



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE
Sektion erneuerbare Energien

19.04.2023

Regeneration von Sole-Wasser Wärmepumpen

Zusatzanalyse zu den Energieperspektiven
2050+ für die Sicherstellung einer nachhaltigen
Erdwärme Nutzung.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

prognos

TEP

Datum: 19.04.2023

Ort: Zürich

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie (BFE)
Pulverstrasse 13
3063 Ittigen
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Prognos AG
St. Alban-Vorstadt 24, CH-4052 Basel
www.prognos.com
Telefon: +41 61 3273-310

TEP Energy GmbH
Rotbuchstrasse 68, CH-8037 Zürich
www.tep-energy.ch
Telefon: +41 43 500 71 71

Autoren:

Dr. Martin Jakob (Projektleitung), TEP Energy GmbH
Dr. Giacomo Catenazzi
Marc Melliger, TEP Energy GmbH

Review

Dr. Andreas Kemmler, Prognos AG
Rita Kobler, BFE
Zoë Talary, TEP Energy GmbH

BFE Projekt Koordination:

Rita Kobler, rita.kobler@bfe.admin.ch

BFE Vertragsnummer: SI/200405-01

Die Autoren danken dem BFE für die Finanzierung und den Reviewern für die Zusammenarbeit, ihre Unterstützung und Beiträge zum vorliegenden Projektbericht.

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Bestimmung des Regenerationsbedarfs	2
2.1	Das Regenerationskriterium	2
2.2	Bezugsfläche der Umweltwärme	4
2.3	Wärmepumpen Potenzial und Diffusion im Jahr 2050	6
2.4	Wärmebedarf	7
2.5	Effizienz der Wärmepumpen	8
2.6	Datenkalibration	8
3	Resultate - Regenerationsbedarf	9
3.1	Grenzwert von 3 kWh/m ²	9
3.2	Grenzwert von 8 kWh/m ²	12
3.3	Grenzwert von 33 kWh/m ²	15
3.4	Sensitivitätsanalysen (GW-3)	18
3.5	Regenerationsbedarf bei Fernwärmenetzen	18
4	Regenerationsansätze	19
4.1	Regenerationsansätze	19
4.2	Berechnungsmethodik	21
5	Resultate – Regenerationspotenzial	24
5.1	Grenzwert von 3 kWh/m ²	24
5.2	Grenzwert von 8 kWh/m ²	26
5.3	Grenzwert von 33 kWh/m ²	28
6	Fazit	30
7	Literatur	31

Glossar und Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DL	Dienstleistungssektor
EBF	Energiebezugsfläche
EFH	Einfamilienhaus
EKZ	Energiekennzahl
EP2050+	Energieperspektiven 2050+
EWS	Erdwärmesonden
GIS	Geo-Informationen-Systeme
GW	Grenzwert
GWh	Gigawattstunde (eine Million kWh)
GPM	Gebäudeparkmodell
JAZ	Jahresarbeitszahl
kWh	Kilowattstunde (1000 kWh)
kW	Kilowatt (1000 Watt)
MFH	Mehrfamilienhaus
NWG	Nichtwohngebäude
PV	Photovoltaik
TEP	Technology Economy Policy
S/W-WP	Sole/Wasser-Wärmepumpe
L/W-WP	Luft/Wasser-Wärmepumpe
VLS	Volllaststunden



1 Einleitung

Die Energieperspektiven 2050+ (EP2050+) des Bundes gehen von einer grossflächigen Umstellung der Wärmeerzeugung aus (Prognos, TEP Energy, Infrac, & Ecoplan, 2021). Wärmeerzeuger wie Sole-Wasser Wärmepumpen (S/W-WP) mit Erdwärmesonden (EWS) spielen in den EP2050+ eine bedeutende Rolle. Nun stellt sich die Frage, ob der Bezug der Wärme aus dem Erdreich langfristig gesichert ist, oder ob mit technischen Massnahmen zusätzliche Wärme zugeführt, d.h. die EWS regeneriert werden muss.

Bestehende Studien weisen darauf hin, dass im urbanen Raum ein beträchtlicher Regenerationsbedarf besteht (Wagner & Weisskopf, 2013, 2014). Was fehlt, ist eine schweizweite Betrachtung, die auf den Szenarien der EP2050+ basiert. Wir berechnen in dieser Zusatzanalyse daher den Regenerationsbedarf von EWS aufgeteilt nach Gebäudetypen und Bauperioden für das Szenario ZERO Basis. Um Effizienzmassnahmen abzubilden, haben wir im Jahr 2050 bei allen Gebäuden eine Reduktion des spezifischen Energiebedarfs gegenüber 2020 angenommen.

Die Hauptergebnisse bestätigen, dass je nach angewandtem Regenerationskriterium bei vielen Flächen ein grosser Regenerationsbedarf besteht. Bei konservativer Berechnung sind dies rund 89 % von über 8 TWh Wärme, die in der Schweiz durch EWS bezogen werden wird. Bei Berechnung nach höheren Grenzwerten betrifft dies noch 71 % bzw. 29 % dieser Flächen. Diese Fläche können mittels Regenerationsoptionen regeneriert werden (Kapitel 4). In diesem Kontext haben nun einzelne Kantone die Notwendigkeit zur Regulierung und finanziellen Unterstützung einer Wärmepumpenregeneration erkannt.

Für den Gebäudebestand im Jahr 2050 quantifiziert die nachfolgende Analyse mittels drei Grenzwerten den Anteil der betroffenen EBF sowie die Umweltwärme aus Regeneration und natürlichem Nachfluss. Resultate für tiefe Grenzwerte (3 kWh/m²) sind im Sinne eines maximalen Regenerationsbedarfs. Resultate mit den zwei mittleren und hohen Grenzwerten (8 und 33 kWh/m²) sind aus der SIA Norm 384/6:2021 abgeleitet. Der Bedarf an regenerierter Umweltwärme kann im Einzelfall geringer sein. Zum einen können EWS, die erst gegen das Jahr 2050 installiert werden, später regeneriert werden, d.h. es besteht vermutlich kein akuter Handlungsbedarf. Zum anderen können spezifische räumliche Umstände oder der Nutzung von Wärmeclustern den Regenerationsbedarf reduzieren.

Im Folgenden erläutern wir die Methodik in Kapitel 2 und zeigen die Hauptresultate sowie Sensitivitätsanalysen in Kapitel 3 auf. In Kapitel 4 werden mögliche Regenerationsansätze vorgestellt, und in Kapitel 5 Resultate zum Regenerationspotenzial präsentiert. Kapitel 6 schliesst mit einem Fazit ab.



2 Bestimmung des Regenerationsbedarfs

Die Analyse des Regenerationsbedarfs basiert hauptsächlich auf gebäudescharfen Daten des Gebäudesparks der Schweiz und dem Szenario ZERO Basis zur Diffusion von S/W-WP. Die Analyse fokussiert sich auf Mehrfamilienhäuser (MFH), Einfamilienhäuser (EFH) und Gebäude im Dienstleistungssektor (DL). Im Folgenden werden diese Datenquellen sowie wesentliche Annahmen, z.B. zur Definition der WP-Bodenbezugsflächen, im Detail erläutert.

2.1 Das Regenerationskriterium

Grundsätzlich gilt, dass mittel- bis langfristig ein Regenerationsbedarf einer Erdwärmesonde (EWS) besteht, wenn deren Bezug an Wärme den natürlichen Nachfluss aus der Umgebung übersteigt oder sich mehrere EWS gegenseitig beeinflussen. Treten diese zwei Fälle auf, kann die Temperatur um die EWS zu stark absinken, womit das Erdreich und die EWS-Hinterfüllung gefrieren würden. Dies kann die EWS beschädigen und die Heizleistung beeinträchtigen.

Um den Regenerationsbedarf in der Schweiz zu quantifizieren, definieren wir drei untere Grenzwerte von 3 kWh Wärmebezug pro WP-Bodenbezugsfläche (m²) pro Jahr (siehe Kapitel 2.2).

2.1.1 Konservative Annahme von 3 kWh pro WP-Bodenbezugsfläche

Der Grenzwert von 3 kWh Wärmebezug pro WP-Bodenbezugsfläche (m²) pro Jahr berücksichtigt den natürlichen Wärmenachfluss sowie den Einfluss benachbarter EWS. Die Einhaltung dieses Grenzwertes stellt sicher, dass die Böden in der Schweiz während der Betriebszeit der EWS eine genügend hohe Temperatur aufweisen und, dass sich benachbarte EWS nicht gegenseitig beeinflussen. Übersteigt der Wärmebezug der EWS den Grenzwert muss Wärme mit technischen Massnahmen regeneriert werden.

Der Grenzwert fusst auf Grundlagen, die in Wagner & Weisskopf (2014) hergeleitet werden. Zusammengefasst halten wir fest, dass die Temperatur um die EWS so weit absinkt, bis sich ihr Wärmeentzug mit dem natürlichen Wärmenachfluss aus der Luft und dem darunterliegenden Erdreich im Gleichgewicht befinden wird. Nach Erreichen des Gleichgewichts dehnt sich der Temperaturtrichter um die EWS nicht weiter aus.

Um der EWS eine nachhaltige Versorgung mit Wärme zu bieten, darf die Grenztemperatur von -1.5 °C (SIA 384/6) nicht vor Eintreten des Gleichgewichtszustandes erreicht werden. Die Temperaturabnahme bis zum Gleichgewichtszustand ist abhängig vom spezifischen Wärmeentzug q , der Wärmeleitfähigkeit λ_{Erde} und Temperaturleitfähigkeit a des Bodens, der Betriebszeit t und der Länge H der EWS. Der Gleichgewichtszustand tritt bei Einzelsonden (angenähert) nach t Jahren ein, wenn:

$$t > e \cdot H^2 \frac{q}{a} \mid a = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Nach SIA 384/6 sind EWS auf eine Nutzungsdauer von 50 Jahren auszulegen, womit sich laut der Formel eine EWS-Länge von 72.3 Meter, d.h. rund 75 Metern ergibt. Es muss aber beachtet werden, dass die notwendige EWS-Länge in der Praxis anhand der benötigten Verdampferleistung und der gegebenen Entzugsleistung dimensioniert wird, d.h. bei 75 Metern und 25 W/m Entzugsleistung kann maximal 1875 W bereitgestellt werden.

Weiter erklären Wagner und Weisskopf, dass die Isothermen (d.h. Bereiche gleicher Temperaturen) um die EWS eine Trichterform ausbilden. Befinden sich mehrere Erdwärmesonden unter benachbarten Grundstücken, dürfen sich deren Temperatur-Trichter nicht überlappen, um einen effektiven Betrieb beider WP zu ermöglichen. Dies ist der Fall, wenn deren Abstand B grösser ist als deren halbe Längen H, d.h. $B > H/2$, was bei 75 Metern ca. 38 Metern entspricht (Eskilson, 1987; Huber & Pahud, 1999).

Zur Berechnung des unteren Grenzwerts geben Wagner & Weisskopf (2014) einen Wärmeentzug von 50 kWh pro Jahr und Meter der EWS an. Nach vereinfachtem Berechnungsverfahren (SIA 384/6:2021) ergibt sich damit bei einem beheizten Gebäude mit 1850 Volllaststunden¹ eine maximale spezifische Entzugsleistung von 27 W/m_{EWS}. Dies entspricht rund 1.5 W / (m K), z.B. einem Boden aus Lockergestein mit geringer Wärmeleitfähigkeit. Der untere Grenzwert bei der angenommenen Entzugsleistung berechnet sich wie folgt:

$$50 \frac{\text{kWh}}{\text{m}} \times \frac{75 \text{ m}}{(38 \text{ m})^2} \approx 3 \text{ kWh/m}^2_{\text{Grundstück}}$$

Dieser Grenzwert entspricht einem kleinen Gebäude mit geringer Heizleistung, was bereits darauf hindeutet, dass viele Gebäude über dem Grenzwert liegen werden. Als grobe Abschätzung zur Abstandsregel lässt sich weiter festhalten, dass bei einer Länge der EWS von 75 m, ein Grundstück von rund 1500 m² (38 m x 38 m) erforderlich wäre. Da die meisten Grundstückflächen von EFH in der Schweiz jedoch weitaus kleiner sind, muss von einem hohen Regenerationsbedarf ausgegangen werden. So kann selbst ein Einfamilienhaus-Neubauquartier ohne Regeneration bei weitem nicht vollständig mit Erdwärmesonden versorgt werden.

2.1.2 Annahmen nach SIA von 8 und 33 kWh pro WP-Bodenbezugsfläche

Der hergeleitete Grenzwert von 3 kWh stellt eine konservative Annahme in Bezug auf die Berücksichtigung möglichst vieler Bodentypen dar. Auch unter höheren Grenzwerten lassen sich EWS, in Abhängigkeit der tatsächlichen Bodenbeschaffenheit, unter Umständen in weiteren Gebieten nachhaltig nutzen (Jakob et al., 2020).

Angelehnt an die SIA Norm 384/6:2021, untersuchen wir daher zwei weitere Grenzwerte, die sich auf die erwartete Temperaturabkühlung nach 50 Jahren bezieht.² Der erste untere Grenzwert unterstellt einen Wärmeentzug von 8 kWh Wärmebezug pro WP-Bodenbezugsfläche (m²) pro Jahr. Ein Grossteil der Gebäude bezieht wesentlich mehr Wärme, womit diesen ein Regenerationsbedarf unterstellt wird. Der zweite Grenzwert unterstellt einen Wärmeentzug von 33 kWh/m². Bei Anwendung dieses Grenzwertes müssten nur die EWS mit dem grössten Wärmeentzug regeneriert werden. Nach SIA entspricht der Wert von 8 erhöhten Anforderungen, und 33 einer Regenerationspflicht. Insgesamt sind tiefere Grenzwerte restriktiver und resultieren in einem höheren Regenerationsbedarf.

¹ Dieses Beispiel basiert auf Angaben zu VLS im vereinfachten Berechnungsverfahren nach SIA 384/6.

² Siehe SIA 384/6:2021, Figur 3 «Zu erwartende Temperaturabkühlung durch künftige Nachbarsonden nach 50 Jahren». Bezogen auf eine Bohrtiefe von 200m.

2.2 Bezugsfläche der Umweltwärme

Unsere Ergebnisse sind wesentlich davon abhängig, welche Fläche einer EWS zum Wärmebezug zur Verfügung steht, und wie diese WP-(Boden)Bezugsfläche definiert ist. Die zugrundeliegenden Flächendaten basieren auf georeferenzierten Gebäuden, für welche mit GIS-Methoden die umliegenden Flächen bestimmt wurden (Abbildung 1).

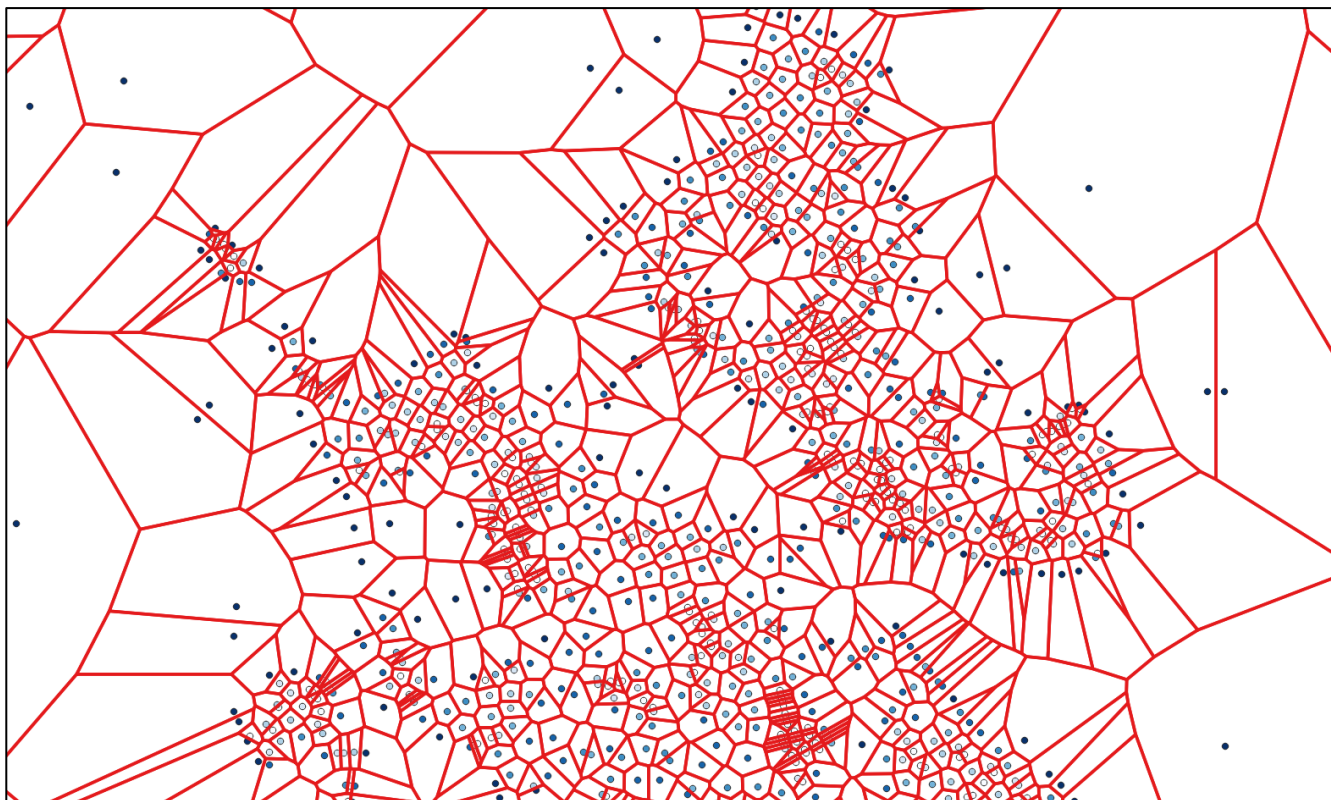


Abbildung 1: Flächendaten eines Gebiets mit Grundstücken innerhalb der Siedlungen und am Siedlungsrand.

Jedoch unterliegt die Bezugsfläche nebst geografischen auch regulatorischen und rechtlichen Überlegungen. Unsere Hauptergebnisse gehen daher davon aus, dass jedes Gebäude die benötigte Umweltwärme nur unter dem eigenen Grundstück sowie angrenzenden öffentlichen Flächen wie Strassen, Spielplätzen oder aus Randgebieten ohne bestehende Bauzonen beziehen können. Eine Nutzung der Erdwärme der angrenzenden, privat bebauten Grundstücke sollte daher, unseren Annahmen gemäss, vermieden werden. Ein Nachbar könnte zu einem späteren Zeitpunkt die Erdwärme in seinem eigenen Grundstück nutzen wollen, wozu er nach den Regeln des Zivilgesetzbuchs berechtigt ist. Es ist zu erwarten, dass entsprechende regulatorische Massnahmen in den nächsten Jahren erlassen werden.

Diese Annahme wirkt sich stark auf das Hauptergebnis aus. Sind die WP-Bodenbezugsflächen auf Grundstücksgrenzen und die anliegenden öffentlichen Flächen begrenzt, wird der Regenerationsbedarf höher ausfallen als bei uneingeschränkter Nutzung. Es ist allerdings zu erwarten, dass solche regulatorischen Massnahmen noch erlassen werden.

Um den Einfluss einer Nutzung weit über individuelle Grundstücksflächen zu quantifizieren, untersuchen wir in einer Sensitivitätsanalyse den Fall, dass jedem Grundstück mit S/W-WP im Jahr 2050 zusätzlich ein zweites, gleich grossen Nachbarsgrundstück zum Wärmebezug zur Verfügung steht.

Damit wird eine Situation simuliert, in der maximal 50 % der Gebäude eine EWS haben würden, und jeweils zwischen benachbarten Grundstücken, ein Grundstück ohne Sonde liegt.

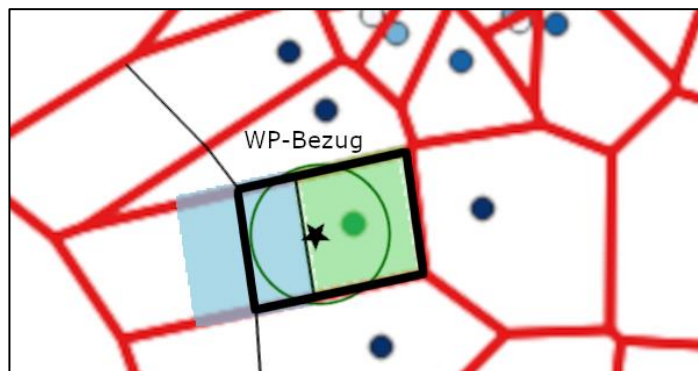


Abbildung 2: Abschätzung der WP-Bodenbezugsfläche am Siedlungsrand. Zur maximal angenommenen Grundstücksfläche und angrenzende öffentlichen Flächen (Strassen etc.) eines «Gebäudepunkts» (grün) wird die Hälfte dieser Fläche vom Siedlungsrand (blau) zur WP-Bezugsfläche hinzu gezählt. Wärmepumpe (Stern) am Grundstückrand mit maximaler Ausdehnung des Wärmebezug / Temperaturtrichters (grüner Kreis).

Weiter sind Überlegungen zum Siedlungsrand notwendig, da dort ungenutzte Wärmereservoirs zur Verfügung stehen. Wir definieren, dass die WP-Bodenbezugsflächen auch diese Randgebiete, auf welchen keine Gebäude stehen, miteinschliessen dürfen. Jedoch werden EWS am Siedlungsrand nur ein gewisses Bodenvolumen nutzen können. Vereinfacht angenommen, entspricht dies bei einer EWS, welche am äussersten Rand eines quadratischen Grundstücks am Siedlungsrand platziert ist, der 1.5-Fachen Grundstücksfläche (Abbildung 2). Würde mehr Fläche ermöglicht, könnte sich der Temperaturtrichter in die Nachbarschaftsgrundstücke ausdehnen. Dies impliziert, dass Flächen weiter ausserhalb des Siedlungsrandes in dieser Analyse nicht genutzt werden können.

Diese Überlegungen bedingen, dass wir die maximale WP-Bodenbezugsfläche begrenzen. Die Begrenzung orientiert sich an typischen Dichten von 0.5 für EFH und 2 für MFH, d.h. dem Verhältnis von EBF zu WP-Bodenbezugsflächen.³ Bei einem EFH mit grosser EBF von 250 m² ergibt sich somit eine Fläche von 500 m². Um die Flächen der Randgebiete mit einzubeziehen, wird angenommen, dass die verfügbare WP-Flächen im Mittel 1.5 mal so gross sind.⁴ Damit ergeben sich die maximalen WP-Bodenbezugsflächen in Tabelle 1 sowie die Dichteverteilung nach Abbildung 3.

Tabelle 1: Begrenzung der WP-Bodenbezugsfläche auf typische Grössen. Die maximal angenommene Fläche errechnet sich aus einer eher grosszügigen WP-Bezugsfläche (inkl. öffentliche Flächen wie Strassen) und dem Siedlungsrandfaktor.

Typ	EBF	Angenommene typische Dichte	WP-Bodenbezugsfläche	Faktor für Siedlungsrand	Maximale WP-Bodenbezugsfläche
EFH	250	0.5	500	1.5	750
MFH	2000	2.0	1000	1.5	1500
DL	-	-	1250	1.5	1875

³ Dies in Analogie zur sogenannten Ausnützungsziffer, d.h. dem Verhältnis von Bruttogeschoss- zu Grundstücksfläche.

⁴ Diese Begrenzung wirkt sich v.a. auf grosse Flächen, die am Rande der Siedlungen existieren aus. Villen mit sehr grossen Grundstücksflächen sind eher die Minderheit im Bestand und bei Neubauten in der Schweiz, und haben mutmasslich einen relativ geringen Einfluss auf das Endergebnis.

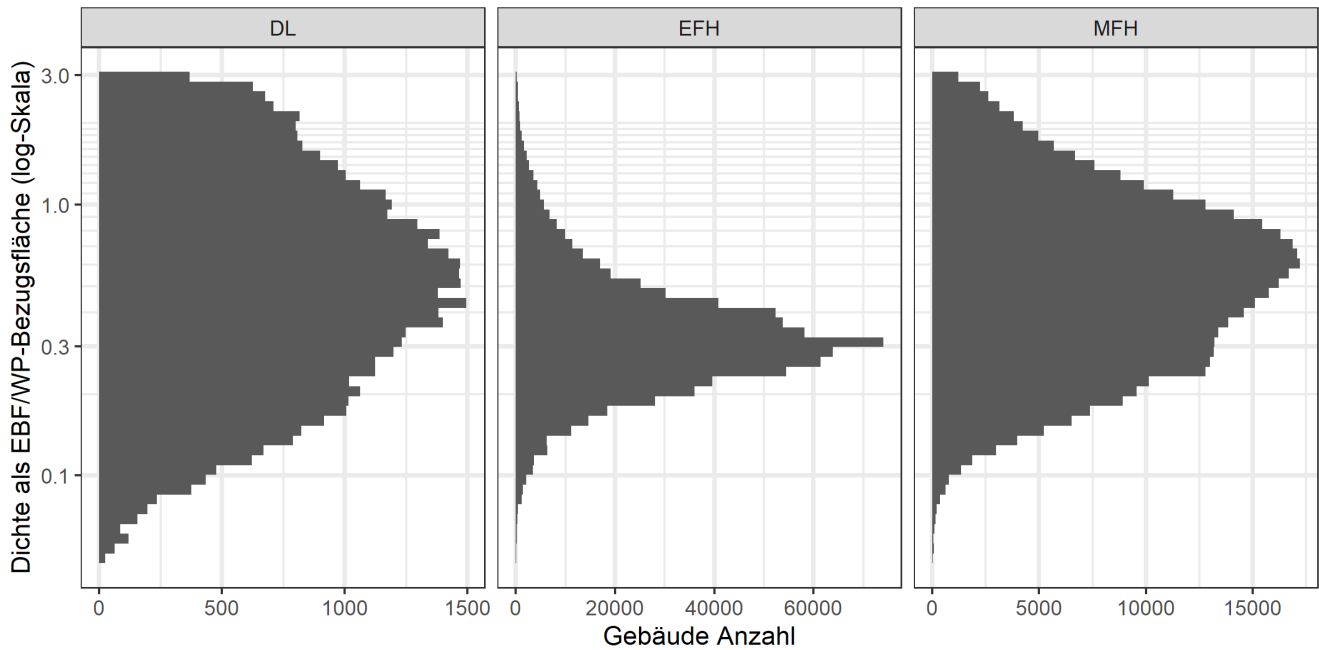


Abbildung 3: Dichteverteilung der Grundstücke in logarithmischer Skala. Diese Dichte ist das Verhältnis von EBF zu WP-Bodenbezugsflächen bei einem Gebäude.

Die erläuterte Methodik zur WP-Bodenbezugsfläche ist vergleichbar mit der Definition der anrechenbaren Grundstücksfläche (GSF_{eff}) in SIA384/6:2021. Bei SIA wird GSF_{eff} bestimmt durch die Summe aus Grundstücksfläche (GSF), der anrechenbaren, nicht nutzbaren Fläche (AFF) sowie der anrechenbaren Strassenfläche (ASF). Analog zum hier vorgestellten Verfahren für den Siedlungsland, unterstellt auch SIA 384/6 die Hälfte der nicht nutzbaren Flächen als anrechenbar.

2.3 Wärmepumpen Potenzial und Diffusion im Jahr 2050

Mit GIS Methoden wurden jene für S/W-WP in Frage kommenden Gebäudeflächen der Schweiz ermittelt. Dabei unterliegt das Potenzial zur Nutzung von EWS rechtlichen Einschränkungen, um die Trinkwasserversorgung nicht zu beeinträchtigen. Analog zu Vorgehen in den EP2050+ werden zur Bestimmung des EWS-Potenzials die Flächen ausserhalb der Grundwassergebiete (vom sog. Typ Au) berücksichtigt. Ausserdem werden Gebiete berücksichtigt, die sich zwar innerhalb dieser Gebiete befinden, die aber aufgrund des Grundwasservorkommens für die Trinkwassergewinnung ungeeignet sind, d.h. eine Mächtigkeit von unter 2 Metern aufweisen (Jakob et al., 2020; Kemmler et al., 2021). Damit beträgt das nutzbare EWS-Potenzial je nach Gebäudetyp zwischen 51 % und 79 % (Tabelle 2). Unsere Analyse des Regenerationsbedarfs bezieht sich somit nur auf die Flächen, die ein Potenzial für EWS, bzw. S/W-WP aufweisen.

Tabelle 2: S/W-WP-Potenziale als Anzahl der Gebäudeflächen. Flächen mit EWS-Potenzial sind der prozentuale Anteil der Gebäudeflächen ausserhalb der Grundwassergebiete bzw. mit geringer Mächtigkeit.

Gebäude-typ	Gebäudeflächen Anzahl		
	Innerhalb von Grundwassergebieten	Ausserhalb von Grundwassergebieten oder geringe Mächtigkeit.	Anteil der Flächen mit EWS-Potenzial
EFH	219,325	804,574	78.6 %
MFH	133,299	408,650	75.4 %
DL	53,509	56,447	51.3 %

Um den Regenerationsbedarf im Jahr 2050 abzuschätzen, wird das ZERO Basis Szenario zur Durchdringung der Wärmepumpen im Jahr 2050 aus den EP2050+ verwendet. Die verwendeten Daten beinhalten Marktanteile an den Heizsystemen und werden hier als grobe Annäherung an die Anteile der WP pro EBF verwendet (Tabelle 3). Um das aggregierte Ergebnis zu erhalten, wurden die EBF mit dem S/W-WP-Potenzial, d.h. der Flächenanteile ausserhalb der Grundwasserschutzgebiete, mit den Szenario-Anteilen gewichtet. Zum Beispiel werden bei MFH 61 % der Flächen ausserhalb der Grundwasserschutzgebiete eine S/W-WP erhalten. Wir unterscheiden dabei zwischen dem Haushalts- und dem Dienstleistungssektor. Von den Berechnungen ausgenommen ist die Landwirtschaft und Industrie, da diese spezielle Wärmebedarfsanforderungen aufweisen.

Tabelle 3: Anteile der S/W-WP im Vergleich zu übrigen Heiztechnologien pro Gebäudetyp und Bauperiode. Die zur Berechnung verwendeten Anteile beziehen sich nur auf die Gebiete mit WP-Potenzial, d.h. auf Gebiete ausserhalb der Grundwasserschutzgebiete.

Gebäudetyp	Bauperiode	Anteile S/W-WP an EBF des Neubaus oder Bestands	Anteile S/W-WP an der Fläche mit EWS-Potenzial
DL	Bestand	20 %	29 %
DL	Neubau ab 2020	29 %	39 %
EFH	Bestand	13 %	16 %
EFH	Neubau ab 2020	22 %	27 %
MFH	Bestand	26 %	35 %
MFH	Neubau ab 2020	48 %	61 %

Tabelle 4 zeigt die Anteile der S/W-WP (ausserhalb der Grundwasserschutzgebiete) als Energiebezugsflächen (EBF) der Wohn- und Dienstleistungsgebäude im Vergleich zur totalen EBF der EP2050+. Um nicht-georeferenzierte Flächen korrekt zu berücksichtigen, wurde eine Kalibration der EBF anhand der Zero Basis Szenario Entwicklung durchgeführt.

Tabelle 4: Aggregierte EBF für die Schweiz im Jahr 2050. Gesamt EBF aller Gebäude im Szenario ZERO Basis sowie EBF mit S/W-WP. Kalibration aufgrund nicht-georeferenzierter Flächen. Zweitwohnungen sind Teil von EFH und MFH.

	Gesamt EBF, ZERO Basis, EP2050+ (Mio. m ²)	EBF mit S/W-WP in 2050 (Mio. m ²)
DL	181.2	37.6
EFH	280.4	33.7
MFH	384.0	122.4
Total	845.6	193.7

2.4 Wärmebedarf

Der Wärmebedarf der Gebäude, welcher mit den Wärmepumpen gedeckt wird, hängt massgeblich von der Bauperiode und dem Sanierungsstandard der Gebäude ab. Diese gehen z.B. mit unterschiedlich stark gedämmten Gebäuden einher, was hier mit den Energiekennzahlen (EKZ) der Gebäude ausgedrückt wird. Beim Bestand bis 2020 sind diese für die Mehrzahl der Gebäude in den Daten vorhanden. Bei lückenhaften Datensätzen sowie Neubauten ab 2020, haben wir die Bauperioden

stochastisch mit einer gegebenen Verteilungsannahme zugewiesen. Mitberücksichtigt wird der Bedarf für Warmwasser unter Annahme, dass insgesamt 40 % der WP auch Warmwasser erwärmen.

Die EKZ basieren auf Modellwerten zu durchschnittlichen EKZ pro Jahr und Bauperiode. Durch diese stochastischen Berechnungen entstehen Unterschiede zwischen verschiedenen Läufen der Berechnung. Daher haben wir die Resultate über 10 Läufe gemittelt; Unterschiede sind kleiner als 5 %.

2.5 Effizienz der Wärmepumpen

Die abgegebene Wärmeenergie einer WP ist die Summe der Umweltwärme und elektrischen Antriebsenergie. Die Anteile von Strom und abgegebener Wärme werden über die Jahresarbeitszahl (JAZ) beschrieben. Somit lässt sich der Anteil Umweltwärme wie folgt bestimmen:

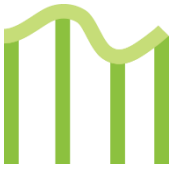
$$\text{JAZ} = \frac{Q_{\text{Wärmeabgabe}}}{E_{\text{Antriebsenergie}}} \mid Q_{\text{Wärmeabgabe}} = E_{\text{Antriebsenergie}} + Q_{\text{Umweltwärme}}$$
$$Q_{\text{Umweltwärme}} = Q_{\text{Wärmeabgabe}} \cdot \left(1 - \frac{1}{\text{JAZ}}\right)$$

Die Jahresarbeitszahl (JAZ) der WP wird mit einer Normalverteilung um den Mittelwert 4.4 und einer Standardabweichung von 0.5 modelliert. Die Annahme des Mittelwerts entspricht den Annahmen im Szenario ZERO Basis der EP2050+ für den Dienstleistungssektor im Jahr 2050. Im Kontext der Regeneration ist wichtig, dass die Regeneration der EWS direkt Quellentemperaturen und daher die JAZ beeinflusst. Diese Wechselwirkung wird hier aber nicht modelliert. Die resultierende Streuung wird hier vereinfacht auf alle Sektoren und Bauperioden angewandt, und berücksichtigt, dass auch WP mit höheren und tieferen JAZ im Einsatz sein werden.

2.6 Datenkalibration

Für diese Zusatzanalyse wird eine Übereinstimmung mit dem Szenario ZERO Basis der EP2050+ angestrebt. Aufgrund einer abweichenden Berechnungsmethodik wurden die Datengrundlagen kalibriert. Dies betrifft die Anteile der S/W-WP Wärmepumpen in den Sektoren, die EBF, die JAZ sowie die EKZ.

Die resultierende Umweltwärme dieser Analyse weicht nach Anwendung der Kalibration noch um ca. 10 % von der angegebenen Umweltwärme in EP2050+ ab. Weiter bestehende Unterschiede lassen sich durch die Vernachlässigung des Industriesektors und die unterschiedliche Repräsentation von Zweit- und Ferienwohnungen erklären (v.a. in Bezug auf die Anteile der WP in den Sektoren).



3 Resultate - Regenerationsbedarf

3.1 Grenzwert von 3 kWh/m²

Resultate in 3.1. beziehen sich auf einen Grenzwert von 3 kWh/m², d.h. der Annahme, dass ein geothermisches Dargebot von bis zu 3 kWh/m² bereitsteht (fortan bezeichnet als GW-3). Dabei soll jedem Gebäude die Möglichkeit offengehalten werden, ausreichend Wärme aus dem eigenen Grundstück und angrenzenden öffentlichen Flächen / Strassen zu beziehen, da die Berechnungen unserer Annahmen gemäss einen Wärmezufuss von Nachbarsgrundstücken ausschliessen.

3.1.1 Betroffene EBF

Das Ergebnis für GW-3 zeigt, dass beinahe bei allen Energiebezugsflächen mit Erdwärmesonden ein Regenerationsbedarf besteht (Abbildung 4). Nur bei einem kleinen Anteil der Haushalte in Gebieten geringer Dichte, wie z.B. am Siedlungsrand, reicht die aus der Umwelt nachfliessende Wärme vollständig aus, um S/W-WP langfristig und nachhaltig zu betreiben (Abbildung 5). Gebäude im Dienstleistungssektor weisen meist eine hohe Dichte auf, d.h. eine hohe EBF auf kleiner WP-Bodenbezugsfläche, womit deren EWS durchwegs regeneriert werden müssen.

Von den EBF mit Regenerationsbedarf müssen jeweils die in Abbildung 6 und Abbildung 7 dargestellten Anteile der bezogenen Wärme regeneriert werden. Steht diese regenerierte Wärme der EWS nicht zur Verfügung, reicht der natürliche Wärmeeintrag aus der Umwelt bei weitem nicht aus, um die Sonden nachhaltig zu versorgen. Zum Beispiel müssten im Dienstleistungssektor die meisten EBF fast vollständig mit regenerierter Wärme versorgt werden, um die meisten Flächen zu beheizen. Bei den Haushalten sind die Ergebnisse differenzierter, d.h. Gebäude aus neueren Bauperioden weisen einen eher geringen Bedarf an Wärme aus Regeneration auf.

3.1.2 Regenerationsbedarf der bezogenen Wärme

Wird der mittlere Regenerationsbedarf pro EBF aus Abbildung 7 mit den betroffenen EBF multipliziert, ergibt sich der jährliche Wärmebedarf, welcher zur regenerieren ist. Abbildung 8 zeigt dies für die Gebäudekategorien und unterschiedlichen Bauperioden. In der Summe pro Bauperiode zeigt sich der Regenerationsbedarf in energetischen Einheiten und pro Gebäudetyp. Über die Schweiz aggregiert, stellen wir einen jährlichen Regenerationsbedarf von 7.1 TWh bei einem Gesamtbedarf von 8.0 TWh Umweltwärme fest.

Tabelle 5: (Grenzwert:3) Summe der jährlich von EWS bezogenen Wärme pro Gebäudetyp und als aggregierte Summe. Wärme in TWh. Bezgl. Vergleich mit EP2050+, siehe Anmerkungen in Kapitel 2.6.

Gebäude-typ	Gesamtwärmebedarf der EWS	Geothermisches Dargebot	Regenerationsbedarf	Anteil zu regenerieren
DL	1.36	0.07	1.29	95.1 %
EFH	1.84	0.28	1.56	84.6 %
MFH	4.77	0.54	4.22	88.6 %
Summe	7.97	0.89	7.08	88.8 %

Quelle: Berechnungen TEP Energy, dieses Projekt

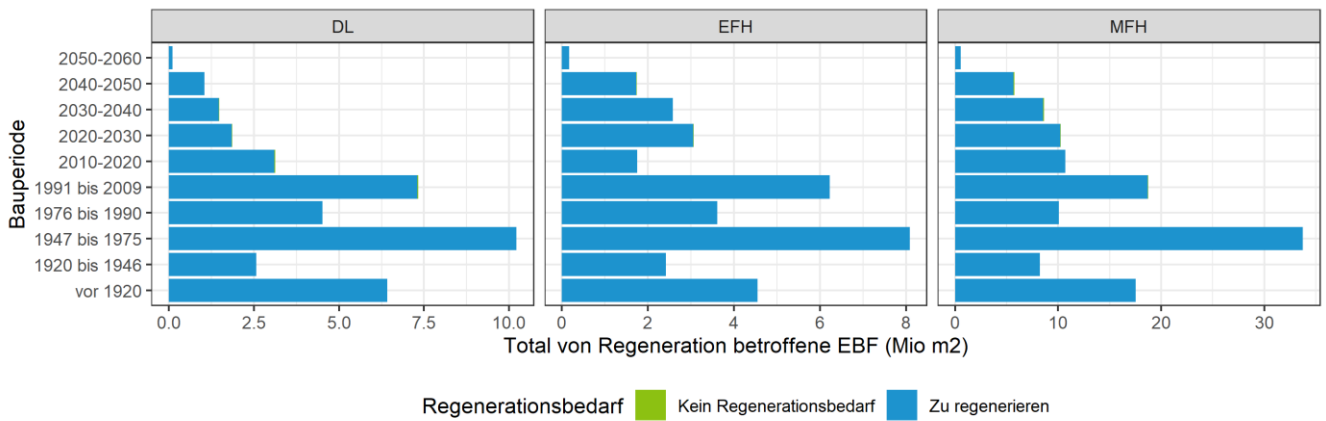


Abbildung 4: (Grenzwert:3) EBF mit EWS bei welchen im Jahr 2050 grundsätzlich regeneriert werden muss (blau) oder auf welchen die zur Verfügung stehende Umweltwärme ausreicht (grün).

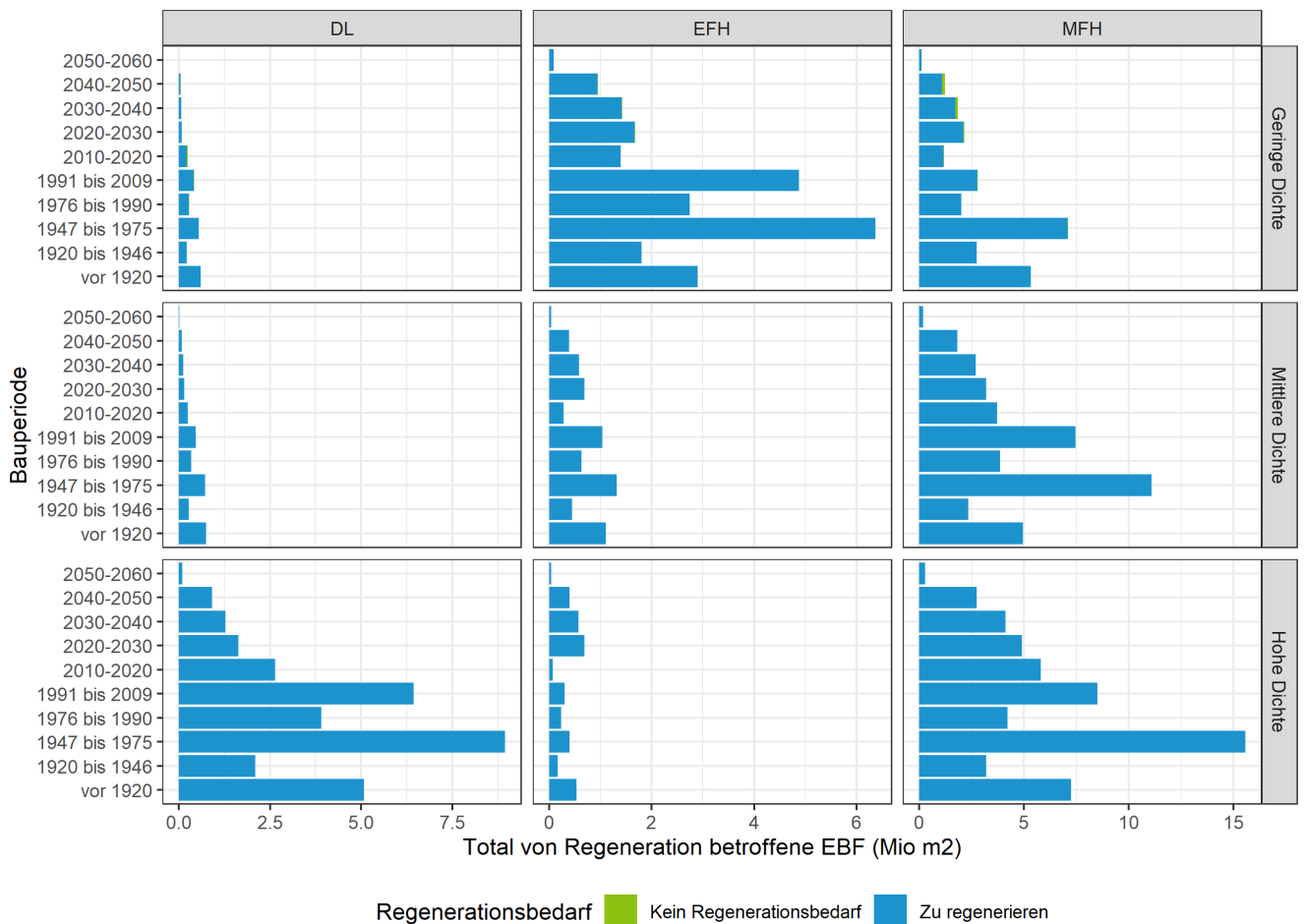
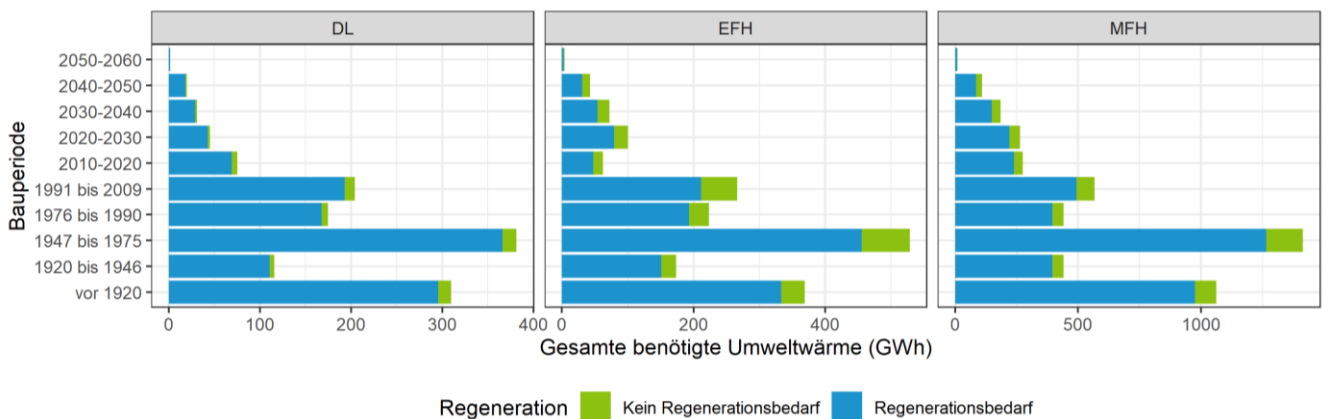
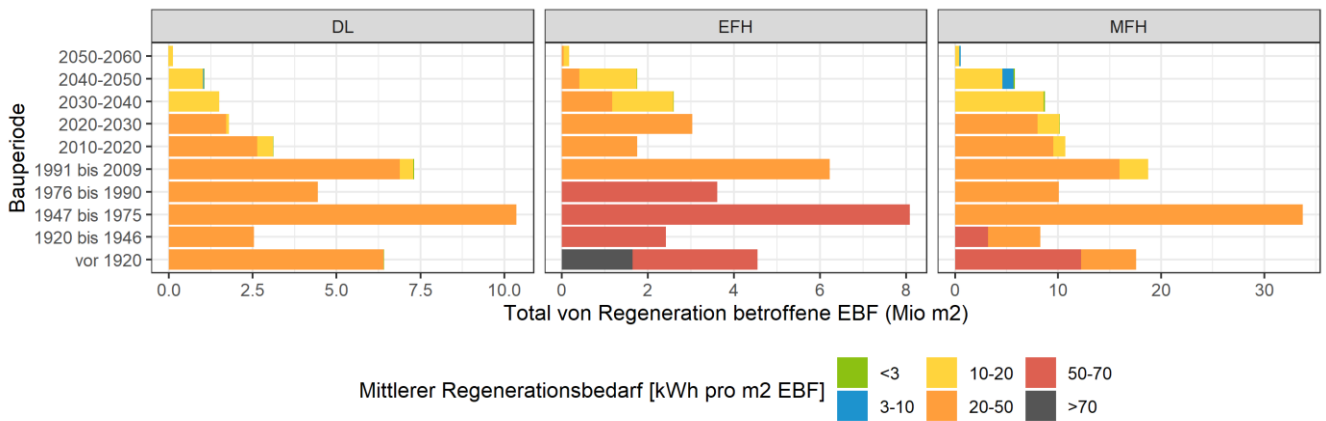
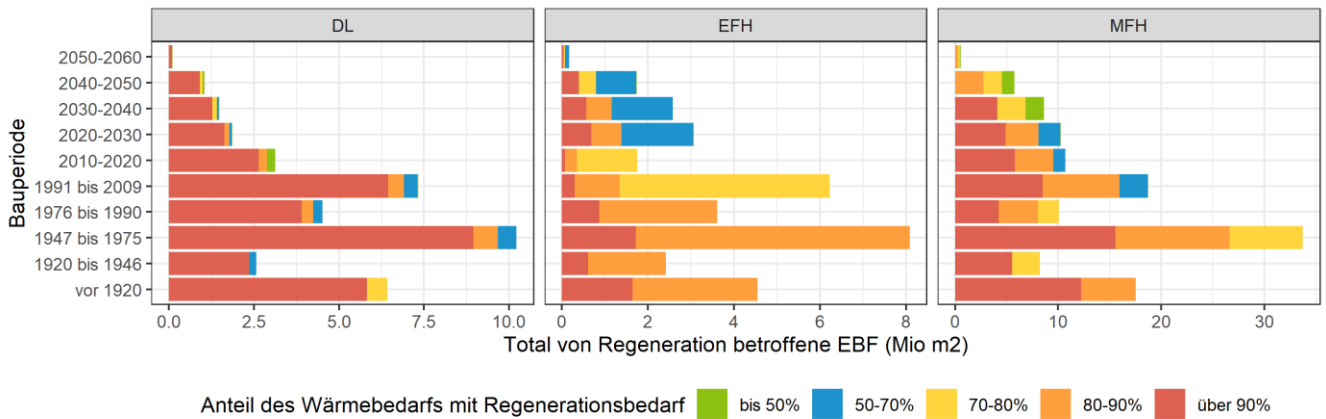


Abbildung 5: (Grenzwert:3) EBF mit EWS, nach Dichten, bei welchen im Jahr 2050 grundsätzlich regeneriert werden muss (blau) oder auf welchen die zur Verfügung stehende Umweltwärme ausreicht (grün). Dichten stellen das Verhältnis der EBF zu den WP-Bodenbezugsflächen dar (geringe <0.5; mittlere 0.5-1; hohe >1).



3.2 Grenzwert von 8 kWh/m²

Unter einem höheren angenommenen Grenzwert, d.h. der hypothetischen Annahme, dass ein geothermisches Dargebot von bis zu 8 kWh/m² bereitsteht (GW-8), verkleinert sich der Anteil zu regenerierender Flächen.

3.2.1 Betroffene EBF

Das Ergebnis mit GW-8 ist vergleichbar mit GW-3, d.h. bei beinahe allen Energiebezugsflächen mit Erdwärmesonden besteht ein Regenerationsbedarf (Abbildung 9). Insbesondere bei Haushalten in Gebieten geringer Dichte, wie z.B. am Siedlungsrand, reicht die aus der Umwelt nachfließende Wärme von bis zu 8 kWh/m² vollständig aus, um S/W-WP langfristig und nachhaltig zu betreiben (Abbildung 10). Gebäude im Dienstleistungssektor weisen meist eine hohe Dichte auf, d.h. eine hohe EBF auf kleiner WP-Bodenbezugsfläche, womit die meisten EWS regeneriert werden müssen.

Von den EBF mit Regenerationsbedarf müssen jeweils die in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellten Anteile der bezogenen Wärme regeneriert werden. Steht diese regenerierte Wärme der EWS nicht zur Verfügung, reicht der natürliche Wärmeeintrag aus der Umwelt bei weitem nicht aus, um die Sonden nachhaltig zu versorgen. Zum Beispiel müssten im Dienstleistungssektor die meisten EBF fast vollständig mit regenerierter Wärme versorgt werden, um die meisten Flächen zu beheizen. Bei den Haushalten sind die Ergebnisse differenzierter, d.h. Gebäude aus neueren Bauperioden weisen einen eher geringen Bedarf an Wärme aus Regeneration auf.

3.2.2 Regenerationsbedarf der bezogenen Wärme

Wird der mittlere Regegenerationsbedarf pro EBF aus Abbildung 7 mit den betroffenen EBF multipliziert, ergibt sich der jährliche Wärmebedarf, welcher zur regenerieren ist. Abbildung 8 zeigt dies für die Gebäudekategorien und unterschiedlichen Bauperioden. In der Summe pro Bauperiode zeigt sich der Regenerationsbedarf in energetischen Einheiten und pro Gebäudetyp. Über die Schweiz aggregiert, stellen wir einen jährlichen Regenerationsbedarf von 5.7 TWh bei einem Gesamtbedarf von 8.0 TWh Umweltwärme fest.

Tabelle 6: (Grenzwert:8) Summe der jährlich von EWS bezogenen Wärme pro Gebäudetyp und als aggregierte Summe. Wärme in TWh. Bei einem Grenzwert von 8 kWh/m².

Gebäude-typ	Gesamtwärmebedarf der EWS	Geothermisches Dargebot	Regenerationsbedarf	Anteil zu regenerieren
DL	1.36	0.16	1.20	88.3 %
EFH	1.84	0.74	1.11	60.1 %
MFH	4.77	1.37	3.39	71.2 %
Summe	7.97	2.27	5.70	71.5 %

Quelle: Berechnungen TEP Energy, im Rahmen des SWEET SURE Projekt

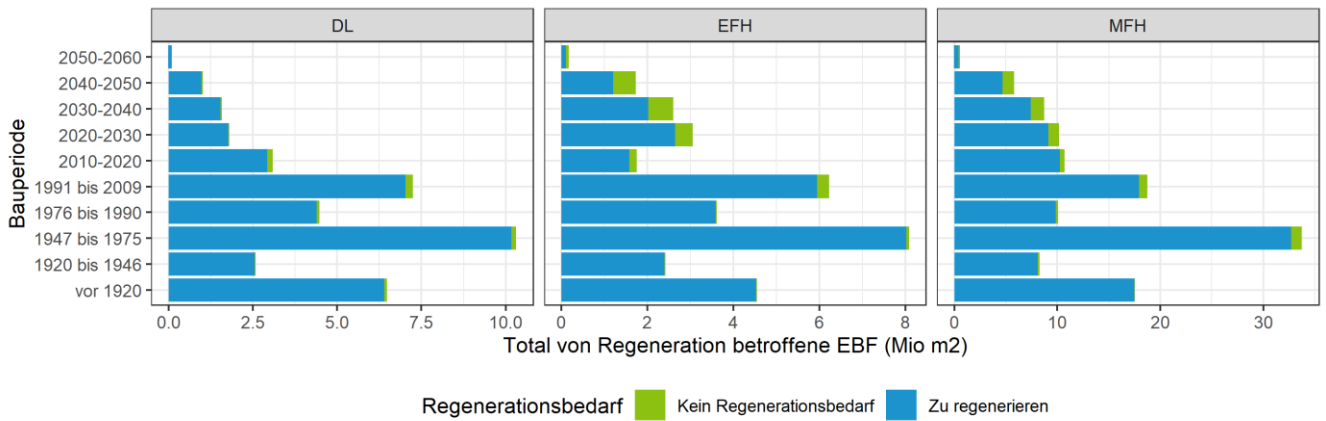


Abbildung 9: (Grenzwert:8) EBF mit EWS bei welchen im Jahr 2050 grundsätzlich regeneriert werden muss (blau) oder auf welchen die zur Verfügung stehende Umweltwärme ausreicht (grün).

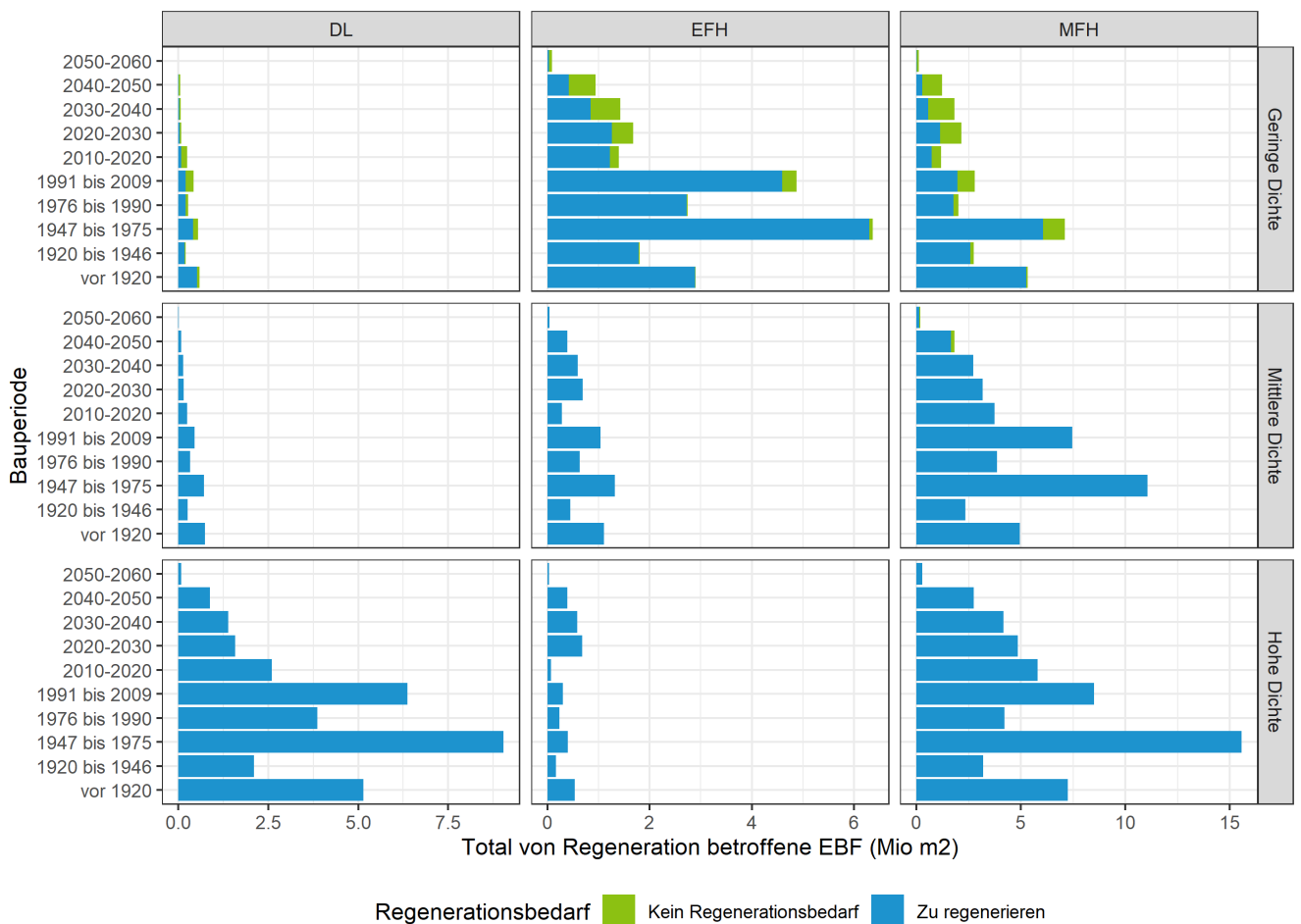


Abbildung 10: (Grenzwert:8) EBF mit EWS, nach Dichten, bei denen im Jahr 2050 grundsätzlich regeneriert werden muss (blau) oder auf welchen die zur Verfügung stehende Umweltwärme ausreicht (grün). Dichten stellen das Verhältnis der EBF zu den WP-Bodenbezugsflächen dar (geringe <0.5; mittlere 0.5-1; hohe >1).

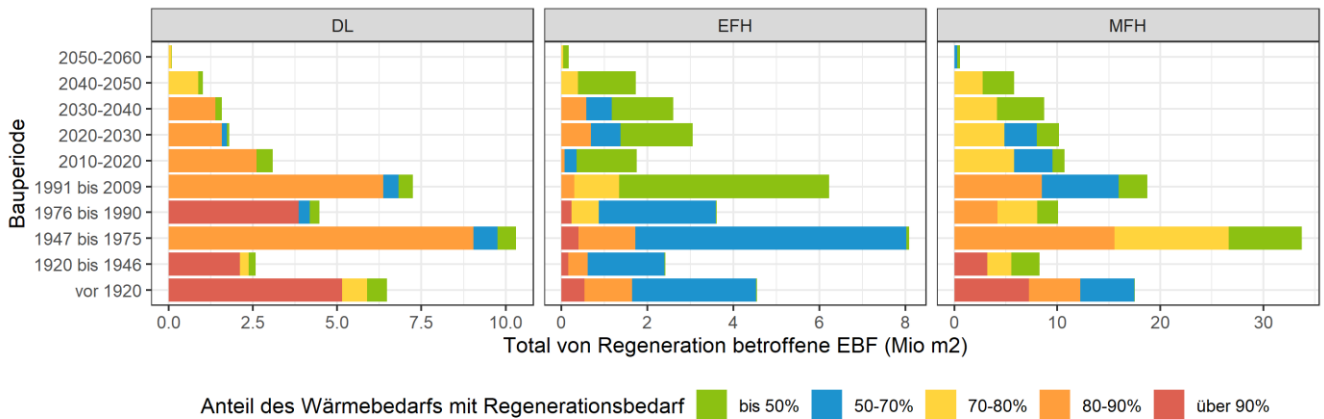


Abbildung 11: (Grenzwert:8) Prozentuale Anteile der EBF mit EWS, die regeneriert werden müssen. Zum Beispiel bedeutet ein Anteil von 85 % (orange) bei EFH vor 1920, dass die EWS bei rund 2 Mio. m² EBF 15 % der Wärme aus nachfließender Umweltwärme und 85 % aus regenerierter Wärme beziehen.

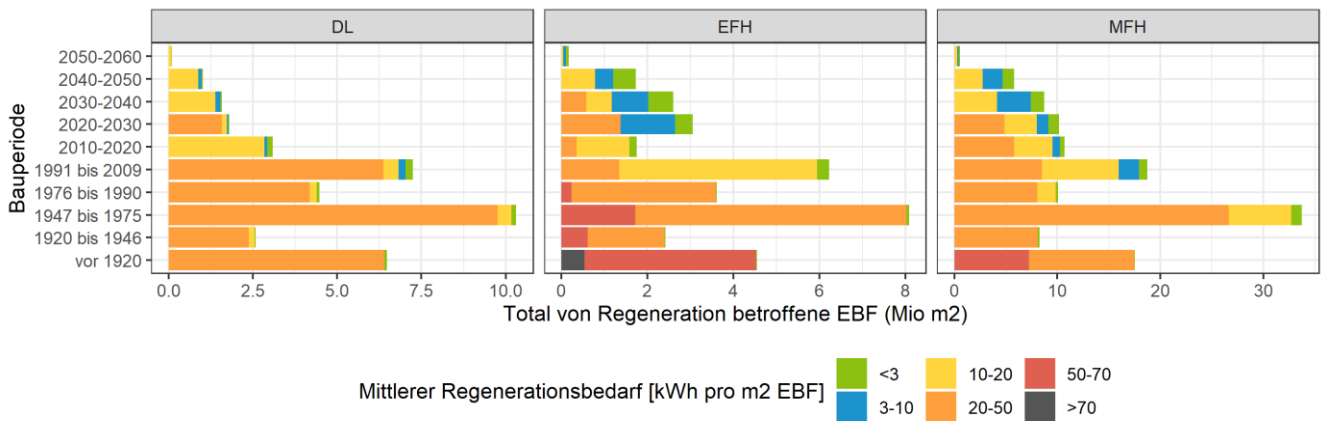


Abbildung 12: (Grenzwert:8) Mittlerer Regenerationsbedarf der EBF mit EWS. Zum Beispiel bedeutet ein mittlerer Bedarf von 60 kWh/m² bei EFH vor 1920, dass 60 kWh pro m² EBF bei rund 5 Mio. Quadratmeter EBF, d.h. rund 300 GWh regeneriert werden müssen, damit diese Flächen beheizt werden können.

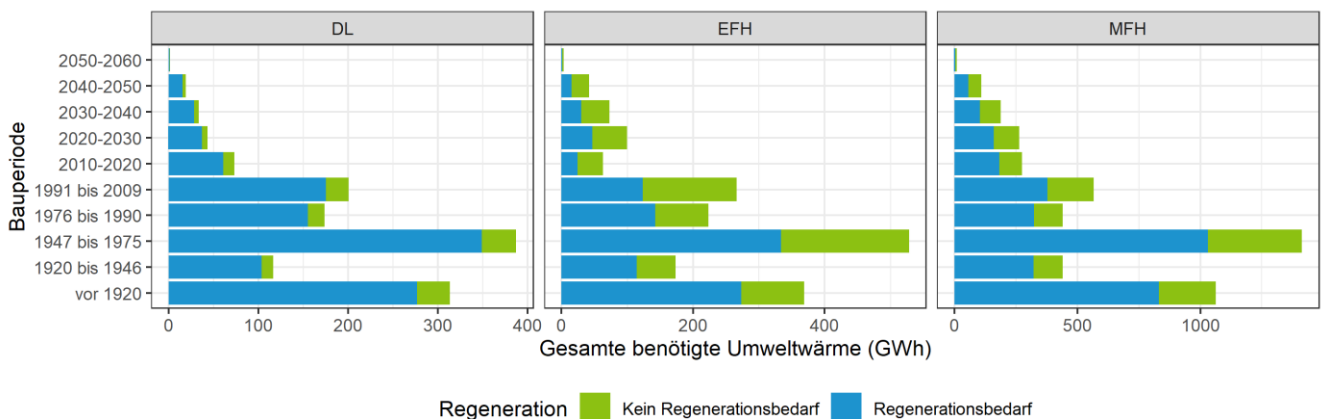


Abbildung 13: (Grenzwert:8) Summe der jährlich von EWS bezogenen Wärme. Die Wärme stammt entweder aus natürlich nachfließender Umweltwärme (grün, kein Reg. bedarf), oder regenerierter Wärme (blau).

3.3 Grenzwert von 33 kWh/m²

Unter einem höheren angenommenen Grenzwert von 33, d.h. der hypothetischen Annahme, dass ein geothermisches Dargebot von bis zu 33 kWh/m² bereitsteht (GW-33), verkleinert sich der Anteil zu regenerierender Flächen.

3.3.1 Betroffene EBF

Das Ergebnis mit GW-33 unterscheidet sich wesentlich von GW-3 und GW-8, d.h. weniger Energiebezugsflächen mit Erdwärmesonden unterstehen einem Regenerationsbedarf (Abbildung 14). Dies bedeutet, dass nur jene Flächen mit dem höchsten Wärmebezug regeneriert werden.

Bei vielen Haushalten in Gebieten mit geringer bis mittlerer Dichte, wie z.B. am Siedlungsrand, reicht die aus der Umwelt nachfliessende Wärme von bis zu 33 kWh/m² vollständig aus, um S/W-WP langfristig und nachhaltig zu betreiben (Abbildung 15). Gebäude im Dienstleistungssektor weisen meist eine hohe Dichte auf, d.h. eine hohe EBF auf kleiner WP-Bodenbezugsfläche, womit trotz hohem Grenzwert die meisten EWS regeneriert werden müssen.

Von den EBF mit Regenerationsbedarf müssen jeweils die in Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellten Anteile der bezogenen Wärme regeneriert werden. Steht diese regenerierte Wärme der EWS nicht zur Verfügung, reicht der natürliche Wärmeeintrag aus der Umwelt bei weitem nicht aus, um die Sonden nachhaltig zu versorgen. Zum Beispiel müssten im Dienstleistungssektor die meisten EBF fast vollständig mit regenerierter Wärme versorgt werden, um die meisten Flächen zu beheizen. Bei den Haushalten sind die Ergebnisse differenzierter, d.h. Gebäude aus neueren Bauperioden weisen einen eher geringen Bedarf an Wärme aus Regeneration auf.

3.3.2 Regenerationsbedarf der bezogenen Wärme

Wird der mittlere Regenerationsbedarf pro EBF aus Abbildung 7 mit den betroffenen EBF multipliziert, ergibt sich der jährliche Wärmebedarf, welcher zur regenerieren ist. Abbildung 8 zeigt dies für die Gebäudekategorien und unterschiedlichen Bauperioden. In der Summe pro Bauperiode zeigt sich der Regenerationsbedarf in energetischen Einheiten und pro Gebäudetyp. Über die Schweiz aggregiert, stellen wir einen jährlichen Regenerationsbedarf von 2.4 TWh bei einem Gesamtbedarf von 8.0 TWh Umweltwärme fest.

Tabelle 7: (Grenzwert:33) Summe der jährlich von EWS bezogenen Wärme pro Gebäudetyp und als aggregierte Summe. Wärme in TWh. Bei einem Grenzwert von 8 kWh/m².

Gebäude-typ	Gesamtwärmebedarf der EWS	Geothermisches Dargebot	Regenerationsbedarf	Anteil zu regenerieren
DL	1.36	0.44	0.92	67.5 %
EFH	1.84	1.66	0.18	9.7 %
MFH	4.77	3.52	1.25	26.2 %
Summe	7.97	5.63	2.35	29.4 %

Quelle: Berechnungen TEP Energy, im Rahmen des SWEET SURE Projekt

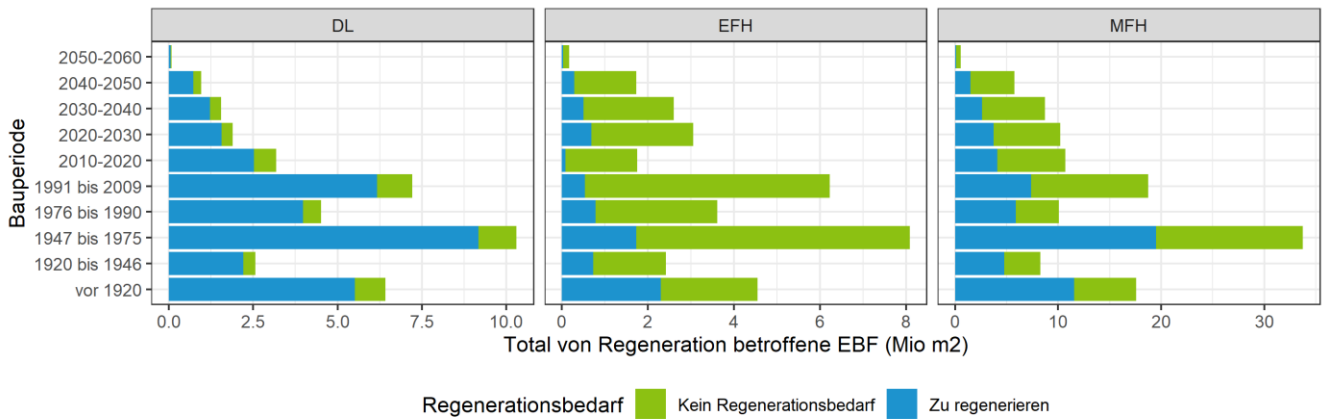


Abbildung 14: (Grenzwert:33) EBF mit EWS bei welcher im Jahr 2050 grundsätzlich regeneriert werden muss (blau) oder auf welchen die zur Verfügung stehende Umweltwärme ausreicht (grün).

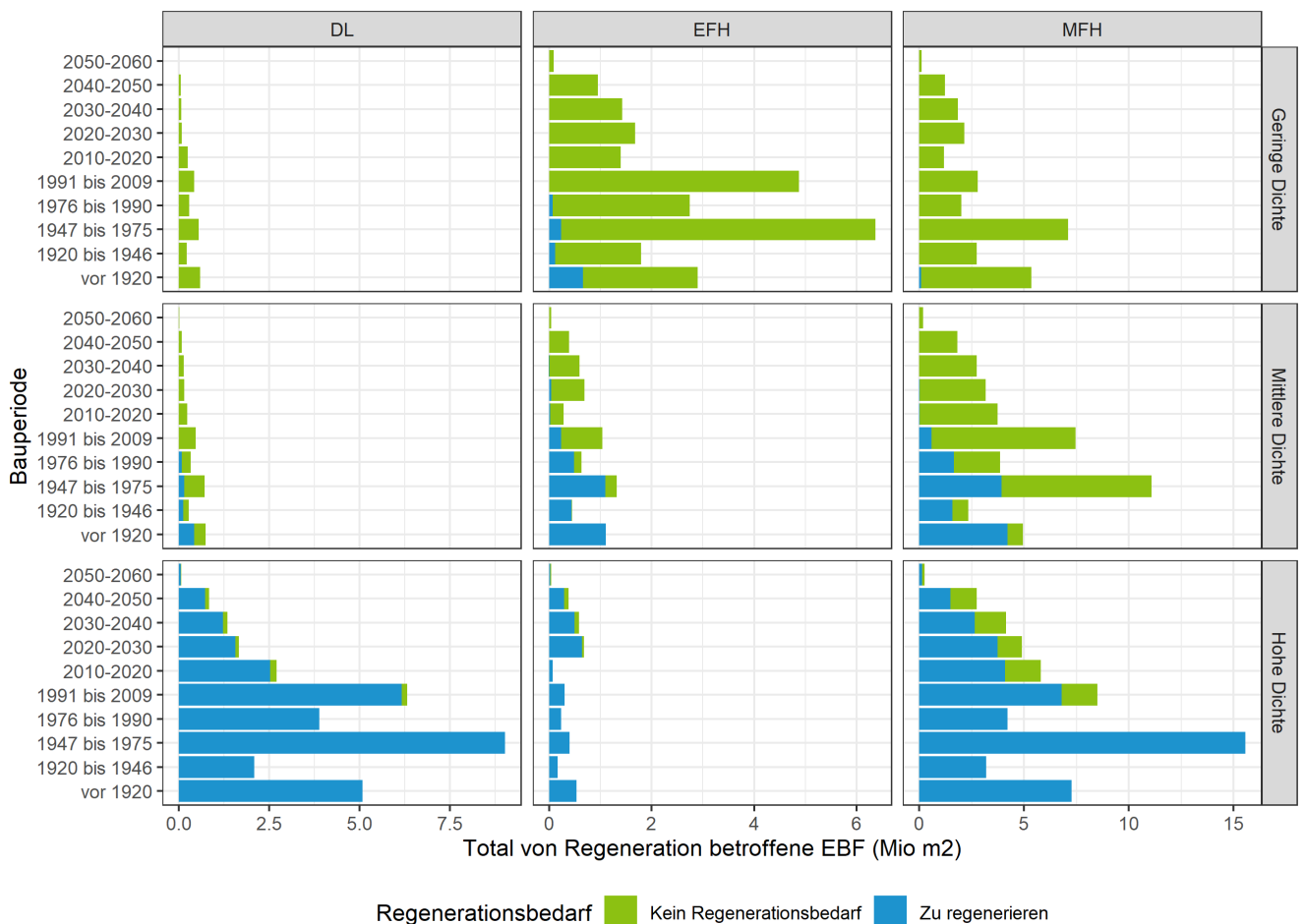


Abbildung 15: (Grenzwert:33) EBF mit EWS, nach Dichten, bei denen im Jahr 2050 grundsätzlich regeneriert werden muss (blau) oder auf welchen die zur Verfügung stehende Umweltwärme ausreicht (grün). Dichten stellen das Verhältnis der EBF zu den WP-Bodenbezugsflächen dar (geringe <0.5; mittlere 0.5-1; hohe >1).

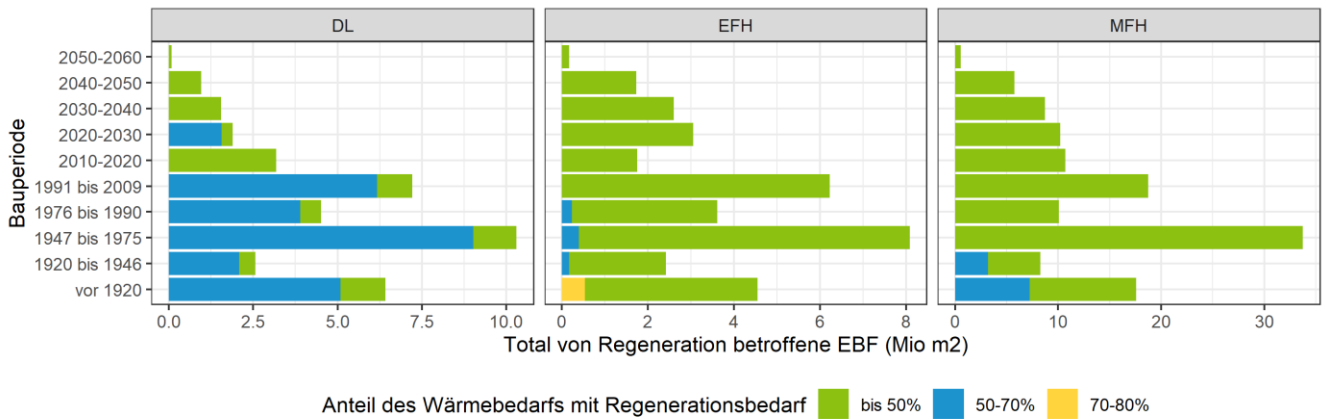


Abbildung 16: (Grenzwert:33) Prozentuale Anteile der EBF mit EWS, die regeneriert werden müssen. Zum Beispiel bedeutet ein Anteil von 85 % (orange) bei EFH vor 1920, dass die EWS bei rund 2 Mio. m² EBF 15 % der Wärme aus nachfließender Umweltwärme und 85 % aus regenerierter Wärme beziehen.

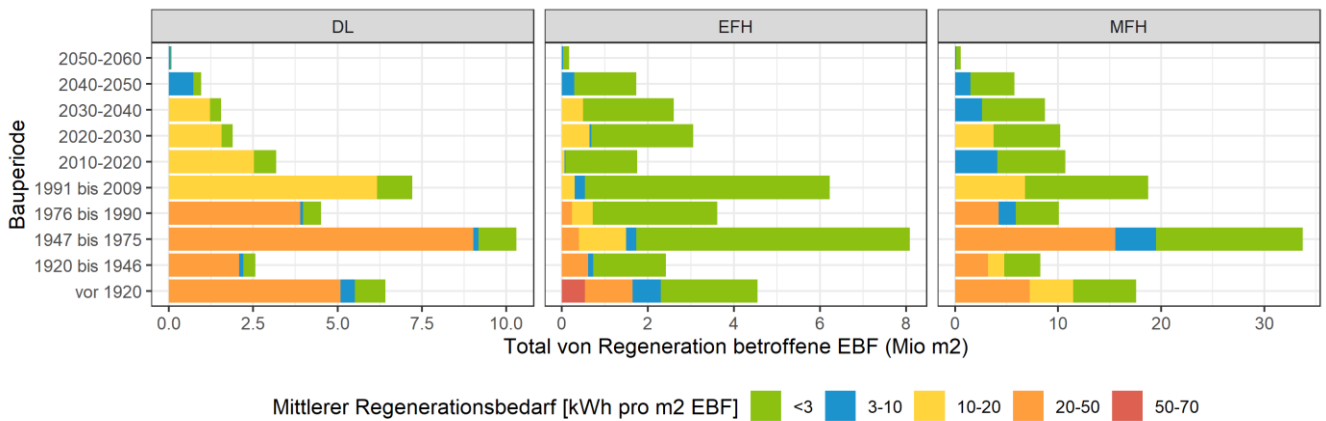


Abbildung 17: (Grenzwert:33) Mittlerer Regenerationsbedarf der EBF mit EWS. Zum Beispiel bedeutet ein mittlerer Bedarf von 60 kWh/m² bei EFH vor 1920, dass 60 kWh pro m² EBF bei rund 5 Mio. Quadratmeter EBF, d.h. rund 300 GWh regeneriert werden müssen, damit diese Flächen beheizt werden können.

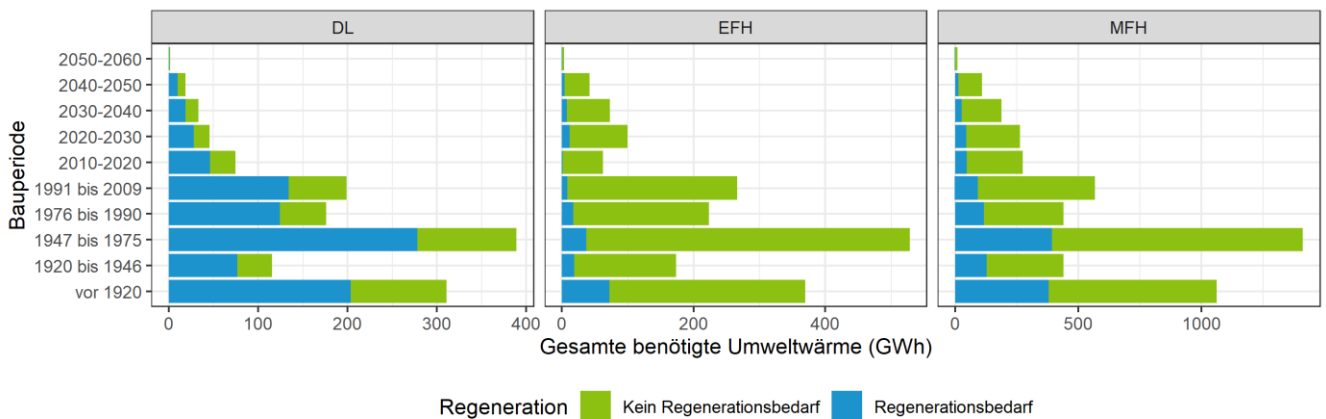


Abbildung 18: (Grenzwert:33) Summe der jährlich von EWS bezogenen Wärme. Die Wärme stammt entweder aus natürlich nachfließender Umweltwärme (grün, kein Regenerationsbedarf), oder regenerierter Wärme (blau).

3.4 Sensitivitätsanalysen (GW-3)

Um eine differenzierte Betrachtung zu ermöglichen, stehen die Ergebnisse mit 3 kWh/m² mit Variation einiger zentraler Parameter zur Verfügung. Ein kurzer Vergleich erfolgt auf Ebene der gesamten Umweltwärme, welche im Hauptergebnis ein Regenerationsbedarf von 84 % aufweist. Insgesamt halten wir die gewählten Parameter im Hauptergebnis für eine umfassende Betrachtung, des maximalen Regenerationsbedarfs beim betrachteten WP-Diffusion Szenarios. Die Variation folgender Parameter hat die nachfolgenden beschriebenen Auswirkungen:

- **Verdoppelung der WP-Bodenbezugsflächen** (siehe auch Kapitel 2.2). Durch Berücksichtigung benachbarter privater Grundstücke verringert sich der Regenerationsbedarf auf 69 % der bezogenen Wärme. Jedoch wird damit im Schnitt jedem zweiten Grundstück die Möglichkeit genommen, eine eigene EWS zu betreiben.
- **Flächenbegrenzung am Siedlungsrand** (siehe auch Kapitel 2.2). Durch die Annahme von mehr Siedlungsrand (Siedlungsrand-Faktor 2) bzw. keinem Siedlungsrand (Faktor 1), steht entweder mehr oder weniger WP-Bodenbezugsfläche zur Verfügung. Bei mehr Siedlungsrand muss nur noch 81 % der bezogenen Wärme regeneriert werden, bei weniger Siedlungsrand hingegen 88 %.
- **Höhere JAZ von 5.4** (siehe auch Kapitel 2.5). Dies führt zu höherem Umweltwärmebedarf von 5.93 TWh. Der relative Anteil, welcher zu regenerieren ist, steigt sehr leicht an von 84 % auf 85 %.

3.5 Regenerationsbedarf bei Fernwärmenetzen

Gesondert zu betrachten ist der Regenerationsbedarf für thermische Netze, die Erdsondenfelder nutzen. Im Szenario ZERO-Basis nutzen im Jahr 2050 rund 12 % der Fernwärmenetze solche Felder. Dabei werden 5.8 PJ Endenergie aus einer mittleren Tiefe bezogen. Ein Teil dieser Wärme müsste unter Umständen regeneriert werden. Der zu regenerierende Anteil ist dabei massgeblich von Grösse, der räumlichen Verteilung und dem Energiebezug der Fernwärmenetze abhängig. Der genaue Bedarf muss im Einzelfall oder mittels GIS-Analysen auf Grundlage der geplanten Areale mit Fernwärme und Erdsondenfeldern geprüft werden.



4 Regenerationsansätze

Im Rahmen der EP2050+ erfolgte bereits eine erste Abschätzung des Regenerationspotentials (Prognos et al., 2021). Dabei wurde das maximal nutzbare Potenzial der Regeneration mittels Solarthermieanlagen ausserhalb der Grundwassergebiete auf ca. 45 TWh pro Jahr geschätzt (Prognos et al., 2021). Das maximale Regenerationspotenzial von Geocooling wurde auf rund 4.4 TWh geschätzt. Berechnungsbasis hierfür ist der modellierte Kältebedarf derjenigen Gebäude, die mit Erdwärmesonden ausgerüstet werden können, sowie eine räumliche Analyse mithilfe der Solardaten von sonnen-dach.ch.

In Anbetracht der eingeschränkten Kälteleistung von Geocooling und weiterer Randbedingungen bei der Solarthermie, ist es fraglich, ob das maximale Potenzial solcher Optionen ausgeschöpft werden kann. Daher führen wir die Einschätzungen aus den EP2050+ in der vorliegenden Zusatzanalyse weiter. Insbesondere ordnen wir den in Kapitel 3 errechneten Regenerationsbedarf mittels einer gebäudescharfen Analyse sowie Abschätzungen auf der aggregierten Ebene möglichen Regenerationsansätzen zu.

Der Regenerationsbedarf, welchen wir in Kapitel 3 berechnet haben, kann über verschiedene Regenerationsansätze gedeckt werden. Kapitel 4.1 gibt eine Übersicht möglicher Ansätze und vermittelt die bestehenden Grundlagen. In Kapitel 4.2 führen wir Berechnungsmethodik und dazugehörigen Annahmen ein. Das nächste Kapitel 5 zeigt die Resultate für verschiedene Grenzwerte.

4.1 Regenerationsansätze

Zum einen muss unterschieden werden zwischen der Entlastung der EWS, und daher einem kleineren Wärmebezug, sowie der Regeneration des Erdreichs (suissetec, 2020). Laut suissetec wird ersteres insbesondere durch eine bessere Dämmung der Fenster oder Gebäudehülle, den Einsatz von Kollektoren zur Warmwassererwärmung (d.h. der Entlastung der WP), L/W-WP (statt S/W-WP) oder zusätzlichen und längeren EWS erreicht. Diese Optionen zum Verringern des Wärmebezugs werden wir hier nicht vorrangig betrachten, sie könnten jedoch eine Alternative darstellen, falls eine Regeneration über andere Optionen nicht möglich ist.

Laut suissetec stehen zur Regeneration der EWS mehrere Optionen zur Verfügung. Geläufig sind Geo(free)cooling, Sonnenkollektoren, oder Luftaustausch über Rückkühler/Aussenluftwärmepumpen. Weniger geeignet und verboten ist die Regeneration über eine Elektroheizung. Die direkte Nutzung des Überschusses einer Photovoltaikanlage (PV-Anlage) sei auch nicht sinnvoll, jedoch könne damit eine Wärmepumpe betrieben werden, um damit die EWS zu regenerieren (Ruesch, Füglistler, Haller, Sommer, & Zakovorotnyi, 2022). Des Weiteren ist die Regeneration über Abwärme denkbar, wobei das Potenzial und die Auslegung sehr objektspezifisch sind (Persdorf, Ruesch, & Haller, 2015).

Diese Zusatzanalyse ergänzt frühere Arbeiten. So wurden für den Fall der Stadt Zürich sechs verschiedene aktive Regenerationsoptionen simuliert und verglichen (Persdorf et al., 2015). Dies beinhaltet vier Solarthermievarianten, Geocooling sowie direkten Luft-Wärmetausch. Ausserdem wurden in den

EP2050+ erste Abschätzungen zum Potenzial von Freecooling und Solarthermie getroffen (Prognos et al., 2021). Jedoch fehlt eine schweizweite Übersichtsanalyse, welche auf dem hier identifizierten Regenerationsbedarf beruht.

4.1.1 Geocooling – Kühlung über die EWS und Fussbodenheizung

Mittels Geocooling wird die überschüssige Raumwärme "über einen Wärmeüberträger [...] direkt in die Erdwärmesonden geleitet" (Persdorf et al., 2015), wobei sich insbesondere WP-Systeme mit Fussboden- oder Flächenheizung für diesen Ansatz eignen. Für Geocooling «wird die kühlere Temperatur im Erdreich verwendet, um ohne Kältemaschine respektive Stromaufwand das Gebäude zu kühlen» (Kobler, 2016). Dabei ist Geo-Cooling eine Form des Free-Coolings, also der Kühlung ohne Kältemaschine, bei der dem Erdreich Wärme zugeführt wird (Rohrer, König, & Tillenkamp, 2018). Einzuzuplanende Aufwände sind der Einsatz von Umwälzpumpen, Wärmetauschern und zusätzlichen Ventilen.

Diese Option eignet sich für Gebäude mit S/W-WP Potential, sowie solche mit Flächenheizungen (am Boden, der Wand oder als Kühldecke). Damit wird diese Option vorwiegend in Neubauten bzw. sanierten Gebäuden des Bestandes Einsatz finden. Im Gegensatz dazu ist die Kühlleistung mit Radiatoren zu gering, und es können eher Probleme mit Kondensation auftreten. Um keine Kondensation zu ermöglichen, dürfen Flächenheizungen mit Geocooling keine Oberflächentemperaturen von unter 20 Grad aufweisen. Weiter zu beachten ist, dass die Kühlleistung der passiven Kühlung über die Fussbodenverteilung (oder andere Flächenverteilungen) relativ gering ausfallen kann, und auch vom Temperaturunterschied zwischen Fussboden und Raumtemperatur abhängt.

4.1.2 Solarthermie – Wärme- und Regenerationsbedarf decken

Eine Solarthermie-Anlage kann nebst der Nutzung zur Trinkwasserbereitung auch für die Regeneration verwendet werden. Dabei sind vier verschiedene Kollektor- und Absorbertypen denkbar (Persdorf et al., 2015). Die Optionen Geocooling und Solarthermie ergänzen sich, «weil sich Solaranwendungen auf eher dezentrale Strukturen und Wohngebäude fokussieren und Geo-Cooling gerade auch in Nicht-Wohngebäuden zur Anwendung kommen. [Es gibt] jedoch durchaus eine gewisse Komplementarität zwischen den beiden Regenerationsarten» (Prognos et al., 2021).

Für Solarthermie unterstellt das Szenario ZERO Basis aus EP2050+ einen Anstieg der Solarthermieanlagen. Dabei wird im Jahr 2060 «bei rund 14 % der Wohnungen das Warmwasser teilweise mit Solarthermieanlagen erzeugt» (Prognos et al., 2021). Die Szenarien Ergebnisse berichten dabei einen Endenergieverbrauch, welcher durch Solarthermie bereitgestellt wird von insgesamt 5.6 PJ in den privaten Haushalten und 2.9 PJ in Dienstleistungsgebäuden (aller Sektoren). Auf den Anteil der Gebäude mit S/W-WP (25 %) umgerechnet, ergibt sich ein Endenergieverbrauch von rund 390 GWh in Haushalten und 201 GWh in Dienstleistungen. Laut EP2050+ kann «ein Teil der Solarwärme [...] zur Regeneration der Wärme des Erdreichs genutzt werden».

Der resultierende Regenerationsgrad ist abhängig von der Dimensionierung und dem solaren Deckungsgrad (Persdorf et al., 2015). Lösungen mit Solarthermie sind erst sinnvoll ab einer Kollektorfläche von 15 m² (suissetec, 2020). Da je nach solarem Deckungsgrad und Einstrahlung mit mehr oder weniger Überschüssen zu rechnen, die zur Regeneration verwendet werden können, könnten Gebäudeeigentümer eine Überdimensionierung der Anlage in Betracht ziehen.

Es kann «eine Nutzungskonkurrenz um die Dachflächen für die Erzeugung von PV-Strom bestehen. Der Vorteil der PV-Erzeugung ist einerseits die Netzanbindung [...], zum anderen kann der PV-Strom nicht nur für die Erzeugung von Wärme, sondern auch für andere Anwendungen genutzt werden.»

(Prognos et al., 2021). In EP2050+ ist ein wesentlicher Teil der Dachflächen bereits für Photovoltaik vorgesehen. So beträgt im Szenario ZERO Basis der bis zum Jahr 2050 realisierte PV-Ausbau rund 34 TWh. Laut Solarkataster beträgt das maximale Potenzial für PV (Für Dach- und Fassadenflächen) 67 TWh. Somit stünde für die grössere Dimensionierung von Solarthermie-Anlagen weitere Fläche zur Verfügung.

4.1.3 Luftwärmetausch

Über einen Luft-Wärmetauscher, welcher in den WP-Kreislauf integriert ist, wird im Sommer das Erdreich regeneriert. Dabei ist eine Auslegung denkbar, welche bei einer Aussentemperatur von 25 °C ein Kältefluid von 10 °C auf 15 °C erwärmt (Persdorf et al., 2015). Dabei kann ein Rückkühler in der Gröszenordnung der WP gewählt werden.

4.1.4 Weitere Optionen

Einige Optionen befinden sich im Forschungsstadium. So bestünde bei Neubauten die Möglichkeit, durch aktives Kühlen die EWS zu regenerieren (Ruesch et al., 2022). Dazu müssten passive Wärmeschutzmassnahmen reduziert und WP oder Kühlgeräte für die Kühlung eingesetzt werden. Dabei wird eine potenzielle Überproduktion von Solarstrom ausgenutzt (Prognos et al., 2021; Ruesch et al., 2022). Was zu klären ist, ist die Akzeptanz solcher Optionen.

4.2 Berechnungsmethodik

Da sich die bestehenden Potenzialwerte der EP2050+ zu Geocooling und Solarthermie teilweise überlappen, können diese Werte nicht «eins zu eins addiert werden» (Prognos et al., 2021). Im Rahmen dieser Zusatzanalyse wenden wir daher eine hierarchische Vorgehensweise an, um die Wirkung mehrerer Regenerationsoptionen gleichzeitig zu betrachten, d.h., den Regenerationsoptionen wird eine Reihenfolge unterstellt. Wir nehmen an, dass erst das Potential von Geocooling ausgenutzt bevor weitere Optionen wie Solarthermie in Betracht gezogen werden.

Wir berücksichtigen verschiedene Randbedingungen und Einschränkungen zur Nutzung der Regenerationsansätze. So ist das Regenerationspotenzial von Geocooling abhängig von der Kälteleistung von Flächenheizungen. Bei Solarthermie müssen Faktoren wie die solare Ausnützung und die Dimensionierung, und bei Luft-Wärmetauscher die Lärmschutzgesetze berücksichtigt werden.

Das generelle Ziel der Regeneration ist es den Regenerationsgrad zu steigern. Dieser beschreibt das Verhältnis zwischen Regenerationsenergie und Entzugsenergie (pro Jahr), d.h. ist der Regenerationsgrad grösser als 100 %, überwiegt die Regenerationsenergie. Bisherige Studien zeigen, dass dieser je nach angewandter Regenerationsoption zwischen 10 % und 110 % liegen kann (Kriesi, 2017; Persdorf et al., 2015; Ruesch et al., 2022; suissetec, 2020). Persdorf et al (2015) finden, dass bereits eine Teilregeneration sinnvoll sei. Eine vollständige Regeneration ist nur in seltenen Fällen sinnvoll.

Im Folgenden wird für jede Option der spezifische Berechnungsansatz weiter erläutert.

4.2.1 Priorität 1: Regeneration über Geocooling

In erster Priorität weisen wir den Gebäuden den Regenerationsansatz Geocooling zu. Zur Berechnung der Potenziale stützen wir uns auf den Anteil der gekühlten Flächen in den EP2050+ sowie Einschätzungen zur spezifischen Kühlleistung.

Die Anteile der Gebäude im Jahr 2050, welche über Geocooling gekühlt werden, und somit einen Teil der EWS regenerieren können, kann mittels der Angaben in EP2050+ grob eingeschätzt werden. Da sich jedoch ein gewisser Interpretationsspielraum zum Anteil des Geocooling in den EP2050+ ergibt, analysieren wir hier 3 Ausprägungen: (1) Alle, (2) zwei Drittel oder (3) ein Drittel der Gebäude mit EWS im Jahr 2050 regenerieren die EWS zumindest teilweise per Geocooling.

Diese Abschätzung und Parametervariation stützt sich auf die Annahme, dass in 2050 «mit dem Anstieg der Sommertemperaturen die Nachfrage nach klimatisierter Wohnfläche deutlich zu [nimmt]. [...] Zudem werden in den Szenarien ZERO Basis und ZERO A mehr Wärmepumpen für die Kühlung eingesetzt als im Szenario WWB.» (Prognos et al., 2021).

Die EP2050+ unterscheiden die klimatisierten Flächen zwischen Wohngebäuden und verschiedenen Dienstleistungssektoren. Bei Wohnflächen wird davon ausgegangen, dass bis im Jahr 2050 ca. 32 % der EBF aller Wohnflächen gekühlt sein werden (in Prognos et al. (2021), Tabelle 52). Von diesen wird der Kühlbedarf bei rund einem Drittel über Wärmepumpen gedeckt. Bei Dienstleistungsgebäuden wird von rund 50-90 % klimatisierten Flächen ausgegangen (in Prognos et al. (2021), Tabelle 54)⁵. Dabei könnte (im Schnitt über alle Sektoren) rund die Hälfte dieser Flächen über Freecooling Optionen wie direkten Luftaustausch oder über das Kaltwassernetz von Kältemaschinen und Wärmepumpen gekühlt werden (in Prognos et al. (2021), Tabelle 55). Bei letzterem ergibt sich das Potenzial zur Nutzung der Erdwärme, wobei auch ohne Betrieb der Wärmepumpe ein Teil der Wärme abgeführt werden kann.

Wir implementieren die drei Annahmen (100 %, 67 %, 33 % der Gebäude mit EWS gekühlt) mittels einer zufälligen Zuteilung von Kühlung zu den Gebäudedaten (siehe Kapitel 2). Dabei treffen wir die vereinfachte Annahme, dass Gebäude entweder vollständig oder nicht gekühlt werden. Zur Abschätzung der jährlichen Energie, die über Geocooling bereitgestellt werden kann, unterscheiden wir zwischen Haushalten und Dienstleistungsgebäuden, da bei Letzteren ein wesentlich höherer spezifischer Kühlbedarf zu erwarten ist.

Bei Haushalten orientieren wir uns an Erfahrungswerten zur Leistungsfähigkeit von Fussbodenheizungen (sowohl im aktiven wie im passiven Betrieb). Suissetec schätzt, dass eine Fussbodenheizung (mit EWS) im Mittel eine Kühlleistung von ca. 7 W/m²K bewirken kann. «Erfahrungsgemäss kann [mit einer EWS und Fussbodenheizung [...] eine Raumtemperaturabsenkung von 3 bis maximal 4 Kelvin erreicht werden» (suissetec, 2021).

Zur Kühlung der Räume gehen wir von einer jährlichen Laufzeit der passiven Kühlung von 200 Stunden⁶ aus, sowie einem angestrebten Temperaturunterschied von 4 Kelvin aus. Somit ergibt sich ein Energiebedarf von 5,6 kWh pro Quadratmeter EBF und Jahr, welchen die Fussboden-/Flächenheizung maximal decken kann. Nach SIA2024 reicht diese Leistung aus, um Wohnräume oder Einzelbüros zu kühlen, jedoch nicht Grossraumbüros, Hörsäle und andere Dienstleistungsräume.

Schliesslich muss eine Unterscheidung zwischen Gebäuden mit Radiatoren und jenen mit Flächenheizungen getroffen werden. Für die sommerliche Kühlung mittels WP und die Regeneration eignen sich vor allem Flächenheizungen. Wie nehmen an, dass bei allen analysierten Gebäuden, welche mit S/W-WP ausgestattet sind, ein passendes Verteilsystem zur Verfügung steht, wie z.B. Fussbodenheizung oder Plattenheizkörper, welche statt Konvektion vor allem Strahlung als Heizprinzip verwenden. Bei Bestandbauten bedingt dies möglicherweise einen Ersatz der Verteilung.

⁵ Eine Ausnahme stellen die Schule mit 20% klimatisierter Fläche dar.

⁶ Quelle: SIA2024:2021, Datenblätter MFH. Diese Standardnutzungsangaben aus SIA 2024:2021 stellen auch die Grundlage der Gebäudeparkmodellierungen der EP2050+ dar.

Bei Dienstleistungsgebäuden orientieren wir uns am entsprechenden Raumkältebedarf in den EP2050+. Wir nehmen dazu wir einen durchschnittlichen COP von 4.2 im Jahr 2050 an, was im Dienstleistungssektor eher einer konservativen Annahme entspricht (in Prognos et al. (2021), Tabelle 52). Im Mittel über alle Bauperioden ergibt sich somit ein Kältebedarf von rund 19.5 kWh_{th}/m². Da der Kältebedarf im Sommer kleiner ist als der Wärmebedarf im Winter, gehen wir davon aus, dass der grösste Anteil dieser Kälte für Geocooling zur Verfügung steht. Um eine geringe Diffusion der Geocooling Massnahme zu simulieren, unterscheiden wir 3 Diffusion Szenarien mit 100%, 66% und 33% Diffusion.

4.2.2 Priorität 2: Regeneration über Solarthermie und Luftwärmetausch

In zweiter Priorität weisen wir den Gebäuden den Regenerationsansatz Solarthermie, Luft-Wärmetauscher sowie weitere Optionen zu. Diese Optionen werden nicht im Detail quantifiziert, sondern zusammen mit möglichen Bedarfseinsparungen als den verbleibenden, zu regenerierenden Anteil der Umweltwärme bilanziert. Eine Alternative besteht in der Nutzung von Luft-Wärmetausch Dabei müssen die Lärmschutz-bedingten Einschränkungen zur Installation von Luft-Wärmepumpen beachtet werden. Verbleibender Regenerationsbedarf muss anderweitig gedeckt werden.



5 Resultate – Regenerationspotenzial

5.1 Grenzwert von 3 kWh/m²

Um den Regenerationsgrad über Geocooling zu steigern, untersuchen wir drei Diffusionsszenarien. Bei höheren Diffusionsraten sinkt der Anteil der EBF mit geringen Regenerationsgraden (Abbildung 19).

Die Resultate der Regenerationspotenzialanalyse in Tabelle 8 zeigt, dass unter unseren Annahmen und je nach Diffusion des Geocooling, ein Teil der Wärme durch Geocooling gedeckt werden könnte. Bei Dienstleistungen ist dieser Anteil durch hohen Kältebedarf und die Verbreitung der Klimakälteanlagen wesentlich höher. Bei EFH/MFH müsste der grösste Teil über andere Optionen regeneriert werden (Abbildung 20).

Tabelle 8: (Grenzwert-3) Summe der jährlich von EWS bezogenen Wärme pro Gebäudetyp und als aggregierte Summe plus Regenerationspotenzial. Wärme in TWh.

Anteil Geocooling	Gebäudetyp	Gesamtwärmebedarf der EWS	Geothermisches Dargebot	Regeneration Geo-Cooling	Regeneration Solar, Luft, etc.	Anteil Geocooling an Gesamt
100 %	DL	1.35	0.07	0.77	0.52	57%
100 %	EFH	1.84	0.28	0.19	1.37	10%
100 %	MFH	4.77	0.54	0.69	3.54	15%
100 %	Alle	7.97	0.89	1.66	5.42	21%
67 %	DL	1.35	0.07	0.52	0.77	38%
67 %	EFH	1.84	0.28	0.13	1.43	7%
67 %	MFH	4.77	0.54	0.46	3.77	10%
67 %	Alle	7.97	0.89	1.11	5.97	14%
33 %	DL	1.35	0.07	0.26	1.03	19%
33 %	EFH	1.84	0.28	0.06	1.49	4%
33 %	MFH	4.77	0.54	0.23	4.00	5%
33 %	Alle	7.97	0.89	0.56	6.52	7%

Quelle: Berechnungen TEP Energy, dieses Projekt

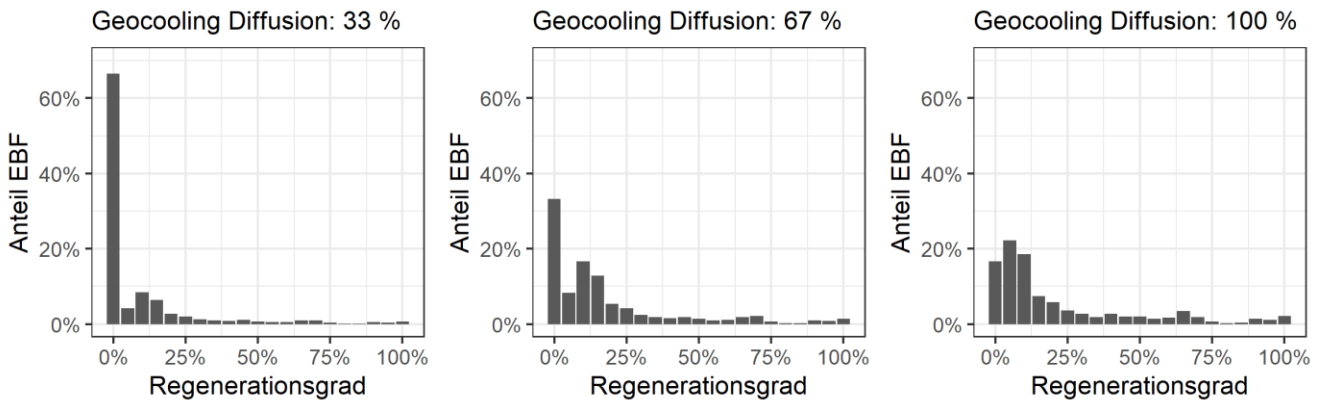


Abbildung 19: (Grenzwert:3) Regenerationsgrade von Geocooling und Anteil EBF, die diesen Grad aufweisen für 33 %, 67 % und 100 % Diffusion von Geocooling.



Abbildung 20: (Grenzwert:3) Summe der jährlich von EWS bezogenen Wärme und Regenerationsoptionen. Die Wärme stammt entweder aus natürlich-nachfließender Umweltwärme (grün), d.h. ohne Regenerationsbedarf oder aus den Regenerationsoptionen (blau und gelb).

5.2 Grenzwert von 8 kWh/m²

Um den Regenerationsgrad über Geocooling zu steigern, untersuchen wir drei Diffusionsszenarien. Bei höheren Diffusionsraten sinkt der Anteil der EBF mit geringen Regenerationsgraden (Abbildung 21).

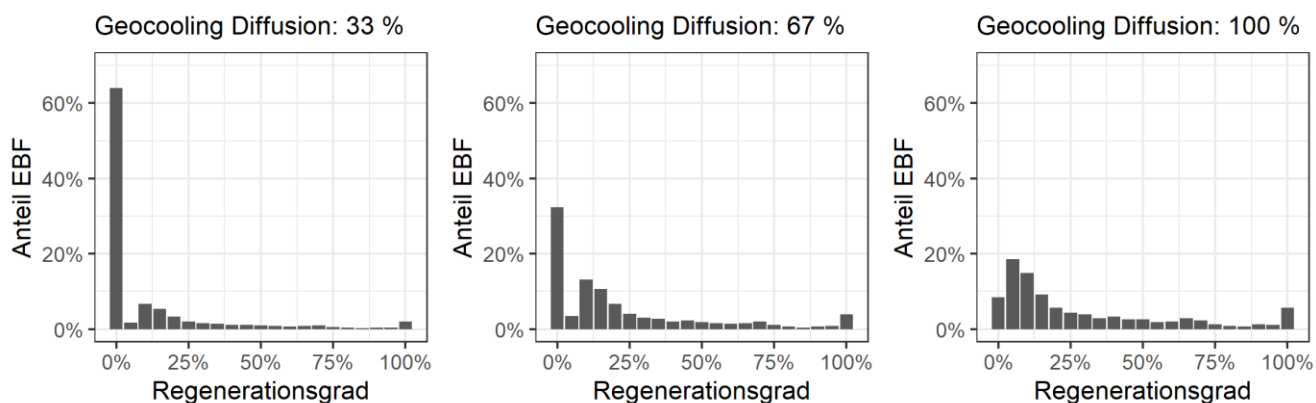


Abbildung 21: (Grenzwert: 8) Regenerationsgrade von Geocooling und Anteil EBF, die diesen Grad aufweisen für 33 %, 67 % und 100 % Diffusion von Geocooling.

Die Regenerationspotenzialanalyse in Tabelle 9 zeigt, dass unter unseren Annahmen und je nach Diffusion des Geocooling, ein Teil der Wärme durch Geocooling gedeckt werden könnte. Bei Dienstleistungen ist dieser Anteil durch hohen Kältebedarf und die Verbreitung der Klimakälteanlagen wesentlich höher. Bei EFH/MFH müsste der grösste Teil über andere Optionen regeneriert werden (Abbildung 22).

Tabelle 9: (Grenzwert:8) Summe der jährlich von EWS bezogenen Wärme pro Gebäudetyp und als aggregierte Summe plus Regenerationspotenzial. Wärme in TWh.

Anteil Geo-cooling	Gebäudetyp	Gesamtwärmebedarf der EWS	Geothermisches Dargebot	Regeneration Geo-Cooling	Regeneration Solar, Luft, etc.	Anteil Geocooling an Gesamt
100 %	DL	1.36	0.16	0.74	0.46	55%
100 %	EFH	1.84	0.74	0.18	0.93	10%
100 %	MFH	4.77	1.38	0.65	2.74	14%
100 %	Alle	7.97	2.27	1.57	4.13	20%
67 %	DL	1.36	0.16	0.50	0.71	36%
67 %	EFH	1.84	0.74	0.12	0.99	6%
67 %	MFH	4.77	1.38	0.43	2.96	9%
67 %	Alle	7.97	2.27	1.05	4.66	13%
33 %	DL	1.36	0.16	0.25	0.95	18%
33 %	EFH	1.84	0.74	0.06	1.05	3%
33 %	MFH	4.77	1.38	0.22	3.18	5%
33 %	Alle	7.97	2.27	0.52	5.18	7%

Quelle: Berechnungen TEP Energy, im Rahmen des SWEET SURE Projekt

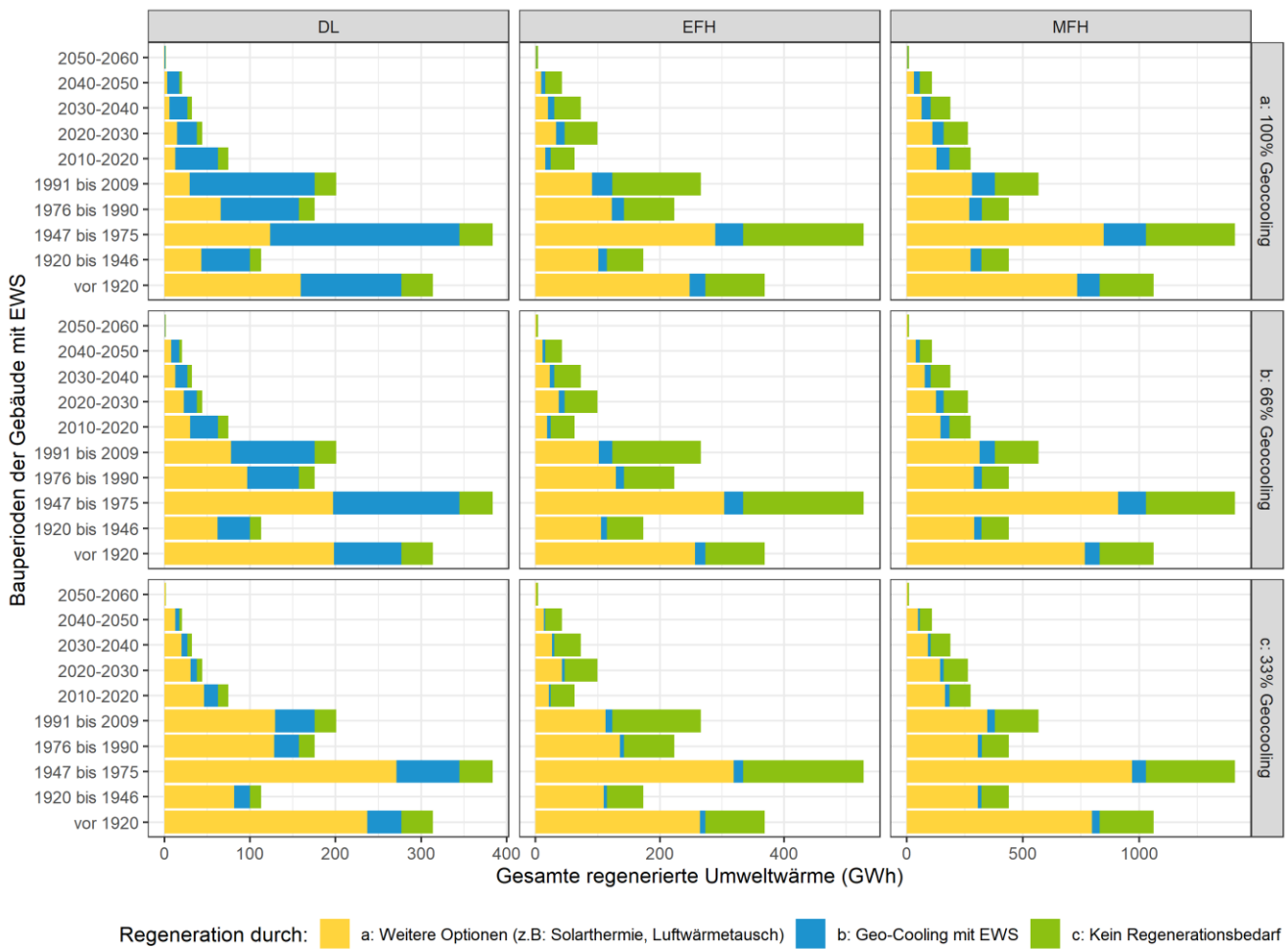


Abbildung 22: (Grenzwert:8) Summe der jährlich von EWS bezogenen Wärme und Regenerationsoptionen. Die Wärme stammt entweder aus natürlich-nachfließender Umweltwärme (grün), d.h. ohne Regenerationsbedarf oder aus den Regenerationsoptionen (blau und gelb).

5.3 Grenzwert von 33 kWh/m²

Um den Regenerationsgrad über Geocooling zu steigern, untersuchen wir drei Diffusionsszenarien. Bei höheren Diffusionsraten sinkt der Anteil der EBF mit geringen Regenerationsgraden (Abbildung 23). Da bei diesem Grenzwert der Regenerationsbedarf kleiner ist, sinkt hier der Anteil der EBF.

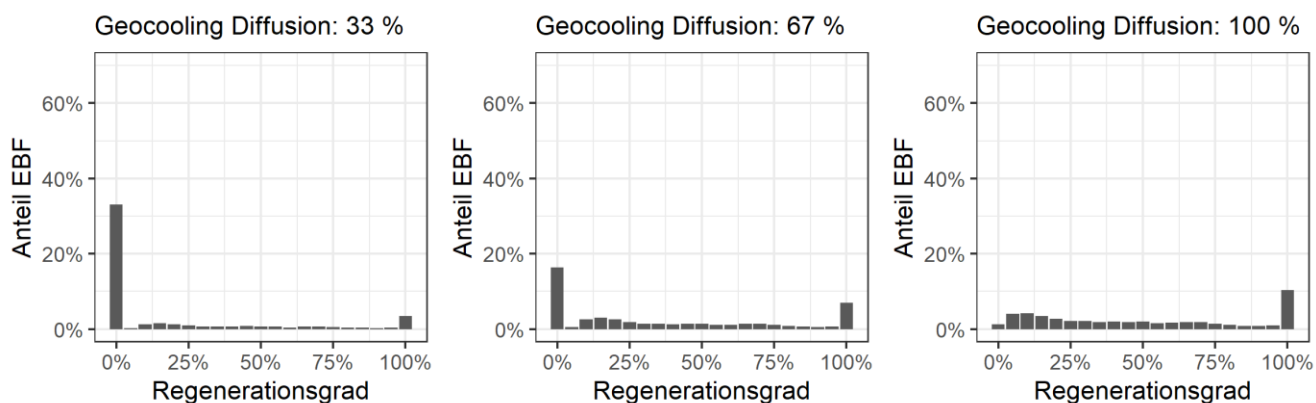


Abbildung 23: (Grenzwert:33) Regenerationsgrade von Geocooling und Anteil EBF, die diesen Grad aufweisen für 33 %, 67 % und 100 % Diffusion von Geocooling.

Die Regenerationspotenzialanalyse in Tabelle 10 zeigt, dass unter unseren Annahmen und je nach Diffusion des Geocooling, ein Teil der Wärme durch Geocooling gedeckt werden könnte. Bei Dienstleistungen ist dieser Anteil durch hohen Kältebedarf und die Verbreitung der Klimakälteanlagen wesentlich höher. Bei EFH/MFH müsste der grösste Teil über andere Optionen regeneriert werden (Abbildung 24).

Tabelle 10: (Grenzwert: 33) Summe der jährlich von EWS bezogenen Wärme pro Gebäudetyp und als aggregierte Summe plus Regenerationspotenzial. Wärme in TWh.

Anteil Geo-cooling	Gebäudetyp	Gesamtwärmebedarf der EWS	Geothermisches Dargebot	Regeneration Geo-Cooling	Regeneration Solar, Luft, etc.	Anteil Geocooling an Gesamt
100 %	DL	1.36	0.44	0.62	0.30	45%
100 %	EFH	1.84	1.66	0.04	0.14	2.1%
100 %	MFH	4.77	3.52	0.31	0.93	7%
100 %	Alle	7.97	5.63	0.97	1.37	12%
67 %	DL	1.36	0.44	0.41	0.51	30%
67 %	EFH	1.84	1.66	0.03	0.15	1.4%
67 %	MFH	4.77	3.52	0.21	1.04	4%
67 %	Alle	7.97	5.63	0.64	1.70	8%
33 %	DL	1.36	0.44	0.20	0.72	15%
33 %	EFH	1.84	1.66	0.01	0.16	0.7%
33 %	MFH	4.77	3.52	0.10	1.14	2.2%
33 %	Alle	7.97	5.63	0.32	2.02	4%

Quelle: Berechnungen TEP Energy, im Rahmen des SWEET SURE Projekt

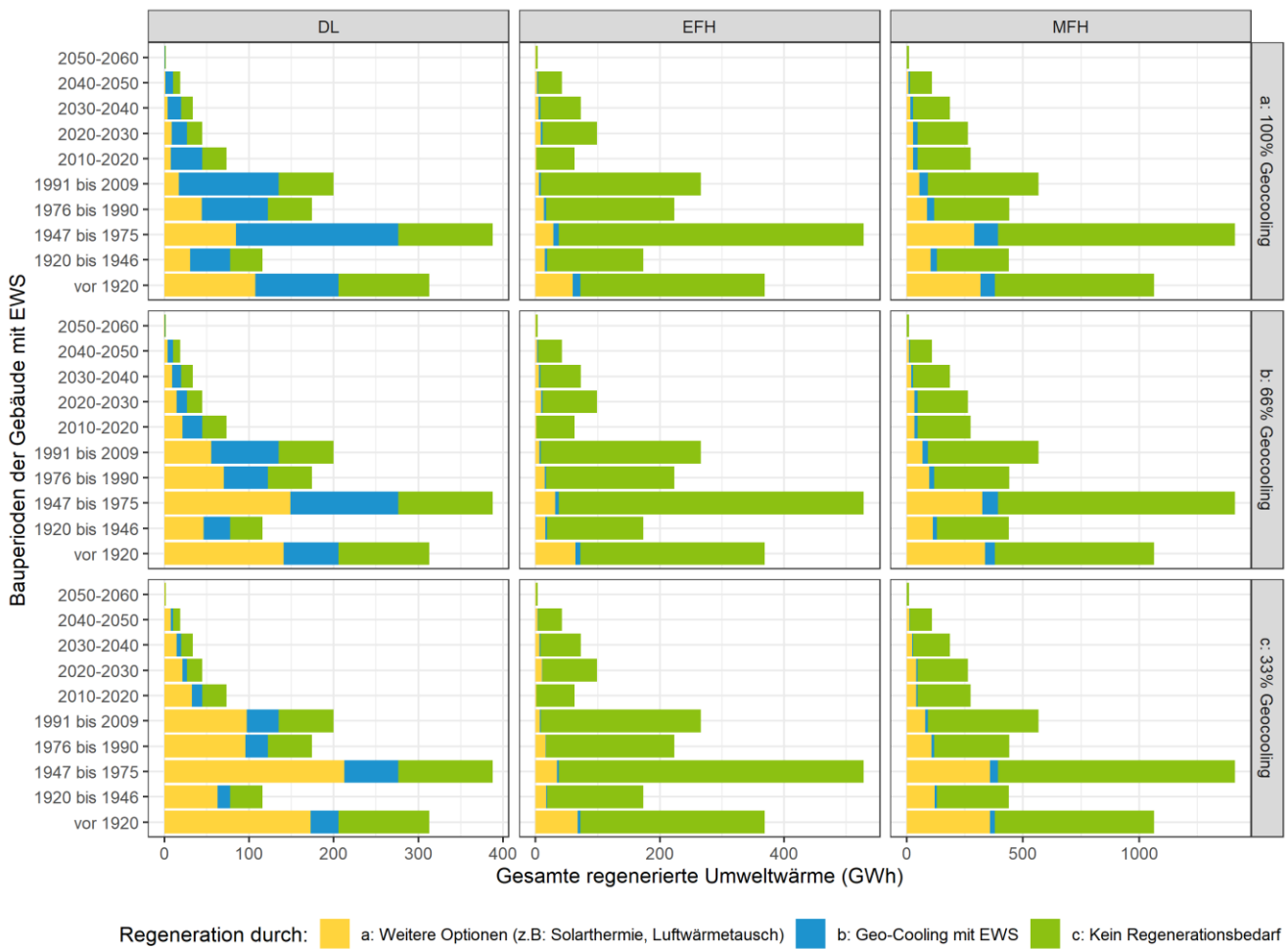


Abbildung 24: (Grenzwert: 33) Summe der jährlich von EWS bezogenen Wärme und Regenerationsoptionen. Die Wärme stammt entweder aus natürlich-nachfließender Umweltwärme (grün), d.h. ohne Regenerationsbedarf oder aus den Regenerationsoptionen (blau und gelb).



6 Fazit

Erdwärme steht nicht unbegrenzt zur Verfügung. Bei stärkerer Verbreitung von Sole-Wasser-Wärmepumpen, wie in den Energieperspektiven 2050+ angenommen, besteht langfristig ein Mangel an natürlich nachfliessender Umweltwärme. Wir haben hier unter unterschiedlichen Grenzwerten aufgezeigt, dass dies zwischen rund 30% und mehr als 80 % der von den Erdwärmesonden bezogenen Wärme betrifft. Massnahmen, um diese Flächen zu regenerieren beinhalten Free Cooling, Solarthermie oder Luft-Wärmetauscher. Selbst unter höheren Grenzwerten wie 8 und 33 kWh besteht immer noch ein bedeutender Regenerationsbedarf. Je nach Diffusion des Geocooling und des Grenzwertes kann zwischen 15% und 57% der zu regenerierenden Erdwärme mittels Geocooling regeneriert werden.

Potenzielle Möglichkeiten, um die EWS räumlich zu trennen und damit das Dichteproblem zu entschärfen, könnten in der Erschliessung von öffentlichen Flächen innerhalb und ausserhalb der Siedlungsgebiete liegen, z.B. Pärke und Strassen. Ausserdem könnten sich mehrere Grundstücke zu Verbänden zusammenschliessen.



7 Literatur

- Eskilson. (1987). *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*. Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology. Lund, Sweden.
- Huber, A., & Pahud, D. (1999). *Untiefe Geothermie. Woher kommt die Energie?, Schlussbericht, im Auftrag des Bundesamtes für Energie, Programm Geothermie*.
- Jakob, M., Reiter, U., Catenazzi, G., Sunarjo, B., Lienhard, L., Müller, A., ... Nägeli, C. (2020). *Erneuerbare- und CO₂-freie Wärmeversorgung Schweiz: Eine Studie zur Evaluation von Erfordernissen und Auswirkungen*. TEP Energy und ECOPLAN i.A. AEE SUISSE, Wärmeinitiative Schweiz (WIS). Zürich.
- Kemmler, A., Kirchner, A., Kreidelmeyer, S., Piégsa, A., Spillmann, T., Dambeck, H., ... Lienhard, L. (2021). *Energieperspektiven 2050 + Technischer Bericht Gesamtdokumentation der Arbeiten*. Prognos, INFRAS, TEP Energy und Ecoplan i.A. BFE. Bern.
- Kobler, R. (2016). *Clever kühlen mit Erdwärmesonden*. BFE - energia.
- Kriesi, R. (2017). *Methoden der Erdsonden-Regeneration - mit Sekundärnutzen*. Stadt Zürich. Zürich.
- Persdorf, P., Ruesch, F., & Haller, M. Y. (2015). *RegenOpt*. Stadt Zürich.
- Prognos, TEP Energy, Infrac, & Ecoplan. (2021). *Energieperspektiven 2050+ Gesamtdokumentation der Arbeiten*. i.A. BFE.
- Rohrer, S., König, M., & Tillenkamp, F. (2018). *Free Cooling in der Klimakälte. IEF Energy Papers*, (8).
- Ruesch, F., Füglistner, L., Haller, M., Sommer, T., & Zakovorotnyi, A. (2022). *Cool2Regen - Aktives Kühlen von Gebäuden mit Wärmepumpen und Erdsonden für hohe Regenerationsgrade*. BFE.
- suissetec. (2020). *Erdwärmesonden: Entlastung oder Regeneration? Merkblatt*. Retrieved from <https://suissetec.ch/de/news-detail/neues-merkblatt-erdwaermesonden-entlastung-oder-regeneration.html>
- suissetec. (2021). *Kühlung mit der Fussbodenheizung - Merkblatt*.
- Wagner, R., & Weisskopf, T. (2013). *Erdsondenpotenzial im urbanen Raum*. Weisskopf Partner GmbH i.A. Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik.
- Wagner, R., & Weisskopf, T. (2014). *Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich, Schlussbericht*. Weisskopf Partner GmbH i.A. Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle Energie- und Gebäudetechnik. Zürich.

Normen

- SIA 384/6 (2021): Erdwärmesonden, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (Hrsg.), Zürich, 2021
- VDI: Thermische Nutzung des Untergrundes, Erdgekoppelte Wärmepumpenanlagen, VDI 4640, VDI-Handbuch Energietechnik, Beuth Verlag, Berlin, 2001