-Daten von 2018.

Laufende Kosten umfassen Betrieb und Wartung der Systeme. Einmalkosten umfassen hingegen die Kosten für die Implementierung der Technologie in jedem untersuchten Gebäude (z.B. Bohrbarkeit, Materialien, Wärmepumpen usw.).

Für diese Kostenstudie haben wir eine anfängliche Kosten-Nutzen-Analyse in Form von Kapitalwertformeln für den Nettobarwert (NPV) berücksichtigt, die auf den von den Partnern erhaltenen Kosten- und Einsparungsdaten basieren. Hier ist die angewandte theoretische Formel und Methode:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{\Delta E_t}{(1+r)^t} - (I_0 + \sum_j^N \frac{C_m}{(1+r)^j} + \sum_j^N \frac{C_r}{(1+r)^j}) \quad [9]$$

Innerhalb dieser Formel können die folgenden Leistungskennzahlen (KPIs) und Indikatoren den NPV beeinflussen und uns helfen, die Dynamik zwischen den Ergebnissen der Kosten-Nutzen-Analyse (CBA), den verwendeten Lösungen, Gebäudetypologien und länderspezifischen makroökonomischen Trends wie Energiepreisen zu verstehen.

- KPIs in Bezug auf den Nutzen:

$$\Delta E_t = \text{Jährlicher monetärer Energiegewinn (abhängig von Energiepreisen, Energieeffizienz der Lösung und Gebäudetypologie)}$$

$r = \text{Diskontsatz (Opportunitätskosten)}$

- KPIs in Bezug auf die Kosten:

$I_0 = \text{Investitionskosten (CAPEX)}$

$C_m = \text{Jährliche Wartungskosten (OPEX)}$

$C_r = \text{Ersatzkosten (OPEX)}$

Da die jährlichen Einsparungen bei den Energiekosten den größten Anteil an den jährlichen Kosten darstellen, können wir Wartungs- und Ersatzkosten vernachlässigen. Daher kann die NPV-Formel auf das Folgende reduziert werden:

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{\Delta E_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad [10]$$

Die Diskontsätze werden entweder auf verschiedenen Ebenen durch NPV-Profile dargestellt oder auf festgelegten Ebenen gesetzt, die mindestens das 2,5-fache des höchsten risikofreien Satzes betragen.

5.3.1. Kostenanalyse der Archetypen

Die Kostenanalyse umfasst die Nachrüstung der Gebäudehülle, der Emissionssysteme und des Energieerzeugungssystems. Wir haben verschiedene Lösungen unter Berücksichtigung möglicher Nachrüstungsstufen in Betracht gezogen. Dabei wurden geschätzte Betriebs- und Investitionskosten berücksichtigt.

Im Hinblick auf das Energieerzeugungssystem war der Ausgangszustand ein Kessel (mit einer saisonalen Effizienz von 85%) kombiniert mit einer Split-System-Lösung. Zwei verschiedene Nachrüftungsoptionen wurden in Betracht gezogen: eine traditionelle Lösung mit einem kondensierenden Gasboiler und einer Luft-Wasser-Kühleinheit sowie eine Nachrüftungslösung mit Erdwärmepumpen (EWP) oder hybriden bzw. bivalenten Wärmepumpen, die Wasser aus dem Erdboden oder Luft als Wärmequelle (im Winter) oder Wärmesenke (im Sommer) verwenden können. Die hybride Lösung bietet sich an, wenn der Platz für die Bohrung nicht ausreicht oder wenn die saisonale thermische Last im Boden nicht ausgeglichen ist. Abbildung 5-3 zeigt die Konzepte der drei Fälle für ein Mehrnutzergebäude.

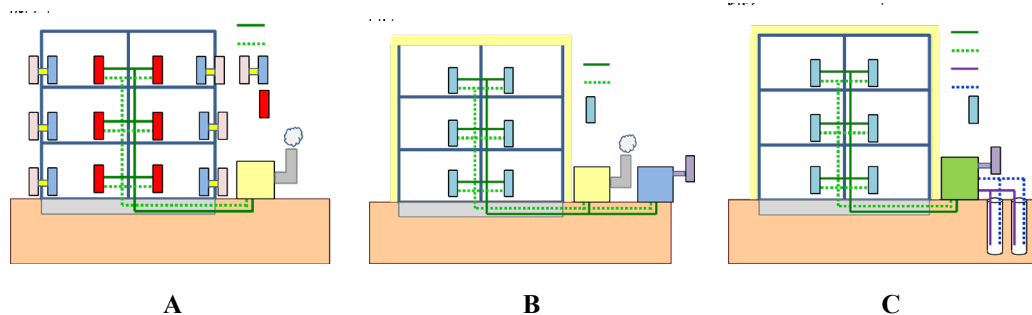


Abbildung 5-3. Analyisierte Fälle: Ausgangszustand (A), Standardlösung für die tiefgreifende Nachrüstung (B), GSHP oder Hybridlösung für die tiefgreifende Nachrüstung (C)

Die Analyse wurde für das Wohngebäude mit mehreren Nutzern (AB, Mehrfamilienhaus), für das Bürogebäude mit mehreren Nutzern (OB, Bürogebäude) und für das Gebäude mit einem Nutzer (TH, Reihenhaus) durchgeführt. Die Analyse wurde sowohl für bestehende (EX) als auch für historische (hi) Gebäude durchgeführt. Wie bereits erwähnt, wurden die drei Referenzklimata berücksichtigt: Athen (C1), Straßburg (C2) und Helsinki (C3).

Die Energiebetriebskosten hängen vom nationalen Markt und den Kosten für die zum Heizen und Kühlen der Gebäude verwendete Energie ab. Die Kosten für thermische Energie betragen in Griechenland 0,062 €/kWh, in Deutschland 0,068 €/kWh und in Finnland 0,08 €/kWh. Die Kosten für Elektrizität wurden als 0,16 €/kWh für Griechenland, 0,30 €/kWh für Deutschland und 0,16 €/kWh für Finnland angesetzt.

Die Ergebnisse dieser Analyse sind im folgenden Diagramm dargestellt (siehe Abbildung 5-4). "Trad" bezieht sich auf das traditionelle System und "GSHP" auf das EWP-System.

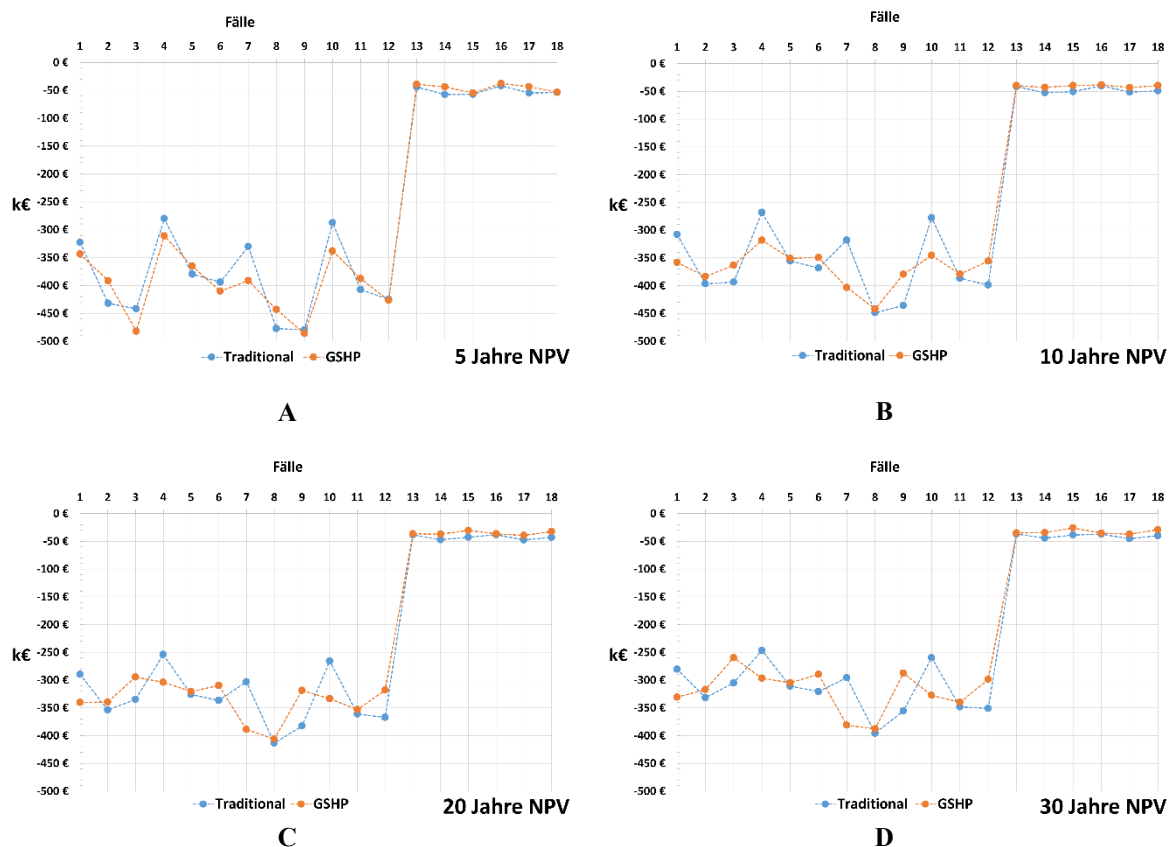


Abbildung 5-4. Die Kostenanalyse der verschiedenen Fallzahlen für verschiedene Nettogegenwartswerte

Betrachten wir die folgenden Fälle:

- Fall 2: Mehrfamilienhaus, historisches Gebäude, **durchschnittliches** Klima
- Fall 5: Mehrfamilienhaus, bestehendes Gebäude, **durchschnittliches** Klima
- Fall 8: Mehrfamilienhaus, historisches Gebäude, **durchschnittliches** Klima
- Fall 11: Mehrfamilienhaus, bestehendes Gebäude, **durchschnittliches** Klima

Wir können sehen, dass die beteiligten EWP-Implementierungen fast die gleiche Rentabilität wie die traditionellen Systeme für alle Barwertzeiträume und für alle Fälle haben.

Wenn wir die folgenden Fälle genauer betrachten:

- Fall 3: Mehrfamilienhaus, historisches Gebäude, **kalt**es Klima
- Fall 6: Mehrfamilienhaus, bestehendes Gebäude, **kalt**es Klima
- Fall 9: Mehrfamilienhaus, historisches Gebäude, **kalt**es Klima
- Fall 12: Mehrfamilienhaus, bestehendes Gebäude, **kalt**es Klima

Wir sehen, dass die traditionellen Lösungen profitabler als die EWP-Installation für den 5-Jahres-NPV-Zeitraum sind. Nichtsdestotrotz erweisen sich die NPVs für die EWP bei einem 10-Jahres-NPV-Zeitraum und darüber hinaus als zunehmend rentabler, was zu einer insgesamt profitableren Lösung im Vergleich zu den traditionellen Alternativen führt. Dies lässt sich damit erklären, dass die geringeren Anfangsinvestitionen der traditionellen Lösung durch die größeren Energieeinsparungen/monetären Gewinne der GSHP auf längere Sicht ausgeglichen werden.

5.4. Umweltauswirkungen von GEO4CIVHIC-Technologien an Fallstudienstandorten

5.4.1. Einführung

Eine Umweltverträglichkeitsprüfung (EIA) ermöglicht eine systematische Bewertung der positiven und negativen Auswirkungen eines Projekts auf die natürliche und menschliche Umwelt. Hauptziele einer UVP sind:

- Identifizierung und/oder Vorhersage der bedeutenden Auswirkungen einer Entwicklung;
- Festlegung von geeigneten Minderungsmaßnahmen zur Eliminierung oder Reduzierung der Auswirkungen;
- Kommunikation und Interpretation der oben genannten Informationen über Auswirkungen der geplanten Entwicklung, sowohl in technischer als auch in allgemeinverständlicher Sprache;
- Unterstützung von Entscheidungsträgern und technischen Experten bei der Umsetzung geeigneter Minderungsmaßnahmen zur Minimierung möglicher identifizierter Auswirkungen.

In den Projekten Cheap-GSHPs (Di Tuccio, 2018) und GEO4CIVHIC (Pasquali, 2022) wurde eine vereinfachte EIA-Methodik entwickelt und eingesetzt, um die Auswirkungen der Installation und des Betriebs der zur Installation von EWP-Systemen verwendeten Technologien in Gebäuden zu bewerten. Dies betrifft sowohl die Nachrüstung bestehender Gebäude als auch historische Gebäude an realen Fallbeispielstandorten. Der Hintergrund der angewandten gemeinsamen Methodik wird in den Abschnitten dieses Bandes dargestellt und die Ergebnisse werden in Band 6 (Pasquali, 2022 *in press*) beschrieben.

5.4.2. Methodik

Der Umfang der EIA-Methode zur Bewertung der Auswirkungen von Planung, Installation und Betrieb von EWP-Systemen beruht auf den großen Ähnlichkeiten der Installationsmethoden, die an den realen Fallstudienstandorten, an denen die Projekttechnologien implementiert wurden, angewandt werden. Die Methode wurde als Vorlage für die Bewertung potenzieller Auswirkungen der mit der Installation von EWP-Systemen verbundenen Arbeiten entwickelt und konzentriert sich auf die folgenden Punkte:

- Die Anwendung und Ähnlichkeit von Bohrmethoden für den Bau und die Fertigstellung des EWT-Feldes;
- Das Ausmaß und der Umfang der Sanierungs- und Nachrüstmaßnahmen, die im Rahmen der Gebäudeupgrades durchgeführt wurden;
- Das langfristige Betriebsprofil der eingesetzten Wärmepumpentechnologien zur Deckung der Energiebedarfe der umgesetzten Projekte.

Die Methode zielt darauf ab, die Schlüsselthemen gemäß der EIA-Richtlinie (2014/52/EU) zu behandeln. Dazu gehören eine Zusammenfassung und Projektbeschreibung, die geologische und hydrogeologische Umgebung, Aspekte der Luftqualität und des Klimas, Verkehr und Transport, Lärm und Erschütterungen sowie die landschaftlichen und visuellen Auswirkungen. Im Kontext der in beiden Projekten umgesetzten EWP-Projekte und der Ähnlichkeiten in Bezug auf die Anwendung der Bohrmethoden und die implementierten Wärmepumpentechnologien wurde ein gemeinsamer Ansatz für den EIA-Prozess, die Bewertung der Auswirkungen für jedes Thema und die Definition etwaiger anwendbarer Minderungsmaßnahmen zur Minimierung solcher Auswirkungen entwickelt. Tabelle 5-4 zeigt den in den Projekten verfolgten Ansatz in Bezug auf diese Themen.

Tabelle 5-4. Überblick über die EIA-Methode an einem Fallstudienstandort mit Angabe der wichtigsten Aspekte, die im Rahmen der Prüfung berücksichtigt werden, und des erforderlichen Prüfungsumfangs für die Durchführung einer EIA für EWP-Projekte

Kapitel Titel	Kapitel Typ	Überblick über die UVP-Bewertungsmethode
Zusammenfassung der Fallstudie	Standortbezogen	Desktop
Beschreibung des Projekts	Standortbezogen	Desktop
Böden und Geologie	Standortbezogen	Desktop
Hydrologie und Hydrogeologie	Standortbezogen	Desktop
Luftqualität und Klima	Allgemein	Desktop
Verkehr und Transport	Allgemein	Desktop
Lärm und Vibration	Allgemein	Messung
Landschaft und Optik	Allgemein	Desktop

Das anfängliche Screening-Prozess für die Umweltverträglichkeitsprüfung (EIA) von Projekten für erdgekoppelte Wärmepumpen (EWP) konzentriert sich auf die Entwicklung eines projektspezifischen, dynamischen Risikoregisters. Dieses berücksichtigt Risiken, die mit dem Design, dem Bau und dem langfristigen Betrieb des Systems zusammenhängen.

Das Risikoregister soll technischen und nichttechnischen Projektbeteiligten ermöglichen, ein laufendes Arbeitsdokument zur Identifikation und Verfolgung von Projektrisiken einzusetzen. Hierbei sollen geeignete

Minderungsmaßnahmen definiert werden, die während der Entwicklungs- und Betriebsphasen der EWP-Systeme umgesetzt werden können.

Des Weiteren erlaubt das Risikoregister die Beurteilung der Wirksamkeit von Kontrollmaßnahmen zur Risikominimierung und trägt zur allgemeinen Verringerung des Projektrisikos bei. In Abbildung 5-5 wird die Risikobewertungsmatrix dargestellt, die bei der Durchführung der Beurteilung angewendet werden kann. Ein Beispiel für ein projektspezifisches Register wird in Abbildung 5-6 skizziert.

Risikobewertung		Konsequenz					
		Vernachlässigbar (1)	Gering (2)	Moderat (3)	Groß (4)	Katastrophal (5)	
Mensch	Mensch	Lokale Behandlung mit kurzer Erholungszeit - geringe kurzfristige Auswirkungen auf die Gesundheit.	Medizinische Behandlung erforderlich oder kurzzeitige akute Auswirkungen auf die Gesundheit.	Arbeitsunfälle mit Ausfallzeiten (Erholung von der Arbeit erforderlich) oder kurz- bis mittelfristig	Schwerwiegende Verletzungen oder chronische Gesundheitsprobleme.	Todesfall oder dauerhafte Behinderung.	
	Umwelt	Freisetzung an Ort und Stelle, eindämmbar mit minimalem Schaden. Nur lokal begrenzte Auswirkungen.	Größere Freisetzung am Standort mit einigen Schäden, keine Schäden außerhalb des Standorts. Zahlreiche und/oder weit verbreitete, aber geringfügige Auswirkungen auf Energie und Abfall. Sanierung in Form von Tagen...	Freisetzung außerhalb des Geländes, keine nennenswerten Umweltschäden. Sanierung in Form von Wochen.	Größere Freisetzung außerhalb des Geländes, kurz- bis mittelfristige Umweltschäden. Sanierungsdauer in Monaten.	Große Freisetzung außerhalb des Geländes, langfristige Umweltschäden. Sanierung in Form von Jahren.	
	Andere	Betroffenheit der Belegschaft	Anliegen der örtlichen Gemeinschaft	Regionale Betroffenheit	Weitreichender Reputationsverlust für eine einzelne Geschäftseinheit, weitreichender Aufschrei in der Gesellschaft	Weitreichende Rufschädigung für mehr als eine Geschäftseinheit, extreme Empörung in der Gesellschaft auf nationaler Ebene.	
Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit	5	Fast sicher	Medium	Hoch	Sehr Hoch	Sehr Hoch	Sehr Hoch
	4	Wahrscheinlich	Medium	Medium	Hoch	Sehr Hoch	Sehr Hoch
	3	Möglich	Gering	Medium	Medium	Hoch	Sehr Hoch
	2	Unwahrscheinlich	Gering	Gering	Medium	Medium	Hoch
	1	Selten	Gering	Gering	Gering	Medium	Medium

Abbildung 5-5. Bewertungsmatrix für die Risikobewertung, die für die Umsetzung der EIA-Methode verwendet wurde

Risk Assessment		Project				Risk Assessment Title				Gresyones Real Case Study Site RAMS		Date:	29/09/2019	Page:											
		GEO4CIVIC								Prepared By: RP		Date of Works:	TBC												
		Greystones, Co. Wicklow				Specific Location				Checked By: RP		Revision	C	1 of 1											
Detail of Works		Job No.: GS 0070				Subcontractor				Contact No.		Initials		Role											
Drilling of 2 No. GHEs using Hydra-TKI Method		First Name		Surname		Company		Contractor		Subcontractor															
Installation of Collector Probes Testing								<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No																	
Trenching and surface Groundworks																									
Heat Pump - Monitoring System & Operation																									
Operation																									
Hazard		Risk Targets		Severity of harm		Likelihood		Proposed Mitigation Measure				Severity of harm		Likelihood		Residual Risk Level		Responsible		Comments / References		Briefing Required			
Project Phase		Pers. Envir. Others		VH H M L		VH H M L						VH H M L		VH H M L											
Slips, Trips & Falls		x		3		4		x				3		2		x		Project Manager							
Infection /dermatitis from direct contact with waste		x		x		4		3		x				4		2		x		Project Manager					
Airborne Drilling Material in Contact With Eyes		x		x		3		3		x				3		2		x		Project Manager					
Hearing Damage from Proximity of Operating Machinery		x		x		3		4		x				3		2		x		Project Manager					
Borehole Location & Obstructions		x		x		2		3		x				2		2		x		Project Manager					
Compressed Air		x		x		3		4		x				3		2		x		Project Manager					
Vibration resulting in damage		x		x		3		3		x				2		2		x		Project Manager					
Working in Trenches		x		x		3		4		x				3		2		x		Project Manager					
Oil/Fuel Spill		x				2		3		x				2		2		x		Project Manager					
Electrocution - outdoor monitoring system		x				5		3		x				2		2		x		Project Manager					
Reduced HP performance from ground collector		x		x		4		3		x				2		3		x		Project Manager					
Waste disposal and Groundwater		x		x		4		2		x				2		2		x		Project Manager					

Abbildung 5-6. Beispiel eines Risikoregisters zur Bewertung des Risikoniveaus und der Umsetzung angemessener Abhilfemaßnahmen, die im Rahmen der Entwicklung des EWP-Systems am Fallstudienstandort Greystones (Irland) durchgeführt wurden. Allgemeine Gesundheits- und Sicherheitsrisiken (gelb), Bohr- und GHE-Installationsarbeiten (grün), mechanische und elektrische Installation (lila), Betriebsphase des Systems (orange)

5.4.3. Identifizierung von Empfängern

Im Rahmen der Umweltverträglichkeitsprüfung (EIA) erlaubt dieser Prozess spezifische Standortberücksichtigungen in der Screening- und Bewertungsphase. In den Anfangsphasen werden die vorgeschlagenen Projektaktivitäten und -umsetzungen zur Identifizierung lokaler Empfänger in dem Gebiet genutzt, in dem die Installation des erdgekoppelten Wärmepumpensystems (EWP) vorgenommen wird. Üblicherweise gehören zu den Empfängern nahegelegene Ökosysteme, einzelne Empfänger in Gebäuden und Gemeinschaften, die sich neben den Projektinstallationsstandorten befinden.

Bewertungsmethode

Nach der Identifizierung in der anfänglichen Screening-Phase an einem Projektsstandort werden die Basisbedingungen der empfangenden Umgebung im Kontext der EIA-Themen bewertet (siehe Tabelle 5-4).

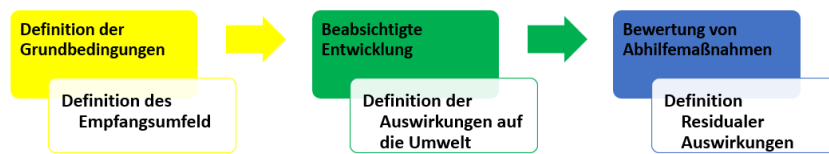


Abbildung 5-7. Arbeitsablauf der EIA-Folgenabschätzung, der die Ermittlung der lokalen Ausgangsbedingungen, die Durchführung von Feldmessungen zur Bestimmung der Auswirkungen und die Ermittlung etwaiger Restauswirkungen zeigt

Die vorgeschlagene Entwicklungs- und Implementierungsphase wird dann nach der Einführung von Kontrollmaßnahmen bewertet. Die tatsächlichen Auswirkungen des Projekts werden dann durch Feldmessungen für kritische Aspekte, die als potenziell auswirkungsreich identifiziert wurden, gemessen (siehe Abbildung 5-7). Zum Beispiel beinhalteten diese während der Bauphase Lärm- und Vibrationsmessungen, die mit den Bohr- und Bauarbeiten in Verbindung stehen, die Entwicklung von grafischen Modellen, die den Standort der Endanlagentechnik in der Betriebsphase des Projekts zeigen und die Auswirkungen, die diese auf die lokale visuelle Landschaft und die Sicht der nahegelegenen Empfänger haben könnten.

5.4.4. Verbleibende Auswirkungen und Empfehlungen

Der abschließende Teil der Bewertung konzentriert sich auf die Ermittlung der verbleibenden Auswirkungen, die bei der Durchführung eines Projekts wahrscheinlich auftreten werden. Zum Beispiel zeigen die Langzeitüberwachungsdaten aus der Betriebsphase der EWP-Systeme den Energieaustausch mit dem Untergrund aus dem Bohrloch-Wärmetauscherfeld und bewerten die wahrscheinlichen (falls vorhandenen) Auswirkungen, die dies auf die Temperaturen im Untergrund unter den geologischen und hydrogeologischen Basisbedingungen haben könnte. Ein weiteres Beispiel hierfür ist die Darstellung der positiven Auswirkung auf die Luftqualität durch den Betrieb des EWP-Systems, der in der Regel zu einer Reduzierung der CO₂-Emissionen durch die Verdrängung vorheriger fossiler Brennstofftechnologien führt.

6. ÜBUNG / TEST

6.1. Thermische Eigenschaften der Gebäude

Es wurde eine Analyse der Gebäudehüllen für die verschiedenen Gebäudetypen und das Alter in Abhängigkeit vom Klima durchgeführt. Es wurden Daten zu Gebäuden und deren thermische Eigenschaften berücksichtigt, unter Berücksichtigung des Klimas und vergleichbarer Bautechniken. Die Tabelle 6-1 zeigt Referenzwerte für bestehende und historische Gebäude und bestätigt, dass die Wärmeübertragung umso geringer ist, je kälter das Klima ist.

Da das Projektziel darin besteht, mögliche Sanierungen von Gebäuden zu untersuchen, wurde eine Analyse durchgeführt, die sich auf die aktuellen lokalen Grenzwerte für die U-Werte der Gebäudehülle (undurchsichtige und verglaste Oberflächen) in den verschiedenen Ländern stützt.

Tabelle 6-1. Durchschnittliche U-Werte auf der Grundlage der statistischen Analyse der Datenbank TABULA

Art des Gebäudes	Alter	Klima	Dach	Wände	Boden	Fenster
		[W/(m ² K)]				
Reihenhaus	bestehend	warm	1.65	0.89	1.36	3.55
		mild	0.70	1.05	1.01	2.85
		kalt	0.29	0.35	0.41	2.35
	historisch	warm	2.30	1.75	1.29	4.97
		mild	1.19	1.75	1.38	3.69
		kalt	0.54	1.11	0.79	2.72
Mehrfamilienhaus	bestehend	warm	0.79	0.79	1.15	3.90
		mild	0.82	1.01	0.68	2.93
		kalt	0.13	0.22	0.16	1.43
	historisch	warm	1.76	1.35	1.07	5.19
		mild	1.80	1.81	0.95	3.41
		kalt	0.32	0.59	0.66	2.50

6.2. Energie-Simulationen

Jedes Gebäude wurde entweder als *bestehendes* oder *historisches* Gebäude betrachtet. Das Mehrfamilienhaus wurde sowohl als Wohn- als auch als Bürogebäude betrachtet, während das Reihenhaus nur als Wohngebäude betrachtet wurde. Im Falle des Wohngebäudes wurde davon ausgegangen, dass die Heizung an allen Tagen 13 Stunden pro Tag eingeschaltet ist, während der Bürobetrieb für zehn Stunden angenommen wurde, ohne Betrieb an den Wochenenden.

Sensible Wärmegewinne wurden gemäß EN ISO 13790 (2008) unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen Belegung von drei Personen in den Wohnungen und einer Kombination von Geräten angenommen, die sich je nach Wohn- oder Bürogebäude unterscheidet. Latente Lasten wurden gemäß ASHRAE 90.1 (2019) definiert, die als internen Gewinnbeitrag die Anwesenheit von Personen in Büros festlegen, während in Wohngebäuden die Kombination von Personen und den typischen Hausaktivitäten berücksichtigt wird.

Der Ausgangswert für die Infiltrationsraten wurde für alle Modelle von bestehenden und historischen Gebäuden auf 0,4 ACH festgelegt, während bei Sanierungsfällen die Infiltrationsrate aufgrund der verbesserten Dichtigkeit der Gebäudehülle durch den Einbau neuer Fenster auf 0,1 ACH festgelegt wurde. Im Fall von Sanierungslösungen wurden die mechanischen Lüftungsströme gemäß EN 16798 (2019) definiert.

So wurden für die Mehrfamilienhäuser zwei Fälle (Wohn- und Nichtwohngebäude) für vier Arten von Gebäudehüllen betrachtet, also acht Fälle. Für das Reihenhaus wurde nur das Wohngebäude mit vier Arten von Gebäudehüllen betrachtet, d.h. vier Fälle. Die insgesamt zwölf Fälle wurden für die drei Standorte untersucht, was 36 Fälle ergibt. Die Methode der stationären Berechnung EN12831 (2018) wurde zur Bestimmung der Spitzenleistung für die Heizung angewendet, während dynamische Simulationen mit der Software TRNSYS durchgeführt wurden, um die Spitzenlast für Kühlung und den Energiebedarf für Heizung und Kühlung zu ermitteln.

6.3. Ergebnisse

Die Ergebnisse für die drei Klimazonen Athen (Abbildung 6-1), Straßburg (Abbildung 6-2) und Helsinki (Abbildung 6-3) werden hier präsentiert. In allen Fällen wurde die Kühlenergie sowohl für die sensible als auch für die latente Last berechnet.

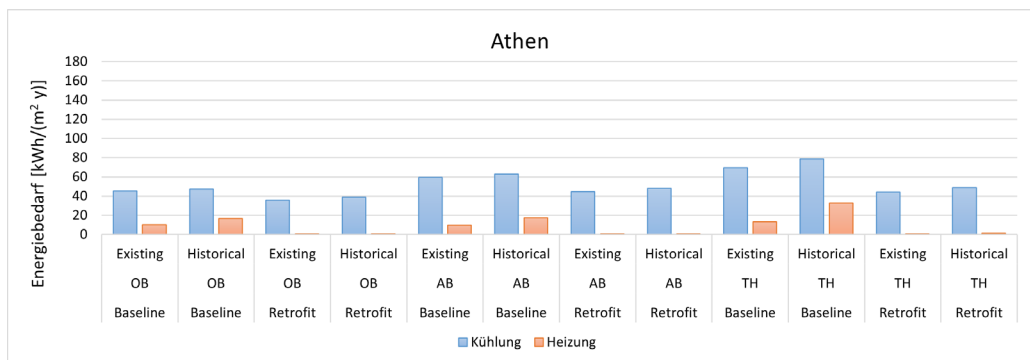


Abbildung 6-1. Energiebedarf für Heizung und Kühlung für Athen

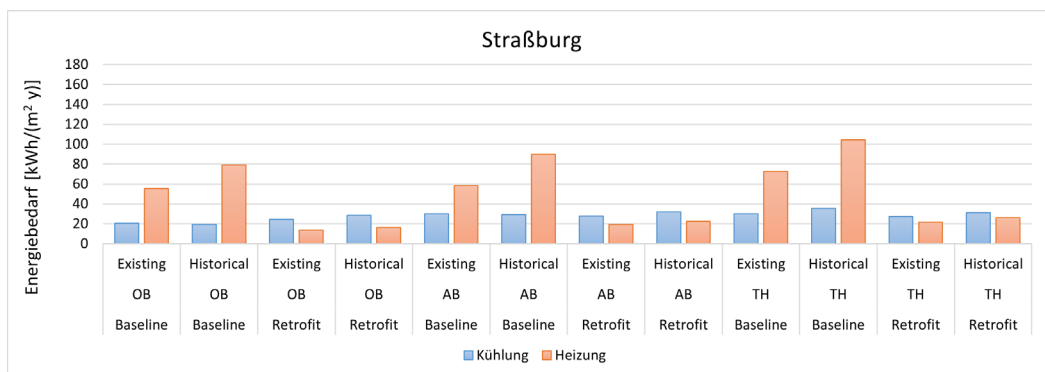


Abbildung 6-2. Energiebedarf für Heizung und Kühlung für Straßburg

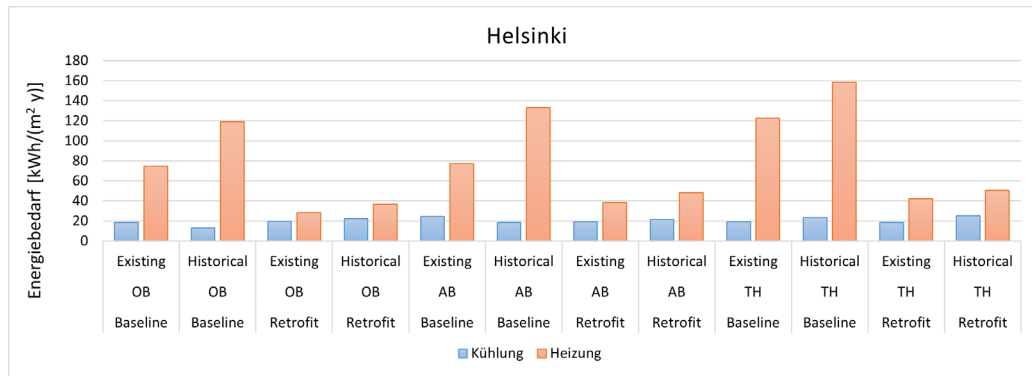


Abbildung 6-3. Energiebedarf für Heizung und Kühlung in Helsinki

Wie zu erwarten, ist der Energiebedarf der Bürogebäude geringer als der der Wohngebäude, da die Heiz-/Kühlsysteme dort länger in Betrieb sind.

Bei den Basisfällen (also in den Fällen, in denen die Transmissionswerte der Gebäude den in Tabelle 6-1 angegebenen Werten entsprechen), dominiert in milden und kalten Klimazonen, abgesehen von Athen, der Heizenergiebedarf. In Straßburg dagegen gleichen sich der Energiebedarf für Heizung und Kühlung an, wenn die Gebäude saniert wurden. Dies ist wichtig, weil die kritischste Bedingung für die Dimensionierung der Erdwärmetauscher der Sommer sein könnte, da in der Kühlperiode die Energie, die in den Boden geleitet werden muss, die Energie des Kompressors berücksichtigen muss. Im Gegensatz dazu ist in der Heizperiode die vom Boden extrahierte Energie die Energie des Gebäudes abzüglich der Energie des Kompressors. Um die Gesamteffizienz des Systems konstant zu halten, sollte die im Kühlbetrieb in den Boden eingespeiste Wärme der im Heizbetrieb aus dem Boden entzogenen Wärme entsprechen, um thermischen Drift zu vermeiden.

Der spezifische Energiebedarf der Reihenhäuser ist höher als der der Mehrfamilienhäuser, was auf die hohen Verluste der Gebäude zurückzuführen ist. Tatsächlich beträgt das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen (S/V) im Fall des Reihenhauses 0,97 m⁻¹ und im Fall des Mehrfamilienhauses 0,56 m⁻¹. Vergleicht man den Energiebedarf der Gebäude im aktuellen Zustand mit den sanierten Gebäuden, zeigen die erhaltenen Diagramme das enorme Potenzial für Energieeinsparungen in Europa, wenn man die Ergebnisse auf Städte mit ähnlichem Klima hochrechnet.

7. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse von Band 5 des Schulungshandbuchs des GEO4CIVHIC-Projekts aufgeführt:

Es gibt drei Kriterien, die dazu beitragen können, thermische Interferenzen zwischen nahegelegenen geothermischen Systemen mit Bohrloch-Wärmetauschern (EWT) zu reduzieren:

- Wenn die Systeme weniger als 50 % der Bohrlänge voneinander entfernt sind (der Abstand wird als der nächstgelegene Punkt zwischen den Sonden berechnet), ist es immer noch möglich, dass es zu negativen thermischen Auswirkungen zwischen geothermischen Systemen kommen kann. Es wird empfohlen, Mindestabstände zwischen den geothermischen Systemen festzulegen, bei deren Überschreitung thermische Interferenzen zu berücksichtigen sind.
- Während des Bemessungsschritts sollte die minimale Fluidtemperatur korrekt erhöht werden, um langfristige Auswirkungen benachbarter Systeme vorherzusehen. Dies kann erreicht werden, indem die Gesamtblöhlänge verlängert wird, falls Änderungen an der jährlichen Wärmeentnahme umgesetzt werden können.
- Die jährliche Entnahme der geothermischen Ressource pro Installation sollte begrenzt werden. Dies kann erreicht werden, indem der Boden jährlich aufgeladen und somit die jährliche Wärmeentnahme reduziert wird.

Natürlich können die Möglichkeiten gleichzeitig und kombiniert eingesetzt werden, wobei darauf zu achten ist, dass das gewünschte und optimale Ergebnis erhalten bleibt.

Die Anwendung der C2RLS-Methode auf die GEO4CIVHIC-Testbohrung bietet zusätzliche Informationen und Einblicke in die Eigenschaften der im Rahmen des Projekts entwickelten Materialien sowie neue Denkansätze für künftige Verbesserungen der Standard-TRT-Bewertungsmethoden.

Das GEO4CIVHIC DSS-Tool ist ein webbasiertes Instrument, das die Annahme von geothermischen Sanierungsmaßnahmen in städtischen Umgebungen beschleunigen soll. Es wurde für eine vorläufige Kosten- und Auswirkungsanalyse angewendet, um Gebäudeeigentümer von der Installation von EWP-Systemen zu überzeugen und die Vorbesprechungen zur Installation eines EWP in einem Sanierungsprojekt zu erleichtern. Außerdem soll es dazu beitragen, dass Entscheidungsträger den Nutzen von Investitionen in EWP verstehen und andererseits EWP-Experten Projekte mit dieser Technologie beauftragen.

Anhand des Bewertungsergebnisses einer EWP-Anlage wurden zwei Faktoren definiert, darunter SCOP und SEER, die die Leistung einer reversiblen Wärmepumpe im Winterbetrieb (gemessen mit SCOP) und im Sommerbetrieb (gemessen mit SEER) angeben.

Die Verwendung einer Hybridstrategie (Luft- und Erdwärmequelle) erhöht die Energieleistung (und damit die wirtschaftlichen Einsparungen) geringfügig. Der große wirtschaftliche Vorteil dieser Option liegt in der Verwendung von Luft als Quelle. Dadurch kann das Bohrlochfeld um bis zu 40 % reduziert werden, was Bohrkosten und damit die Investition für die Anlage drastisch senkt. Je nach Klima, Verwendungszweck und Energiebedarf des Gebäudes, der mit dem Baujahr oder den durchgeführten Nachrüstungsmaßnahmen zusammenhängt, können zahlreiche Strategien angewandt werden. Die Nutzung des Erdreichs als Energiequelle verbessert die Energieeinsparungen (und damit die wirtschaftlichen Einsparungen) je nach Szenario um 5% bis 15 %.

Es wurde festgestellt, dass die beteiligten traditionellen Lösungen für den 5-Jahres-Barwert-Zeitrahmen rentabler sind als die EWP-Installation. Dennoch sind die Kapitalwerte für die EWP im 10-Jahres-Kapitalwert-Zeitrahmen und darüber zunehmend profitabel, was zu einer profitableren Lösung im Vergleich zu den beteiligten traditionellen Lösungen führt. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die geringeren Anfangsinvestitionen der herkömmlichen Lösung durch die größeren Energie-/Geldeinsparungen Gewinne der EWP-Anlage bei längerfristigen Investitionszeiträumen ausgeglichen werden.

Die Langzeitüberwachungsdaten aus der Betriebsphase der EWP-Systeme zeigten den Energieaustausch mit dem Erdreich aus dem Erdwärmesondenfeld und die Bewertung der wahrscheinlichen (wenn überhaupt) Auswirkungen, die dies auf die Temperaturen im Untergrund auf die geologischen und hydrogeologischen Ausgangsbedingungen haben könnte. Im Gegenteil, es wurden positive Auswirkungen auf die Luftqualität festgestellt, was einer Verringerung der CO₂-Emissionen durch die Ablösung früherer fossiler Brennstofftechnologie.

REFERENZEN

1. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ANSI/ASHRAE/IES Standard 90.1: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, 2019.
2. Ballarini, Ilaria, Stefano Paolo Corgnati, und Vincenzo Corrado. "Verwendung von Referenzgebäuden zur Bewertung des Energieeinsparpotenzials des Wohngebäudebestands: The experience of TABULA project." *Energy Policy* 68 (2014): 273-284.
3. Badenes, Borja, Miguel Ángel Mateo Pla, Lenin G. Lemus-Zúñiga, Begoña Sáiz Mauleón, und Javier F. Urchueguía. "Über den Einfluss von Betriebs- und Regelungsparametern bei der Prüfung des thermischen Verhaltens von Erdwärmesonden." *Energies* 10 (2017): 1328.
4. Badenes, Borja, Miguel Ángel Mateo Pla, Teresa Magraner, Javier Soriano, und Javier F. Urchueguía. "Theoretische und experimentelle Kosten-Nutzen-Bewertung von Erdwärmesonden (BHEs) in Abhängigkeit von der Durchflussmenge des Arbeitsmediums". *Energies* 13 (2020): 4925.
5. Beier, Richard A., und Marvin D. Smith. "Mindestdauer von In-situ-Tests an vertikalen Bohrlöchern". *ASHRAE Transactions* 109 (2003): 475.
6. Cazorla-Marín, Antonio, Carla Montagud-Montalvá, José Miguel Corberán, Álvaro Montero, und Teresa Magraner. "Ein TRNSYS unterstützendes Werkzeug für die Abschätzung der thermischen Eigenschaften des Bodens, angewandt auf TRT-Daten (Thermal Response Test): B2G model." *Applied Thermal Engineering* 185 (2021): 116370.
7. Carslaw, H. S., und J. C. Jaeger. "Conduction of heat in solids. Aufl." (1986).
8. Di Tuccio, M. C., Alessandrini, D. Pasquali, R. O'Neill, N. 2018. Studie zur Umweltrisikobewertung für jeden der Fallstudienstandorte. Deliverable D7.4, Cheap and Efficient Application of reliable Ground Source Heat Exchangers and Pumps (Cheap-GHSPs).
9. De Carli M, Carneletto L, Di Bella A, Graci S, Emmi G, Zarrella A, et al. Archetypendefinition für die Analyse von Nachrüstungs-lösungen in städtischen Gebieten in Europa. Tanabe SI, Zhang H, Kurnitski J, Gameiro da Silva MC, Nastase I, Wargocki P, et al., editores. E3S Web Conf. 2019;111:03027.
10. De Carli M, Massimo Tonon, Angelo Zarrella, und Roberto Zecchin. "A computational capacity resistance model (CaRM) for vertical ground-coupled heat exchangers". *Renewable Energy* 35 (2010): 1537-1550.
11. De Carli M, A. Bernardi, M. Cultrera, G. Dalla Santa, A. Di Bella, G. Emmi, A. Galgaro, S. Graci, D. Mendrinós, G. Mezzasalma, R. Pasquali, S. Pera, R. Perego, A. Zarrella, A Database for Climatic Conditions around Europe for Promoting GSHP Solutions, Geosciences (Switzerland) 8 (2), February 2018.
12. EN 12831: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden. Verfahren zur Berechnung der Auslegungsheizlast - Teil 1: Raumheizlast, 2017.
13. EN 14825: Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern für die Raumheizung und -kühlung - Prüfung und Bemessung unter Teillastbedingungen und Berechnung der jahreszeitlichen Leistung, 2019.
14. EN 15450: Heizungsanlagen in Gebäuden - Auslegung von Wärmepumpen-Heizungsanlagen, 2007.
15. EN 15898: Konservierung von Kulturgut - Allgemeine Begriffe und Definitionen, 2019.
16. EN 16798: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Lüftung von Gebäuden - Teil 1: Raumlufttechnische Eingangsparameter für die Planung und Bewertung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden unter Berücksichtigung von Raumluftqualität, thermischer Umgebung, Beleuchtung und Akustik, 2019.
17. EN 16883: Erhaltung des kulturellen Erbes - Leitlinien für die Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz historischer Gebäude, 2016.
18. EN ISO 17628: Geotechnische Untersuchungen und Prüfungen - Geothermische Prüfungen - Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Boden und Fels mit einer Erdwärmesonde, 2015.
19. Europäische Kommission, 2014. Richtlinie 2014/52/EU des Europäischen Parlaments und des Rates.
20. Gehlin, Signhild. "Thermal Response Test: In-situ-Messungen der thermischen Eigenschaften in hartem Gestein". PhD diss., Luleå tekniska universitet, 1998.
21. Hackel, Scott, und Amanda Pertzborn. "Effektive Auslegung und Betrieb von hybriden Erdwärmepumpen: drei Fallstudien". *Energy and Buildings* 43 (2011): 3497-3504.
22. Internationale Organisation für Normung, EN ISO 13790: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energieverbrauchs für Raumheizung und Kühlung", Genf, Schweiz, 2008.
23. Kavanaugh SP, Rafferty K. Ground-source Heat Pumps-Design of Geothermal System for Commercial and Institutional Buildings, ASHRAE Applications Handbook. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers; 1997.
24. Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *metz.* 10 de julio de 2006;15(3):259-63.
25. Li, Min, und Alvin CK Lai. "Analytisches Modell für Kurzzeitreaktionen von Erdwärmetauschern mit U-förmigen Rohren: Model development and validation." *Applied Energy* 104 (2013): 510-516.
26. Li, Min, und Alvin CK Lai. "Review of analytical models for heat transfer by vertical ground heat exchangers (GHEs): A perspective of time and space scales." *Applied Energy* 151 (2015): 178-191.

27. Magraner, Teresa, Álvaro Montero, Antonio Cazorla-Marín, Carla Montagud-Montalvá, und Julio Martos. "Thermal Response Test Analysis for U-pipe vertical borehole heat exchangers under groundwater flow conditions". *Renewable Energy* 165 (2021): 391-404.
28. Müller, Johannes, Antonio Galgaro, Giorgia Dalla Santa, Matteo Cultrera, Constantine Karytsas, Dimitrios Mendrinou, Sebastian Pera et al. "Generalized pan-european geological database for shallow geothermal installations." *Geosciences* 8 (2018): 32.
29. Magrini, Anna, Giorgia Lentini, Sara Cuman, Alberto Bodrato, und Ludovica Marengo. "Von Fast-Null-Energie-Gebäuden (NZEB) zu Positiv-Energie-Gebäuden (PEB): Die nächste Herausforderung - Die neuesten europäischen Trends mit einigen Anmerkungen zur Energieanalyse eines PEB-Vorläuferbeispiels". *Developments in the Built Environment* 3 (2020): 100019.
30. N. Molina-Giraldo, Heat transport modeling in shallow aquifers, Ph.D. thesis, Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Eberhard Karls Universität Tübingen (2011).
31. Pasquali R, Harlin K, Badenes B, Urchueguía J, Ballardi M, Soma L, et al. Deliverable 6.4 Common MCDA Methodology & Risk Assessment of individual case study sites. GEO4CIVHIC-Projekt;
32. Pasquali, R. Dalla Santa, G. Micaleff, D. Vercruysee, J. Mezzasalma, G. Pockelé, L. 2022. Ergebnis 6.2, Bericht über die Umweltauswirkungen der GEO4CIVHIC-Technologien an Fallstudienstandorten. Einfachste, effizienteste und kostengünstigste geothermische Systeme für die Nachrüstung von Zivilgebäuden und historischen Gebäuden (GEO4CIVHIC).
33. Rasmussen B., Machimbarrena M., COST Action TU0901 - Building acoustics throughout Europe - Volume 1: Towards a common framework in building acoustics throughout Europe (2014) <http://www.costtu0901.eu/tu0901-e-books.html> (zuletzt gesehen am 15/01/2019).
34. Sanner, Burkhard, Göran Hellström, Jeffrey D. Spitler, und Signhild Gehlin. "More than 15 years of mobile Thermal Response Test-a summary of experiences and prospects. In *Proceedings of the European Geothermal Congress*, vol. 9. Italy Pisa, 2013.
35. SN 546 384/6: Bohrlochwärmetauscher, 2021
36. UNE 100715-1, Planung, Installation und Wartung von oberflächennahen geothermischen Anlagen - geschlossene vertikale Systeme, 2014
37. Usman, Muhammad, Daniel Balsalobre-Lorente, Atif Jahanger, und Paiman Ahmad. "Die Sorge um die Umweltverschmutzung im Zuge der Globalisierung in finanziell ressourcenreichen Ländern: spielen finanzielle Entwicklung, natürliche Ressourcen und der Verbrauch erneuerbarer Energien eine Rolle?". *Renewable Energy* 183 (2022): 90-102.
38. Urchueguía, Javier F., Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga, Jose-Vicente Oliver-Villanueva, Borja Badenes, Miguel A. Mateo Pla, und José Manuel Cuevas. "Wie zuverlässig sind standardmäßige Tests zur thermischen Reaktion? An assessment based on long-term thermal response tests under different operational conditions." *Energies* 11 (2018): 3347.
39. Urchueguía, Javier F., Borja Badenes, Hossein Javadi, Miguel A. Mateo Pla, und Bruno Armengot Carbó. "Angepasste zusammengesetzte Zwei-Regionen-Linienquellen-Methoden für die Bewertung von Erdwärmesonden mit fortschrittlichen Kunststoffrohrmaterialien und verbesserten Verfüllungsprodukten". *Applied Thermal Engineering* (Under Review).
40. VDI 4640-2: Thermische Nutzung des Untergrundes - Erdreichwärmepumpenanlagen, 2019.
41. VDI 4640-5: Thermische Nutzung des Untergrundes - Thermische Prüfung, 2020.
42. Witte, Henk JL, Guus J. Van Gelder, und Jeffrey D. Spitler. "In-situ-Messung der Wärmeleitfähigkeit des Bodens: A Dutch perspective." *Ashrae Transactions* 108 (2002): 263-272.
43. Yang, Rui, und Lingfeng Wang. 2012. Efficient Control of a Solar Assisted Ground-Source Heat Pump System Based on Evaluation of Building Thermal Load Demand'. In *2012 North American Power Symposium (NAPS)*, 1-6. IEEE.

AUTOREN

1. CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE (CNR)

CNR - ISAC

Adriana BERNARDI
Alessandro BORTOLIN
Gianluca CADELANO

CNR - ITC

Sergio BOBBO
Laura FEDELE
Stefano ROSSI
Mauro SCATTOLINI

2. UNIVERSITA DEGLI STUDI DI PADOVA (UNIPD)

Abteilung für Wirtschaftsingenieurwesen

Michele DE CARLI
Angelo ZARRELLA
Giuseppe EMMI
Laura CARNIELETTO
Samantha GRACI
Davide QUAGGIOTTO

Fachbereich Geowissenschaften DG Referat

Antonio GALGARO
Eloisa DI SIPIO
Giorgia DALLA SANTA
Alberto CARRERA

3 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA (UPV)

Javier F. URCHUEGUÍA
Borja BADENES
Hossein JAVADI
Miguel Á. MATEO

4. R.E.D. SRL RESEARCH AND ENVIRONMENTAL DEVICES (ROT)

Luc POCKELÉ
Giulia MEZZASALMA
Silvia CONTINI
Mattia CHINELLO
Nicola MUTINELLI

5. TERRA GEOSERV LIMITED (GEOSERV)

Riccardo PASQUALI
Aisling CUNNINGHAM

6. GALLETTI BELGIUM / HIREF (GALLETTI)

Fabio POLETTO
Andrea TARABOTTI
Enrico PACCHIN

7. FUNDACION TECNALIA FORSCHUNG & INNOVATION (TECNALIA)

Miguel Ángel ANTÓN
Amaia CASTELRUIZ
Sarah NOYÉ
Beatriz SÁNCHEZ
Arantza LÓPEZ

8. TERRA INFRASTRUCTURE (EHEMALS THYSSENKRUPP INFRASTRUCTURE)

Arno ROMANOWSKI
Franziska HELBIG

9. UNESCO REGIONALBÜRO FÜR WISSENSCHAFT UND KULTUR IN EUROPA

Jonathan BAKER
Francesca BAMPA
Matteo ROSATI
Iuliia KOZLOVA
Francesco LIPPARINI
Anh Thi Ngoc NGUYEN
Akémi LAMARCHE VADEL

10. FRIEDRICH-ALEXANDER- UNIVERSITÄT ERLANGEN NUERNBERG (FAU)

David BERTERMANN
Oliver SUFT
Moritz FAUDE
Johannes MULLER

11. SOCIETATEA ROMANA GEOEXCHANGE / RUMĂNICHE GEOEXCHANGE- GESELLSCHAFT (SRG - RGS)

Robert GAVRILIUC
Doinița- Iuliana CUCUȚEANU
Tiberiu CATALINA
Marian ALEXANDRU

12. ZENTRUM FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN UND FONDATION FÜR ENERGIESPAREN (CRES)

Dimitrios MENDRINOS
Konstantin KARYTSAS
Ioannis CHOROPANITIS
Ioannis CHALDEZOS
Spyridon KARYTSAS

13. HYDRA SRL (HYDRA)

Davide RIGHINI
Elisabetta GARDENGHI

14. UBEG DR ERICH MANDS U MARC SAUER GBR (UBEG)

Burkhard SANNER
Erich MANDS
Marc SAUER

15. GEO-GREEN SPRL (GEO-GREEN)

Jacques VERCRUYSSÉ

16. PIETRE EDIL SRL (PIETRE)

Elena Loredana FODOR
Leonardo ROSSI
Alexandru TĂNASE

17. SOLINTEL M&P SL (SOLINTEL)

Dery TORRES
Hugo GRASSET
Miguel Angel GOMEZ

18. DIN L-ART HELWA (DLH)

Luciano MULE'STAGNO
Daniel MICALLEF
Ingrid GALEA
Davide POLETTO
Daniele SFERRA
Manuel SCARPA

19. SCUOLA UNIVERSITARIA PROFESSIONALE DELLA SVIZZERA ITALIANA (SUPSI)

Marco BELLARDI
Linda SOMA
Sebastian PERA
Rodolfo PEREGO

PARTNER



INSTITUTE OF ATMOSPHERIC SCIENCES AND CLIMATE
NATIONAL RESEARCH COUNCIL (CNR – ISAC)
www.isac.cnr.it



INSTITUTE OF CONSTRUCTION
TECHNOLOGIES NATIONAL
RESEARCH COUNCIL (CNR-ITC)
www.itc.cnr.it



UNIVERSITA' DEGLI
STUDI DI PADOVA (UNIPD)
www.unipd.it



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA (UPV)
www.upv.es



RESEARCH AND
ENVIRONMENTAL
DEVICES SRL (RED)
www.red-srl.com



TERRA INFRASTRUCTURE
(FORMER THYSSENKRUPP
INFRASTRUCTURE)
www.terra-infrastructure.com



TERRA GEOSERV LIMITED
(GEOSERV)
www.geoservsolutions.com



GALLETTI BELGIUM/
HIREF (GALLETTI)
www.galletti.be/hiref.it



MEMBER OF BASQUE RESEARCH
& TECHNOLOGY ALLIANCE
FUNDACION TECNALIA
RESEARCH & INNOVATION
www.tecnalia.com



GEO GREEN SPRL
(GEO-GREEN)
www.geo-green.be



UNESCO REGIONAL BUREAU
FOR SCIENCE AND CULTURE
IN EUROPE
www.unesco.org/venice



Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

FRIEDRICH-ALEXANDER-
UNIVERSITÄT ERLANGEN-
NURNBERG (FAU)
www.uni-erlangen.de



ROMANIAN GEOEXCHANGE SOCIETY
SOCIETATEA ROMANA
GEOEXCHANGE /ROMANIAN
GEOEXCHANGE SOCIETY
(SRG - RGS)
www.geoexchange.ro



CENTRE FOR RENEWABLE
ENERGY SOURCES
AND SAVING FUNDATION
(CRES)
www.cres.gr



HYDRA SRL
(HYDRA)
www.hydrahammer.it



UBEG DR ERICH MANDS
U MARC SAUER
GBR (UBEG)
www.ubeg.de

Scuola universitaria professionale
della Svizzera italiana



SCUOLA UNIVERSITARIA
PROFESSIONALE
DELLA SVIZZERA ITALIANA
(SUPSI)
www.supsi.ch



PIETRE EDIL SRL
(PIETRE EDIL)
www.pietre-edil.ro



SOLINTEL M&P SL
(SOLINTEL)
www.solintel.eu



DIN L-ART HELWA (DLH)
www.dinlarthelwa.org