



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

2018 - 2023

1

2

3

4

5

6

7

Energiebedarf und technische Lösungen für effiziente Gebäude

Autoren: GEO4CIVHIC-Konsortium

Projektkoordinatorin: Adriana BERNARDI

Band-Koordinatorin: Laura CARNIELETTO

www.geo4civhic.eu

Das GEO4CIVHIC-Projekt wurde durch das Forschungs- und Innovationsprogramm Horizont 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 weitere Verwendung der darin enthaltenen Informationen verantwortlich ist.

REDAKTIONEN:

Adriana Bernardi

Doinița - Iuliana Cucuțeanu

PRÄAMBEL



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**

Band

1

GEO4CIVHIC-Projekt

Schulungshandbuch

Energiebedarf und technische Lösungen für effiziente Gebäude

Autoren: GEO4CIVHIC-Konsortium

Projektkoordinatorin: Adriana BERNARDI

Band-Koordinatorin: Laura CARNIELETTO

INHALT

ABSTRACT	7
AUTOREN/PARTNER.....	8
NOMENKLATUR	9
1. EINFÜHRUNG IN ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE.....	10
1.1. Nachrüstung an Bestandsgebäuden	10
1.2. Neue Gebäude (NEH, nNEH, PEH).....	11
1.3. Energie- und Nachhaltigkeitskennzeichnung	12
1.4. Umwelt- und Nachhaltigkeitsleistung eines Gebäudes	13
2. MÖGLICHE NACHRÜSTUNGSSZENARIEN.....	14
2.1. Mögliche Nachrüstungsmaßnahmen	15
2.2. Dimensionierung der Erdwärmetauscher	17
2.3. Optimale Länge der Sonden.....	18
3. FALLSTUDIEN	19
3.1. Athen.....	20
3.2. Straßburg.....	21
3.3. Helsinki	22
3.4. Optimale Länge der Sonden.....	23
4. INTEGRATION VON ERDWÄRMEPUMPEN MIT ANDEREN SYSTEMEN	25
4.1. Mit erneuerbarem Strom unterstützte Erdwärmepumpen	25
4.2. Solarthermisch unterstützte Erdwärmepumpen.....	26
4.3. Luft- und erdgekoppelte Wärmepumpen.....	28
4.4. PV-Thermal unterstützte Erdreich-Wärmepumpen.....	29
4.5. Anwendung von Fallstudien: Selbstversorgungs- und Selbstverbrauchsindizes für GEO4CIVHIC-Archetyphen.....	29
5. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND WEITERE ANWENDUNGEN.....	33
REFERENZEN	35

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1. Vereinfachtes Schema der angewandten Nachrüstungsstrategien.....	17
Abbildung 2-2. Mögliche Szenarien der Fallstudien	19
Abbildung 3-1. Vergleich zwischen der maximal verfügbaren Länge und der erforderlichen Bohrlochlänge zur Deckung des Energiebedarfs für die drei Gebäudetypologien für Athen ohne (a) und mit (b) Hüllendämmung.....	21
Abbildung 3-2. Vergleich zwischen der maximal verfügbaren Länge und der erforderlichen Bohrlochlänge zur Deckung des Energiebedarfs für die drei Gebäudetypologien in Straßburg ohne (a) und mit (b) Hüllendämmung	22
Abbildung 3-3. Vergleich zwischen der maximal verfügbaren Länge und der erforderlichen Bohrlochlänge zur Befriedigung der Energienachfragetypologien für Helsinki ohne (a) und mit (b) Hüllendämmung	23
Abbildung 4-1. Wind-/PV-gestützte Erdwärmepumpenanlage	26
Abbildung 4-2. Aufbau einer solarthermisch unterstützten Erdwärmepumpenanlage	27
Abbildung 4-3. Anschlussschema eines Kühlturms oder Trockenkühlers mit einer Erdwärmepumpe.....	28
Abbildung 4-4. Anschlussschema Luft-Wasser-Wärmepumpe gekoppelt mit GSHP.....	28



TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1. Auslegung und saisonale Werte der Wärmepumpe, die an die verschiedenen Heiz- und Kühlsysteme angeschlossen ist	18
Tabelle 2-2. Thermische Eigenschaften der drei betrachteten Bodentypen.....	18
Tabelle 2-3. Optimale Länge der Sonden	19
Tabelle 3-1. Energieaufwand für Heizung und Kühlung an den drei Standorten [kWh/(m ² y)].....	20
Tabelle 3-2. Für die Sonden gewählte endgültige Länge	24
Tabelle 4-1. Durchschnittlich stündlich verbrauchte elektrische Energie [Wh]	29
Tabelle 4-2. Tägliche Nutzung Elektroherd [Wh].....	30
Tabelle 4-3. Gesamtstromverbrauch einschließlich Wärmepumpe, Beleuchtung und Geräte [kWh]	30
Tabelle 4-4. Jährliche Energieerzeugung durch die Photovoltaikanlage.....	31
Tabelle 4-5. Dimensionierungsparameter der PV-Anlage.....	31
Tabelle 4-6. Zusammenfassung der Ergebnisse der Selbstversorgung und des Eigenverbrauchs für das bestehende Reihenhaus	31
Tabelle 4-7. Zusammenfassung der Ergebnisse der Selbstversorgung und des Eigenverbrauchs für das historische Reihenhaus	32

ABSTRACT

Nach den jüngsten politischen Maßnahmen in Bezug auf die Energienutzung in Gebäuden und die Notwendigkeit von Nachrüstungsstrategien, um zu Null- (oder Fast-Null- oder Plus-) Energiegebäuden zu gelangen. Ziel des GEO4CIVHIC-Projekts ist es, die Nachrüstung von zivilen und historischen Gebäuden zu fördern, indem die Installation erleichtert, die Kosten senkt und die Effizienz der verschiedenen Komponenten durch oberflächennahe geothermische Systeme erhöht wird. Insbesondere sollen politische Maßnahmen zur Verringerung des Energiebedarfs von Gebäuden unterstützt werden, indem Strategien vorgeschlagen werden, die Erdwärmetauscher mit anderen erneuerbaren Energiequellen kombinieren. Das Hauptziel besteht darin, das Bewusstsein für die potenziellen Energieeinsparungen zu schärfen, die bei optimaler Dimensionierung und begrenzten Auswirkungen auf die städtische Umwelt möglich sind.

Die Definition von Gebäudearchetypen ist von grundlegender Bedeutung, um die Fallstudien in anderen Klimazonen und an anderen Orten zu wiederholen und die Analyse möglicherweise auf städtischer Ebene zu erweitern. Es wurden Archetypen entwickelt, die zwischen bestehenden und historischen Gebäuden unterscheiden und sich auf Einfamilien-Reihenhäuser konzentrieren, die die typischen Wohngebäude in europäischen historischen Zentren sind.

Die potenzielle Kopplung von erdgekoppelten Wärmepumpen mit anderen erneuerbaren Energien wurde untersucht (d. h. Solarthermiekollektoren mit Speicher, Windenergie, Photovoltaik (PV)-Systeme, hybride PV-thermische Lösungen und Luft-Wasser-Wärmepumpen), und es wurden optimale Lösungen für die verschiedenen Gebäudetypen und Klimazonen als Anwendungsbeispiele definiert.

Es wurde eine Methodik für die optimale Dimensionierung von Erdwärmepumpen entwickelt, die auch Dual-Source-Systeme oder Luftsysteme berücksichtigt. Es wurden Ergebnisse für archetypische Gebäude vorgestellt, bei denen Simulationen einer Photovoltaikanlage kombiniert wurden, um die Autarkie und den Eigenverbrauch für fünf Ausrichtungen des Gebäudes zu schätzen.

Extreme Ergebnisse wurden für warme Klimazonen erzielt, mit vernachlässigbarem Heizenergiebedarf und möglicherweise freien Kühlsystemen anstelle der im Winter benötigten traditionellen Kühlsysteme. Mit der richtigen Neigung könnten Photovoltaiksysteme auch in nördlichen Klimazonen bis zu 40 % des Selbstversorgungsanteils liefern.

AUTOREN/PARTNER

UNIPD – Laura Carnieletto, Michele De Carli, Angelo Zarrella, Giuseppe Emmi, Davide Menegazzo

SUPSI – Marco Belliardi

CRES – Dimitris Mendrinos

NOMENKLATUR

Abkürzungen

<i>LWWP</i>	Luft/Wasser-Wärmepumpe
<i>GEM</i>	Gebäude-Energiemodell
<i>BREEAM</i>	Umweltbewertungsmethode des Building Research Establishment
<i>DHW</i>	Domestic hot water / Warmwasser
<i>EPBD</i>	Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden
<i>EPC</i>	Ausweis über die Gesamtenergieeffizienz
<i>ESPC</i>	Energiespar-Contracting
<i>EU</i>	Europäische Union
<i>GHE</i>	Erdwärmetauscher
<i>THG</i>	Treibhausgas
<i>GSHP</i>	Erdwärmepumpe
<i>HGSHP</i>	Hybride GSHP
<i>HLK</i>	Heizung, Lüftung und Klimatisierung
<i>ILQ</i>	Innenraum-Luftqualität
<i>IRQ</i>	Innenraum-(Wohn-)Qualität
<i>LEED</i>	Führung in Energie- und Umweltdesign
<i>NEEAP</i>	Nationaler Aktionsplan für Energieeffizienz
<i>NEPC</i>	Nationale Ausweise über die Gesamtenergieeffizienz
<i>NGO</i>	Nichtstaatliche Organisation
<i>NPO</i>	Gemeinnützige Organisation
<i>nNEH</i>	Nahezu Null-Energie-Gebäude
<i>PCM</i>	Phasenwechselmaterial
<i>PEH</i>	Plusenergiehaus
<i>PV</i>	Photovoltaik
<i>EEQ</i>	Erneuerbare Energiequellen
<i>SNBS</i>	Sustainable Building Standard Schweiz
<i>NEH</i>	Null-Energie-Gebäude

Symbole

λ	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]
<i>CO₂</i>	Kohlendioxid [-]
<i>COP</i>	Leistungsziffer / Arbeitszahl [W/W]
<i>EEV</i>	Energie-Effizienz-Verhältnis [W/W]
<i>L_c</i>	(Sonden-) Länge für Raumkühlung [m]
<i>L_h</i>	(Sonden-) Länge für Raumheizung [m]
<i>L_{max}</i>	Maximale Sondenlänge [m]
<i>SCOP</i>	Saisonale Leistungszahl [W/W]
<i>SEER</i>	Saisonaler Energiewirkungsgrad [W/W]
<i>PBT</i>	Pay back time (Rückzahlungsfrist) [a]
<i>EV</i>	Eigenverbrauch [%]
<i>SS</i>	“Self Sufficiency”: Autarkie [%]

Nachkommastellen

<i>h</i> oder <i>H</i>	Heizen
<i>c</i> oder <i>C</i>	Kühlen
<i>max</i>	Maximum

1. EINFÜHRUNG IN ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE

1.1. Nachrüstung an Bestandsgebäuden

Das europäische Horizon 2020-Projekt GEO4CIVHC¹ (Most Easy, Efficient and Low-Cost Geothermal Systems for Retrofitting Civil and Historical Buildings) zielt darauf ab, den Einsatz von oberflächennahen geothermischen Systemen zum Heizen und Kühlen durch die Nachrüstung bestehender und historischer Gebäude in Stadtzentren zu beschleunigen und Hindernisse wie Platzverfügbarkeit und gesetzliche Einschränkungen im Zusammenhang mit der architektonischen und kulturellen Bedeutung der Gebäude zu überwinden. Es basiert auf innovativen Lösungen für Erdwärmetauscher (ground heat exchanger - GHE) und Erdwärmepumpen (ground source heat pump - GSHP). Die oberflächennahe Geothermie ist eine sehr vielversprechende Lösung, wie das Interesse der Europäischen Kommission an der Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) und ihrer Neufassung (Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union 2010 und 2018) zeigt. In jüngster Zeit hat Europa einen Plan zur Beschleunigung des Grünen Deals mit dem Namen REPowerEU² entwickelt, der verschiedene Maßnahmen zur Unterstützung von Energiesparmaßnahmen und zur Förderung der Diversifizierung der Versorgung enthält, um fossile Brennstoffe durch neue erneuerbare Energiequellen zu ersetzen. Die EU-Solarstrategie zielt darauf ab, die geothermische Kapazität bis 2030 zu verdreifachen. Die Rechtsvorschriften werden verbessert, um einen soliden Markt für geothermisches Heizen und Kühlen durch Erdwärmetauscher zu schaffen und die Dekarbonisierung von Gebäuden und der Industrie zu unterstützen. Im Rahmen des Pakets "Fit for 55" der europäischen Green-Deal-Gesetzgebung³ schlug die EU-Kommission die Verbesserung langfristiger Energieeffizienzmaßnahmen vor, einschließlich einer Anhebung des verbindlichen Energieeffizienzziels von 9 % auf 13 %.

In der Literatur gibt es mehrere Ansätze, die darauf abzielen, Strategien zur Steigerung der Nachhaltigkeit der städtischen Umwelt zu entwickeln, die sowohl ökologische, wirtschaftliche und soziale Perspektiven (Richtlinie 2010/31/EU) als auch kulturelle und institutionelle Aspekte (Richtlinie 2012/27/EU, Richtlinie 2018/844) berücksichtigen. Die Energieerzeugung und -optimierung in Gebäuden sollte jedoch einer der Hauptschwerpunkte bei der Umsetzung des Prozesses der Dekarbonisierung von Städten sein. Die Raumheizung und -kühlung in Gebäuden ist einer der energieintensivsten Endverbraucher, der reduziert werden muss, um die Ziele der Europäischen Union für Energieeffizienz und Treibhausgasemissionen (THG) bis 2050 zu erreichen. Mehrere Studien haben sich auf die detaillierte Energiemodellierung einzelner Gebäude konzentriert, indem sie die internen Lasten und die Isolierung der Gebäudehülle sowie den Betrieb der Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (HLK-Systeme) optimiert haben. Daher sollten die Gebäudedatensätze repräsentativ für den europäischen oder nationalen Gebäudebestand sein, um eine so große Anzahl von Gebäuden zu erfassen und Simulationswerkzeuge auf Stadtebene zu unterstützen.

Der Energiebedarf bestehender Gebäude in Europa liegt nach jüngsten Studien zwischen 150 kWh/(m² Jahr) und 300 kWh/(m² Jahr) (Ballarini und Corngati, 2014). Folglich gibt es in Europa ein großes Potenzial von schätzungsweise 25.000 km² Nutzfläche. Die meisten sanierungsbedürftigen Gebäude befinden sich jedoch in städtischen Gebieten, in denen die Platzverfügbarkeit für die Installation des Bohrlochfelds für eine erdgekoppelte Wärmepumpe ein wichtiges Thema ist und entsprechend den gesetzlichen Beschränkungen überwunden werden muss. Die Platzverfügbarkeit hängt sowohl von den tatsächlich verfügbaren Freiflächen (Gärten, Parkplätze usw.) als auch von dem angewandten Sanierungsniveau ab, da eine tiefgreifende Nachrüstung der Gebäudehülle und des Systems den Energiebedarf und damit die Länge der Sonden und den benötigten Platz reduziert. Emmi et al. (2017) untersuchten die Anwendung von GSHP in historischen Gebäuden und zeigten die Auswirkungen einer optimalen Dimensionierung trotz der besonderen städtebaulichen Gegebenheiten in zwei Fallstudien in Venedig und Florenz. Beim Vergleich der Ergebnisse mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe (LWWP) zeigte die GSHP die beste Leistung. In ähnlicher Weise zeigten Zarrella et al. (2019) die Kopplung zwischen GSHP und LWWP bei unausgeglichener Wärmelast, indem sie eine wechselnde Lufttemperatur definierten, um die höchste Effizienz des Systems zu nutzen. Eine weitere Anwendung von GSHP wurde von Emmi et al. (2020) untersucht, die ein Wohngebäude mit einr GHSP, das ein Solarfeld bei der Erzeugung von Brauchwarmwasser unterstützen konnte, mit Raumkühlung und Raumheizung versorgten.

Obwohl sich mehrere Arbeiten mit der effizienten Integration von GSHP als Erzeugungssysteme für Raumheizung und -kühlung befasst haben, wurde jede Analyse auf der Ebene einzelner Gebäude durchgeführt. Im Gegenteil, bewegt sich die Forschung in Richtung einer breiteren Perspektive auf Bezirks- oder Stadtebene, um die gemeinsame Nutzung von Energie zu optimieren und erneuerbare Energiequellen zu nutzen. In den vorhandenen Informationen zu den bereits für

¹ Verfügbar unter: <https://ec.europa.eu/inea/en/horizon-2020/projects>

² Mitteilung über REPowerEU: Gemeinsame europäische Aktion für mehr erschwingliche, sichere und nachhaltige Energie, KOM (2022) 108 endgültig. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu>

³ Verfügbar unter: <https://www.consilium.europa.eu>

den europäischen Kontext entwickelten Archetypen wie TABULA und EPISCOPE⁴ fehlten Informationen über den stündlichen Energiebedarf, Spitzenlasten und Daten zur Simulation der potenziellen Integration erneuerbarer Energiequellen. Daher wäre eine vollständige Datenbank für thermische und elektrische Profile nützlich, um den Energiebedarf von Gebäudebeständen zu definieren und so Stadtplanern und politischen Entscheidungsträgern die Möglichkeit zu geben, eine Prioritätenliste von Bezirken oder Städten zu erstellen, die dringend Unterstützung bei der Reduzierung des Energieverbrauchs benötigen. Integrierte Ergebnisse zur Sanierung der Gebäudehülle und der Anlagen bieten eine neue Perspektive für die Stadtmodellierung, einschließlich der Möglichkeit der gemeinsamen Nutzung thermischer und elektrischer Energie durch die Entwicklung von Energiegemeinschaften.

1.2. Neue Gebäude (NEH, nNEH, PEH)

Hochenergieeffiziente Gebäude sind so konzipiert und gebaut, dass sie weniger Energie für Heizung, Kühlung und Beleuchtung verbrauchen als herkömmliche Gebäude. Insbesondere bei neuen Gebäuden besteht die Möglichkeit, von Anfang an energiesparende Komponenten zu integrieren, die sich auf Aspekte auswirken, die sonst nur schwer zu ändern wären (Strukturen, Installationen, Räume, Ästhetik usw.). Beispiele für energieeffiziente Planungsstrategien für neue Gebäude sind die Tageslichtoptimierung, die kontrollierte mechanische Belüftung, die Verwendung besser isolierter Wände, Dächer und Fenster, die Auswahl energieeffizienter Geräte und Beleuchtung, die Nutzung erneuerbarer Energiequellen wie Sonne und Wind sowie hocheffiziente Technologien wie Wärmepumpen. Durch die Senkung des Energieverbrauchs können diese Gebäude die Kosten für die Energierechnung und die Umweltbelastung wirtschaftlich senken und ein gesünderes und komfortableres Wohn- und Arbeitsumfeld schaffen.

Die Richtlinien der Europäischen Union legen Rechtsvorschriften für die Energieeffizienz von Gebäuden fest. Die jüngste ist die Richtlinie 2018/844/EU, die EU-Gebäuderichtlinie), die Ziele für die Energieeffizienz bestehender und neuer Gebäude in der EU festlegt. Die Richtlinie verpflichtet die Mitgliedsländer, Maßnahmen zu ergreifen, um ein hohes Niveau der Energieeffizienz von Gebäuden zu erreichen, und fördert die Nutzung erneuerbarer Energien für die Heizung und Kühlung von Gebäuden.

Im Einzelnen heißt es in der Richtlinie:

- Energieausweis von Gebäuden (Energy Performance Certificates - EPCs) - Die Mitgliedstaaten müssen sicherstellen, dass für alle Gebäude EPCs ausgestellt werden, wenn sie gebaut, verkauft oder vermietet werden.
- Nahezu Null-Energie-Haus (nNEH) - Die Mitgliedstaaten müssen sicherstellen, dass alle neuen Gebäude, die von Behörden genutzt werden und sich in deren Besitz befinden, ab dem 31. Dezember 2018 und alle neuen Gebäude ab dem 31. Dezember 2020 nNEH sind. Ein Gebäude mit diesem Konzept hat einen sehr hohen Energieeffizienzstandard und nutzt nur einen geringen Anteil an Energie aus erneuerbaren Quellen.
- Die Renovierung bestehender Gebäude - Die Mitgliedstaaten müssen eine langfristige Strategie zur Erhöhung der Renovierungsrate bestehender Gebäude verabschieden, mit dem Ziel, bis 2050 ein signifikantes Niveau der energetischen Renovierung zu erreichen.
- Smart Readiness Indicator - Die Mitgliedstaaten müssen sicherstellen, dass neue Gebäude sowie Gebäude, die einer größeren Renovierung unterzogen werden, so geplant und gebaut werden, dass sie "smart ready" sind.
- Energiespar-Contracting (ESPC) - Die Mitgliedstaaten müssen die Nutzung von ESPC fördern, die eine Möglichkeit darstellen, die energetische Sanierung von Gebäuden durch Einsparungen bei den Energierechnungen zu finanzieren.
- Nationale Energieausweise - Die Mitgliedstaaten müssen sicherstellen, dass für alle Gebäude nationale Energieausweise ausgestellt werden, wenn sie gebaut, verkauft oder vermietet werden.
- Nationaler Aktionsplan Energieeffizienz - Die Mitgliedstaaten müssen alle fünf Jahre einen nationalen Aktionsplan erstellen und umsetzen, um die Maßnahmen festzulegen, die sie zur Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden ergreifen werden.

Bauplaner, Bauleitung und Bauherren müssen Materialien und Technologien verwenden, die einen hohen Wärmedämmwert haben und die Umwelt weniger belasten. Dazu gehört die Verwendung von isolierten Wänden, Dächern und Böden sowie von hocheffizienten Fenstern und Türen, um den Wärmeverlust zu minimieren. Darüber hinaus muss ein erheblicher Teil der für die Beheizung und Kühlung des Gebäudes benötigten Energie durch erneuerbare Energien wie Solarthermie- und Photovoltaikanlagen, Wärmepumpen und thermische Energiespeichersysteme bereitgestellt werden. Die EU-Gebäuderichtlinie fördert auch den Einsatz intelligenter Technologien zur Überwachung und Steuerung des Energieverbrauchs von Gebäuden und zur Erleichterung der Anpassung des Energieverbrauchs durch die Gebäudenutzer.

⁴ Verfügbar unter: <https://episcopes.eu/welcome/>

Die Auswahl der Materialien und Technologien hängt von den Gegebenheiten, der Verfügbarkeit, den Kosten und anderen spezifischen Faktoren des jeweiligen Gebäudes und Landes ab, aber die Richtlinie fördert die Verwendung der energieeffizientesten Lösungen.

Die einzelnen Mitgliedsländer haben unterschiedliche Maßnahmen ergriffen, um die europäischen Rechtsvorschriften zur Energieeffizienz von Gebäuden einzuhalten. Jedes europäische Land hat seine eigene spezifische Gesetzgebung, aber alle sind verpflichtet, die EU-Richtlinie zu befolgen. In Deutschland gibt es beispielsweise das Gebäudeenergiegesetz – GEG (2020), das Mindestanforderungen an die Energieeffizienz bestehender und neuer Gebäude festlegt und die Nutzung erneuerbarer Energiequellen fördert.

In Italien legt das Gesetzesdekret vom 26. Juni 2015 "Anwendung von Methoden zur Berechnung der Gesamtenergieeffizienz und Festlegung von Mindestvorschriften und -anforderungen für Gebäude" die Methodik zur Berechnung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, einschließlich der Nutzung erneuerbarer Energiequellen, sowie die Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und Wohneinheiten unter Einhaltung der allgemeinen Kriterien des Gesetzesdekrets Nr. 192 vom 19. August 2005 fest.

In Frankreich legt das Gesetz "Grenelle 1" von 2007 Ziele für die Energieeffizienz bestehender und neuer Gebäude fest und fördert die Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Frankreich hat ein System zur Kennzeichnung der Energieeffizienz von Gebäuden eingeführt, das den in anderen europäischen Ländern verwendeten Systemen ähnelt, um den Verbrauchern leicht verständliche Informationen über die Energieeffizienz von Gebäuden zu liefern.

In der Schweiz gehören zu den nationalen Vorschriften für energieeffizientes Bauen die Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Energy Performance of Buildings Directive, EPBD) und die Energieverordnung des Bundes (EnO, 2017). Die EPBD legt Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz neuer und bestehender Gebäude fest und fördert die Nutzung erneuerbarer Energiequellen. Die EnO legt Energieeffizienzstandards für Gebäude fest und schreibt regelmäßige Inspektionen vor, um die Einhaltung zu gewährleisten. Die Schweiz hat auch ein Energieetikettierungssystem für Gebäude eingeführt, das dem in anderen europäischen Ländern verwendeten System ähnelt.

In Spanien gehören zu den nationalen Vorschriften für energieeffiziente Gebäude das Documento Básico Ahorro de la Energía (aktualisiert 2022), das Teil des Código Técnico de la Edificación (CTE) ist und Leitlinien für die Begrenzung des Energieverbrauchs enthält, indem Mindestanforderungen für die Steuerung des Energiebedarfs (HE1), die Installation von Geräten (HE2, HE3) und den Mindestanteil erneuerbarer Energiequellen (HE4, HE5) festgelegt werden. Das Real Decreto 390/2021, das das Real Decreto 47/2007 ersetzte, genehmigte die Leitlinien für die Energieeffizienzstandards für Gebäude. Es legt die technischen und administrativen Verfahren fest, die für die Durchführung von Effizienzertifizierungen und die Methodik zur Berechnung der Energieeffizienzbewertung gelten, um ein System zur Energiekennzeichnung von Gebäuden einzuführen, das den in anderen europäischen Ländern verwendeten Systemen ähnelt.

Zusätzlich zu den bisherigen nationalen Anforderungen erfreut sich das Konzept des PEH (Plusenergiehaus) zunehmender Beliebtheit, da immer mehr Länder bestrebt sind, ihren CO₂-Fußabdruck zu verringern und nachhaltiger zu werden. Ein PEH ist ein Gebäude, das mehr Energie produziert als es verbraucht und damit einen Beitrag zum Stromnetz leistet. Das Ziel eines PEH ist es, energieautark oder sogar energiepositiv zu sein. Erreicht wird dies durch energieeffizientes Design und energieeffiziente Technologie in Kombination mit erneuerbaren Energiequellen wie Sonnenkollektoren.

1.3. Energie- und Nachhaltigkeitskennzeichnung

Ein System zur Zertifizierung der Energieeffizienz von Gebäuden ist ein Instrument zur Bewertung und Kennzeichnung von Gebäuden auf der Grundlage ihrer Energieleistung. Ziel dieser Systeme ist es, transparente und vergleichbare Informationen über die Energieleistung von Gebäuden bereitzustellen, damit Gebäudeeigentümer und -nutzer fundierte Entscheidungen über Energieverbrauch und -kosten treffen können. Energiezertifizierungssysteme für Gebäude bewerten in der Regel den Energieverbrauch und die Energieeffizienz eines Gebäudes in Bereichen wie Heizung, Kühlung, Beleuchtung und Warmwasser und vergeben auf der Grundlage dieser Bewertung eine Bewertung oder ein Label. Diese Kennzeichnungen können dann verwendet werden, um die Energieleistung verschiedener Gebäude zu vergleichen.

Die verschiedenen europäischen Länder verwenden unterschiedliche Bezeichnungen für ihre Energieausweise. Hier sind ein paar Beispiele:

- In Deutschland wird der Ausweis als "Energieausweis" bezeichnet.
- In Frankreich wird das Zertifikat als "Certificat de Performance Énergétique" oder "CPE" bezeichnet.

- In Italien wird das Zertifikat als "Attestato di Certificazione Energetica" oder "ACE" bezeichnet.
- In Spanien wird das Zertifikat als "Certificado de Eficiencia Energética" oder "CEE" bezeichnet.
- In der Schweiz heißt der Ausweis GEAK "Gebäudeenergieausweis der Kantone" oder "Gebäudeenergieausweis der Kantone".
- Im Vereinigten Königreich wird der Ausweis als "Energy Performance Certificate" oder "EPC" bezeichnet.

Es ist zu beachten, dass das Format der Bescheinigung und die darin enthaltenen Informationen von Land zu Land leicht variieren.

Auf der anderen Seite gibt es freiwillige Zertifizierungssysteme, die höhere Standards für Energieeffizienz und Komfort setzen. Gebäude, die diese Standards erfüllen, sind in der Regel energieeffizienter, gesünder und angenehmer zu bewohnen als Gebäude, die nur die Mindestanforderungen des jeweiligen "Energieausweises" erfüllen. Freiwillige nationale Zertifizierungen zielen darauf ab, Energieeffizienz und Nachhaltigkeit in Gebäuden zu fördern und Verbrauchern und Gebäudeeigentümern zusätzliche Informationen zu liefern.

Einige Beispiele sind das deutsche "Passivhaus", das schweizerische "Minergie", das schwedische "Miljöbyggnad", das italienische "CasaClima" und das französische "Effinergie".

So müssen in der Schweiz Neubauten oder Renovierungen von öffentlichen Gebäuden mindestens die Minergie-Zertifizierung erfüllen (für private Gebäude ist dies jedoch nicht zwingend vorgeschrieben).

Alle diese Systeme verfolgen in gewisser Weise das gleiche Ziel, nämlich den Verbrauchern einen einfachen und verständlichen Zugang zur Energieeffizienz von Gebäuden zu verschaffen und Regierungen und Gebäudeeigentümern bei der Überwachung und Verbesserung der Energieeffizienz von Gebäuden zu helfen.

1.4. Umwelt- und Nachhaltigkeitsleistung eines Gebäudes

Green-Building-Zertifizierungssysteme sind eine Reihe von Bewertungssystemen und -instrumenten, mit denen die Leistung eines Gebäudes oder Bauprojekts unter Nachhaltigkeits- und Umweltaspekten bewertet werden kann. Diese Bewertungen zielen darauf ab, die Gesamtleistung von Gebäuden und Infrastrukturen zu verbessern, einen Lebenszyklusansatz in ihre Planung und ihren Bau zu integrieren und die Erreichung der Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen durch die Bauindustrie zu fördern. Gebäude, die bewertet und als geeignet erachtet werden, ein bestimmtes Leistungs- und Qualitätsniveau zu erfüllen, erhalten ein Zertifikat, das diese Leistung bescheinigt.

Diese Systeme werden in der Regel von Organisationen oder Gruppen von Experten auf dem Gebiet des nachhaltigen Bauens entwickelt und sollen weltweit eingesetzt werden. Sie sollen eine einheitliche und transparente Methode zur Bewertung der Umwelt- und Nachhaltigkeitsleistung von Gebäuden bieten, damit Bauherren, Planer und andere Interessengruppen fundierte Entscheidungen über die Planung, den Bau und den Betrieb von Gebäuden treffen können.

Beispiele für internationale Zertifizierungssysteme für nachhaltige Gebäude sind LEED⁵ (Leadership in Energy and Environmental Design) und BREEAM⁶ (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), die beide weithin anerkannt und respektiert sind.

BREEAM ist eine vom Building Research Establishment (BRE) im Vereinigten Königreich entwickelte Methode zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden, während LEED ein vom U.S. Green Building Council (USGBC) entwickeltes Bewertungssystem ist.

Diese Zertifizierungen umfassen eine Reihe von Kriterien, die ein Gebäude erfüllen muss, um zertifiziert zu werden, z. B. Energie- und Wassereffizienz, Wohnqualität in Innenräumen, Materialien und Ressourcen und vieles mehr. Es gibt auch verschiedene Zertifizierungsstufen wie Gold, Silber und Bronze. Gebäude, die diese Kriterien erfüllen und eine Zertifizierung erhalten, können der Öffentlichkeit, den Mietern und den Aufsichtsbehörden zeigen, dass das Gebäude umweltbewusst ist und die Umwelt weniger belastet.

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) und BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) sind Beispiele für internationale Zertifizierungssysteme für nachhaltige Gebäude, die in vielen Ländern weltweit, auch in Europa, verwendet werden.

⁵ Verfügbar unter: <https://www.usgbc.org/>

⁶ Verfügbar unter: <https://bregroup.com/>

Sowohl LEED als auch BREEAM werden häufig zusätzlich zu den bereits erwähnten nationalen Systemen verwendet. Diese Zertifizierungen können ein nützliches Instrument für Bauherren und Entwickler sein, die die Umwelt- und Nachhaltigkeitsleistung ihrer Gebäude nachweisen wollen.

Internationale Zertifizierungssysteme für nachhaltiges Bauen, wie LEED und BREEAM, werden in der Regel von Organisationen oder Gruppen von Experten auf dem Gebiet des nachhaltigen Bauens entwickelt und sollen weltweit eingesetzt werden. Sie sollen streng und umfassend sein und ein breites Spektrum von Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekten bei der Planung, dem Bau, der Inbetriebnahme und dem Betrieb von Gebäuden abdecken.

Diese Systeme sind nicht an bestimmte nationale oder regionale Regeln und Vorschriften gebunden, sondern so konzipiert, dass sie mit den örtlichen Bauvorschriften und -regelungen in Einklang gebracht und manchmal sogar in sie integriert werden können.

Internationale Zertifizierungssysteme ersetzen nicht die nationalen oder lokalen Vorschriften, sondern können als Hilfsmittel zur Einhaltung dieser Vorschriften eingesetzt werden. Sie können auch als Mittel zum Nachweis der Einhaltung lokaler Vorschriften und Normen dienen und zusätzliche Informationen über die Umwelt- und Nachhaltigkeitsleistung des Gebäudes liefern.

Darüber hinaus haben viele Länder ihre eigenen Bewertungssysteme für umweltfreundliches Bauen, die manchmal an die internationalen Bewertungssysteme wie LEED oder BREEAM angeglichen sind. Auf diese Weise können Gebäude sowohl nach dem nationalen als auch nach dem internationalen System zertifiziert werden.

Internationale Zertifizierungssysteme für nachhaltiges Bauen wie LEED und BREEAM haben einige Ähnlichkeiten mit beispielsweise dem Schweizer SNBS (Swiss National Standard for Sustainable Buildings), da sie sich auf die Bewertung der Umwelt- und Nachhaltigkeitsleistung von Gebäuden konzentrieren.

Der Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz (SNBS) 2.1 ist der Gesamtstandard für nachhaltiges Bauen in der Schweiz. Er integriert bestehende Instrumente und Werkzeuge wie die SIA-Empfehlung 112/1 "Nachhaltiges Bauen - Bauarbeiten", die Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft oder die Minergie-Kriterien und orientiert sich an den Stufen des SIA-Performance-Modells. Nach dem SNBS können Büro-/Verwaltungsgebäude, Wohn- und Bildungsbauten zertifiziert werden. Dies gilt sowohl für Neubauten als auch für die Renovation von Gebäuden.

Alle diese Systeme sollen Gebäudeeigentümern und -planern dabei helfen, Gebäude zu entwerfen, zu bauen und zu betreiben, die eine geringere Umweltbelastung aufweisen. Sie können zusammen verwendet werden, obwohl die Erfüllung der Anforderungen eines dieser Systeme nicht die Einhaltung der anderen garantiert.

2. MÖGLICHE NACHRÜSTUNGSSZENARIOEN

Es gibt eine große Debatte über die Sanierung von Gebäuden, die in zwei Arten unterteilt werden kann: oberflächliche oder tiefgreifende Renovierung. Die oberflächliche Sanierung ist die am weitesten verbreitete und konzentriert sich auf risikoarme Energiesparmaßnahmen mit kurzer Rückzahlungsfrist („Paybacktime“ - PBT), wie z. B. die teilweise Umrüstung der Beleuchtung, der Austausch von Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage und die Nachinbetriebnahme oder die Installation erneuerbarer Energiequellen (EE) aufgrund von günstigen Kosten oder Anreizen. Andererseits wird durch eine tiefgreifende Renovierung der Energieverbrauch im Vergleich zum Stand vor der Renovierung in der Regel um mehr als 60 % gesenkt. Diese Maßnahmen umfassen häufig eine Nachrüstung der Gebäudehülle (Fassaden- und/oder Dachisolierung, Austausch von Fenstern und erhebliche Verbesserungen der Luftdichtheit des Gebäudes) sowie die Sanierung des HLK-Systems.

Heute sind die Maßnahmen hauptsächlich oberflächlicher Natur, da die Investitionskosten für eine tiefgreifende Sanierung höher sind: Im Durchschnitt kann eine oberflächliche Sanierung ca. 650 €/m² (bezogen auf die Nettogrundfläche), während eine übliche tiefgreifende Nachrüstung etwa 830 €/m² kostet. Darüber hinaus ist der Zeitaufwand für tiefgreifende Nachrüstungen um 25 % höher als für oberflächliche Sanierungen. Es gibt noch weitere Probleme: schwieriger Zugang zu vielen Gebäuden, potenzielle Beeinträchtigung der Bewohner und der Nachbarschaft, geringer Bekanntheitsgrad, mangelnde Risikobereitschaft und/oder mangelnde Erfahrung der Akteure (Architekten, Installateure, Gebäudeeigentümer) und wenige integrierte Lösungen, mit denen verschiedene Probleme gleichzeitig gelöst werden können, z. B. bauliche Reparaturen in Verbindung mit energieeffizienten Maßnahmen.

Da die EU das Ziel verfolgt, bis 2050 den Anteil erneuerbarer Energien in Gebäuden auf 100 % zu erhöhen, sollte eine tiefgreifende Nachrüstung nach Möglichkeit durchgeführt werden, um dieses Ziel zu erreichen. Die Verkürzung der Zeit, die für eine tiefgreifende Nachrüstung benötigt wird, und die Reduzierung der Installationskosten sind zwei der wichtigsten Themen, die angegangen werden müssen. Die Vorfertigung könnte eine interessante Lösung sein, da sie die

Schwankungen bei der Produktqualität und dem Zeitplan des Prozesses verringert, die Zykluszeiten für die Produktion und die Installation verkürzt und verschiedene Nachverfolgungstechnologien unterstützt, die helfen, den Prozess sichtbar zu machen.

Interne kleinere modulare Lösungen können effizienter sein und bei verschiedenen Gebäudetypen angewandt werden: bei historischen Gebäuden, bei denen es unmöglich ist, die Außenfassade zu verändern, bei mehrstöckigen Gebäuden, bei denen die Außendämmung kompliziert sein kann, bei Gebäuden in Stadtzentren, bei denen die Außenfassade ein Problem darstellen kann, und bei Gebäuden, die bereits teilweise renoviert wurden (zweiter Schritt der Nachrüstung), z. B. Dach und/oder Außenanstrich. Die Innendämmung kann eine sehr interessante Lösung sein, die eine größere Verbreitung von tiefgreifenden Nachrüstungsmaßnahmen ermöglichen könnte. Sie wird jedoch immer noch wenig angenommen. Innere modulare Lösungen sind daher sehr attraktiv und werden nicht so eingehend untersucht wie die äußere Dämmung und stellen daher eine potenzielle Lösung für die umfassende Nachrüstung von Gebäuden dar. Ein entscheidender Punkt ist die Frage, wie modulare Lösungen entworfen, gebaut und verwaltet werden können und wie gleichzeitig die Baustelle industrialisiert werden kann, um die Effizienz der Arbeiter zu steigern und den Prozess der tiefgreifenden Nachrüstung des Gebäudes zu beschleunigen. Eine wichtige Frage, die es zu lösen gilt, ist die Möglichkeit, Strukturen zu verstärken und das Gebäude erdbebensicher zu machen.

Ein entscheidendes Thema ist die Innenraumqualität (IRQ, Temperatur- und Feuchtigkeitskontrolle, Akustik, ILQ, Sonnenschutz), die sorgfältig bedacht werden muss und einen Teil der hohen Kosten und des Zeitplans der Arbeiten bei der Renovierung ausmachen kann. Geeignete integrierte Lösungen mit einfach zu bedienenden Technologien und Wartung helfen dabei, eine gute IRQ zu gewährleisten und die in der Planungsphase prognostizierten komfortablen Lösungen beizubehalten.

Ein Großteil der Bemühungen muss auf zivile Gebäude gerichtet sein, die sowohl Wohn- als auch Nichtwohngebäude sind. Besondere Anstrengungen sollten für Gebäude mit hohem Eigenwert unternommen werden, entweder weil sie historisch sind oder weil sie eine soziale Funktion haben, d.h. Sozialwohnungen, öffentliche Gebäude, gemeinnützige non-profit Organisationen (NPOs), Nichtregierungsorganisationen (NGOs) und Kirchen. Diese Gebäude können zu Musterbeispielen werden, und die Außenwirkung kann durch die öffentlichen Unternehmen/Einrichtungen und Kirchen, NROs und NPOs verstärkt werden. Einerseits besitzen sie ein breites Portfolio an Bestandsgebäuden, andererseits verfügen sie über ein dichtes Netzwerk. Dank der Kommunikations- und Informationsaktivitäten können die Bürgerinnen und Bürger daher besser über die tiefgreifenden Sanierungslösungen informiert werden. Darüber hinaus sind sie in weiten Gebieten/Regionen präsent, was eine breite geografische Replizierbarkeit ermöglicht.

Besondere Anstrengungen müssen bei Kosten-Nutzen-Analyse unternommen werden, um die Verwendung von einfach zu installierenden Systemen (Plug-and-Play-Lösungen) zusammen mit verschiedenen lokalen erneuerbaren Energiequellen wie Photovoltaik und Erdwärmepumpen zu ermöglichen. Wie in der Literatur gezeigt wurde, ist die Kombination von PV- und GSHP-Lösungen ein guter Antrieb, um nNEH-Lösungen mit angemessenen Rückzahlungsfristen zu erreichen.

Bei den Zielgebäuden im innerstädtischen Bereich handelt es sich um bestehende und historische Wohn- und Nichtwohngebäude, bei denen eine neue Außendämmung nur manchmal einfach nachrüstbar ist. Die Definition von Strategien auf städtischer Ebene erfordert die Entwicklung von Gebäudearchetypen, um die Perspektive des einzelnen Gebäudes zu erweitern (Carnieletto und Ferrando, 2021), die die häufigste Gebäudetypologie für Modellierungszwecke darstellen. Dieser Ansatz ist wichtig, um die potenziellen Hindernisse bei der Anwendung einer spezifischen Sanierungsstrategie besser zu definieren. Archetypen werden im Allgemeinen als theoretische Gebäude definiert, die durch eine statistische Analyse von Gebäudemerkmalen ermittelt werden, die auf der Grundlage von Ähnlichkeiten gruppiert werden (Carnieletto und Ferrando, 2021). Gebäudearchetypen können auch als Modelle definiert werden, die die Anwendung von Simulationswerkzeugen zur Bewertung des Energiebedarfs eines breiten Gebäudebestands ermöglichen (Ferrando und Causone, 2020). Auch wenn die Anwendung der archetypbasierten Modellierung einige Vereinfachungen erfordert, zeigt die Literatur, dass dies die Entwicklung innovativer Strategien und Technologien zur Steigerung der Energieeffizienz mit akzeptablen Ergebnissen sowohl auf der Ebene eines einzelnen Gebäudes als auch auf städtischer Ebene ermöglicht, wie in den Arbeiten von Fracastoro und Ferraino (2011), Dall'O' und Galante (2012), Pratavera und Romano (2021) und Teso und Carnieletto (2022) dargestellt. Daher kann die potenzielle Verringerung des Energieverbrauchs mit anderen Parametern für das wirtschaftliche Management verglichen werden.

2.1. Mögliche Nachrüstungsmaßnahmen

Wie bereits erwähnt, befasst sich das Projekt GEO4CIVHIC mit der Nachrüstung bestehender und historischer Gebäude in Stadtzentren unter Einsatz von GSHPs. Eine typische Struktur historischer Gebäude (d. h. vor 1950 erbaut) besteht meist aus Außenwänden mit Vollziegeln (50 cm), die je nach Klima des betreffenden Standorts durch einen Luftspalt von 5 cm getrennt sind. Typische Dächer historischer Gebäude haben einen hölzernen Dachstuhl, der eine Holzschicht

mit den Ziegeln trägt. Der darunter liegende Dachboden kann von den Räumen durch einen nicht begehbaren Dachboden getrennt werden, der aus einer weiteren Holzschicht besteht, die von Balken getragen wird.

Bei bestehenden Gebäuden kann eine Referenzkonstruktion aus 25 cm dicken Lochsteinen oder Hohlblocksteinen aus Ziegeln bestehen, die eventuell durch einen Luftspalt von 5 cm getrennt sind. Dächer sollten je nach Standort definiert werden; in Straßburg und Helsinki gibt es beispielsweise Schrägdächer aus Ziegelbeton mit Ziegeln, während in Athen horizontale Dächer aus Betonbalken und Hohlblockziegeln bestehen. Da viele historische Gebäude unter Denkmalschutz stehen und eine Isolierung nicht möglich ist, wurde auch erwogen, den Gaskessel durch eine Hochtemperatur-Wärmepumpe zu ersetzen, die die Heizkörper versorgt. Daher sollten bei den Lösungen sowohl Hochtemperatur-Terminals als auch Heizungsemissionssysteme für mittlere und niedrige Temperaturen (d. h. Gebläsekonvektoren und Heizkörpern) berücksichtigt werden.

Im Falle einer Sanierung der Gebäudehülle schlägt die Strategie vor, die Außenwände mit 12 cm dickem EPS zu dämmen, das auf der Innenseite angebracht wird, um mögliche Einschränkungen im Zusammenhang mit dem Schutz des kulturellen Erbes oder der Stadtgestaltung zu berücksichtigen. Diese Strategie erlaubt möglicherweise nicht die Verwendung einer Außendämmung in Stadtzentren und kann die Fußgängerzone als Folge der Verringerung der Gehwegfläche reduzieren. Die Dicke der Dämmschicht ist ein Durchschnittswert, der die verfügbare innere Nettobodenfläche nicht übermäßig verringert und somit vom Nutzer positiv bewertet wird. Die Innenböden sollten ebenfalls leicht gedämmt werden, um die mögliche Installation von Heizsystemen zu berücksichtigen, die aufgrund der geringeren erforderlichen Temperatur besser mit Erdwärmepumpen gekoppelt werden können (Carnietto und Kazanci, 2018). Der Austausch von Fenstern sollte in Betracht gezogen werden, um die Wärmeverluste insgesamt zu verringern.

Unter der Annahme, dass die meisten Gebäude mit Standard-Gaskesseln versorgt werden, besteht die erste vorgeschlagene Strategie in der Ersetzung durch eine effizientere GSHP (Fall 0), kombiniert mit der Ersetzung von Mittel- oder Niedertemperatur-Emissionssystemen (d. h. Gebläsekonvektoren oder Heizsysteme) sowohl zum Heizen als auch zum Kühlen (Fall 1), eventuell in Verbindung mit einer Wärmedämmung der Gebäudehülle (Fälle 2 und 3).

Daher wurden insgesamt vier mögliche Nachrüstungslösungen untersucht (siehe Abbildung 2-21):

- Fall 0: Der Standardheizkessel wird durch eine Hochtemperatur-KWK ersetzt und die herkömmlichen Heizkörper werden beibehalten.
- Fall 1: Der Standardkessel wird durch eine GSHP ersetzt und die Heiz- und Kühlungsgeräte werden entweder durch Gebläsekonvektoren (1a) oder durch ein Heizsystem (1b) ersetzt.
- Fall 2: Der Standardkessel wird durch eine GSHP ersetzt, die Heizkörper werden beibehalten, aber die Isolierung des Gebäudes wird verbessert.
- Fall 3: Der Standardkessel wird durch eine GSHP ersetzt, die Heiz- und Kühlgeräte werden entweder durch Gebläsekonvektoren (3a) oder Heizsysteme (3b) ersetzt und die Isolierung des Gebäudes wird verbessert.

Grundmodell

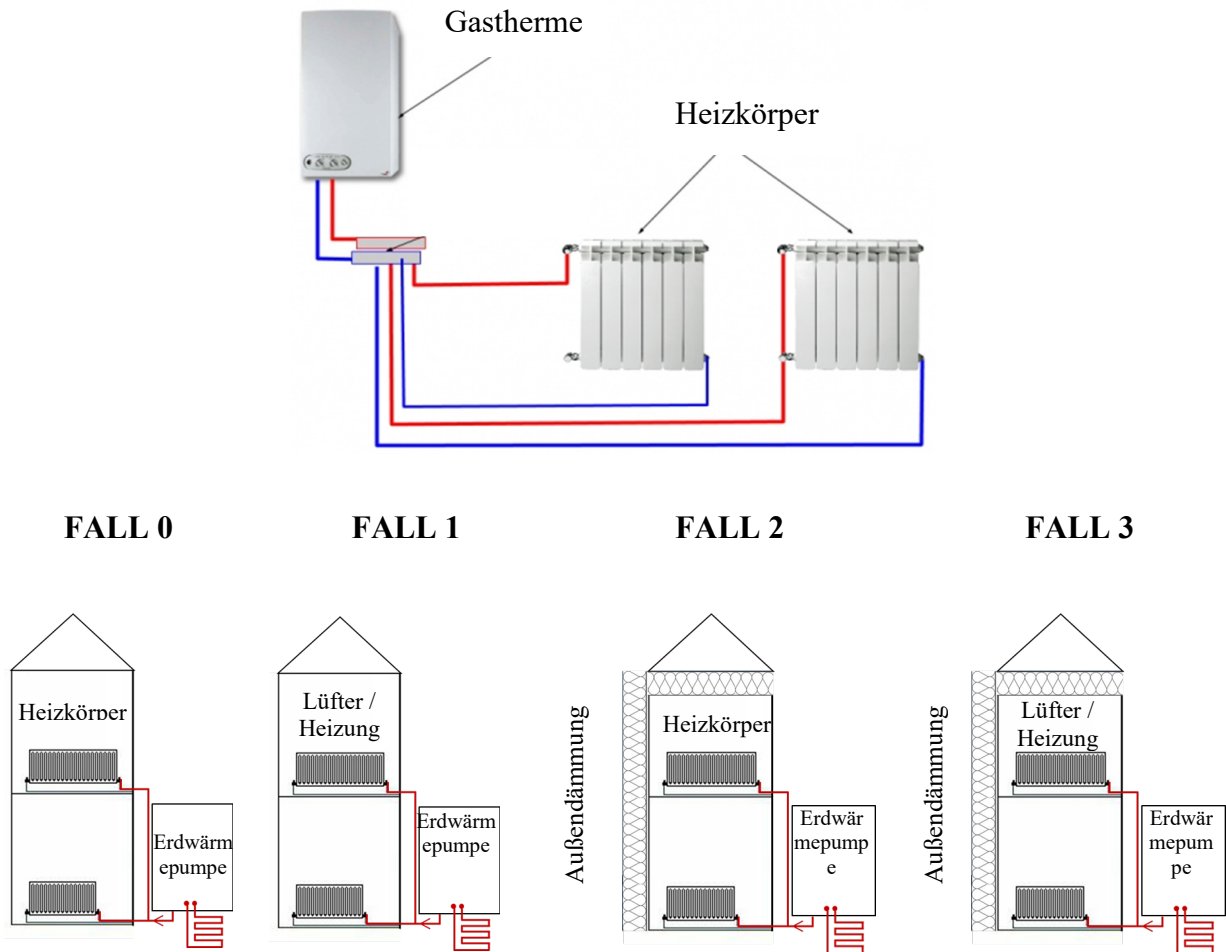


Abbildung 2-1. Vereinfachtes Schema der angewandten Nachrüstungsstrategien

2.2. Dimensionierung der Erdwärmetauscher

Die für die Versorgung mit Raumwärme und -kühlung erforderliche Gesamtlänge der Erdwärmesonde und die Ausdehnung des Erdwärmesondenfeldes von Doppel-U-Rohr-Erdwärmetauschern wurde nach der ASHRAE-Methode (ASHRAE, 2011) geschätzt. Die erforderlichen Eingaben sind der saisonale Wärmeenergiebedarf und die Spitzenlast für Raumheizung und -kühlung. Die Ergebnisse können mit früheren Projekten wie Cheap GSHPs und mit dem WebTool wie TABULA⁷ verglichen werden.

Um die Beeinflussung durch benachbarte Bohrungen bei der Berechnung der erforderlichen Gesamtbohrungslänge zu berücksichtigen, wurde die ASHRAE-Methode zweimal hintereinander angewendet, wobei das von Capozza et al. entwickelte Tool zum Einsatz kam (Capozza und Zarrella, 2015). In der ersten Berechnung werden die erforderlichen Bohrlochlängen für Heizung (L_h) und Kühlung (L_c) berechnet. Nach der Berechnung der idealen Gesamttiefe auf der Grundlage des Linienquellenmodells wird der höchste Wert zwischen L_c und L_h durch die Tiefe der GHEs geteilt, die als gleich lang angesehen werden. Der Abstand zwischen den Erdwärmesonden wurde auf 7 m festgelegt, um thermische Interferenzen entsprechend den Standortmerkmalen zu begrenzen (Lee und Park, 2021). In der zweiten Iteration werden L_h und L_c unter Berücksichtigung der Straftemperatur (t_p) genauer bewertet.

Die optimale Dimensionierung der Bohrlochlänge für die Anlage hängt vom Energiebedarf des Gebäudes ab; in kälte-dominierten Gebieten ist zum Beispiel häufig die Sommersaison die kritischste Bedingung für die Dimensionierung des Systems. Durch die Verringerung der Übertragungsverluste, die durch die Dämmung der Gebäudehülle erzielt

⁷ Verfügbar unter: <https://webtool.building-typology.eu>

werden, kann die Zeitkonstante des Gebäudes erhöht werden, was sich in kälte-dominierten Gebieten positiv auf den Kühlbedarf auswirken kann.

Typische COP- und EEV-Werte für eine Wärmepumpe, die an verschiedene Heiz- und Kühlgeräte (Heizkörper, Gebläsekonvektoren, Fußbodenheizung) angeschlossen ist, sind in Tabelle 2-1 dargestellt, die sich auf drei Klimabedingungen beziehen, die für einen warmen (Athen), milden (Straßburg) und kalten (Helsinki) Standort repräsentativ sind. Diese Werte wurden anhand der Datenblätter von realen Wärmepumpen ermittelt, wobei die saisonalen Werte von COP und EEV entsprechend den Auslegungskriterien des Systems gewählt wurden. Anhand der örtlichen Temperaturen lässt sich feststellen, dass der COP umso niedriger und der EEV umso höher ist, je kälter das Klima ist.

Tabelle 2-1. Auslegung und saisonale Werte der Wärmepumpe, die an die verschiedenen Heiz- und Kühlsysteme angeschlossen ist

		Einlass/Auslass Temperatur [°C]	ATHEN		STRASBOURG		HELSINKI	
			Design COP/EEV	Saisonale COP/EEV	Design COP/EEV	Saisonale COP/EEV	Design COP/EEV	Saisonale COP/EEV
Heizung	Heizkörper	75 - 65	2.4	2.5	2.4	2.5	2.4	2.5
	Gebläsekonvektor	45 - 40	3.6	4.1	3	3.3	2.7	3
	Heizstrahler	35 - 30	4.8	5.3	3.8	4.3	3.4	3.8
Kühlung	Gebläsekonvektor/ Heizstrahler	7 - 12	4	4.4	5	5.5	5.9	6.5

Drei Werte für die Wärmeleitfähigkeit und die thermische Volumenkapazität sind in Tabelle 2-2 als Referenzwerte für die gängigsten Bodenarten angegeben. Diese Werte für die thermischen Eigenschaften wurden auf der Grundlage der wichtigsten Ergebnisse mehrerer Forschungsprojekte ausgewählt, die sich mit der Bestimmung der thermischen Eigenschaften des Bodens für oberflächennahe Erdwärmepumpenanwendungen befassten und Daten für Lockergestein, Sedimentgestein, metamorphes Gestein und Eruptivgestein sammelten (Galgaro und Dalla Santa, 2021). Bei der in den folgenden Kapiteln vorgestellten Anwendung wird nur die Wärmeaustauschkomponente zwischen Sonde und Boden berücksichtigt. Der Konvektionsbeitrag aufgrund der Grundwasserströmung, der die äquivalente Wärmeleitfähigkeit des Untergrunds erhöht und damit die für Erdwärmetauscher erforderliche Gesamtlänge verringern könnte, wird hier der Einfachheit halber vernachlässigt.

Tabelle 2-2. Thermische Eigenschaften der drei betrachteten Bodentypen

Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	1.5	2.2	3.0
Spezifisches Volumen Wärmekapazität [MJ/(m ³ K)]	2.0	2.5	2.6

Die Installation von GSHP-Systemen in städtischen Gebieten ist in der Regel kompliziert, vor allem wegen der begrenzten verfügbaren Fläche, wie etwa kleinen Innenhöfen oder Gärten.

2.3. Optimale Länge der Sonden

Den letzten Absatz zusammenfassend, zeigen Abbildung 2-2 und Tabelle 2-3 die möglichen Szenarien, wobei die maximal verfügbare Länge (L_{max}) mit der Länge der Sonden verglichen wird, die erforderlich ist, um den Energiebedarf des Gebäudes für Kühlung (L_c) und Heizung (L_h) zu decken. Es gibt drei Optionen:

- A: Genügend Platz für die Sonden, um den Energiebedarf zu decken
- B: Nur der Heiz- oder Kühlenergiebedarf kann im Verhältnis zur verfügbaren Fläche gedeckt werden ($L_{max} < L_h$ oder $L_{max} < L_c$)
- C: Es gibt nicht genügend Platz, um weder den Heiz- noch den Kühlbedarf des Gebäudes zu decken ($L_h > L_{max}$ und $L_c > L_{max}$).

Wenn die Länge der Sonden nicht ausreicht, um den Energiebedarf des Gebäudes zu decken, wurde die Kombination mit einer Luft-Wasser-Wärmepumpe (LWWP) untersucht, damit das kombinierte System den erforderlichen Wärmebedarf decken kann.

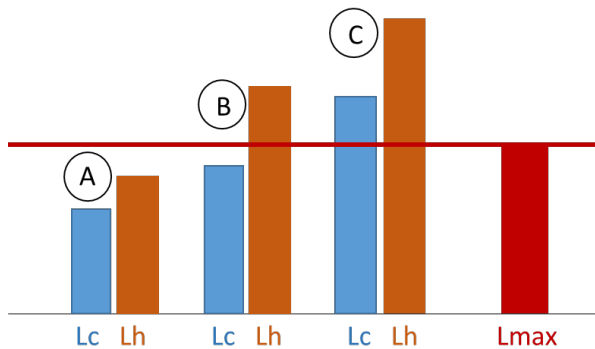


Abbildung 2-2. Mögliche Szenarien der Fallstudien

A) LH, LC < Lmax	
1 - $L_h \approx L_c$ (15% Abweichung akzeptiert)	$L = \max(L_h, L_c)$
2- $L_h > L_c$	2a) $L = L_h$ 2b) $L = L_c + LWWP$
3- $L_c > L_h$	3a) $L = L_c$ 3b) $L = L_h + LWWP$
1 LH oder LC > Lmax	
1- $L_h > L_{max}$	$L = L_c + LWWP$
2- $L_c > L_{max}$	$L = L_h + LWWP$
2 LH, LC > Lmax	
$L = L_{max} + LWWP$	

Tabelle 2-3. Optimale Länge der Sonden

Unter Berücksichtigung der Kombination möglicher Szenarien können verschiedene Fälle untersucht werden, um insbesondere die optimale Sondenlänge zu bestimmen:

- Fall A1: Die Länge der Sonden ist für Heizung und Kühlung fast gleich, es kann das Maximum von beiden gewählt werden (voller Bedarf des Gebäudes mit einer reversiblen Wasser-Wasser-Wärmepumpe). Es wurde eine Abweichung von etwa 15 % angenommen.
- Fälle A2 und A3: Wenn der Unterschied zwischen L_h und L_c größer als 15 % ist, kann die Wahl entweder unter Berücksichtigung der längsten Länge der Sonden (Unterfälle 2a und 3a mit vollständiger GSHP) oder der kürzesten Länge der Sonden (Unterfälle 2b und 3b) mit einem hybriden System getroffen werden, das zwei Quellen nutzt, Wasser und Luft (GSHP+LWWP); in diesem Fall kann eine geeignete Maschine, die zwei Quellen gleichzeitig einsetzt, in Betracht gezogen werden (Zarrella und Zecchin, 2019).
- Fälle B1 und B2: Wenn eine der Bohrlochlängen kürzer als die maximal verfügbare Länge ist und die andere länger, ist ein Hybridsystem die einzige Lösung, bei der die GSHP den ausgeglichenen Teil der Grundlast und die LWWP den Rest der Lasten übernimmt - d.h. die optimale Gesamtlänge der Bohrlöcher ist die kürzeste, und die Energie, die nicht von der GSHP geliefert wird, wird von der Luftquelle (GSHP+LWPP) geliefert. Auf diese Weise wird der Nutzungsfaktor der GSHP maximiert.
- Fall C: Wenn beide Längen größer als die maximal verfügbare Länge sind, ist die optimale Länge der zu installierenden Sonde die maximal zulässige, wobei die überschüssige Energie in eine Hybridlösung (GSHP+LWWP) integriert wird. Auf diese Weise wird, ähnlich wie in den Fällen B1 und B2, der Nutzungsfaktor der GSHP maximiert und die Grundlast ausgeglichen, während die verbleibende Last von der LWWP versorgt wird.

3. FALLSTUDIEN

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse von drei Fallstudien vorgestellt, die im Rahmen des GEO4CIVHIC-Projekts entwickelt wurden. Tabelle 3-1 zeigt den Energiebedarf sowohl für bestehende als auch für historische Wohngebäude in Athen, Straßburg und Helsinki als Grundlage für die Dimensionierung von EWS. Die Energiereduzierung ist bei nachgerüsteten Gebäuden sowohl für bestehende als auch für historische Gebäude aufgrund der geringeren Transmissionsverluste durch die Gebäudehülle erheblich. Vergleicht man die Ergebnisse für die Basisfälle (d. h. bestehende und historische Gebäude ohne Nachrüstung), so zeigt sich, dass in milden und kalten Klimazonen der Heizenergiebedarf in Gebäuden dominiert, während in warmen Klimazonen der Kühlenergiebedarf überwiegt. Im Gegensatz dazu ist der Energiebedarf für Heizung und Kühlung bei nachgerüsteten Gebäuden in Straßburg ähnlich, was ein wichtiges Ergebnis für die Dimensionierung von Erdwärmetauschern ist.

Tabelle 3-1. Energieaufwand für Heizung und Kühlung an den drei Standorten [kWh/(m² y)]

Energiebedarf [kWh/(m ² y)]		Bestehend		Historisch	
		Basislinie	Nachrüstung	Basislinie	Nachrüstung
Athen	Heizung	13.1	0.4	32.6	1.1
	Kühlung	69.5	44.1	78.7	48.8
Straßburg	Heizung	72.6	21.5	104.2	26.4
	Kühlung	30.2	27.3	35.6	31.2
Helsinki	Heizung	122.3	41.9	158.4	50.5
	Kühlung	19.1	18.5	23.3	25.4

Wie bereits bekannt, wird die Leistung der GSHP-Anlage durch die Wärmeleitfähigkeit des Bodens beeinflusst. Eine durchschnittliche Wärmeleitfähigkeit von 2,2 W/(m K) und eine volumetrische Wärmekapazität von 2,5 MJ/(m³ K) wurden für die detaillierte Analyse der in diesem Abschnitt dargestellten Ergebnisse gewählt.

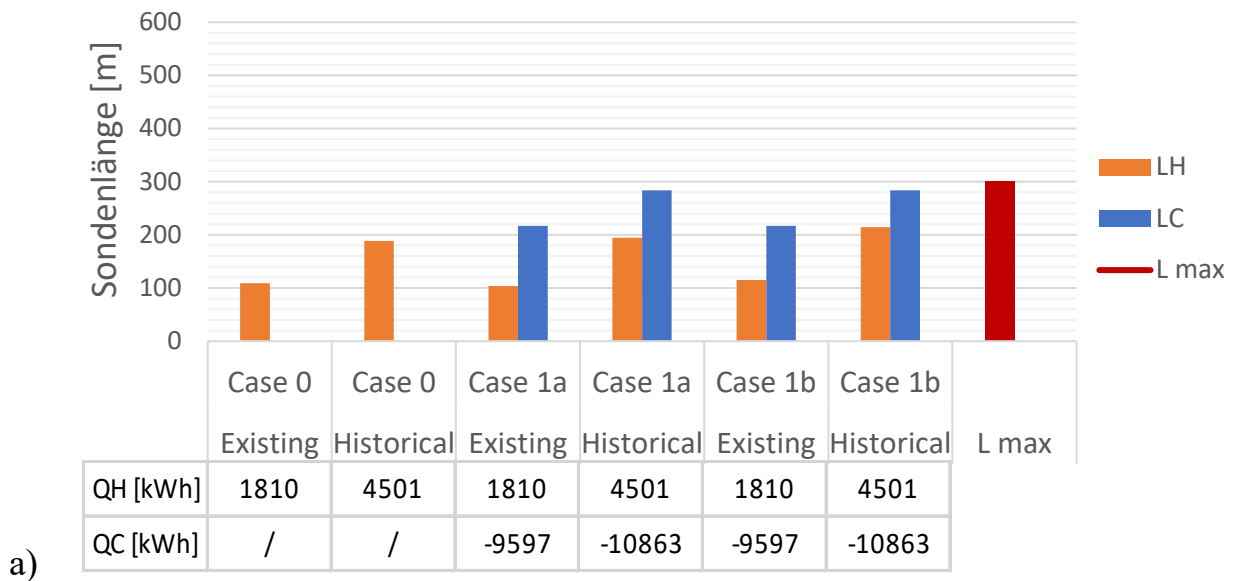
Die Endergebnisse der ASHRAE-Methode, die für jede Fallstudie vorgestellt werden, entsprechen den erforderlichen Bohrlochlängen für Heizung (L_h) und Kühlung (L_c), die mit der maximal möglichen Länge verglichen werden. Der Archetyp bezieht sich auf ein typisches Reihenhaus, in dem die EWS linear im Hof in einem Abstand von etwa 3,3 m zur Nachbarschaft und von 7 m zwischen ihnen angeordnet werden können, um thermische Interferenzen zu vermeiden. Diese Annahmen führen zu einem Maximum von 3 EWS für die Installation, so dass die Längenbegrenzung für LH und LC 300 m beträgt. Die Analyse wurde unter der Annahme durchgeführt, dass die erforderlichen Bodenuntersuchungen und Genehmigungen bereits durchgeführt sind und von der zuständigen örtlichen Behörde gemäß dem Übereinkommen zum Schutz des Kultur- und Naturerbes der Welt (UNESCO, 1972) erteilt wurden.

3.1. Athen

In Athen wurde die Installation einer GSHP ohne Dämmung der Gebäudehülle in Betracht gezogen (Abbildung 3-1 a) und mit Nachrüstung der Gebäudehülle (Abbildung 3-1 b) ist die für das Gebäude erforderliche Wärmelast unausgewogen. Die Energie, die im Sommer mit dem Erdreich ausgetauscht wird, und damit die erforderliche Bohrlochlänge für die Kühlung (L_c), ist viel größer als die für die Heizung (L_h) erforderliche Energie. L_c wurde definiert, weil ursprünglich kein Kühlsystem vorhanden sein sollte, während L_h auf 6 % bzw. 13 % für bestehende und historische Gebäude gesunken ist, wenn man den Ausgangszustand mit dem Fall 3-1b (Sanierung der Gebäudehülle in Verbindung mit dem Austausch der Verteilungs- und Erzeugungssysteme) vergleicht. Trotz der unausgeglichenen Wärmelast können mit der GSHP Probleme im Zusammenhang mit dem thermischen Drift des Bodens vermieden werden, da die nach der ASHRAE-Methode berechnete Straftemperatur in allen Fällen unter 1 °C liegt. Wie aus den Diagrammen hervorgeht, wird bei einer Sanierung der Gebäudehülle die erforderliche Bohrlochlänge für die Heizung aufgrund des geringeren Energiebedarfs des Gebäudes infolge der Verringerung der Übertragungsverluste stark reduziert. In diesem Fall wird die Länge der Sonde für die Kühlung leicht verringert, was auf eine Zunahme des Ungleichgewichts zwischen Heiz- und Kühlbedarf hinweist.

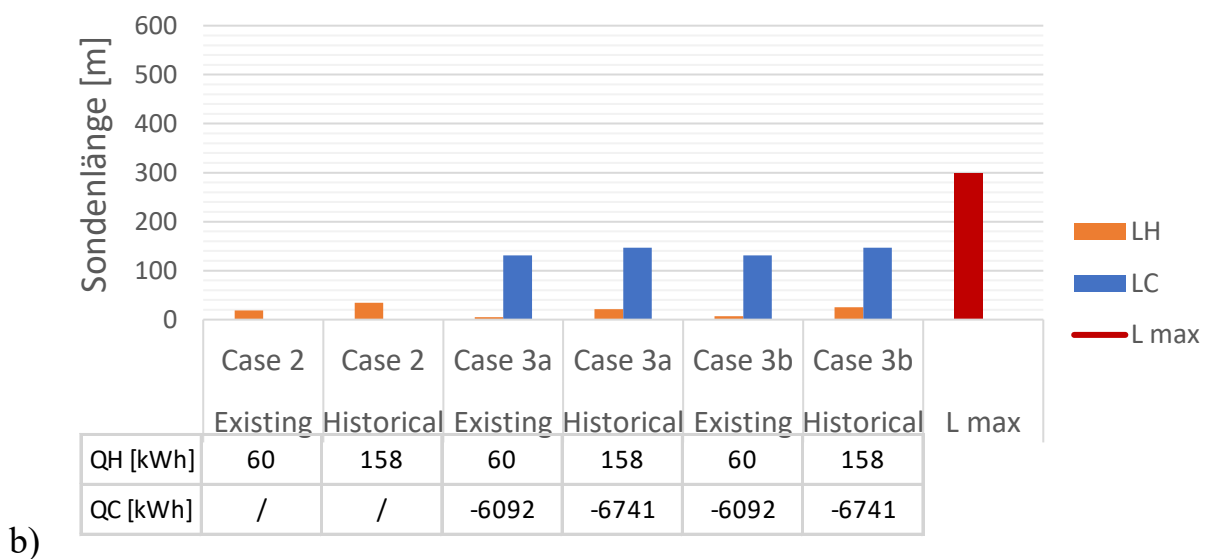
Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Leistungsmerkmale des Bodens sind die erforderlichen Bohrlochlängen kürzer als im Fall einer Wärmeleitfähigkeit von 1,5 W/(m K) (siehe Anhang), daher sind L_h und L_c kürzer als die maximal zulässige Länge (L_{max}). Der gegenteilige Effekt ist bei λ=3 W/(m K) noch deutlicher.

Ausgangssituation + GSHP



a)

Nachrüstung der Gebäudehülle + GSHP



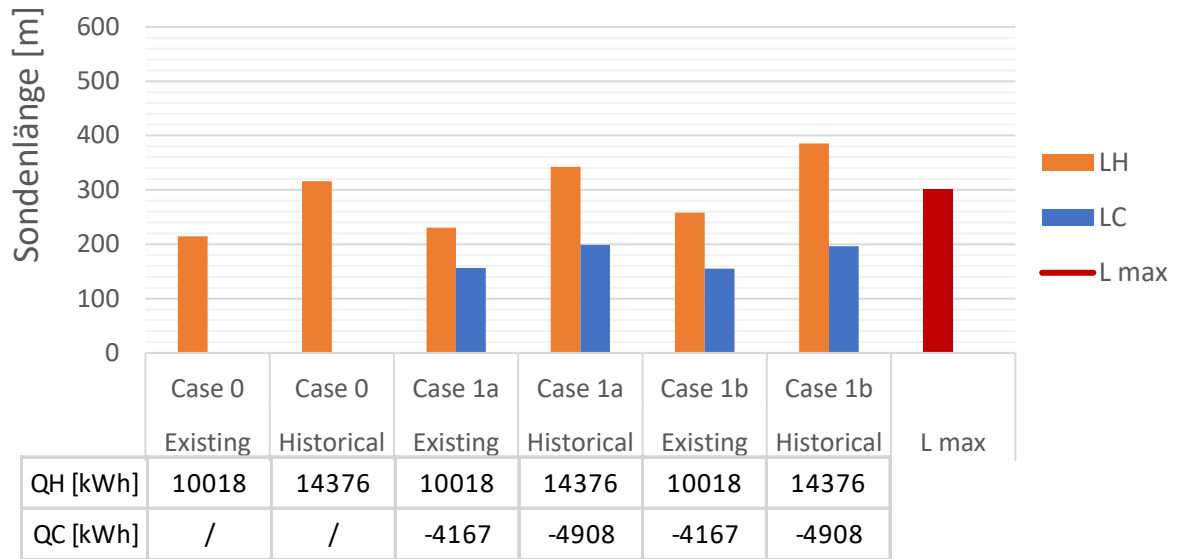
b)

Abbildung 3-1. Vergleich zwischen der maximal verfügbaren Länge und der erforderlichen Bohrlochlänge zur Deckung des Energiebedarfs für die drei Gebäudetypologien für Athen ohne (a) und mit (b) Hüllendämmung

3.2. Straßburg

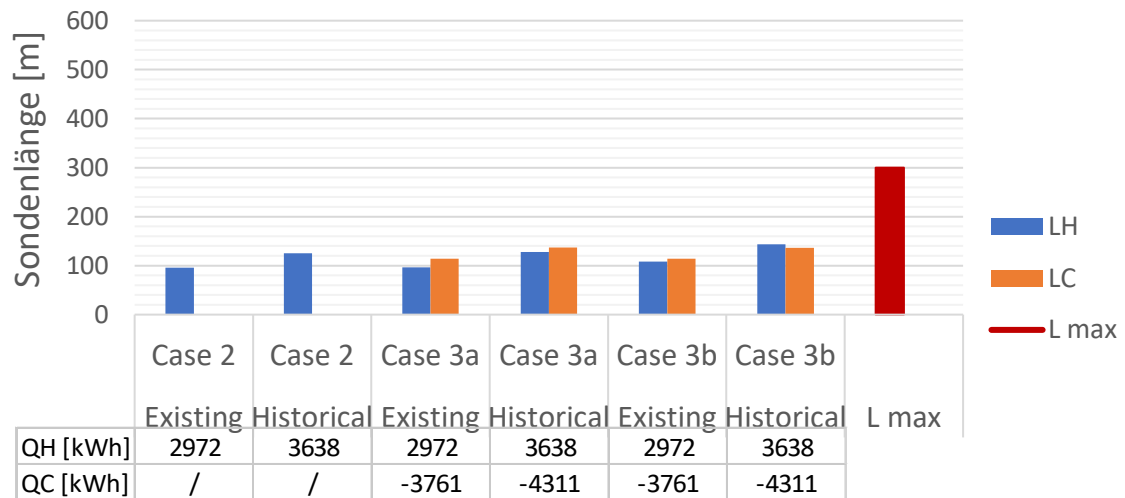
Die Fälle mit einer nachgerüsteten Umhüllung (Abbildung 3-2 b) zeigen einen ausgeglichenen Heiz- und Kühlenergiebedarf dank einer Verringerung der Wärmelast während der Heizperiode, während der Fall ohne Dämmung (Abbildung 3-2 a) eine unausgewogene Wärmelast mit höherem Energiebedarf im Heizbetrieb aufweist. Daher ermöglicht die Anwendung der Tiefenanierung eine optimierte Dimensionierung der Sonde, wobei eine Installationstiefe angenommen wird, die hypothetisch fast den gesamten Energiebedarf für Heizung und Kühlung decken kann. Die Länge der Sonden für die Raumheizung wird für bestehende und historische Gebäude um 50 % bzw. 55 % reduziert, während für die Raumkühlung eine Auslegungslänge der Sonden vorgesehen wurde.

Ausgangssituation + GSHP



a)

Nachrüstung der Gebäudehülle + GSHP

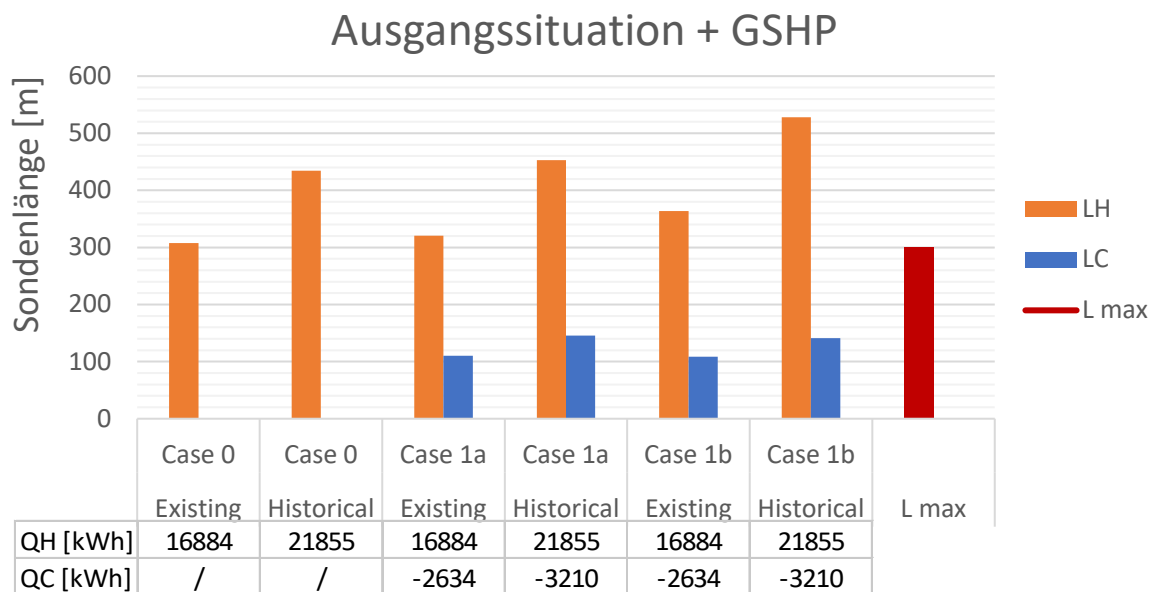


b)

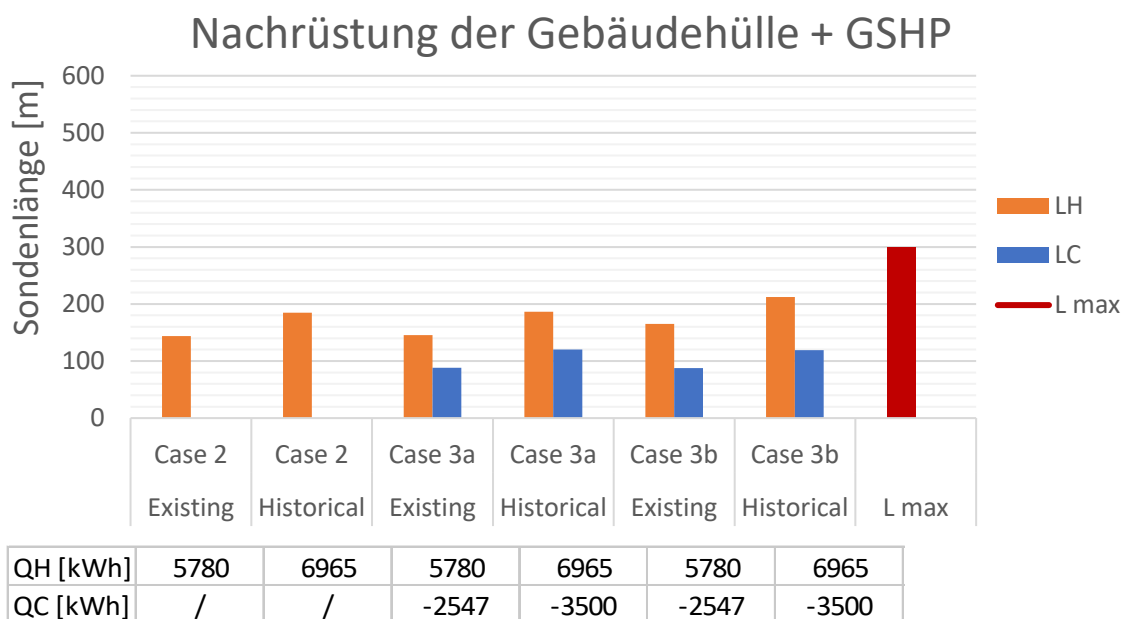
Abbildung 3-2. Vergleich zwischen der maximal verfügbaren Länge und der erforderlichen Bohrlochlänge zur Deckung des Energiebedarfs für die drei Gebäudetypologien in Straßburg ohne (a) und mit (b) Hüllendämmung

3.3. Helsinki

Betrachtet man die Fälle in Helsinki, so zeigt sich, dass die unausgeglichene Wärmelast der nicht nachgerüsteten Gebäudehülle (Abbildung 3-3 a), etwas ausgeprägter als in Straßburg ist. Obwohl die Anwendung einer tiefgreifenden Sanierung eine geringere Heizlänge erfordert, die bei bestehenden und historischen Gebäuden um 45 % bis 61 % reduziert wird, wenn man den Basisfall mit Fall 3-3b vergleicht, ist die Heizlast immer noch dominant, was die Dimensionierung der Sonden zur effizienten Deckung des Energiebedarfs des Gebäudes erschwert.



a)



b)

Abbildung 3-3. Vergleich zwischen der maximal verfügbaren Länge und der erforderlichen Bohrlochlänge zur Befriedigung der Energienachfragetypologien für Helsinki ohne (a) und mit (b) Hüllendämmung

3.4. Optimale Länge der Sonden

Die in Abschnitt 2.2.1 erläuterte und in Tabelle 2-3 dargestellte Methodik wurde verwendet, um die optimale Länge der zu installierenden Sonde korrekt zu definieren, um Probleme wie thermischen Drift aufgrund der extrem unausgeglichene thermischen Belastung der Gebäude zu vermeiden (siehe Tabelle 3-2 für die endgültigen Referenzfälle).

Wenn der Wärmeaustausch im Erdreich zwischen der Heizperiode (Wärmeentzug aus dem Erdreich) und der Kühlperiode (Wärmeabgabe an das Erdreich) nahezu ausgeglichen ist, besteht die optimale Wahl darin, die gleiche Dauer für Heizung und Kühlung festzulegen, um einen Drift der Bodentemperatur zu vermeiden. Die Arbeit mit der

Luftquelle, wenn die Bodenquelle nicht ausreicht, ermöglicht die Optimierung der verfügbaren Energiequellen und erhöht die Effizienz des Systems, da die LWWP in den mittleren Jahreszeiten effizienter ist, insbesondere wenn die Lufttemperatur höher ist als die Bodentemperatur (Zarella und Zecchin, 2018).

In den verschiedenen Fällen, in denen eine tiefgreifende Sanierung durchgeführt wird, wird die Länge der Sonden im Winter erheblich reduziert (L_h), während die für die Kühlung erforderliche Länge (L_c) nahezu konstant bleibt. Aus diesem Grund ist Fall B in warmen Klimazonen häufiger anzutreffen, da der Heizenergiebedarf vernachlässigt werden kann, der Kühlenergiebedarf jedoch deutlich höher ist.

Tabelle 3-2. Für die Sonden gewählte endgültige Länge

			L_h	L_c	Fall*	L installiert	L installiert
			[m]	[m]		(a)	(b)
						[m]	[m]
Fall 0 Heizkörper	Athen	Bestehend	85	-	2a	85	-
		Historisches	150	-	2a	150	-
	Straßburg	Bestehend	190	-	2a	190	-
		Historisches	280	-	2a	280	-
	Helsinki	Bestehend	265	-	2a	265	-
		Historisches	375	-	4	-	300
Fall 1 Gebläsekon vektoren	Athen	Bestehend	75	200	3a/3b	200	75
		Historisches	140	250	3a/3b	250	140
	Straßburg	Bestehend	180	140	2a/2b	180	140
		Historisches	265	170	2a/2b	265	170
	Helsinki	Bestehend	250	100	2a/2b	250	100
		Historisches	355	135	2a/2b	300	135
Fall 1 Strahlungs anlage	Athen	Bestehend	80	200	3a/3b	200	80
		Historisches	150	250	3a/3b	250	150
	Straßburg	Bestehend	200	140	2a/2b	200	140
		Historisches	295	170	2a/2b	295	170
	Helsinki	Bestehend	275	100	2a/2b	275	100
		Historisches	400	130	4	300	130
Fall 2 Heizkörper	Athen	Bestehend	15	-	2a	15**	-
		Historisches	25	-	2a	25**	-
	Straßburg	Bestehend	85	-	2a	85	-
		Historisches	105	-	2a	105	-
	Helsinki	Bestehend	115	-	2a	115	-
		Historisches	155	-	2a	155	-
Fall 3 Gebläsekon vektoren	Athen	Bestehend	5	115	3a	115	-
		Historisches	15	135	3a	135	-
	Straßburg	Bestehend	75	105	3a/3b	105	75
		Historisches	95	120	3a/3b	120	95
	Helsinki	Bestehend	105	80	2a/2b	105	80
		Historisches	140	110	2a/2b	140	110
Fall 3 Strahlungs anlage	Athen	Bestehend	5	115	3a	115	-
		Historisches	15	135	3a	135	-
	Straßburg	Bestehend	80	105	1	105	-
		Historisches	105	125	3a/3b	125	-
	Helsinki	Bestehend	120	80	2a/2b	120	80
		Historisches	155	110	2a/2b	110	155

* Ref. Tabelle 2-3

** Wenn max (L_h, L_c) \ll L-Sonde, ist GSHP nicht erforderlich

4. INTEGRATION VON ERDWÄRMEPUMPEN MIT ANDEREN SYSTEMEN

In einem nNEH können die Energieverbrauchsziele erreicht und die Energiewirtschaft verbessert werden, indem die GSHPs mit erneuerbarem Strom und/oder mit anderen Systemen zur Versorgung mit erneuerbarer Wärmeenergie integriert werden. Diese Systeme werden als Hybrid-GSHP (HGSHP) bezeichnet. Sie können auch zu ausgeglichenen jährlichen Heiz- und Kühllasten in Gebäuden führen, was notwendig ist, um eine Verschlechterung der Bodentemperatur zu vermeiden. Die Verfügbarkeit von erneuerbarem Strom vor Ort durch PV-Paneele oder Mikrowindturbinen kann die CO₂-Emissionen, die durch den Stromverbrauch des Wärmepumpenkompressors, der Wasserumwälzpumpen des Hydroniksystems und der Ventilatoren der Innenraumgeräte entstehen, wirksam minimieren. Die Integration von Energiespeicherkomponenten, entweder thermisch (z. B. mit Phasenwechselmaterialien (PCM) gefüllte Tanks) oder elektrisch (z. B. Batterien), kann die Wirtschaftlichkeit und Gesamtenergieeffizienz weiter verbessern.

Um einen reibungslosen Systembetrieb und eine bessere Energienutzung zu gewährleisten, müssen fortschrittliche Regelungsalgorithmen eingesetzt werden. Die Integration anderer erneuerbarer Energiequellen erschwert die Einführung optimierter Steuerungsstrategien. Herkömmliche regelbasierte Steuerungsstrategien sind einfach, leicht zu implementieren und zwischen ähnlichen Systemen übertragbar. Ihre Nachteile sind die begrenzten Parameter, die berücksichtigt werden, die mangelnde Flexibilität und die konservative Tendenz in Bezug auf den Komfort. Mathematische Optimierungstechniken (entweder modellbasiert, datengesteuert oder modellfrei) zeigen ihrerseits eine bessere Leistung, sind aber auch komplexer zu implementieren und erfordern physikalische Modelle oder Datensätze. KI-Algorithmen ermöglichen das Erlernen des optimalen Betriebs unter Berücksichtigung einer großen Anzahl von Parametern für nichtlineare Probleme, wodurch sie sich für die Bewältigung der Komplexität von GSHP-Systemen eignen, insbesondere wenn sie mit anderen erneuerbaren Energien kombiniert werden, und für die Implementierung autonomer und anpassungsfähiger intelligenter Steuerungen. Sie benötigen jedoch große Datensätze für ihre Entwicklung. Die Wahl des Ansatzes ist in jedem Fall ein Kompromiss zwischen der Systemleistung und der Komplexität der Implementierung.

4.1. Mit erneuerbarem Strom unterstützte Erdwärmepumpen

Die Kopplung von Windturbinen oder Photovoltaik (PV)-Paneelen mit der GSHP erfolgt im Hinblick auf die Stromversorgung der GSHP, wenn erneuerbarer Strom verfügbar ist. Die GSHP nutzt den erneuerbaren Strom für die Warmwasserbereitung, die Heizung oder Kühlung des Gebäudes sowie für die Speicherung von Wärmeenergie in Wasser und PCM für die spätere Nutzung zur Deckung von Spitzenlasten bei Heizung oder Kühlung des Gebäudes. Wenn keine GSHP-Last benötigt wird, wird die erneuerbare Energie in den Batterien für eine spätere Nutzung gespeichert oder in das Stromnetz eingespeist.

Die Grundkonfiguration eines mit Wind oder PV gekoppelten GSHP-Systems ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Die Windturbine oder die PV-Paneele erzeugen erneuerbare Elektrizität, die vorrangig in den Batterien gespeichert wird, während überschüssige Elektrizität in das Stromnetz abgeleitet wird. Die GSHP liefert Wärme entweder an den Warmwasserspeicher oder an den Pufferspeicher auf verschiedenen Temperaturniveaus, wobei dem Warmwasser Vorrang eingeräumt wird. Der Pufferspeicher ist je nach Heiz- oder Kühlbetrieb mit dem WARM- oder KALT-PCM-Speicher verbunden. In Zeiten, in denen Wind-/PV-Strom verfügbar ist (erzeugt oder in den Batterien gespeichert), lädt die GSHP den PCM-Speicher auf, indem es den Einstellpunkt des Pufferspeichers an das PCM-Niveau anpasst. Wenn kein Strom aus erneuerbaren Energien verfügbar ist (erzeugt oder in den Batterien gespeichert), deckt die GSHP die Grundlast des Gebäudes und das PCM die Spitzenlast ab.

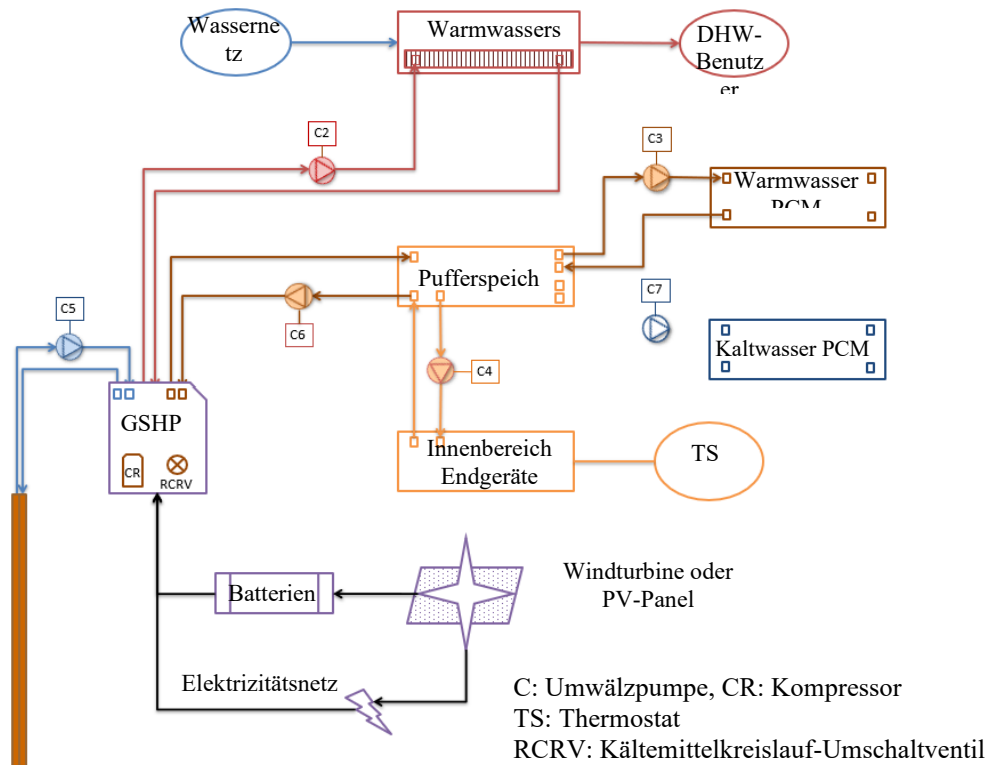


Abbildung 4-1. Wind-/PV-gestützte Erdwärmepumpenanlage

Die wichtigsten Grundsätze der Kontrollstrategie sind:

- Das Umschaltventil des Kältemittelkreislaufs befindet sich je nach Betriebsart in der Stellung HEIZEN oder KÜHLEN, außer wenn die Brauchwasserzirkulation eingeschaltet ist; in diesem Fall wird es immer automatisch in die Stellung HEIZEN geschaltet.
- Wärmepumpe lädt vorrangig den Warmwasserspeicher
- Der Wärmeaustausch zwischen Pufferspeicher und PCM erfolgt je nach Benutzerbelastung
- GSHP lädt das PCM, wenn Windstrom verfügbar ist, so dass seine Temperatur auf dem gewünschten Niveau plus/minus der halben Temperaturbandbreite gehalten wird.
- GSHP und PCM laden den Pufferspeicher, so dass a) seine Wassertemperatur auf dem gewünschten Niveau plus/minus der halben Temperaturbandbreite gehalten wird und b) die GSHP die Grundlast und das PCM die Spitzenlast abdeckt
- Das Innenraumsystem verwendet je nach Raumtemperatur warmes/kaltes Wasser aus dem Pufferspeicher, so dass die Raumlufttemperatur auf dem gewünschten Niveau plus/minus der halben Temperaturbandbreite gehalten wird.

4.2. Solarthermisch unterstützte Erdwärmepumpen

Die Grundkonfiguration der Kopplung von solarthermischen Kollektoren mit einem GSHP ist in Abbildung 4-2 dargestellt. Bei dieser Konfiguration liefert die GSHP thermische Energie in einen Pufferspeicher, der hydraulisch mit einem PCM-Speicher und dem Heiz-/Kühlsystem des Gebäudes verbunden ist und thermisch über einen Wärmetauscher mit dem Brauchwasserspeicher verbunden ist. Die solarthermischen Kollektoren liefern thermische Energie für den Brauchwasserspeicher. Das Konzept sieht vor, dass die thermische Energie kontinuierlich zwischen dem Pufferspeicher, dem GSHP, dem PCM, dem Warmwasser und dem Gebäude ausgetauscht wird, je nach Verfügbarkeit der Solarenergie, den Stromtarifen und dem Bedarf der Nutzer an Wärme/Kälte und Warmwasser.

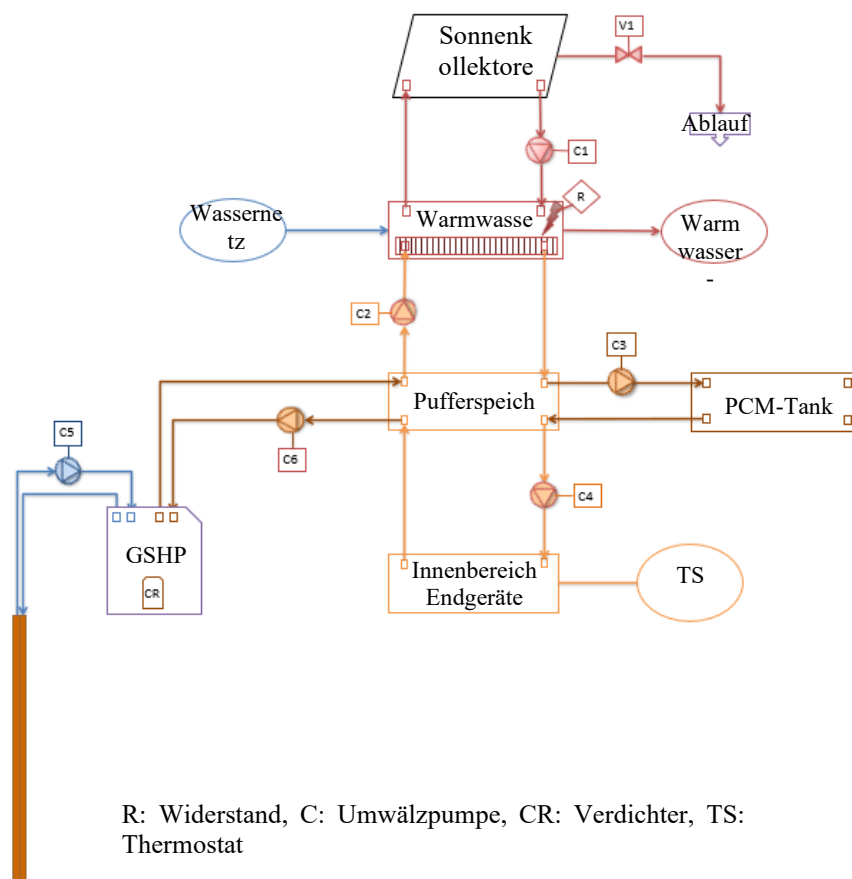


Abbildung 4-2. Aufbau einer solarthermisch unterstützten Erdwärmepumpenanlage

Die Kopplung zwischen dem GSHP und den Solarkollektoren erfolgt im Winter im Heizbetrieb nur durch die Wärmeübertragung zwischen dem Hauptpufferspeicher und dem Brauchwasserspeicher. Im Sommer ist keine Kopplung zwischen den beiden Systemen vorgesehen, da davon ausgegangen wird, dass die Solarkollektoren den gesamten Warmwasserbedarf des Nutzers decken können.

Die wichtigsten Grundsätze der Kontrollstrategie sind:

- Solarkollektoren laden den Brauchwasserspeicher während hoher Sonneneinstrahlung; im Winter wird der elektrische Widerstand am Brauchwasserspeicher einige Minuten pro Woche gemäß den örtlichen Legionellenschutzvorschriften eingeschaltet (Zeitprogrammierung)
- Im Heizbetrieb erfolgt der Wärmeaustausch zwischen Warmwasserspeicher, Pufferspeicher und PCM je nach Verbraucherbelastung
- Im Heizbetrieb lädt die GSHP das PCM in Stunden mit niedrigem Stromtarif auf, so dass die Temperatur auf dem gewünschten Sollwert plus/minus der halben Temperaturbandbreite gehalten wird.
- Im Kühlbetrieb sind die Solarkollektoren und das GSHP entkoppelt, so dass die Warmwasserbereitung ausschließlich durch Solarthermie erfolgt, die voraussichtlich 100 % des Warmwasserbedarfs decken kann.
- In beiden Modi lädt die GSHP den Pufferspeicher, so dass dessen Temperatur auf dem gewünschten Wassersollwert plus/minus der halben Temperaturbandbreite gehalten wird.
- Das Innenraumsystem nutzt die Wärmeenergie aus dem Pufferspeicher entsprechend der Raumlufttemperatur, so dass die Innentemperatur auf dem gewünschten Raumsollwert plus/minus der halben Temperaturbandbreite gehalten wird.

Die Installation der GEO4CIVHIC GSHP in Verbindung mit einer thermischen Solaranlage führt je nach Gebäudetyp und klimatischen Bedingungen zu erheblichen Primärenergieeinsparungen. Jährliche wirtschaftliche Einsparungen sind ebenfalls von Bedeutung, wobei die PBT der Investition vom Gebäudetyp, der Isolierung der Gebäudehülle und den klimatischen Bedingungen abhängen.

4.3. Luft- und erdgekoppelte Wärmepumpen

Es gibt zwei Hauptoptionen für die Einbeziehung von Luft als zusätzliche Energiequelle, je nachdem, ob Luft als eine der möglichen Hauptenergiequellen (Luft-Wasser-Wärmepumpe) verwendet wird oder ob sie geothermische Energie als Senke oder Quelle (Kühlturm/Trockenkühler) unterstützt. Im ersten Fall integriert das System sowohl eine Luft/Wasser-Wärmepumpe (ASHP) als auch eine Erd/Wasser-Wärmepumpe (GSHP). Das System kann mit LWP oder GSHP heizen oder kühlen, unabhängig davon, ob die Luftquelle zum Heizen oder Kühlen verwendet wird. Bei diesem Ansatz der HGSHP wird die Luft als zusätzliche Quelle für die Wärmeeinspeisung oder -auskopplung einbezogen und der Erdwärmetauscher nur zur Einspeisung oder Auskopplung eines Teils des Wärmeenergiebedarfs des Gebäudes verwendet. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Luft als zusätzliche Quelle einzubeziehen, eine davon ist der Einsatz von Kühltürmen (nur zur Kühlung) oder Trockenkühlern (Abbildung 4-3) als neues, vom GHE unabhängiges Element mit unterschiedlichen Konfigurationen je nach Bedarf und Optimierung des HLK-Systems. Eine weitere Möglichkeit ist eine Wärmepumpe mit zwei Quellen (DSHP) Abbildung 4-4), bei der alle Elemente in derselben Wärmepumpe untergebracht sind, d. h. die Ventilatoren und Wärmetauscher für die Luftquelle und der Wärmetauscher für die Erdwärmequelle befinden sich im selben Gehäuse der Wärmepumpe.

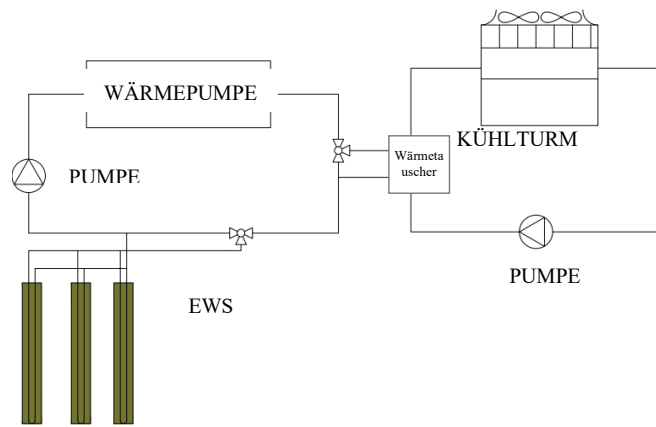


Abbildung 4-3. Anschlussschema eines Kühlturms oder Trockenkühlers mit einer Erdwärmepumpe

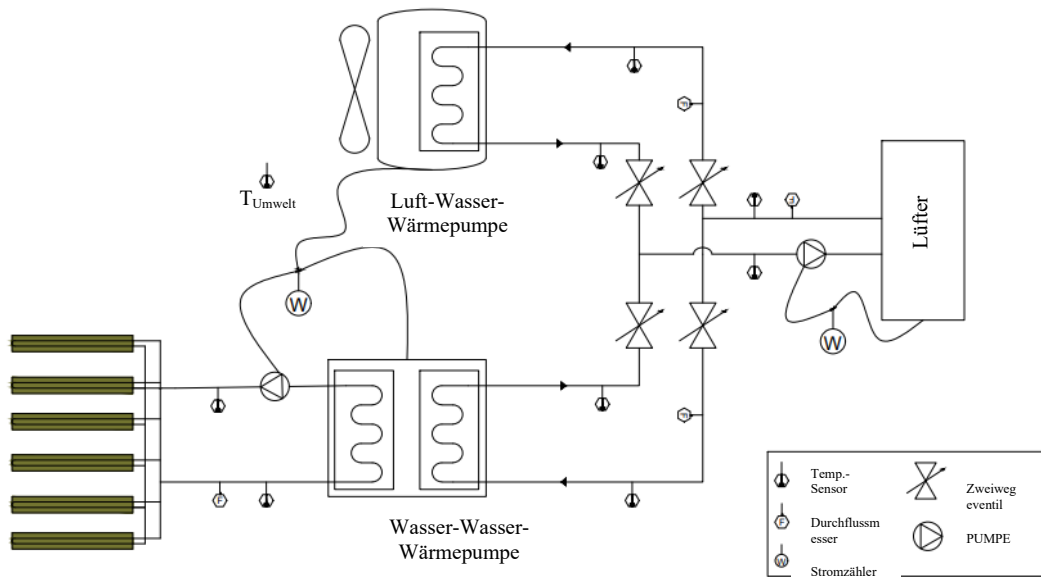


Abbildung 4-4. Anschlussschema Luft-Wasser-Wärmepumpe gekoppelt mit GSHP

Die Kombination von Luft- und Erdwärmequelle erhöht die Energieleistung geringfügig und führt daher zu wirtschaftlichen Einsparungen. Der große wirtschaftliche Vorteil dieser Option liegt jedoch in der Tatsache, dass durch die Verwendung von Luft als Energiequelle die Installation des Sondenfeldes um bis zu 40 % reduziert werden kann, was die Bohrkosten und damit die Investition für die Anlage drastisch senkt. Um dieses Szenario zu unterstützen, müssen weitere fortschrittliche Kontrollstrategien erforscht werden.

4.4. PV-Thermal unterstützte Erdreich-Wärmepumpen

Durch den Einsatz von photovoltaisch-thermischen Paneelen (PVT) lässt sich im Vergleich zu einer Lösung mit getrennten thermischen Solarkollektoren und photovoltaischen Paneelen Dachfläche einsparen und der Gesamtwirkungsgrad der Sonnenenergieumwandlung verbessern, da PVT-Kollektoren sowohl für die Wärmeenergie als auch für die Stromversorgung effizienter sind als die beiden herkömmlichen Systeme zusammen. Bei dieser Technologie liefert das Solarfeld eine Wärmequelle mit höherer Temperatur und deckt gleichzeitig auch den Strombedarf der Wärmepumpe.

Bei der Kopplung des Erdreichs und der PVT-Felder als Wärmequellen für die Wärmepumpe, wobei der Warmwasserbereitung sowohl in der Heiz- als auch in der Kühlsaison Vorrang eingeräumt wird, ist der direkte thermische Beitrag der Solaranlagen erwartungsgemäß an den Orten mit höheren Werten der Sonneneinstrahlung höher. Im Einzelnen steigt dieser Anteil von 27 % in der Fallstudie von Helsinki auf 34 % in Straßburg und Bilbao und auf 64 % in Athen.

4.5. Anwendung von Fallstudien: Selbstversorgungs- und Selbstverbrauchsindizes für GEO4CIVHIC-Archetypen

Um das Potenzial der Integration erneuerbarer Energiequellen bei der Sanierung bestehender Gebäude in Stadtzentren aufzuzeigen, wurde im Rahmen des GEO4CIVHIC-Projekts die Integration von Photovoltaikanlagen (PV) auf dem Dach untersucht, was zu einer umfassenden Analyse führte, bei der die Sanierung der Gebäudehülle, die GSHP und die PV-Produktion miteinander verbunden wurden. Der Einsatz von PV-Systemen hat viele Vorteile, denn Solarenergie ist sauber und kostenlos, die Installation ist nicht kompliziert und kann nach den Bedürfnissen des Nutzers gestaltet werden. Der Hauptnachteil ist der intermittierende Betrieb, der, wenn möglich, teilweise mit einem Speichersystem gelöst werden kann, was jedoch die Installationskosten erhöht. Für eine vollständige Analyse muss die Energieleistung der PV-Anlage unter Berücksichtigung zahlreicher Faktoren wie Standort, Neigung, Ausrichtung und Vorhandensein von Abschattungselementen richtig bewertet werden; aus diesem Grund wurden die Simulationen mit dem dynamischen Tool TRNSYS durchgeführt.

Die elektrische Belastung des Gebäudes wurde anhand der von Eurostat bereitgestellten Energiewerte berechnet (Eurostat) und nach einem von Wilson und Engebrecht (2014) vorgeschlagenen Profil auf Stundenbasis verteilt.

Tabelle 4-1 zeigt den durchschnittlichen stündlichen Verbrauch der elektrischen Geräte und der Beleuchtung nach Jahreszeit und Wochentag.

Tabelle 4-1. Durchschnittlich stündlich verbrauchte elektrische Energie [Wh]

[Wh]	Sommer		Winter		Frühling/Herbst	
	Mo-Fr	Sa-So	Mo-Fr	Sa-So	Mo-Fr	Sa-So
Waschmaschine	28	30	28	30	28	30
Kühlschrank + Gefrierschrank	130	130	130	130	130	130
PC	14	14	14	14	14	14
TV	14	14	14	14	14	14
Video	8	8	8	8	8	8
Beleuchtung	40	40	53	53	51	51

Der Elektroherd wird in der Regel dreimal am Tag benutzt, wie in Tabelle 4-2 dargestellt ist. Dabei variiert die Intensität je nach Uhrzeit und Wochentag.

Tabelle 4-2. Tägliche Nutzung Elektroherd [Wh]

		Wochentag [Wh]	Wochenende [Wh]
Frühstück	7:00h	100	200
Mittagessen	12:00h	300	600
Abendessen	19:00h	1000	1500

Ausgehend von dem in Abschnitt 2.7 berechneten Energiebedarf wurden unter Berücksichtigung der entsprechenden COP und EER für jeden Fall die mit der Wärmepumpenerzeugung verbundenen Stromprofile berechnet. Der sich daraus ergebende stündliche Energiebedarf der Wärmepumpe wird zum allgemeinen elektrischen Lastprofil eines privaten Nutzers (Tabelle 4-1 und Tabelle 4-2) hinzugefügt. Dies ergibt den gesamten Strombedarf der Wohneinheiten welcher in Tabelle 4-3 für jedes Klima und jeden Gebäudetyp dargestellt ist.

Tabelle 4-3. Gesamtstromverbrauch einschließlich Wärmepumpe, Beleuchtung und Geräte [kWh]

Bestehend	Fall 0	Fall 1 - Gebläsekonvektor	Fall 1 - Strahler	Fall 2	Fall 3 - Gebläsekonvektor	Fall 3 - Strahler
Athen	7305	7022	6923	5809	5799	5796
Straßburg	9206	8224	7511	6266	5975	5764
Helsinki	12920	12210	11017	8866	8475	8064
Historisches	Fall 0	Fall 1 - Gebläsekonvektor	Fall 1 - Strahler	Fall 2	Fall 3 - Gebläsekonvektor	Fall 3 - Strahler
Athen	8696	7987	7736	5995	5971	5962
Straßburg	11085	9680	8660	6647	6290	6030
Helsinki	15422	13957	12415	9481	9012	8519

Das gesamte Stromprofil des Gebäudes wurde stündlich mit der von der Photovoltaikanlage erzeugten Energie verglichen, wobei zwei Indikatoren ausgewertet wurden (Luthander und Widén, 2015): die Autarkie (Self-sufficiency – SS) und der Eigenverbrauch (Self-consumption – SC), die beide von der selbst genutzten Energie (1) abhängen, d. h. von der Differenz zwischen der verbrauchten und der aus dem Netz gelieferten Energie.

$$\text{Selbst genutzte Energie} = \text{verbrauchte Energie} - \text{aus dem Netz bezogene Energie [kWh]} \quad [1]$$

Der Selbstversorgungsgrad wird durch Gleichung (2) als das Verhältnis zwischen der selbst genutzten Energie und der gesamten verbrauchten Energie definiert, d. h. er ist der Prozentsatz der verbrauchten Energie, der von der auf dem Gebäude installierten PV-Anlage erzeugt wird.

$$SS = \frac{\text{Selbst genutzte Energie}}{\text{Gesamtverbrauch Energie}} \quad [\%] \quad [2]$$

Gleichung (3) definiert den Eigenverbrauch als die selbst genutzte Energie geteilt durch die von der PV-Anlage erzeugte Gesamtenergie, d. h. den prozentualen Anteil der im Gebäude erzeugten und verbrauchten Solarenergie im Vergleich zur insgesamt erzeugten Solarenergie.

$$SC = \frac{\text{Selbst genutzte Energie}}{\text{Gesamterzeugung Energie}} \quad [\%] \quad [3]$$

Die Bewertung dieser Indikatoren hängt streng von der stündlichen Analyse der Last ab, die die Menge der verbrauchten oder in das Netz eingespeisten Energie entsprechend der vom System erzeugten und der vom Nutzer verbrauchten Energie definiert. Daher wurden dynamische Simulationen mit der Software TRNSYS durchgeführt, um die stündlich von den PV-Paneelen erzeugte Energie für verschiedene Ausrichtungen zu berechnen, um die Effizienz des Systems unter Berücksichtigung der verschiedenen möglichen Ausrichtungen des Gebäudes in einem städtischen Kontext zu vergleichen. Die Ergebnisse in Tabelle 4-4 zeigen, dass die höchste Energieerzeugung bei einer Ausrichtung nach Süden oder Südwesten erzielt wird, während sie bei einer Ausrichtung nach Norden je nach Standort um 30 bis 50 % sinkt.

Tabelle 4-4. Jährliche Energieerzeugung durch die Photovoltaikanlage

Standort	Von der PV-Anlage erzeugte Energie [kWh/Jahr]				
	0°	45°	90°	180°	270°
	Süd	Süd-West	West	Norden	Ost
Athen	19533	19255	17229	12828	15563
Straßburg	15930	15767	14250	10997	12880
Helsinki	14118	13577	11385	7292	10311

Die Dachfläche und die Bemessungsparameter (Tabelle 4-5) wurden entsprechend der Geometrie des Gebäudes berechnet, wobei die unterschiedliche Neigung des Daches je nach Klima berücksichtigt und um 5 % reduziert wurde, um einen angemessenen Raum für die technische Wartung der Paneele zu schaffen. In Athen wurde das Dach als waagrecht betrachtet, so dass der verfügbare Platz noch weiter reduziert wurde, um die gegenseitige Abschattung der Paneele zu vermeiden. Dies ist der Grund für die geringere installierte Leistung (6 kW) im Vergleich zu den anderen Standorten (12 kW). Es wurden polykristalline PV-Module ausgewählt; für die Module und den Wechselrichter wurden die auf dem Markt verfügbaren technischen Datenblätter herangezogen.

Tabelle 4-5. Dimensionierungsparameter der PV-Anlage

	Athen	Straßburg	Helsinki
Brutto-Dachfläche [m] ²	59	117	121
Dachneigung	0°	30°	40°
Anzahl der Paneele	18	35	37
Anzahl der Stränge	3	9	9
Installierte Spitzenleistung [kWp]	6.0	11.9	12.3

Die erhaltenen Ergebnisse wurden entsprechend dem Indikator für die stündlich selbst genutzte Energie (Gl. 1) in Dump-Energie und Netzenergie aufgeteilt. Wenn die erzeugte Energie größer ist als die in diesem Zeitschritt benötigte Energie, wurde angenommen, dass die überschüssige Energie ins Netz eingespeist wird. Ist dagegen der Energiebedarf höher als die erzeugte Energie, wird die fehlende Energie aus dem Netz bezogen.

Jede in Abschnitt 3.6 erläuterte Sanierungsstrategie wurde für fünf verschiedene Ausrichtungen der Paneele analysiert, so dass insgesamt 180 Fälle für bestehende und historische Gebäude simuliert wurden.

Tabelle 4-6 fasst die Ergebnisse zusammen, die für das bestehende Reihenhaus für jedes Klima, jede Ausrichtung und jede Nachrüstungskonfiguration erzielt wurden. Für Athen kann jede Ausrichtung der Paneele mehr als 50 % der vom Nutzer benötigten Energie liefern, obwohl die genutzte Energie nur 20-30 % der insgesamt erzeugten Energie ausmacht.

Der Indikator für den Eigenverbrauch ist in Straßburg im Durchschnitt ähnlich, etwa 20-30 %, aber der Selbstversorgungsgrad liegt bei etwa 40-50 %, da die Gesamteinstrahlung niedriger ist als in Athen und somit auch die erzeugte Energie geringer ist. Die gleichen Ergebnisse wurden für Helsinki mit niedrigeren Prozentsätzen erzielt.

Süd-, Südwest- und Westausrichtung weisen ähnliche Ergebnisse in Bezug auf die Selbstversorgung auf, wobei ein großer Prozentsatz der genutzten Energie im Vergleich zur benötigten Energie ermittelt wird. Die Nordausrichtung zeigt signifikante Ergebnisse in Bezug auf den Eigenverbrauch, da die Sonneneinstrahlung geringer ist, aber die selbst genutzte Energie im Vergleich zu den anderen Ausrichtungen ähnlich ist, so dass das Verhältnis, das dem Indikator für den Eigenverbrauch entspricht, höher ist.

Tabelle 4-6. Zusammenfassung der Ergebnisse der Selbstversorgung und des Eigenverbrauchs für das bestehende Reihenhaus

VORHANDENE	Selbstversorgungsgrad (%)	Eigenverbrauch (%)
------------	---------------------------	--------------------

		Ausrichtung der PV					Ausrichtung der PV				
		0°	45°	90°	180°	270°	0°	45°	90°	180°	270°
Fall 0	Athen	57%	59%	58%	57%	54%	21%	22%	25%	32%	26%
	Straßburg	40%	40%	39%	37%	38%	23%	23%	25%	31%	27%
	Helsinki	26%	25%	24%	21%	23%	23%	24%	27%	38%	28%
Fall 1 Gebläse konvekt	Athen	58%	60%	60%	58%	55%	21%	22%	24%	32%	25%
	Straßburg	43%	43%	42%	41%	41%	22%	23%	25%	30%	26%
	Helsinki	30%	30%	28%	25%	27%	26%	27%	30%	43%	32%
Fall 1 Strahler	Athen	58%	60%	60%	59%	55%	21%	22%	24%	32%	25%
	Straßburg	46%	46%	45%	44%	44%	22%	22%	24%	30%	26%
	Helsinki	32%	32%	31%	28%	29%	25%	26%	30%	42%	31%
Fall 2	Athen	57%	59%	59%	58%	55%	17%	18%	20%	26%	21%
	Straßburg	48%	48%	48%	47%	47%	19%	19%	21%	27%	23%
	Helsinki	36%	36%	35%	34%	34%	23%	24%	28%	41%	29%
Fall 3 Gebläse konvekt	Athen	57%	60%	60%	58%	55%	17%	18%	20%	26%	21%
	Straßburg	50%	50%	50%	49%	48%	19%	19%	21%	26%	22%
	Helsinki	37%	38%	37%	35%	35%	22%	24%	29%	41%	29%
Fall 3 Strahler	Athen	58%	60%	60%	58%	55%	17%	18%	20%	26%	21%
	Straßburg	51%	51%	51%	50%	49%	18%	19%	20%	26%	22%
	Helsinki	39%	39%	38%	36%	37%	22%	23%	27%	40%	29%

Ähnlich, Tabelle 4-7 fasst die Ergebnisse für das historische Reihenhaus zusammen. Die Ergebnisse sind eher im Hinblick auf den Energieverbrauch als auf die Autarkie interessant, da durch die Nutzung einer erneuerbaren Energiequelle weniger Energie aus dem Netz benötigt wird.

Tabelle 4-7. Zusammenfassung der Ergebnisse der Selbstversorgung und des Eigenverbrauchs für das historische Reihenhaus

HISTORISCH		Selbstversorgungsgrad (%)					Eigenverbrauch (%)				
		Ausrichtung der PV					Ausrichtung der PV				
		0°	45°	90°	180°	270°	0°	45°	90°	180°	270°
Fall 0	Athen	54%	56%	55%	53%	52%	24%	25%	28%	36%	29%
	Straßburg	36%	36%	35%	32%	34%	25%	25%	27%	33%	29%
	Helsinki	25%	24%	23%	21%	22%	27%	28%	31%	44%	33%
Fall 1 Gebläse konvekt	Athen	57%	59%	58%	57%	54%	23%	24%	27%	35%	28%
	Straßburg	40%	39%	39%	36%	37%	24%	24%	26%	32%	28%
	Helsinki	27%	27%	25%	23%	24%	26%	27%	31%	44%	32%
Fall 1 Strahler	Athen	58%	60%	59%	58%	55%	23%	24%	27%	35%	27%
	Straßburg	43%	43%	42%	40%	41%	23%	23%	25%	32%	27%
	Helsinki	29%	29%	28%	26%	27%	26%	27%	30%	43%	32%
Fall 2	Athen	58%	60%	60%	58%	55%	18%	19%	21%	27%	21%
	Straßburg	47%	47%	47%	46%	46%	20%	20%	22%	28%	24%
	Helsinki	35%	35%	34%	33%	33%	24%	25%	29%	43%	30%
Fall 3 Gebläse konvekt	Athen	58%	60%	60%	58%	56%	18%	19%	21%	27%	56%
	Straßburg	49%	49%	49%	48%	48%	19%	20%	22%	28%	23%
	Helsinki	37%	37%	36%	34%	34%	23%	25%	29%	42%	30%
Fall 3 Strahler	Athen	58%	60%	60%	58%	56%	18%	19%	21%	27%	21%
	Straßburg	50%	51%	50%	50%	49%	19%	19%	21%	27%	23%
	Helsinki	38%	39%	38%	36%	36%	23%	24%	28%	42%	30%

Die Verwendung eines elektrischen Speichers würde die selbst verbrauchte Energie und damit die beiden berechneten Indizes erhöhen; die Dimensionierung der Batterie und die Definition des Betriebs hängen jedoch von mehreren Faktoren ab. Insbesondere muss der Planer entscheiden, ob er der Batterieschonung, der Minimierung der Lade-/Entladezyklen, der Maximierung der selbst verbrauchten Energie oder der Minimierung der Einspeisung aus dem

Verteilungsnetz den Vorrang geben will. Es können viele Hypothesen aufgestellt werden, um das Verhalten des Speichers abzuschätzen und die Anwendung der für diese Archetypen erzielten Ergebnisse auf den städtischen Maßstab auszudehnen, indem auch verschiedene Energienutzungsprofile durch die Verbraucher definiert werden, um die Entwicklung von Energiegemeinschaften zu planen und zu unterstützen. Zu diesem Zweck werden in zukünftigen Arbeiten weitere Untersuchungen durchgeführt.

5. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND WEITERE ANWENDUNGEN

Das Handbuch 1 des GEO4CIVHIC-Projekts zielt darauf ab, die Bedeutung der Reduzierung des Energiebedarfs aufzuzeigen, um die Kopplung mit erneuerbaren Energiequellen zu unterstützen und so die Entwicklung von Null-, Fast-Null- und Plusenergiegebäuden zu fördern, wie es von der aktuellen nationalen und internationalen Politik gefordert wird. Um das Potenzial des europäischen Gebäudebestands in städtischen Gebieten zu untersuchen, wurden Archetypen in Bezug auf Geometrie, thermische Eigenschaften der Gebäudehülle, Endnutzung und Art der installierten HLK-Anlagen entwickelt und später als Fallstudien verwendet, um die Ergebnisse der Integration erneuerbarer Energiequellen zu untersuchen. Die detaillierten Merkmale wurden in Carnieletto, 2022 vorgestellt. Auf der Grundlage der verschiedenen möglichen Strategien und Optionen wurden sowohl oberflächliche als auch tiefgreifende Nachrüstungen untersucht. Die Verringerung des Energiebedarfs bezieht sich hauptsächlich auf die jährliche Energiebilanz, da ein hohes Isolationsniveau die Wärmeverluste verringert und den Beitrag der internen Gewinne maximiert. Im Gegensatz dazu haben stark gedämmte Gebäude einen höheren Kühlenergiebedarf, da der Wärmedurchgang durch die Gebäudehülle verringert wird.

Das vorliegende Dokument analysiert die Synergie von GSHP mit anderen erneuerbaren Energien, um optimale Lösungen für die verschiedenen Gebäudetypen und Klimazonen zu definieren. Es wurden mehrere Anwendungen für die optimale Integration von GSHPs und anderen erneuerbaren Energiequellen vorgestellt, wenn auch begrenzt auf ein typisches Reihenhaus in verschiedenen Klimazonen.

Es wurden dynamische Simulationen durchgeführt, um den Heiz- und Kühlenergiebedarf zu ermitteln, der später zur Dimensionierung von Erdwärmetauschern unter Berücksichtigung der verschiedenen geologischen Gegebenheiten verwendet wurde. Dabei wurden drei typische thermische Bedingungen im Untergrund von 1,5 W/(m K), 2,2 W/(m K) und 3 W/(m K) zugrunde gelegt, was die Anwendung der erzielten Ergebnisse erweitert. Die richtige Dimensionierung der Systeme kann möglicherweise die Länge des zu installierenden Wärmetauschers und damit die Installationskosten und die damit verbundene Amortisationszeit verringern und eine Verschlechterung der Leistung im Laufe der Zeit verhindern. Die Integration mehrerer Quellen erhöht die Komplexität des Systems und macht eine optimierte Steuerungsstrategie erforderlich. Es wurde eine Methode zur Berechnung der optimalen Länge der Sonden in Abhängigkeit von der Wärmelast des Gebäudes und dem verfügbaren Platz definiert, um eine Überdimensionierung des Systems zu vermeiden und die Energieeffizienz durch die Integration einer Wärmepumpe mit zwei Quellen oder einer Luft-Wärmepumpe zu verbessern. Diese Lösung erhöht die Leistung in den Übergangsjahreszeiten und führt zu Kosteneinsparungen für die Endnutzer. Extreme Ergebnisse wurden für warme Klimazonen erzielt, in denen der Heizenergiebedarf vernachlässigbar ist und freie Kühlsysteme anstelle herkömmlicher Kühlsysteme sogar im Winter erforderlich sind. In diesem Fall war die Straftemperatur akzeptabel, selbst wenn der Energiebedarf unausgeglichen war, was die Installation von GSHPs bei richtiger Dimensionierung unterstützt.

Die Installation einer GSHP in Verbindung mit einer thermischen Solaranlage führt je nach Gebäudetyp und klimatischen Bedingungen zu erheblichen Primärenergieeinsparungen. Betrachtet man die vom Solarfeld erzeugte und von der Wärmepumpe verbrauchte elektrische Energie, so ist der Eigenverbrauchsanteil bei nicht nachgerüsteten Gebäuden höher. Der niedrigere Anteil für nachgerüstete Gebäude ist auf die geringere Wahrscheinlichkeit zurückzuführen, die gesamte erzeugte Energie innerhalb desselben Zeitschritts zu nutzen, da der Energiebedarf aufgrund der angewandten Nachrüstungslösungen geringer ist. Die höchsten Werte entsprechen den wärmeren Klimazonen, da sie von der Möglichkeit abhängen, den Energiebedarf und die erzeugte Energie innerhalb desselben Zeitschritts zu decken.

Die Installation einer Photovoltaikanlage wurde analysiert, wobei der Einfluss der Ausrichtung auf die Indikatoren für Autarkie und Eigenverbrauch untersucht wurde, die eine realistische Prognose für Energiegemeinschaften liefern können. Der Deckungsgrad ist bei den nachgerüsteten Gebäuden im Allgemeinen höher als bei den nicht nachgerüsteten Gebäuden. Vergleicht man die drei klimatischen Bedingungen, so liegt der durch die PV-Anlage erzielte Deckungsgrad in warmen und milden Klimazonen (Athen und Straßburg) zwischen 46 und 67 %, während Helsinki aufgrund des höheren Energiebedarfs und der geringeren Verfügbarkeit von Energie aus der Sonneneinstrahlung einen geringeren Anteil aufweist. Die Installation eines elektrischen Speichers könnte den Primärenergieverbrauch weiter senken; allerdings müssen einige Probleme bei der richtigen Dimensionierung der Batterie gelöst werden, um eine Überdimensionierung der Batterie oder eine schnelle Unterbrechung der Ladeleistung zu vermeiden.

Wie kürzlich in der Literatur untersucht wurde, ermöglicht die umfassende Verwendung von archetypischen Gebäuden für die Stadtmodellierung umfassendere Anwendungen der Energiemodellierung, indem die Simulationszeit aufgrund der Komplexität des Data Mining reduziert wird, was zu einer breiteren Verwendbarkeit durch Experten führt, ohne dass die Qualität der Ergebnisse beeinträchtigt wird. Auf diese Weise können die gewonnenen Ergebnisse bei der Analyse eines breiten Gebäude- und Anlagenbestands, einschließlich ihrer Sanierung, helfen und eine Prioritätenliste von Maßnahmen zur Begrenzung des Energieverbrauchs festlegen. Diese Informationen zielen darauf ab, die Entwicklung von Energiepolitiken für Energiegemeinschaften zu beeinflussen, den Anteil der thermischen und elektrischen Energie unter den verschiedenen Nutzern zu optimieren, eine unterschiedliche Gleichzeitigkeit der Lasten zu nutzen und so die Effizienz der Systeme zu verbessern. Daher wird auf den Bau von Null-, Fast-Null- und Plus-Energie-Gebäuden hingearbeitet.

Wie die verschiedenen vorgestellten und untersuchten Lösungen zeigen, können je nach Klima, Endnutzung und Energiebedarf des Gebäudes, der mit dem Baujahr oder den durchgeführten Nachrüstungsmaßnahmen zusammenhängt, viele Strategien angewendet werden. Obwohl der Standort die Verfügbarkeit der Sonneneinstrahlung erheblich beeinflusst, zeigen die Ergebnisse interessante Auswirkungen auf die Energieeinsparungen und die damit verbundenen Energiekosten, was das Potenzial der Installation von GSHPs in Stadtzentren bestätigt.

REFERENZEN

1. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, "Richtlinie 2010/31/EU vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (Neufassung)", S. 13-35, 2010, doi: doi:10.3000/17252555.L_2010.153.eng.
2. Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union, "Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG".
3. Das Europäische Parlament und der Rat, "Richtlinie 2018/844 vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz", 2018.
4. L. Carnieletto, M. Ferrando, L. Teso, K. Sun, W. Zhang, F. Causone, P. Romagnoni, A. Zarrella, T. Hong, "Italian prototype building models for urban scale building performance simulation", *Build. Environ.*, vol. 192, 2021.
5. M. Ferrando, F. Causone, T. Hong, und Y. Chen, "Urban building energy modeling (UBEM) tools: A state of the art review of bottom-up physics-based approaches," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 62, 2020.
6. I. Ballarini, S. P. Corgnati, and V. Corrado, "Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project," *Energy Policy*, vol. 68, pp. 273-284, 2014, doi: 10.1016/j.enpol.2014.01.027.
7. G. Emmi, A. Zarrella, M. De Carli, S. Moretto, A. Galgaro, M. Cultrera, M. Di Tuccio, A. Bernardi, "Ground source heat pump systems in historical buildings: Two Italian case studies," *Energy Procedia*, vol. 133, pp. 183-194, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.383.
8. A. Zarrella, R. Zecchin, F. De Rossi, G. Emmi, M. De Carli und L. Carnieletto, "Analysis of a double source heat pump system in a historical building", 2019.
9. Deutscher Bundestag, Das GEBÄUDEENERGIEGESETZ (GEG), Berlin, Deutschland, 13. August 2020
10. Präsident der Italienischen Republik, Gesetzesdekret 192, Umsetzung der Richtlinie 2002/91/EG über Energieeffizienz in Gebäuden, Rom, Italien, 19. August 2005
11. Ministerium für Umwelt, Energie und Meer, Gesetz Nr. 2009-967 über die Programmplanung zur Umsetzung des Umweltgranulats I. Paris, Frankreich, 3. August 2009
12. Schweizerischer Bundesrat, Verordnung über die Energie (EnO), Bern, Schweiz, 1. November 2017.
13. König von Spanien, Gesetz 8/2013 de rehabilitación, regeneración y renovación urbanas, Madrid, Spanien, 26. Juni 2013 (BOE-A-2013-6938).
14. Bundesamt für Energie, Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz (SNBS), Schweiz, 2018.
15. Institut Wohnen und Umwelt, "Die gemeinsame Website von EPISCOPE und TABULA", 2016. (Zugriff am 20. Februar 2005).
16. G. V. Fracastoro und M. Serraino, "A methodology for assessing the energy performance of large scale building stocks and possible applications", *Energy Build*, Bd. 43, 2011.
17. G. Dall'o', A. Galante und M. Torri, "A methodology for the energy performance classification of residential building stock on an urban scale," *Energy Build.* vol. 48, pp. 211-219, May 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.01.034.
18. E. Pratavera, P. Romano, L. Carnieletto, F. Pirotti, J. Vivian, und A. Zarrella, "EURECA: An open-source urban building energy modelling tool for the efficient evaluation of cities energy demand," *Renew. Energy*, Vol. 173, 2021.
19. L. Teso *et al.*, "Large scale energy analysis and renovation strategies for social housing in the historic city of Venice", *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 52, 2022.
20. L. Carnieletto, O. B. Kazanci, M. De Carli, und B. W. Olesen, "Why couple renewable energy sources with radiant systems: current trends, limitations and potential", 2018.
21. A. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, "ASHRAE Handbook-HVAC Applications. Geothermal Energy", 2011.
22. A. Capozza, A. Zarrella, and M. De Carli, "Long-term analysis of two GSHP systems using validated numerical models and proposals to optimize the operating parameters," *Energy Build.*, vol. 93, pp. 50-64, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.02.005.
23. S. M. Lee, S. H. Park, Y. S. Jang, E. J. Kim, "Proposition of Design Capacity of Borehole Heat Exchangers for Use in the Schematic-Design Stage," *Energies*, vol. 14, no. 822, 2021, doi: 10.3390/en14040822.
24. A. Galgaro, G. Dalla Santa, and A. Zarrella, "First Italian TRT database and significance of the geological setting evaluation in borehole heat exchanger sizing," *Geothermics*, vol. 94, 2021, doi: 10.1016/j.geothermics.2021.102098.
25. UNESCO - Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur, "Übereinkommen zum Schutz des Kultur- und Naturerbes der Welt", 1972. [Online]. Verfügbar unter: <https://whc.unesco.org/en/conventiontext/>.
26. A. Zarrella, R. Zecchin, P. Pasquier, D. Guzzon, M. De Carli, G. Emmi, M. Quaggia, "A comparison of

- numerical simulation methods analyzing the performance of a ground-coupled heat pump system," *Sci. Technol. Built Environ.*, vol. 24, 2018, doi: 10.1080/23744731.2018.1438663.
27. E. Wilson, C. M. Engebrecht, S. Horowitz, und R. Hendron, "Building America House Simulation Protocols", 2014.
 28. R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, and J. Palm, "Photovoltaic self-consumption in buildings: A review," *Appl. Energy*, vol. 142, 2015.
 29. L. Carnieletto, A. Di Bella, D. Quaggiotto, G. Emmi, A. Bernardi, M. De Carli, Potential von GSHP gekoppelt mit PV-Systemen für die Nachrüstung von städtischen Gebieten in verschiedenen europäischen Klimazonen basierend auf der Definition von Archetypen. *Energie und gebaute Umwelt* (2022). DOI: 10.1016/j.enbenv.2022.11.005

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 POLITECNICA DE VALENCIA (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- UNIVERSITAET ERLANGEN NUERNBERG (FAU)

David BERTERMANN
Oliver SUFT
Moritz FAUDE
Johannes MULLER

11. SOCIETATEA ROMANA GEOEXCHANGE / RUMĂNISCHE 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



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



Dín I-Art Helwa
DIN L-ART HELWA (DLH)
www.dinlarthelwa.org