

REGENERATION VON ERDWÄRMESONDEN

SCHLUSSBERICHT

IMPRESSUM

Titelbild: Allianz 2SOL

Herausgeber: Amt für Umweltschutz und Energie (AUE)

Autoren:

Marc Bättschmann, TEND AG (Projektleitung)

Emanuel Huber, GEOTEST AG

Florian Ruesch, SPF Institut für Solartechnik

Roland Wagner, Kanton Basel-Landschaft

Begleitgruppe

Felix Arnold, Kanton Aargau

Adrian Auckenthaler, Kanton Basel-Landschaft

Dominik Bänninger, Kanton Basel-Landschaft

Bastian Burger, Kanton Basel-Stadt

Walter Eugster, Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz

Louis Frei, Stadt Zürich

Mischa Haas, Kanton Luzern

Luca Hüsler, Kanton Basel-Landschaft

Rita Kobler, Kanton Basel-Landschaft

Beat Lehmann, Kanton Zürich

Alexandra Märki, Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz

Martin Ménard, Low-Tech Lab GmbH

Christoph Plattner, Kanton Basel-Landschaft

Daniel Rüdin, Kanton Basel-Landschaft

Karl-Heinz Schädle, Geothermie-Schweiz

Tobias Sommer, Kanton Luzern

Franz Sprecher, Stadt Zürich

Nadège Vetterli, ANEX AG

Marcel Wickart, Stadt Zürich

Der vorliegende Bericht wurde vom Amt für Umweltschutz und Energie der Bau- und Umweltschutzdirektion des Kantons Basel-Landschaft mit Unterstützung der Kantone Aargau, Kanton Basel-Stadt und Luzern, dem Amt für Hochbauten der Stadt Zürich und EnergieSchweiz finanziert.

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren des Berichtes verantwortlich.

Liestal, 08.10.2025

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	5
2	Einleitung.....	8
2.1	Ausgangslage	8
2.2	Politischer Auftrag Mo 2021/559	9
2.2.1	Revision der kantonalen Energiegesetzgebung	9
2.2.2	Verlängerung und Anpassung des Förderprogramms.....	10
3	Grundlagen	11
3.1	Bewilligung von EWS	11
3.2	Zustand der EWS-Nutzung im Kanton BL	11
3.2.1	Räumliche Verteilung der Anlagen.....	11
3.2.2	Verteilung der Anlagengrösse.....	14
3.3	Erwarteter Zubau von EWS-Anlagen.....	16
3.4	Mit dem EWS-Zubau erwartete Herausforderungen	16
3.5	Grenzen des EWS-Potenzials	19
3.6	Auslegung von EWS-Anlagen	21
3.7	Berücksichtigung künftiger Nachbarsonden	22
3.8	Kritische Diskussion der SIA-Auslegungspraxis	25
3.9	Rechtliche Fragen	26
3.10	Weiterführende Studien.....	27
3.11	Abgrenzung.....	29
3.12	Begleitgruppe	29
4	Methodik	30
4.1	Berechnungskonzepte.....	30
4.1.1	Endliche Linienquelle.....	30
4.1.2	Simulation des Ist-Zustandes (Vorwärtssimulation)	30
4.1.3	Workflow «Anforderungen an die Auslegung von EWS»	31
4.1.4	Randbedingungen und Modellannahmen	33
4.1.5	Szenarien	34
4.1.6	Auswertung	35
4.1.7	Untersuchungsgebiet.....	35
4.2	Einfluss der Regeneration auf die Grundwassertemperatur	38
4.2.1	Hydrogeologische und thermische Eigenschaften	39
4.2.2	Randbedingungen	39
4.2.3	Wärmenutzungen	39
5	Ergebnisse.....	42
5.1	Resultate der Simulation heutiger EWS-Anlagen (Vorwärtssimulation Ist-Zustand)	42

5.2	Resultate der Szenarien.....	45
5.2.1	Resultate Szenario 1	45
5.2.2	Resultate Szenario 2	48
5.2.3	Resultate Szenario 3	50
5.2.4	Resultate Szenario 4	53
5.2.5	Zusammenfassung der Resultate	56
5.3	Resultate der thermischen Grundwassermodellierung	57
5.4	Kosten von Massnahmen zur Abwendung einer thermischen Übernutzung	60
5.4.1	Ansatz	60
5.4.2	Kosten unterschiedlicher Regenerationsquellen	61
5.4.3	Kosten von Mehrlänge.....	64
5.4.4	Kostenvergleich Regeneration und Mehrlänge	65
6	Diskussion.....	67
6.1	Methodik	67
6.2	Szenarien.....	68
6.3	Ergebnisse	68
6.3.1	Vorwärtssimulation und Szenarien.....	68
6.3.2	Einfluss der Regeneration auf die Grundwassertemperatur	69
6.3.3	Kosten der Regeneration und Mehrlänge	69
7	Schlussfolgerungen.....	70
8	Anhang.....	84
8.1	Auslegungsmethodik.....	85
8.2	Geothermische Bodenkennwerte	89
8.3	Vergleich mit SIA-Methode (R1, R2, R3, R4)	90
8.4	Zur Gleichwertigkeit von Massnahmen.....	97
8.5	Quellenangaben.....	98

1 ZUSAMMENFASSUNG

Allgemeine Thematik

Wärmepumpen mit Erdwärmesonden (EWS-WP) weisen – insbesondere in der kältesten Zeit des Jahres – eine höhere Effizienz auf als Luft-Wasser-Wärmepumpen (L/W-WP). Die Jahresarbeitszahl als Mass für die Effizienz über ein ganzes Jahr beispielsweise, ist bei EWS-WP um etwa eins höher als bei L/W-WP. EWS-Anlagen können, insbesondere wenn sie einen signifikanten Anteil an den erneuerbaren Heizsystemen erreichen, demnach wesentlich zur Minderung der Winterstromproblematik beitragen. Ein Ausbau der oberflächennahen Erdwärmenutzung mittels EWS ist daher aus energiepolitischer Sicht grundsätzlich zu begrüssen.

Dem Ausbau von EWS-Anlagen sind jedoch physikalische und regulatorische Grenzen gesetzt: EWS, die primär für Heizzwecke genutzt werden, kühlen den Untergrund im Lauf der Zeit ab. Dies, weil dem Untergrund mehr Wärme entzogen wird als aus dem tieferen Untergrund oder über die Erdoberfläche natürlich regeneriert. Während des Betriebs der EWS bildet sich eine Temperatursenke, die sich über die Jahre vergrössert. Befinden sich mehrere EWS auf engem Raum, überlagern sich die Temperatursenken und die Temperatur im Untergrund sinkt noch schneller ab. Diese Situation entspricht einer «thermischen Übernutzung» des Untergrunds. Im schlimmsten Fall müssen Anlagen vorzeitig ausser Betrieb genommen oder aufwändig saniert werden.

Einer thermischen Übernutzung kann begegnet werden, indem EWS entlastet, vorsorglich mit einer Leistungsreserve mittels längerer bzw. zusätzlicher Bohrungen geplant oder aktiv regeneriert werden. Unter Regeneration versteht man im Zusammenhang mit EWS-Anlagen einen partiellen oder vollständigen Ausgleich der während der Heizphase aus dem Untergrund über die EWS entzogenen Wärme. Als Energiequellen zur Regeneration eignen sich z.B. Solarkollektoren, Luft-Wärmetauscher, Abwärme aus der Gebäudekühlung oder direkte Raumwärme aus Geocooling über die Fussbodenheizung.

Gemäss Norm SIA 384/6 haben Planende bei der Auslegung von EWS bereits heute einen künftigen Zubau in der Nachbarschaft zu berücksichtigen. Je nach Annahme über die Dichte künftiger Anlagen sind eine entsprechende Regeneration und/oder Reserven vorzusehen (SIA 384/6:2021, Ziffer 3.5). Diese Anforderungen aus der Norm entspricht in Gebieten mit hoher EWS-Dichte faktisch einer Regenerationspflicht. Eine verlässliche Anwendung der Norm ist in der Praxis jedoch kaum möglich, da der tatsächliche Zubau schwer vorherzusehen ist. Wird die Dichte bei der Auslegung unterschätzt, sind die geplanten Anlagen unterdimensioniert und erreichen ihr Lebensende früher als gemäss Norm vorgesehen.

Die Thematik ist auch rechtlich vielschichtig. Eigentümerschaften dürfen ihr Heizungssystem grundsätzlich frei wählen, sofern es dem kantonalen Recht entspricht. Nach gängiger Auffassung umfasst das Grundeigentum auch einen Teil des Erdreichs, soweit ein Interesse an dessen Nutzung besteht. Gleichzeitig verstösst jedoch ein grundstücksübergreifender Wärmeentzug gegen das zivilrechtliche Überbaurecht. Mit steigender Dichte von EWS-Anlagen sind daher zunehmende gerichtliche Auseinandersetzungen absehbar.

Situation im Kanton Basel-Landschaft

Die Motion 2021/559 «Anpassung des Energiegesetzes: Regeneration von Erdwärmesonden» fordert, kurzfristig freiwillige Massnahmen mit Fördermitteln zu unterstützen, mittelfristig gesetzliche Auflagen einzuführen und die Erdwärmenutzung besser zu koordinieren. Mit § 23 Abs. 2 des im Jahr 2023 teilrevidierten Energiegesetzes verfügt der Regierungsrat inzwischen über eine Rechts-

grundlage, um Gebiete zu bezeichnen, in denen eine Regeneration geboten ist. **Ziel der vorliegenden Studie ist es, solche Gebiete im Kanton zu identifizieren und Massnahmen zur Vermeidung einer thermischen Übernutzung aufzuzeigen.**

Im Jahr 2022 waren im Kanton Basel-Landschaft rund 12'000 Wärmepumpen in Betrieb, wovon etwa 2'500 mit EWS betrieben wurden. Das entspricht etwa 4% aller Heizungen. Die meisten dieser Anlagen besitzen eine oder zwei EWS und befinden sich in Gebieten mit geringer Energiebedarfsdichte. Eine generelle thermische Übernutzung liegt im Kanton Basel-Landschaft derzeit nicht vor, mit Ausnahme einzelner Orte, an denen EWS-Anlagen lokal stark gehäuft auftreten.

Hält der aktuelle Zubau von etwa 130 ± 30 Anlagen pro Jahr an, wird sich ihre Anzahl bis 2050 um den Faktor 2 bis 2.5 auf etwa 5'200 bis 6'700 EWS-Anlagen erhöhen. In Quartieren bzw. Gevierten mit hohem Zubau dürfte die durchschnittliche Dichte bis zu 20% erreichen. Auf kleinerer räumlicher Skala ist von Anlagendichten von bis zu 40% auszugehen (vgl. Kapitel 3.2.1). Eine solche Dichte von nicht regenerierten EWS-Anlagen führt langfristig zu einer thermischen Übernutzung. Diese lässt sich mit 20 - 30% Mehrlänge und 15% Regeneration meist vermeiden¹. Die Mehrkosten liegen bei 25 - 35%, sichern jedoch eine nachhaltige Versorgung der Gevierte mit Erdwärme.

Alle Empfehlungen und Schlussfolgerungen gelten für *Gevierte* als kleinste räumliche Einheit. Unter *Gevierte* wird hier eine kleinräumige Einteilung bebauter Gebiete verstanden, die durch Strassen, Bahnlinien oder Gewässer eingegrenzt sind. *Gevierte* sind keine offizielle räumliche Einteilung. Oft wird auch der Begriff «Kleinquartier» verwendet.

Handlungsbedarf

Besteht der Anspruch, die Nutzung der oberflächennahen Erdwärme nachhaltig zu gestalten, ergibt sich aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie im Kanton Basel-Landschaft folgender Handlungsbedarf:

- Grosse Anlagen (≥ 10 Sonden oder $\geq 2'000$ m Laufmeter EWS) werden möglichst vollständig regeneriert. Dies ist meist auch wirtschaftlich.
- Für kleine Anlagen (< 10 EWS oder $< 2'000$ m Laufmeter) in Gevierten mit einem spezifischen Wärmebedarf < 400 MWh/ha gelten: 15% Regeneration und 20% Mehrlänge (oder gleichwertige Massnahme)
- Für kleine Anlagen in Gevierten mit einem spezifischen Wärmebedarf zwischen 400 und 700 MWh/ha gelten: 15% Regeneration und 30% Mehrlänge (oder gleichwertige Massnahme).
- In Gevierten mit einem spezifischen Wärmebedarf > 700 MWh/ha wird eine sehr geringe Dichte von EWS-Anlagen erwartet, da dort die Liegenschaften für eine Erschliessung mit thermischen Netzen geeignet sind. Hier wird ein Verzicht auf Vorgaben zur Regeneration für kleine Anlagen empfohlen; stattdessen sind erhöhte finanzielle Anreize zum Anschluss an Wärmeverbunde vorzusehen.
- Generell sind Massnahmen zur Information und Sensibilisierung zielführend. Um lokale Häufungen zu vermeiden, sollte der Kanton Gebiete identifizieren, in welcher die Dichte von EWS-Anlagen 40% überschreitet und diese Gebiete im Geoportal des Kantons ausweisen sowie Hinweise und Empfehlungen dazu veröffentlichen.

¹ Die aktive Regeneration und Mehrlänge bezieht sich auf eine EWS-Anlage, die ohne den Einfluss durch künftige Nachbarsonden geplant wurde (vgl. Kapitel 8.4).

Zubau von EWS-Anlagen nach 2050

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die im Jahr 2050 erwartete Dichte von EWS-Anlagen eine thermische Übernutzung verursacht, die mit den oben beschriebenen Massnahmen kompensiert werden kann. Ein weiterer Zubau von EWS-Anlagen hat aber zur Folge, dass die getroffenen Massnahmen keine ausreichende Wirkung erzielen und weitere Massnahmen ergriffen werden müssen.

2 EINLEITUNG

2.1 AUSGANGSLAGE

Am 18. Juni 2023 haben die Schweizer Stimmberechtigten das Klima- und Innovationsgesetz (KIG) angenommen. Es verpflichtet die Schweiz, ihre Treibhausgasemissionen bis 2050 auf Netto-Null zu reduzieren resp. die verbleibenden, schwer vermeidbaren Emissionen durch natürliche oder technische CO₂-Senken aufzunehmen. Das Gesetz definiert Zwischenziele für die Perioden 2031–2040 und 2041–2050 sowie für das Jahr 2040. Zudem enthält es sektorielle Richtwerte für die Emissionsreduktion in den Bereichen Gebäude, Verkehr und Industrie. Im Kanton Basel-Landschaft wurden die kantonalen Zielvorgaben mit der Teilrevision des Energiegesetzes vom 1. März 2025 an das Bundesrecht angepasst.

Zur Erreichung der Ziele im Gebäudebereich ist eine Abkehr von fossilen hin zu CO₂-neutralen Energiequellen erforderlich. Zentrale Bedeutung kommt dabei der Nutzung lokaler Umweltwärme zu – insbesondere aus Luft, Grundwasser, Oberflächengewässern, Solarthermie und der Erde.

Gemäss dem Bericht zur Energieversorgung des Kantons Basel-Landschaft (EBP, 2022) beträgt das theoretische Potenzial an Umweltwärme rund 2'600 GWh/a – etwa so viel wie der gesamte Energiebedarf des Wohnsektors. Das Szenario ZERO Basis der kantonalen Energieplanung geht davon aus, dass bis 2050 rund 1'000 GWh/a dieses Potenzials genutzt werden können, vorwiegend über Wärmepumpen. 2022 waren im Kanton rund 12'000 Wärmepumpen installiert, hauptsächlich Luft-Wasser-Wärmepumpen. Diese nutzten 334 GWh/a Umweltwärme. Etwa 2'500 dieser Anlagen beziehen ihre Wärme über Erdwärmesonden (EWS), deren Beitrag wird auf 100 GWh/a geschätzt.

EWS-gekoppelte Wärmepumpenanlagen (kurz: EWS-Anlagen) haben in der Regel höhere Jahresarbeitszahlen als Luft-Wasser-Systeme. Da diese besonders in der Winterzeit weniger Strom für die Wärmeproduktion benötigen, sind sie aus energiepolitischer Sicht – insbesondere zur Reduktion des Winterstrombedarfs² – vorzuziehen.

Der Ausbau von EWS stösst jedoch auf physikalische und regulatorische Grenzen. Nicht regensierte EWS beeinflussen sich langfristig gegenseitig. Je näher EWS beieinander positioniert werden, desto stärker ist die gegenseitige Beeinflussung. Bei der für EWS-Bohrungen erforderlichen grundwasserschutzrechtlichen Bewilligung werden die Auswirkungen des Wärmeentzugs auf vorhandene oder zukünftige Nachbarerdwärmesonden nicht geprüft.³

Mit dem politischen Vorstoss von Thomas Noack ([Motion 2021/559](#) «Regeneration von Erdwärmesonden») (s. Kapitel 2.2) wird erstmals im nationalen wie internationalem Umfeld die Forderung gestellt, auf gesetzgeberischer Basis Voraussetzungen für eine nachhaltige Nutzung der oberflächennahen Erdwärme mittels EWS zu schaffen. Der Kanton Basel-Landschaft hat zur Beantwortung des politischen Vorstosses diese Studie zur Regeneration von Erdwärmesonden in Auftrag gegeben. Die Studie wird von verschiedenen öffentlichen Institutionen finanziell sowie personell unterstützt (Kapitel 3.12).

² Nach Frischknecht (2025) ist die Treibhausgas-Belastung des schweizerischen Verbraucher-Strommixes im Jahr 2018 bis 2022 im Winter rund doppelt so hoch wie im Sommer.

³ Die mit dem Zubau von EWS-Anlagen verbundenen Herausforderungen werden mittlerweile auch von den Fachverbänden angesprochen (z.B. [aeesuisse](#): Faktenblatt Regeneration Erdsonden; [suissetec](#): Merkblatt «Erdwärmesonden: Entlastung oder Regeneration»).

2.2 POLITISCHER AUFTRAG MO 2021/559

Am 03.11.2022 hat der Landrat des Kantons Basel-Landschaft dem Regierungsrat die [Motion 2021/559](#) «Regeneration von Erdwärmesonden» von Thomas Noack überwiesen: «Um einen langfristigen und damit nachhaltigen Betrieb von Erdwärmesonden zu gewährleisten ist eine saisonale Nachladung bzw. Regeneration unerlässlich.». In seiner Motion schlägt Thomas Noack folgende Massnahmen vor, damit «die Erdwärmennutzung über Generationen betrieben werden kann»:

1. Kurzfristig sollen Massnahmen zur *freiwilligen* Regeneration der Bodentemperatur mit dem Energieförderprogramm gezielt unterstützt werden.
2. Mittelfristig (in maximal 3 - 5 Jahren) sollen entsprechende Massnahmen für neue Anlagen in geeigneten Gebieten als Verpflichtung in das Energiegesetz aufgenommen werden.
3. In Kombination mit der Verpflichtung zur Regeneration in geeigneten Gebieten sollen die Gemeinden die Nutzung der Erdwärme besser koordinieren

Konkret soll der Kanton im Energiegesetz diejenigen Gebiete bezeichnen, in denen eine Regeneration der Bodentemperatur nach Erdwärmennutzung zwingend vorzunehmen ist bzw. aus hydrogeologischen Gründen nicht angebracht ist. Darüber hinaus soll es Gemeinden ermöglicht werden, in geeigneten Gebieten regenerierte EWS-Felder zu erstellen und zentral zu betreiben.

2.2.1 REVISION DER KANTONALEN ENERGIEGESETZGEBUNG

Am 1. März 2025 setzt der Regierungsrat des Kantons Basel-Landschaft die Teilrevision des Energiegesetzes des Kantons Basel-Landschaft ([EnG BL, SGS 490](#)) in Kraft. Mit der Teilrevision des Energiegesetzes werden die kantonalen Ziele den Vorgaben des Bundesrechts angeglichen. Zur Konkretisierung der neuen Gesetzesbestimmungen wurde die kantonale Energieverordnung ([EnV BL, SGS 490.11](#)) ebenfalls per 1. März 2025 angepasst.

Im **Energiegesetz** regelt §23 die Bewilligungs- und Konzessionspflicht der Nutzung von Erdwärme. Damit besitzt der Kanton eine gesetzliche Grundlage, um Gebiete zu benennen, in denen eine Regeneration erforderlich oder aus gewässerschutzrechtlichen Aspekten unerwünscht ist, womit eine wesentliche Forderung der Motion 2021/559 erfüllt ist.

Auszug aus §23 des kantonalen Energiegesetzes

²Für die Nutzung des untiefen Untergrunds beurteilt der Kanton die Risiken und bezeichnet die geeigneten Gebiete für die Nutzung mit Erdsonden. Ebenso bezeichnet der Kanton Gebiete, in welchen für neue Installationen eine Regeneration geboten ist.

^{2bis}Die Bau- und Umweltschutzdirektion kann Vorschriften über die einzureichenden und aufzubewahrenden Unterlagen, die erforderlichen Schutzvorrichtungen, die Anforderungen an die Eigenkontrolle und die Überwachung und Abnahme von Anlagen zur Erdwärmennutzung und Wärmespeicherung im Untergrund erlassen sowie technische Normen als verbindlich erklären.

⁷Die Bewilligungsinhaberin oder der Bewilligungsinhaber muss nach Abschluss der Untersuchungen bzw. der Bauarbeiten die geologischen und hydrogeologischen Untersuchungsergebnisse sowie die technischen Daten zur Bohrung der Bau- und Umweltschutzdirektion unentgeltlich zur Verfügung stellen.

⁸Die Ergebnisse stehen zur Einsichtnahme offen, sofern ein öffentliches Interesse nachgewiesen wird.

Paragraf §34a der **Energieverordnung** präzisiert u.a. die Anforderungen an einzureichende Unterlagen:

Auszug aus §34a der kantonalen Energieverordnung

²Bei Anlagen zur Wärmespeicherung oder aktiven Regeneration kann das Amt für Umweltschutz und Energie Wärmemessungsinstallationen sowie ein Monitoring verlangen, falls die in den Untergrund zugeführte Wärme zu einer Erwärmung von Grund- oder Oberflächengewässer führen könnte.

³Das Amt für Umweltschutz und Energie darf die geologischen Primärdaten und die prozessierten geologischen Primärdaten anderen, staatlichen Institutionen und Forschungseinrichtungen zur Verfügung stellen. Diese stellen sicher, dass die Daten zweckbestimmt eingesetzt und nicht ohne die Zustimmung der Bewilligungsinhaberin oder des Bewilligungsinhabers an Dritte weitergegeben werden.

2.2.2 VERLÄNGERUNG UND ANPASSUNG DES FÖRDERPROGRAMMS

Massnahmen im Gebäudebereich zur Senkung des CO₂-Ausstosses werden durch das Baselbieter Energiepaket finanziell gefördert. Der Regierungsrat hat am 22.05.2025 den Landrat um eine neue Ausgabenbewilligung gebeten. Neu werden Massnahmen zur Regeneration von Erdwärmesonden mit insgesamt 100'000 Franken pro Jahr bis 2030 gefördert.

Mit der Revision des Energiegesetzes, der Energieverordnung und der Anpassung der Förderprogramms sind bereits wesentliche Forderungen des politischen Vorstosses erfüllt.

3 GRUNDLAGEN

In diesem Kapitel werden die gesetzlichen, technischen und planerischen Rahmenbedingungen für die Nutzung der oberflächennahen Geothermie mittels Erdwärmesonden (EWS) dargelegt. Dabei werden die Anforderungen an das Bewilligungsverfahren, die Auslegung nach SIA-Norm 384/6, die Thematik der gegenseitigen thermischen Beeinflussung sowie die Erfordernisse der Berücksichtigung potenzieller zukünftiger Nachbarsonden erläutert.

3.1 BEWILLIGUNG VON EWS

Für die Erstellung einer Erdwärmesonde ist in der Schweiz mindestens eine gewässerschutzrechtliche Bewilligung erforderlich, die durch die kantonalen Behörden ausgestellt wird (Art. 19 GschG, SR 814.20). Die Bohrbewilligung kann mit Auflagen erteilt werden. In manchen Kantonen ist die maximale Bohrtiefe beschränkt, im Kanton Basel-Landschaft aus geologischen Gründen auf maximal 200 m.

Im Kanton Basel-Landschaft ist für EWS-Bohrungen eine gewässerschutzrechtliche Bewilligung der Bau- und Umweltschutzdirektion erforderlich. Die zuständige Bewilligungsbehörde ist das Amt für Umweltschutz und Energie (AUE). Auf Basis der nationalen Gesetzgebung ist die Bewilligungspflicht für Eingriffe ins Grundwasser und Bohrungen im Kanton Basel-Landschaft im Gesetz über die Nutzung und den Schutz des Grundwassers (Grundwassergesetz, SGS 454 vom 3. April 1967) und in der Verordnung über die Wasserversorgung sowie die Nutzung und den Schutz des Grundwassers (SGS 455.11 vom 13. Januar 1998) geregelt. Eine Übersicht über die für Planung und Ausführung relevanten gesetzlichen Grundlagen ist im [Erdwärmenutzungskonzept BL](#) zu finden.

Gemäss Gewässerschutzverordnung (GSchV) und der Wegleitung Grundwasserschutz darf die Temperatur des Grundwassers durch Wärmeeintrag oder -entzug gegenüber dem natürlichen Zustand um höchstens 3 K verändert werden. Die Regeneration von EWS kann zu einer unerwünschten Erwärmung des Grundwassers führen. In der unmittelbaren Umgebung der Erdwärmesonden (EWS), d.h. in einem Umkreis von maximal 100 m, darf die Temperaturänderung des Grundwassers nicht mehr als 3 K betragen (3 K-Kriterium).

3.2 ZUSTAND DER EWS-NUTZUNG IM KANTON BL

3.2.1 RÄUMLICHE VERTEILUNG DER ANLAGEN

Im Kanton Basel-Landschaft sind heute (Stand April 2025⁴) 2'761 EWS-Anlagen mit insgesamt 8'086 EWS in Betrieb. Die durchschnittliche EWS-Tiefe von etwa 140 m ist aufgrund lokaler, geologisch und hydrogeologisch bedingter Bohrtiefenbegrenzungen eher gering im Vergleich zum schweizerischen Durchschnitt von etwa 200 m⁵. EWS-Bohrungen sind im Kanton Basel-Landschaft grundsätzlich nur innerhalb von Bauzonen (Gesamtfläche 71.0 km²) zulässig. Die Fläche, auf der EWS-Bohrungen erlaubt sind, beträgt etwa 55.9 km² (Zum Vergleich: Kantonsfläche: 517.7 km²).

⁴ GDWH-Datensatz, abgerufen im April 2025. Zur Beurteilung der heutigen EWS-Nutzung müssen Daten aus der Energiestatistik des Kantons aus dem Jahr 2022 mit räumlichen Daten des Amtes für Geoinformation von Ende April 2025 verglichen werden. Für die Fragestellung, d.h. die Prognose des Zubaus der EWS-Nutzung im Kanton, ist der Fehler, der durch den Vergleich unterschiedlich aktueller Datensätze entsteht, aber nicht relevant.

⁵ Eine Auswertung von Daten aus 18 Kantonen (AG, AR, BE, BL, BS, FR, GR, JU, LU, NE, NW, SG, SH, SO, SZ, VD, ZG und ZH) ergibt eine seit 1980 kontinuierlich zunehmende durchschnittliche Sondenlänge. Im Jahr 2017 betrug diese 194 m (Dörig, 2019).

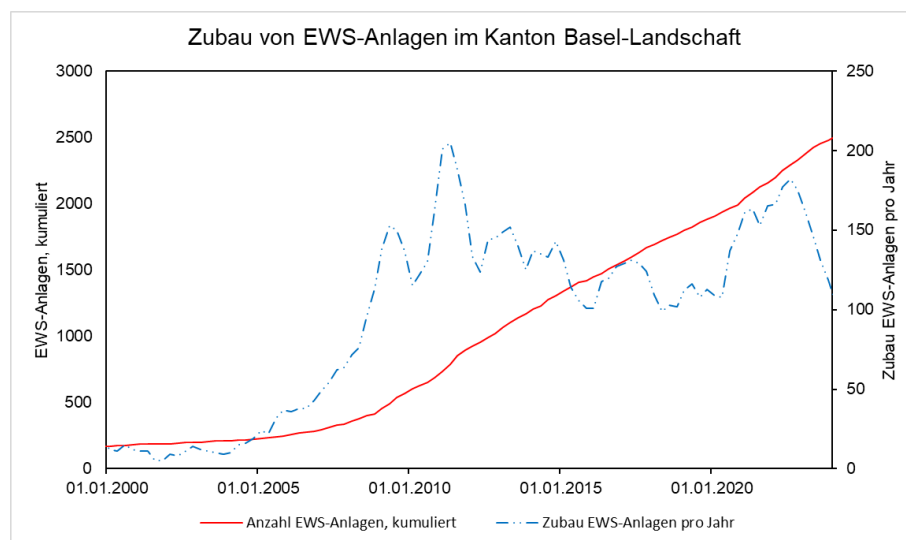


Abbildung 1: Zubau von EWS-Anlagen im Kanton Basel-Landschaft, dargestellt für den Zeitraum 2000 bis 2023. Der jährliche Zubau stellt den gleitenden Mittelwert realisierter EWS-Anlagen über ein Jahr dar, basierend auf Quartalsdaten.

Die Fläche der Gevierte, auf der EWS erlaubt sind und auf denen mit einem Zubau gerechnet werden kann, beträgt 42.9 km². Dies ergibt eine durchschnittliche Dichte von nur 0.6 EWS-Anlagen pro Hektar bzw. einem Abstand von 130 m zwischen benachbarten Anlagen. Bei solchen Abständen ist die thermische Beeinflussung vernachlässigbar.⁶

Die räumliche Verteilung der EWS-Anlagen ist jedoch sehr heterogen: 77% aller heutigen EWS-Anlagen sind in Gevierten anzutreffen, die durch einen geringen durchschnittlichen spezifischen Wärmebedarf von maximal 400 MWh pro Hektar Grundfläche charakterisiert sind, d.h. in typischen Randgebieten mit Ein- und kleinen Mehrfamilienhäusern (Abbildung 2 und Abbildung 3). 19% der Anlagen sind in Gevierten mit 400 – 700 MWh/ha anzutreffen.

Der Anteil von EWS-Anlagen an allen Heizsystem beträgt in Gevierten mit 400 MWh/ha Wärmebedarf 8%, in den Gevierten mit 400 – 700 MWh/ha Wärmebedarf 5%. Der Quotient aus Energiebezugsfläche⁷ (EBF) und Fläche der Gevierte beträgt dort etwa 44% resp. 73%. Vereinzelt treten EWS-Anlagen stark gehäuft auf (s. Abbildung 4).

Wärmebedarfsdichten von weniger als 700 MWh/ha sind in der Regel zu gering für einen wirtschaftlichen Betrieb von thermischen Netzen (Rohrbach, 2022). Es ist daher zu erwarten, dass der Zubau von EWS-Anlagen vor allem in diesen Gevierten stattfindet.

Ein geringer Anteil (4%) aller EWS-Anlagen sind in Gevierten mit hoher Wärmebedarfsdichte (> 700 MWh/ha) anzutreffen. Dort beträgt ihr Anteil an allen Heizungen 4% und der Quotient aus Energiebezugsfläche⁸ (EBF) und Fläche der Gevierte etwa 122%.

⁶ Hier sind nur Flächen berücksichtigt, auf denen die maximal zulässige Bohrtiefe mindestens 50 m beträgt. Beim Mapping dieser Flächen auf die Gevierte sind nur solche Gevierte berücksichtigt, in denen mindestens 50% der Fläche für EWS-Bohrungen zulässig sind. Andernfalls liesse sich in diesen Gevierten kein sinnvoller Zubau realisieren. Diese Gevierte enthalten 88% aller installierten EWS-Anlagen.

⁷ Die Energiebezugsfläche wurde, da im kantonalen gebäude- und Wohnungsregister kGWR nur für wenige Objekte vorhanden, aus der Grundfläche und der Geschoszahl der Objekte berechnet. Der so erhaltene Wert stellt daher nur eine Näherung an die tatsächliche EBF dar.

⁸ Die Energiebezugsfläche wurde, da im kantonalen Gebäude- und Wohnungsregister kGWR nur für wenige Objekte vorhanden, aus der Grundfläche und der Geschoszahl der Objekte berechnet. Der so erhaltene Wert stellt daher nur eine Näherung an die tatsächliche EBF dar.

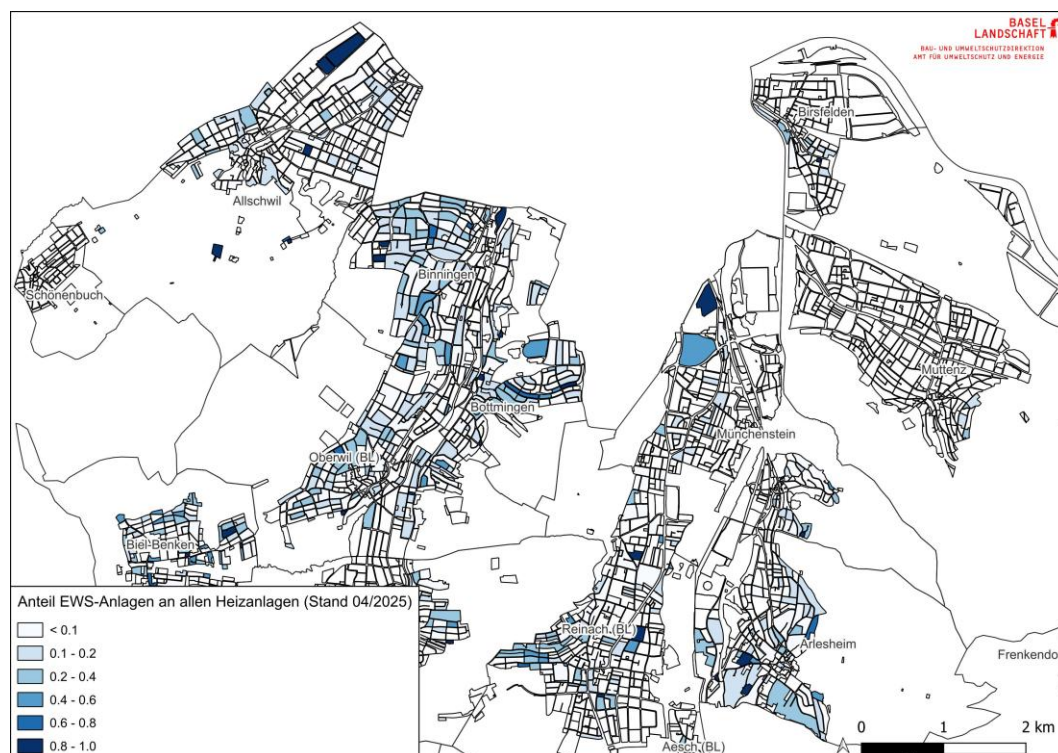


Abbildung 2: Anteil von EWS-Anlagen an allen Heizsystemen, dargestellt für Gevierte in den dicht besiedelten Gemeinden im Unterbaselbiet (Stand April 2025).

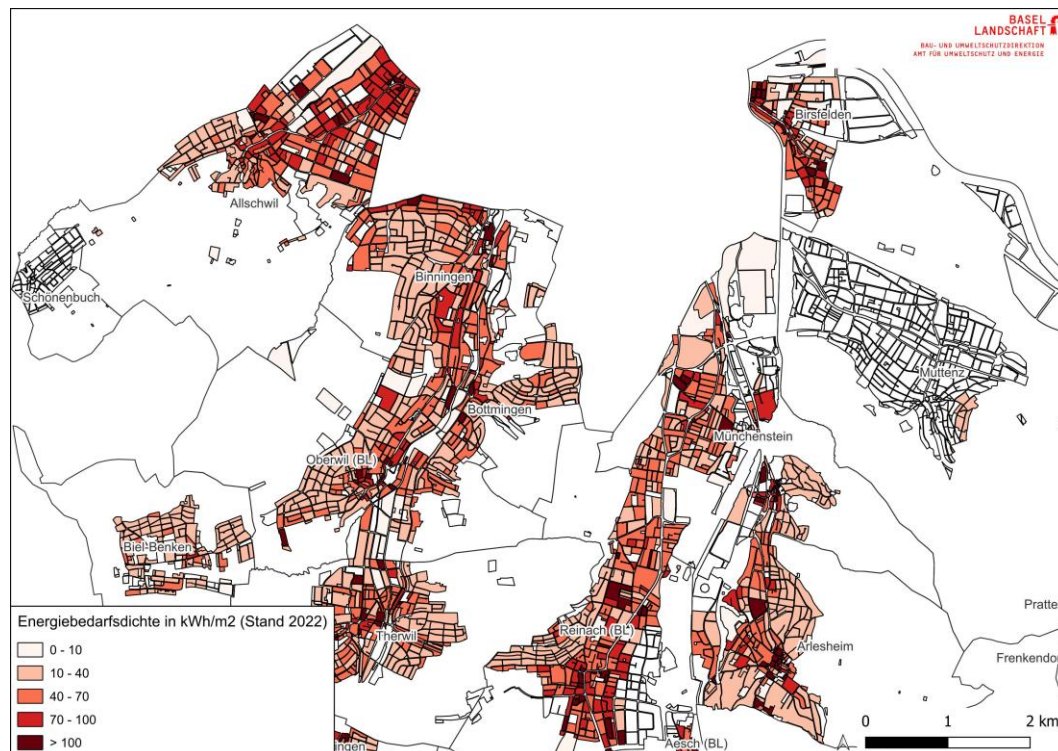


Abbildung 3: Wärmebedarfsdichte in kWh/m² in den dicht besiedelten Gemeinden im Unterbaselbiet. Die Wärmebedarfsdichte ist nur in denjenigen Gevierten dargestellt, in denen EWS-Bohrungen erlaubt sind bzw. wo eine EWS-Nutzung aufgrund der maximal zulässigen Bohrtiefe sinnvoll ist (1 kWh/m² entspricht 10 MWh/ha; Stand 2022).



Abbildung 4: Beispiel für ein Gebiet in der Gemeinde Binningen mit einer starken lokalen Häufung (100%) von EWS-Anlagen (grüne Punkte: einzelne EWS).

3.2.2 VERTEILUNG DER ANLAGENGRÖSSE

Die EWS-Anlagen sind hinsichtlich ihrer Grösse (Anzahl EWS pro Anlage) relativ homogen verteilt. «Kleine» sowie «grosse» EWS-Anlagen finden sich in allen Gebietsklassen. Mit zunehmender Anzahl von EWS pro EWS-Anlage nimmt der Anteil der Anlagen in den Vierteln mit geringer Energiebedarfsdichte wie zu erwarten leicht ab (Abbildung 5, Abbildung 6). Entsprechend nimmt in den Vierteln mit mehr als 400 MWh/ha Wärmebedarf die Anlagendichte mit der EWS-Anzahl pro Anlage zu.

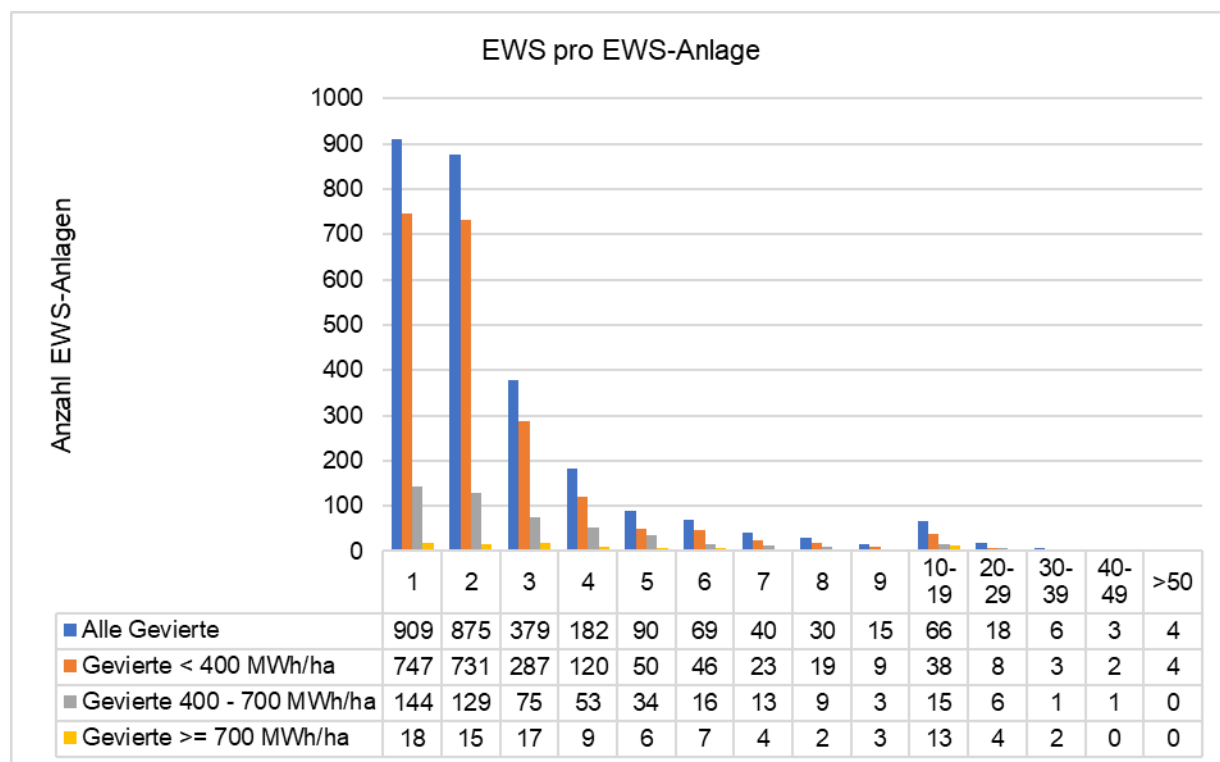


Abbildung 5: Räumliche Verteilung der EWS-Anlagengrösse in den drei Gebietsklassen.

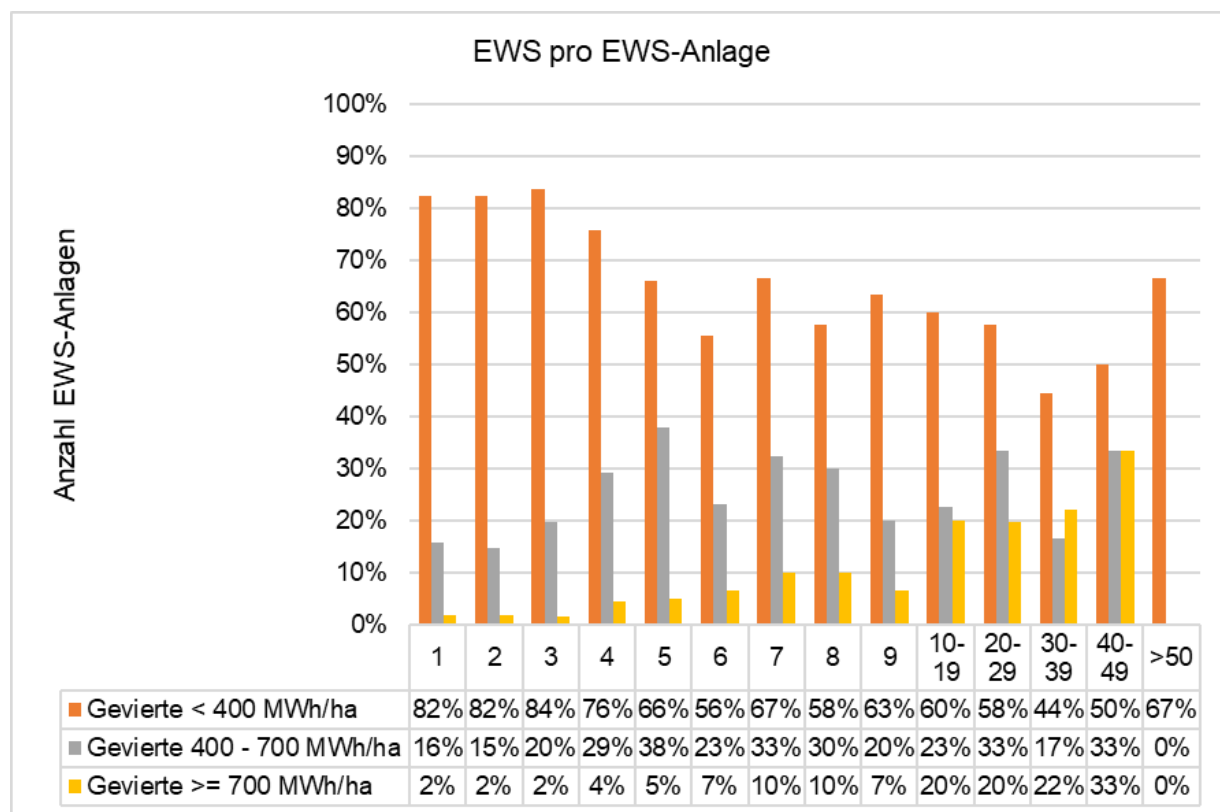


Abbildung 6: Relative räumliche Verteilung der EWS-Anlagengrösse in den drei Gebietsklassen.

3.3 ERWARTETER ZUBAU VON EWS-ANLAGEN

Geht man davon aus, dass der mittlere Zubau von EWS-Anlagen der letzten Jahre von 130 ± 30 EWS-Anlagen pro Jahr (s. Abbildung 1) bis zum Jahr 2050 hinsichtlich Menge und räumlicher Verteilung unverändert bleibt, sind im Jahr 2050 etwa 5'200 bis 6'700 EWS-Anlagen zu erwarten, was etwa 200% bis 250% gegenüber dem Stand im Jahr 2025 entspricht. Der Anteil von EWS-Anlagen an allen Heizungssystemen wird dann etwa 8% bis 10% betragen und etwa 200 bis 250 GWh Komfortwärme erzeugen. Der Wärmeentzug aus dem Erdreich würde dann bei einer durchschnittlichen Jahresarbeitszahl (JAZ) der EWS-Anlagen von 4 etwa 150 resp. 190 GWh betragen. Zum Vergleich: Das Szenario ZERO Basis der kantonalen Energieplanung geht davon aus, dass bis 2050 rund 1'000 GWh/a Umweltwärme genutzt werden.⁹

In den Gevierten mit einer Energiebedarfsdichte von maximal 400 MWh/ha (400 – 700 MWh/ha) Stand heute wird der Anteil an EWS-Anlagen etwa 16 - 20% (10 - 13%) betragen.

Tabelle 1: Räumliche Verteilung von EWS-Anlagen, unterteilt nach Gevierten mit unterschiedlicher Energiebedarfsdichte, im Jahr 2025 und prognostiziert für das Jahr 2050.

Gebiets- klasse	Wärmebe- darfsdichte heute [MWh/ha]	2025				Prognose 2050	
		Flächen- anteil	Enthält x Prozent aller EWS-Anla- gen	Anteil EWS-An- lagen an allen Heizun- gen	Anteil Anlagen mit < 10 EWS	Enthält x Prozent aller EWS-An- lagen	Anteil EWS-An- lagen an allen Hei- zungen
1	< 400	76%	77%	8%	97%	77%	16 – 20%
2	400 – 700	17%	19%	5%	95%	19%	10 – 13%
3	> 700	7%	4%	4%	87%	4%	8 – 10%

3.4 MIT DEM EWS-ZUBAU ERWARTETE HERAUSFORDERUNGEN

Eine EWS stellt im Betrieb eine Temperatursenke dar, die durch eine Wärmepumpe so stark abgekühlt wird, dass eine ausreichend grosse Wärmemenge aus dem Erdreich auf das Wärmeträgerfluid in der Sonde übertragen wird. Durch den Wärmeentzug kühlt sich der Boden um die Sonde immer weiter ab. Nach SIA muss die Länge einer Sonde so bemessen werden, dass während 50 Jahren Betriebszeit bei konstantem mittlerem Wärmeentzug die mittlere Wärmeträgertemperatur in der Sonde nicht unter -1.5°C sinkt. Andernfalls muss mit Frostschäden an der Hinterfüllung gerechnet werden, welche irreversible sein können und im Extremfall lokale Bodensetzungen verursachen.

⁹ Denkbar ist, dass sich der Zubau hinsichtlich der Verteilung der Anlagengrösse verändert. Möglicherweise wurden bisher EWS-Anlagen mehrheitlich bei kleineren Objekten (kostengünstige Umrüstung) installiert. Künftig könnten zunehmend grössere Objekte, bei denen Luft-WP z.B. aus lärmschutztechnischen Gründen nicht realisiert werden können, mit EWS ausgerüstet werden, was im Ergebnis einen höheren Anteil von EWS-Anlagen in den dicht besiedelten Gevierten zur Folge haben könnte als hier angenommen. Für diese Differenzierung fehlen zum heutigen Zeitpunkt jedoch belastbare Grundlagen.

Mit zunehmender Betriebszeit wächst die Temperatursenke zylinderförmig um eine nicht regenerierte EWS und erreicht nach 50 Jahren Betriebszeit einen Durchmesser von etwa 100 m – 200 m (Abbildung 7).

Der Abkühlung wirkt der natürliche Wärmefluss über die Erdoberfläche und aus dem Erdinnern in die Temperatursenke entgegen. Die Zeit, nach der ein Gleichgewicht zwischen Wärmeentzug und natürlich nachströmender Wärme erreicht wird, nimmt quadratisch mit der Länge der Sonde zu und beträgt für eine EWS mit Länge 100 m etwa 250 Jahre, also weit jenseits der 50 Jahre, auf die EWS in der Schweiz in der Regel ausgelegt werden. Nach 50 Jahren ist eine EWS, wenn sie korrekt nach SIA ausgelegt wurde und wenn der Wärmeentzug über die Jahre konstant bleibt, thermisch erschöpft. Diese Zeit wird noch verkürzt, wenn sich die Temperatursenken von Sonden auf benachbarten Parzellen überlagern.¹⁰ Einzelsonden, die nicht durch Nachbarsonden beeinflusst sind, kühlen sich nach 50 Jahren nur noch geringfügig weiter ab.

Die Betriebszeit nicht vollständig regenerierter EWS ist begrenzt. Mit einer nachträglichen Regeneration kann eine langfristige Erdwärmenutzung jedoch sichergestellt werden. Nicht regenerierte EWS-Anlagen können jedoch die Wirkung der Regeneration von benachbarten EWS beeinträchtigen.

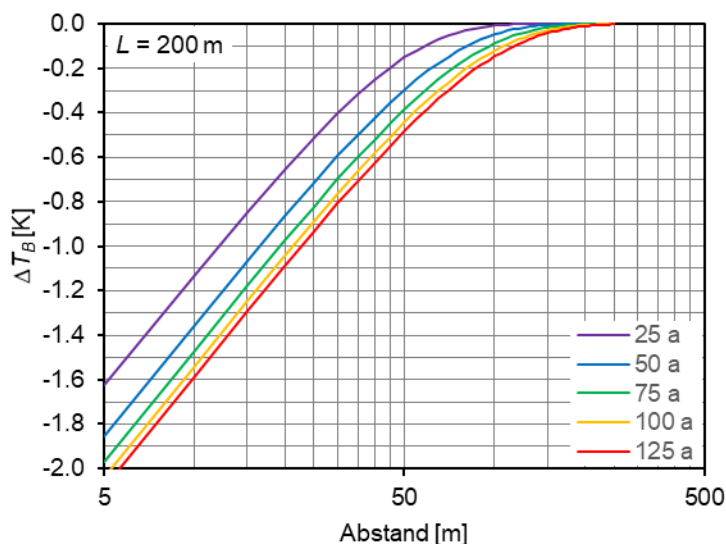


Abbildung 7: ΔT_B : Veränderung der Bodentemperatur T_B um eine 200 m tiefe EWS nach 25, 50, 75, 100 und 125 Jahren Betriebszeit (Annahmen: Wärmeleitfähigkeit des Bodens 2.5 W/m/K , Temperaturleitfähigkeit des Bodens $1.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, durchschnittlicher Wärmeentzug $100 \text{ kWh pro Meter EWS}$).

Bei lokal hohem Wärmebedarf pro Hektar Bauland ist herausfordernd, die Wärmeversorgung rein mit Erdwärmesonden nachhaltig sicherzustellen. Bei der Auslegung von neuen EWS wird i.d.R. neben dem Wärme- und Leistungsbedarf nur der aktuelle Zustand der Erdwärmenutzung, d.h. die

¹⁰ Überdimensionierte EWS, die immer wieder anzutreffen sind, können auch weit über 50 Jahre hinaus genutzt werden (sofern sie nicht durch Nachbarsonden beeinflusst werden). Es gibt jedoch keine verlässlichen Aussagen dazu, wie hoch der Anteil überdimensionierter Anlagen an allen EWS-Anlagen ist. Die Anzahl unterdimensionierter EWS lässt sich ebenso wenig schätzen. Es kann lediglich vermutet werden, dass nach Einführung der SIA 384/6 im Jahr 2010 mit den neuen Planungshilfen der Anteil unterdimensionierter Anlagen abgenommen hat. Die vorliegende Studie muss aber von einer Planung und Auslegung nach SIA ausgehen. Eine Relativierung der Konsequenzen der thermischer Übernutzung als Folge überdimensionierter Sonden ist unzulässig.

bestehenden Nachbarsonden, mitberücksichtigt. Jede künftige Nachbarsonde führt zu einem zusätzlichen Entzug von Wärme am Standort des Projektes. Zwar schreibt die SIA vor, dass künftige Sonden ebenso wie bestehende Nachbarsonden bei der Auslegung zu berücksichtigen sind, jedoch lässt sich diese Forderung in der Praxis kaum umsetzen, da sich der Zubau (Anteil und räumliche Verteilung) von EWS nicht prognostizieren lässt.

Mit einer vollständigen aktiven Regeneration aller EWS-Anlagen ist eine dauerhafte und nachhaltige Erdwärmenutzung grundsätzlich möglich. Damit wären nachbarschaftliche Konflikte praktisch ausgeschlossen.

Definition Regeneration

Regeneration bezeichnet die Rückführung von Wärme ins Erdreich, um die Temperatur rund um die Erdwärmesonde zu erhöhen. Dies kann entweder passiv durch natürliche Wärmeflüsse oder aktiv mittels Erschliessung geeigneter Wärmequellen erfolgen wie bspw. Solarkollektoren.

Die Regeneration von EWS erfolgt heute oft durch die passive Kühlung von Gebäuden über die Fussbodenheizung, das sogenannte «Geocooling». Der Regenerationsgrad f_{EWS} bezeichnet das Verhältnis der über die EWS in den Boden eingespeisten Wärme im Verhältnis zum Wärmeentzug in der Jahresbilanz. Der erreichbare Regenerationsgrad ist abhängig vom Gebäudestandard und von den klimatischen Verhältnissen.

Mit Geocooling können jedoch nur geringe Regenerationsraten von weniger als 20% erzielt werden. Um höhere Regenerationsgrade zu erzielen, ist eine Erschliessung von Energiequellen mit höherer Quellentemperatur erforderlich. Die Aussenluft als Wärmequelle (Regeneration über Luft-Wärmetauscher) ermöglicht Regenerationsgrade bis 60%. Mit Wärme aus Solarkollektoren und Abwärme aus der Klimatisierung können Regenerationsgrade von 100% und mehr erreicht werden.

Eine ungewollte Abkühlung des Untergrundes kann auch reduziert werden, indem EWS durch Verringerung des Wärmeentzugs thermisch «entlastet» werden, etwa durch energetische Sanierungen oder durch die Nutzung einer zweiten (separaten) Wärmeerzeugungsanlage. In der Schweiz existieren unterdessen auch erste Wärmepumpenanlagen, die zwei Quellen gleichzeitig nutzen. So werden beispielsweise Luft und Erdwärme gemeinsam genutzt. Zwei-Quellen-Wärmepumpenanlagen eignen sich vorwiegend bei grösseren Anlagen mit einer Heizleistung über 100 kW.

Im vorliegenden Bericht wird auf die Unterscheidung zwischen aktiver und passiver Regeneration verzichtet, sofern dies für das Verständnis nicht zwingend erforderlich ist.

Bei grossen EWS-Feldern ist ein hoher Regenerationsgrad Stand der Technik und zwingend erforderlich, da sonst bereits nach wenigen Jahren die tiefsten zulässigen EWS-Temperaturen unterschritten werden. Mit einem hohen Regenerationsgrad lässt sich ausserdem die Anzahl von EWS reduzieren. Die zusätzlichen Kosten z.B. für die Einbindung von Solarwärme oder anderen Wärmequellen wird ab einer Anlagenleistung von etwa 100 kW durch die eingesparten EWS-Meter wieder ausgeglichen. Für kleinere Objekte ist eine generelle Forderung nach einer vollständigen Regeneration jedoch verhältnismässig teuer und in Gebieten mit geringer Ausnützungsziffer gar nicht erst nötig.

Energiebedarf für die Regeneration

Die Regeneration erfolgt vorwiegend im Sommer. Dann steht gleichzeitig ein hohes Angebot an günstiger elektrischer Energie aus Solarstromanlagen zur Verfügung. Dies gilt für die Regenerationsquellen Solarwärme, Aussenluft und Abwärme aus der Klimatisierung gleichermassen. Der Strombedarf für die Umwälzpumpen ist sehr gering, fällt vermehrt zum Zeitpunkt des solaren Strom-Überangebots an und besitzt daher eine hohe ökologische Qualität (Frischknecht, 2025). Damit ist der Stromverbrauch für die Regeneration sowohl ökonomisch wie auch bezüglich Versorgungssicherheit unkritisch. Dies gilt auch für den Fall von aktiver Regeneration mit aktiver Kühlung über die Wärmepumpe. Die Wärmepumpe arbeitet zu dieser Zeit mit einem hohen COP und bei Stromüberangebot.

3.5 GRENZEN DES EWS-POTENZIALS

Wie bereits in den Jahren zwischen ca. 2005 und 2011 ist in der Schweiz seit etwa 2018 wieder ein gewisser EWS-„Boom“ zu beobachten. Wurden von 2011 bis 2018 pro Jahr etwa 2.5 Millionen EWS-Meter installiert, sind es im Jahr 2023 bereits über 4.5 Millionen (FWS, 2024). Damit decken EWS-Anlagen im Jahr 2023 etwa 3.7 TWh des Endenergiebedarfs von 70 TWh für Raumwärme und Warmwasser. Diese Nutzung entspricht einem Wärmeentzug aus dem Erdreich von etwa 2.8 TWh (Link, 2024).¹¹

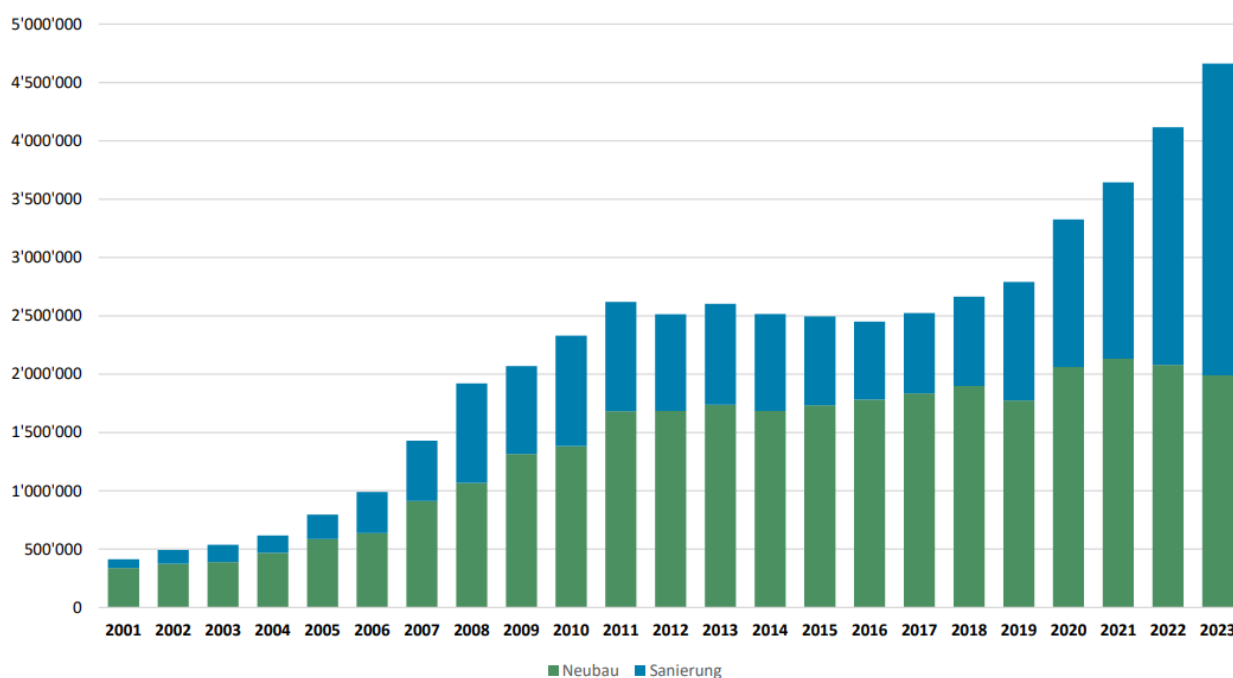


Abbildung 8: In der Schweiz installierte Erdwärmesonden in Meter pro Jahr für Neubauten und Sanierungen (Quelle: Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz).

Wie gross das technisch nutzbare Potenzial der oberflächennahen Erdwärme ist, hängt in erster Linie davon ab, wie das Erdreich langfristig mittels EWS bewirtschaftet wird und wie gross die verfügbare Fläche auf bebauten Parzellen ist, auf denen EWS installiert werden können.

¹¹ Die Grösse der Fläche, auf der in der Schweiz EWS-Bohrungen zulässig sind, ist nicht dokumentiert. Daher sind Aussagen zur Dichte von EWS-Anlagen nur lokal möglich.

Abbildung 9 veranschaulicht qualitativ die Wärmeströme und Temperaturen im Erdreich, wie sie sich im Betrieb einer EWS einstellen.

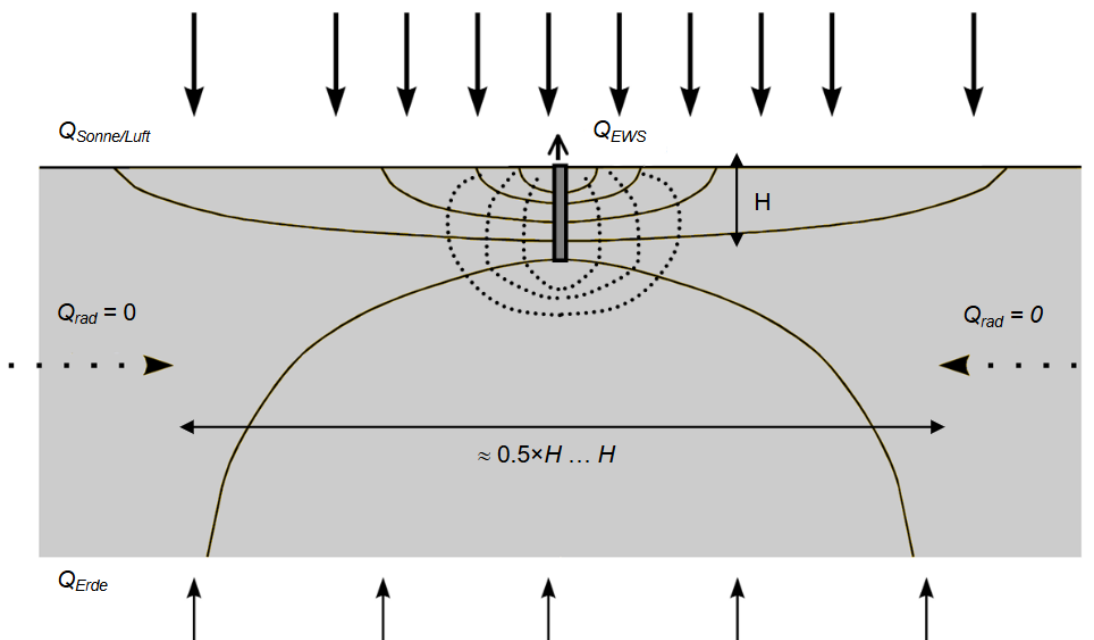


Abbildung 9: Wärmestromdichten (Pfeile) und Wärmeflusslinien (durchgezogene Linien) im stationären Zustand einer einzelnen EWS der Länge H . Die punktierten Linien (Isothermen) veranschaulichen den "Temperatur-Trichter" (oder «Temperatursenke»), der sich durch kontinuierlichen Wärmeentzug um die EWS ausbildet. Im stationären Zustand wird der Wärmeentzug Q_{EWS} der EWS aus dem Boden durch den Wärmestrom Q_{Erde} aus dem Erdinnern und dem Wärmestrom über die Erdoberfläche $Q_{Sonne/Luft}$ («Solarenergie») vollständig kompensiert. Die Ausdehnung des Trichters im stationären Zustand beträgt etwa eine halbe bis ganze EWS-Länge ($Q_{rad} = 0$). Die Betriebsdauer, nach der sich ein stationärer Zustand einstellt, nimmt quadratisch mit der Sondenlänge H zu und beträgt für eine 100 m tiefe EWS etwa 250 Jahre, liegt also weit ausserhalb der typischen Auslegungszeit für EWS von 50 Jahren. Nach SIA ist für EWS, die für einen Zeitraum von 50 Jahren ausgelegt werden, innerhalb von 50 m Abstand ein möglicher Einfluss von Nachbarsonden zu berücksichtigen (Bild: Wagner und Weisskopf, 2014).

Nach Poppei und Huber (2019) ist hierfür der sogenannte "grundstücksflächenbezogene Wärmeentzug" P_{GSF} in kWh pro m² Bodenfläche und Jahr massgeblich, das ist der durchschnittliche Netto-Wärmeentzug, verursacht über alle EWS-Anlagen in einem Gebiet während einem Jahr. Ein Wärmeentzug P_{GSF} von 8 kWh/m²/a verursacht demnach eine Abkühlung der Bodentemperatur von durchschnittlich 1 K (diese Werte gelten für bestimmte Bodenkennwerte und typische Betriebsparameter von EWS-Anlagen, sind also nicht ohne weiteres auf beliebige Standorte übertragbar). Erst bei grösserem Wärmeentzug wird die thermische Beeinflussung so gross, dass Massnahmen wie eine Längenreserve oder eine aktive Regeneration zur Kompensierung der gegenseitigen Beeinflussung erforderlich wird¹².

¹² Die Längenreserve und die aktive Regeneration sind als zusätzliche Massnahmen gegenüber einer EWS-Auslegung ohne Berücksichtigung von künftigen Nachbarsonden zu verstehen.

Poppei und Huber gehen implizit davon aus, dass eine durch Nachbarsonden verursachte Abkühlung der Bodentemperatur von 1 K gegenüber der ungestörten Bodentemperatur am Standort einer zu planenden Sonde keine Massnahmen erfordert¹³. Die SIA hat diese Sichtweise bei der Überarbeitung der Norm 384/6 Erdwärmesonden 2021 übernommen. Unter diesen Annahmen lässt sich folgern, dass ein durchschnittlicher Wärmeentzug aus dem Boden mittels EWS von 8 kWh/m²/a ohne aktive Regeneration über einen Zeitraum von 50 Jahren möglich ist (siehe auch Kapitel 3.10).

Anders verhält es sich, wenn Sonden aktiv regeneriert werden. Vollständig regenerierte EWS (Regenerationsgrad f_{EWS} gleich 100%) verhalten sich wie unbeeinflusste Einzelsonden (Huber, 2012). Unter diesen Bedingungen kann man nicht mehr von einem "Erdwärme-Potenzial" sprechen, sondern von der (sensiblen) Wärmespeicherkapazität des Erdreichs. Die Obergrenze dieses Potenzials entspricht der Energiedichte, die in grossen, kompakten EWS-Feldern gespeichert werden kann, d.h. etwa 200 bis 300 kWh/m²/a. Allerdings lassen sich in Wohngebieten aufgrund der begrenzten Fläche für EWS-Bohrungen solch hohe Werte bezogen auf individuelle Anlagen bei weitem nicht erreichen.

Weitere Faktoren, welche das EWS-Potenzial bestimmen, sind lokale Parameter wie Bodentemperatur, Wärmestromdichte, thermische Gesteinseigenschaften, Grundwasserströmung und objekt-spezifische Parameter der EWS-Anlage (Entzugsleistung und die Vollbetriebsstunden).

Natürliche Regeneration durch Grundwasserströmung

Der Wärmetransport durch Grundwasserströmung kann die Auskühlung des Untergrundes durch eine EWS verringern. Umgekehrt kann die durch aktive Regeneration in den Boden gebrauchte Wärme mit der Grundwasserströmung abtransportiert werden. Die hydrogeologischen Parameter sind jedoch oft nicht gut bekannt, weshalb bei der Auslegung von EWS nur die Wärmeleitung im Untergrund berücksichtigt wird. Aufgrund der mit der Grundwasserströmung verbundenen Komplexität wurde diese in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

3.6 AUSLEGUNG VON EWS-ANLAGEN

Die Norm SIA 384/6 Erdwärmesonden definiert die Regeln der Baukunst für die Planung, Dimensionierung und Erstellung von EWS und deren Einbindung in eine Wärmepumpenanlage in der Schweiz. Die wichtigsten Anforderungen an die Auslegung von EWS-Anlagen nach SIA 384/6:2021 sind:

1. Einzelne EWS oder ein EWS-Feld sind so zu bemessen, dass für ein definiertes Lastprofil der EWS-Anlage während einer Betriebszeit von mindestens 50 Jahren Eisbildung in der Hinterfüllung und im Erdreich ausgeschlossen ist. Dies ist sichergestellt, wenn die mittlere Wärmeträgertemperatur T_{EWS} (d.h. der Mittelwert aus Ein- und Austrittstemperatur des Wärmeträgers am Sondenkopf) in der EWS nicht unter -1.5°C sinkt.
2. Bestehende und künftige EWS sind in einem Umkreis von 50 m um das Projekt zu berücksichtigen.

¹³ Bei der Auslegung von EWS nach SIA muss bei der Berechnung der mittleren Bodentemperatur über die Länge der EWS für den Betriebsfall "Wärmeentzug" ein "Sicherheitszuschlag" von 1K berücksichtigt werden. Indem der Boden bei der Auslegung um 1 K zusätzlich "rechnerisch" abgekühlt wird, entsteht so eine "Temperaturreserve" bei der Auslegung.

Die Auslegung kann nach SIA bei einfachen EWS-Anlagen (monovalente Anlagen zur Wärmezeugung mit maximal 4 EWS) anhand vereinfachter Berechnungsverfahren vorgenommen werden. Komplexere und grössere EWS-Anlagen sind mit numerischen Modellen auszulegen.

3.7 BERÜCKSICHTIGUNG KÜNFTIGER NACHBARSONDEN

Bei der Auslegung von EWS nach SIA 384/6:2021 muss eine Annahme zum endgültigen Ausbau (d.h. zum «geothermischen Deckungsgrad») von EWS-Anlagen in der Projektumgebung getroffen werden. Der geothermische Deckungsgrad f_{geo} (Anteil von EWS-Anlagen an allen Heizsystemen) setzt sich zusammen aus dem Anteil bestehender EWS-Anlagen an allen Heizsystemen, f_{50m} , und dem Anteil zukünftiger EWS-Anlagen an allen Heizsystemen, f_{ZB} , d.h.

$$f_{geo} = f_{50m} + f_{ZB} \quad \text{Gl. 1}$$

Während der Anteil bestehender Anlagen bekannt ist, kann der Zubau künftiger Nachbarsonden kaum verlässlich abgeschätzt werden. Es kann lediglich vermutet werden, dass in Gebieten, die im Perimeter eines thermischen Netzes liegen, eher ein geringer Anteil von EWS-Anlagen zu erwarten ist, während in allen übrigen Gebieten der Anteil höher ausfällt. Die SIA empfiehlt für diese Gebiete, von 20% resp. 40% Anteilen von EWS-Anlagen an allen Heizsystemen auszugehen. Wie die Auswertung in Kapitel 3.2.2 zeigt, sind für den Kanton Basel-Landschaft geringere Werte zu erwarten (Tabelle 1).

Der SIA stellt mit der Norm 384/6:2021 eine einfache Auslegungshilfe für die Berücksichtigung künftiger Nachbarsonden auf Basis einer Annahme zu f_{geo} zur Verfügung. Diese Auslegungshilfe beruht jedoch auf stark vereinfachten Bedingungen, nämlich auf einer gleichmässigen Anordnung von EWS-Anlagen mit identischer JAZ in einer Umgebung, in der alle Objekte identisch hinsichtlich ihres Energiebedarfes und ihrer Grundstücksfläche sind.

Unter diesen Bedingungen wird der Einfluss durch künftige EWS mit Hilfe des von Poppei und Huber (2019) eingeführten grundstücksflächenbezogenen Wärmeentzug P_{GSF} berechnet. Dieser wird aus der Energiebezugsfläche A_E , der effektiven Grundstücksfläche GSF_{eff} , dem spezifischen Wärmebedarf Q des Objektes (inkl. Trinkwarmwasser), der Jahresarbeitszahl JAZ der Wärmepumpe und dem zu erwartenden Zubauanteil f_{ZB} an gleichartigen EWS-Projekten in der Umgebung berechnet:

$$P_{GSF} = Q \frac{A_E}{GSF_{eff}} \frac{JAZ}{JAZ - 1} f_{ZB} \quad \text{Gl. 2}$$

Die effektive Grundstücksfläche umfasst neben der Grundstücksfläche gemäss Kataster je nach Lage auch für die Berechnung relevante Anteile angrenzender öffentlicher Flächen wie z.B. Strassen. Für die Diskussion dieser Methode kann die effektive Grundstücksfläche mit der tatsächlichen Grundstücksfläche gleichgesetzt werden. Der Quotient von A_E und GSF_{eff} entspricht daher etwa der Ausnützungsziffer.

Der «grundstücksflächenbezogene Wärmeentzug» in kWh pro m² Bodenfläche und Jahr entspricht also dem Netto-Wärmeentzug, verursacht durch alle Nachbar-EWS-Anlagen in einem Gebiet während einem Jahr. Dieser Wärmeentzug hat (unter den oben beschriebenen vereinfachten Annahmen) eine bestimmte Abkühlung des Erdreichs zur Folge, die in Abbildung 10 dargestellt ist.

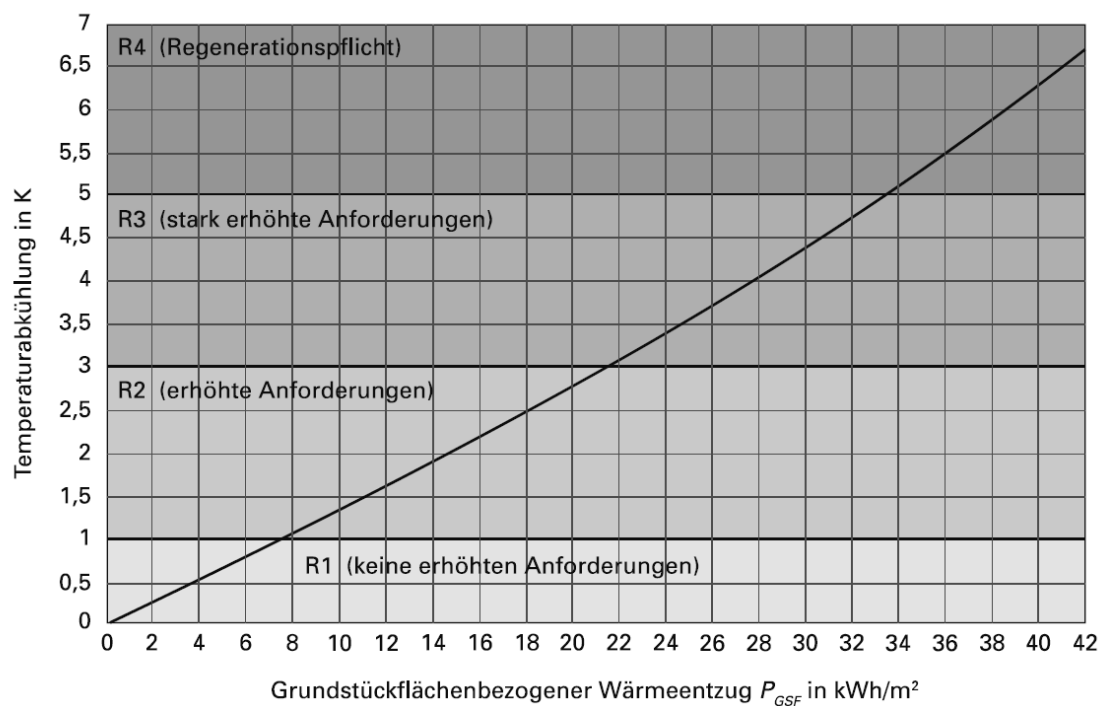


Abbildung 10: Änderung der Bodentemperatur am Projektstandort in Kelvin, verursacht durch den spezifischen Wärmeentzug P_{GSF} künftiger Nachbarsonden nach 50 Jahren. Je nachdem, wie gross die Abkühlung ausfällt, wird das Gebiet in Klassen von R1 bis R4 eingeteilt, für welche jeweils konkrete Massnahmen (z.B. sog. «erhöhte» oder «stark erhöhte Anforderungen», d.h. Auslegungsreserven in Form zusätzlicher Bohrmeter oder aktive Regeneration) vorgegeben werden (SIA 384/6:2021 Figur 3).

Das Ausmass der Abkühlung wird in vier verschiedene Klassen R1 bis R4 unterteilt. Je nachdem, wie gross diese Abkühlung ausfällt, müssen entsprechende Massnahmen bei der Auslegung berücksichtigt werden, z.B. zusätzliche Sondenmeter und/oder aktive Regeneration. Diese sog. «erhöhten Anforderungen» oder «stark erhöhten Anforderungen» sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Auslegungsziele für EWS je nach Abkühlung des Untergrundes durch Nachbarsonden. Dargestellt sind die Wärmeträgertemperaturen T_{EWS} , auf die eine EWS-Anlage für eine Betriebszeit von 50 Jahren ausgelegt werden muss. Eine Auslegung auf über -1.5°C bedeutet, dass die EWS auf eine geringere Entzugsleistung im Vergleich zu einer Sonde ohne Beeinflussung ausgelegt wird, d.h. effektiv länger ausfällt (dunkelgrau hinterlegte Auslegungsziele). Rot markiert sind Konstellationen, unter denen eine EWS-Nutzung nicht möglich ist (nach SIA 384/6 Tabelle 2).

Mindestanforderungen an Regeneration	R1 Keine erhöhten Anforderungen	R2 Erhöhte Anforderungen	R3 stark erhöhte Anforderungen	R4 Regenerationspflicht
Keine Regeneration ($f_{EWS} = 0.0$)	-1.5°C	0.0°C	$+1.5^{\circ}\text{C}$	-
$f_{EWS} = 0.2$	-1.5°C	-0.5°C	$+0.8^{\circ}\text{C}$	-
$f_{EWS} = 0.4$	-1.5°C	-1.0°C	0.0°C	$+1.5^{\circ}\text{C}$
$f_{EWS} = 0.6$	-1.5°C	-1.5°C	-1.0°C	0.0°C
$f_{EWS} = 0.8$	-1.5°C	-1.5°C	-1.5°C	-1.5°C

Beispiel:

Eine EWS-Anlage soll für ein Objekt in einem Wohngebiet mit homogener Struktur (ähnlich grosse Objekte auf ähnlich grossen, gleichmässig verteilten Grundstücken) geplant werden. Der spezifische Energiebedarf Q des Objektes beträgt wie derjenige der benachbarten Objekte $100 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$. Die Energiebezugsfläche A_E beträgt 200 m^2 , die effektive Grundstücksfläche GSF_{Eff} 400 m^2 . Der Anteil f_{ZB} an neuen (künftigen) Erdwärmesonden-Anlagen, bezogen auf alle Objekte im Quartier, wird auf 40% geschätzt. Mit einer typischen Jahresarbeitszahl von 4 für die EWS-Anlage folgt daraus ein grundstücksflächenbezogener Wärmeentzug $P_{GSF} = 16 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$. Die benachbarten identischen Objekte verursachen nach 50 Jahren also eine zusätzliche Abkühlung des Bodens von etwa 2.0 bis 2.5 K (Kategorie R2, "erhöhte Anforderungen" gemäss Abbildung 10).

Um den Wärmeentzug durch die Nachbarsonden zu kompensieren, muss die EWS-Anlage nach Tabelle 2 auf eine minimale Wärmeträgertemperatur von 0°C statt der üblichen -1.5°C ausgelegt werden, wenn die Sonde nicht zusätzlich aktiv regeneriert werden soll (d.h. die Sonde muss effektiv länger ausgeführt werden). Ebenso sind Kombinationen von erhöhter Auslegungstemperatur (d.h. Mehrlänge) und aktiver Regeneration möglich. Bei einer Regeneration von mehr als 60% ist für R2 keine Mehrlänge notwendig.

Planende können nach SIA 384/6:2021 Ziffer 2.4 eine Nutzungsvereinbarung mit der Bauherrschaft abschliessen, in der diese Anforderungen (R1 bis R4) vereinbart werden, aber auch, auf welchen Auslegungszeitraum die EWS-Anlage ausgelegt werden soll. Die Verantwortung für die Auslegungsziele liegt bei der Bauherrschaft. Ob diese Nutzungsvereinbarung in der Praxis angewendet wird, und – falls ja – die Bauherrschaft fachlich durch die Planenden ausreichend beraten wurde und über ausreichende fachliche Kompetenz verfügt, kann bezweifelt werden.

Der SIA war sich bei der Überarbeitung der Norm dieser Problematik offenbar bewusst, und schlägt nun vor, dass Kantone und Gemeinden in Gebieten, wo eine thermische Übernutzung zu erwarten ist, solche zusätzlichen Anforderungen an die Auslegung vorschreiben. Damit wird die

ein Teil der Verantwortung für eine korrekte Auslegung von EWS-Anlagen von den Planenden und der Bauherrschaft an die Gemeinden und Kantone übertragen. Für Vollzugsbehörden sind Vorgaben in Normen jedoch nicht bindend, ausser dies ist in entsprechenden Gesetzen so geregelt.

SIA 384/6:2021, Ziffer 2.5 Behördliche Energieplanung:

Ziffer 2.5.1: Gibt es kantonale oder kommunale Energieplanungen mit Anforderungen an die Erdwärmenutzung, sind diese anzuwenden.

Ziffer 2.5.2: Zonen, in denen mit einem erheblichen Zubau von Erdwärmesonden gerechnet werden muss, sind in der Planung zu berücksichtigen. [...].

Ziffer 2.5.3: In der strategischen Planung können die kantonalen oder kommunalen Behörden Zonen mit erhöhten Anforderungen gemäss Tabelle 2 festlegen. Die Berechnung hat gemäss den Grundsätzen von 3.3 über den Zeitraum von mindestens 50 Jahren zu erfolgen.

Ziffer 2.5.4: Die Zonen mit erhöhten Anforderungen sollen in den geografischen Informationssystemen des Bundes, der Kantone und der Gemeinden gemäss 3.3 für jedermann zugänglich gemacht werden.

Bisher (Stand Oktober 2025) hat noch keine Gemeinde und kein Kanton solche Zonen mit Auslegungsanforderungen oder Regenerationspflichten definiert.

Im Kanton Basel-Landschaft wird die Erarbeitung einer solchen «behördlichen Energieplanung» durch die stark ausgeprägte Gemeinde-Autonomie im Kanton erschwert. Daher ist eine einigermaßen verlässliche Zuordnung zwischen Ausnützungsziffer und Wärmebedarfsdichte hier nicht möglich. Jede Gemeinde nutzt unterschiedliche Nutzungsmasse (Bebauungsziffer, Überbauungsziffer, Nutzungsziffer, Ausnützungsziffer, Bruttogeschossfläche, Grünflächenziffer, ...) und das in teilweise verschiedenen Kombinationen. Es gibt kein einheitliches Mass für die Definition von Ausnützungsziffern wie W2, W3, WG2, etc.

3.8 KRITISCHE DISKUSSION DER SIA-AUSLEGUNGSPRAXIS

Das oben beschriebene Auslegungsbeispiel verdeutlicht, dass die gängige Auslegungspraxis eine langfristig nachhaltige Erdwärmenutzung nicht zwangsläufig garantiert. Um zukünftige privatrechtliche Nachbarschaftsprobleme zu vermeiden, empfiehlt der SIA, die Verantwortung für eine nachhaltige Erdwärmenutzung an die Gemeinden bzw. Kantone zu übertragen. Diese sollen klar definieren, in welchen Fällen und an welchen Standorten erhöhte Anforderungen gelten:

1. Die Auslegungshilfe des SIA, mit welcher der Einfluss künftiger Nachbarsonden berücksichtigt werden kann, geht von stark vereinfachten Annahmen aus, nämlich von einer homogenen Verteilung von EWS-Anlagen und von Objekten mit gleichem Energiebedarf und gleicher Grundstücksfläche. Solche Bedingungen können annähernd in manchen Neubaugebieten angetroffen werden, bilden aber keineswegs die überwiegend anzutreffende eher heterogene Struktur realer Wohngebiete ab.
2. Das Berechnungsmodell nach Poppei und Huber geht ausserdem von Bodenkennwerten aus, die für das Schweizer Mittelland typisch sind. Diese Annahmen sind auf andere Gebiete wie den Kanton Basel-Landschaft mit seiner komplexen Geologie und Topografie aber nicht ohne Weiteres übertragbar.

3. In realen Gebieten sind eher lokale Häufungen oder vereinzelt sehr kurze Abstände zwischen benachbarten EWS-Anlagen anzutreffen, was lokal deutlich stärkere Abkühlungen als nach dem homogenen Modell berechnet zur Folge hat.
4. Weder Planende oder Bauherrschaften können den Zubau künftiger Nachbarsonden abschätzen. Es kann lediglich vermutet werden, dass in Gebieten, die im Perimeter eines thermischen Netzes liegen, eher ein tiefer Anteil von EWS zu erwarten ist, während in allen übrigen Gebieten der Anteil höher ausfällt. Die SIA empfiehlt hier, von 20% resp. 40% Anteilen von EWS-Anlagen an allen Heizsystemen auszugehen.

In Kapitel 8.3 wird gezeigt, dass die Anwendung dieser Methode für die vorliegende Fragestellung unzureichend ist.

3.9 RECHTLICHE FRAGEN

Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, reicht die Temperatursenke um eine EWS weit über typische Parzellengrenzen hinaus. Neben den damit verbundenen technischen Fragen wirft dies auch rechtliche Fragen auf. Hier sind einige Aussagen und Fragen aus aktuellen, noch nicht abgeschlossenen Diskussionen zusammengefasst (siehe z.B. Abegg et al, Dörig, 2020):

1. Jeder Bauherrschaft steht die Wahl des Heizungssystems (innerhalb rechtlicher Anforderungen, z.B. Grundwasserschutz, Luftreinhaltung, Energiegesetz, ...) frei. Eine thermische Übernutzung des Untergrundes liesse sich prinzipiell verhindern, indem die Gemeinden oder der Kanton vorgeben, welcher maximale Wärmebezug bei nicht regenerierten Erdwärmesonden möglich ist. Heute fehlt eine gesetzliche Grundlage, um den Wärmeentzug zu limitieren oder die Erstellung von EWS aus energetischer Sicht einzuschränken. Der Zubau erfolgt "unkontrolliert".
2. Nach gängiger Rechtsauffassung erstreckt sich das Grundeigentum innerhalb der Parzellengrenze vertikal in das Erdreich, soweit für die Ausübung des Eigentums, d.h. die Nutzung der Erdwärme, ein Interesse besteht, d.h. bis zum Fuss der Erdwärmesonde. Die mittels einer Erdwärmesonde geförderte Wärme ist Eigentum des Liegenschaftsbesitzers.
3. Es wird angenommen, dass Liegenschaftsbesitzende gegen den übermässigen Entzug von Wärme durch eine Nachbarsonde mit einer Nachbarschaftsklage wehren können. Es ist unklar, ab wann ein Wärmeentzug einer unzumutbaren Beeinträchtigung entspricht und wie dies nachzuweisen wäre.
4. EWS-Anlagen, bei denen der Einfluss künftiger EWS nicht berücksichtigt wurde, werden durch die nach ihnen installierten Projekte beeinträchtigt und beeinträchtigen diese umgekehrt.
5. Nach Auffassung von Dörig (2020) stellt eine Planungspraxis, die lediglich Anforderungen an neue Erdwärmesonden stellt und eine Beeinträchtigung bestehender Sonden in Kauf nimmt, (First come, first served – Prinzip), einen Verstoss gegen das Zivilgesetzbuch (ZGB) und damit gegen nationales Recht dar.
6. Bauten und Anlagen, welche erheblich Auswirkungen auf Raum, Erschliessung und Umwelt haben, benötigen je nach Ausmass der Auswirkung eine behördliche Bewilligung (Raumplanungsgesetz). Massgebend ist das Interesse der Öffentlichkeit und der Nachbarn an einer vorgängigen Kontrolle mittels Bewilligung. Ob EWS hierunter fallen, ist unklar bzw. bis jetzt nicht Gegenstand von Diskussionen. Kantone können innerhalb von Bauzonen weiter als das RPG gehen. Möglicherweise liessen sich Massnahmen gegen eine thermische Übernutzung des Untergrundes auch über das Raumplanungsgesetz herleiten.

Die bundesrechtliche Regelung gemäss Raumplanungsgesetz (Art. 22 Abs. 1 RPG) verlangt für alle Bauten und Anlagen eine Baubewilligung, wenn sie eine feste Verbindung zum Boden aufweisen und relevante räumliche Auswirkungen haben können. Dazu zählen auch unterirdische Anlagen, sofern sie zonenkonform sind oder die Nutzungsordnung erheblich beeinflussen. Das Bundesgericht bestätigt, dass auch Nutzungen des Untergrunds – wie etwa Sondierbohrungen – grundsätzlich bewilligungspflichtig sind. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob es sachlich angezeigt ist, für die Erstellung einer Erdwärmesonde (EWS) grundsätzlich eine Baubewilligung zu verlangen.

3.10 WEITERFÜHRENDE STUDIEN

Bereits in den Arbeiten von Huber und Pahud (1999) sowie Pahud et al. (2002) finden sich erste Hinweise darauf, dass der vermehrte Ausbau von Erdsonden-Wärmepumpen-Systemen (EWS) potenziell zu einer thermischen Übernutzung des Untergrunds führen kann. Gleichzeitig wird darin die aktive Regeneration als mögliche Gegenmassnahme zur Minderung dieses Effekts vorgeschlagen. Mit der ersten Ausgabe der SIA-Norm 384/6 im Jahr 2010 wurden erstmals Handlungsempfehlungen zu diesem Thema formuliert, wenn auch noch in allgemeiner Form. So heisst es in Ziffer 2.3.3.2 der Norm:

SIA 384/6:2010, Ziffer 2.3.3.2: “Bei einer örtlichen Häufung von verschiedenen Projekten ist die gegenseitige Beeinflussung einzurechnen oder durch geeignete Massnahmen (saisonale Nachladung) zu eliminieren.”

Eine vertiefte Betrachtung des EWS-Potenzials unter energieplanerischen Gesichtspunkten wurde von Wagner und Weisskopf (2014) vorgenommen. Am Beispiel der Stadt Zürich illustrieren sie, dass eine langfristig nachhaltige und substanzielle Nutzung von EWS ohne aktive Regeneration kaum realisierbar ist. Das Amt für Hochbauten der Stadt Zürich trägt diesem Umstand mittlerweile Rechnung und weist in seiner *Richtlinie Gebäudetechnik – Ergänzung zur KBOB-Empfehlung Gebäudetechnik* (2022) auf die Risiken einer thermischen Übernutzung hin. Entsprechende präventive Massnahmen sind verbindlich umzusetzen:

Richtlinie Gebäudetechnik - Ergänzung zur KBOB-Empfehlung Gebäudetechnik, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, 2022:

«Um eine Beschädigung der Erdsonden durch thermische Übernutzung rechtzeitig erkennen zu können, ist ein SONDENSCHUTZ-KONZEPT (z. B. Monitoring oder Überwachung der Erdsondentemperatur) zu erstellen und die Temperatur des aus der Erdsonde zurückströmenden Wärmeträgers ist zu mit einem Monitoring zu überwachen.»

Detaillierte Abschätzungen zum theoretischen Potenzial von EWS unter Berücksichtigung geologischer Standortbedingungen liefert die Studie von Rivera, Blum und Bayer (2017). Mittels numerischer Simulationen und unter Verwendung standorttypischer Bodenkennwerte aus der Stadt Zürich wird gezeigt, dass bei einem typischen Abstand von 30 m zwischen benachbarten EWS-Anlagen und einer Sondenlänge zwischen 50 und 200 m Wärmeentzugsdichten von rund 10 bis 30 kWh/m²/a erzielt werden können – unter der Annahme einer begrenzten Betriebsdauer von 50 Jahren (sogenanntes *Depleting Scenario*). Im Vergleich dazu sind bei einer unbegrenzten Nutzungsdauer (*Renewable Scenario*) lediglich 6 bis 8 kWh/m²/a realisierbar. Des Weiteren weisen die Autoren darauf hin, dass die durch den Klimawandel bedingte Erwärmung des Untergrunds –

erkennbar an erhöhten Temperaturen bis in Tiefen von rund 80 m – das nutzbare Potenzial nur geringfügig verbessern.

Einen neuen Ansatz zur Verbindung der üblichen objektspezifischen Auslegungsmethoden mit energieplanerischen Konzepten auf regionaler Ebene präsentieren Walch et al. (2021). Am Beispiel der Region Lausanne ermitteln sie ein technisch nutzbares Potenzial von rund 16 kWh/m²/a, wiederum unter der Annahme einer Nutzungsdauer von 50 Jahren. In einer Folgestudie (Walch et al., 2022) zeigen sie auf, dass individuell betriebene EWS-Anlagen, welche durch Rückgewinnung von Abwärme aus der Gebäudekühlung regeneriert werden, im Jahr 2050 rund 63 % des Kühl- und 55 % des Heizbedarfs decken könnten. In Kombination mit thermischen Netzen liesse sich dieser Anteil auf 87 % respektive 85 % erhöhen.

Jakob, Catenazzi und Melliger (2023) beurteilen das Potenzial von EWS in der gesamten Schweiz im Rahmen der Energieperspektiven des Bundes. Auf Basis statistischer Analysen gelangen sie zum Schluss, dass zwischen rund 30 % und 80 % der gemäss den Ausbauzielen vorgesehenen EWS-Anlagen bis zum Jahr 2050 von einer thermischen Übernutzung des Untergrunds betroffen sein könnten. Zur Minderung dieses sogenannten „Dichteproblems“ schlagen die Autoren vor, öffentliche Flächen innerhalb und ausserhalb der Siedlungsgebiete – etwa Parks und Strassen – für EWS nutzbar zu machen sowie einzelne EWS-Anlagen über thermische Netze zu koppeln.

Ruesch et al. (2023) berücksichtigen in der Energieplanung der Gemeinde Stäfa (ZH) die gegenseitige thermische Beeinflussung benachbarter EWS-Anlagen. Sie analysieren, in welchen Kleinquartieren der Gemeinde welche maximalen Ausbauziele für EWS realisierbar sind und welche Massnahmen dafür erforderlich wären. Die Ergebnisse zeigen, dass in den meisten Quartieren der lokale Wärmebedarf über EWS gedeckt werden kann – entweder durch moderate Mehrtiefen von bis zu 20% oder durch den Einsatz aktiver Regenerationstechnologien über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren. Die Studie geht dabei von einem maximalen Anteil von 80% EWS-Anlagen am gesamten Heizsystemmix aus, wobei eine aktive Regeneration von mindestens 20% für alle Anlagen vorausgesetzt wird.

Der Frage, wie einer thermischen Übernutzung des Erdreichs durch EWS-Anlagen auf regulatorischer Ebene begegnet werden kann, wurde bisher noch nicht nachgegangen. Weder im nationalen wie internationalen Umfeld sind entsprechende Vorstösse oder gar Lösungsansätze bekannt.

3.11 ABGRENZUNG

Im Rahmen dieser Studie kann aus Gründen der Komplexität oder wegen fehlender Relevanz in Bezug zur Fragestellung nur eine begrenzte Anzahl von Themen und Annahmen berücksichtigt werden.

1. Für den Energiebedarf des Gebäudeparks werden Daten der kantonalen Energiestatistik verwendet.
2. Empfehlungen und Schlussfolgerungen aus Simulationsrechnungen gelten für Durchschnittswerte mit Gevierten als kleinste räumliche Einheit.
3. In den Simulationsszenarien wird der Energiebedarf des Endzustandes im Jahr 2050 gerechnet. Eine dynamische Entwicklung des heutigen auf den künftigen Energiebedarf wurde nicht gerechnet.
4. Der Fokus der Studie liegt auf der Regeneration von EWS im Allgemeinen. Ob die jeweiligen Regenerationsquellen im Einzelfall realisiert werden können (z.B. ob genügend geeignete Dachflächen für solare Regeneration zur Verfügung stehen) wird im Rahmen der Studie nicht untersucht.
5. Natürliche Regeneration durch Grundwasserströmung wird aus Gründen der Komplexität und der unzureichenden Datenlage nicht berücksichtigt.
6. Bei der Ermittlung der Kosten der verschiedenen Massnahmen werden lediglich die Investitionskosten ermittelt. Diese sind für die Eigentümerschaften bei der Wahl des Heizungssystems oftmals zentral. Eine Betrachtung der Lebenszykluskosten wird in dieser Studie ausgeklammert.
7. Die aktive Regeneration mit Solarwärme kann in Konflikt mit einer Solarstromnutzung stehen. Dieser Konflikt wird nicht weiter behandelt. Mit sog. PVT-Kollektoren ist Wärme- und Stromproduktion auf gleicher Dachfläche möglich.
8. Welche EWS-Mehrlänge anstelle eines bestimmten Regenerationsgrades (und umgekehrt) als äquivalente Massnahme entspricht, wurde nicht weiter untersucht. Lösungsansätze hierzu werden in Kapitel 8.4 skizziert.
9. Die Auswirkungen des Klimawandels auf Bodentemperatur, Heiz- und Kühlenergiebedarf wurden nicht untersucht.

3.12 BEGLEITGRUPPE

Die Frage, inwieweit EWS-Anlagen regeneriert werden müssen, ist kantonsübergreifend von grossem Interesse. Die Studie wurde von den Kantonen Aargau, Basel-Stadt, Luzern, dem Amt für Hochbauten der Stadt Zürich und von EnergieSchweiz mit finanziellen Mitteln unterstützt.

Die Begleitgruppe, bestehend aus Vertreterinnen und Vertretern öffentlicher Einrichtungen, Expertinnen und Experten sowie Vertreterinnen und Vertretern der Branche (s. Impressum), wurde in regelmässigen Abständen eingeladen, um über wichtige Randbedingungen und Stossrichtungen zu entscheiden.

Das in der Studie gewählte Vorgehen und die in den Berechnungen getroffenen Annahmen wurden von den Vertreterinnen und Vertretern der Begleitgruppe mehrheitlich unterstützt.

Die im Rahmen der Studie erarbeiteten Ergebnisse beziehen sich auf die Situation im Kanton Basel-Landschaft. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen können nicht ohne Weiteres auf andere Kantone übertragen werden.

4 METHODIK

Für die Berechnung des Einflusses bestehender und künftiger EWS-Anlagen untereinander sind Ansätze nach SIA, die auf homogenen Verteilungen von EWS-Anlagen und Objekten und somit durchschnittlichen globalen Annahmen beruhen, nur bedingt geeignet.

In diesem Kapitel wird ein Ansatz beschrieben, bei dem EWS-Anlagen zufällig auf Parzellen verteilt werden, in einer Anzahl, die einem vorgegebenem Ausbauziele für EWS-Anlagen entspricht. Mittels Simulationsrechnungen werden alle EWS-Anlagen nach SIA ausgelegt. Die gegenseitige Beeinflussung der EWS-Anlagen untereinander wird berücksichtigt.

Die Resultate werden mit den lokalen Wärmebedarfsdichten in Beziehung gebracht. Entsprechend können für die verschiedenen Szenarien und Gebietsklassen Handlungsempfehlungen hergeleitet werden.

4.1 BERECHNUNGSKONZEPTE

4.1.1 ENDLICHE LINIENQUELLE

Die dimensionierungsgerechte Auslegung von EWS-Anlagen als auch die Berechnung ihrer thermischen Beeinflussung untereinander beruht auf der «endlichen Linienquelle» (ELQ, oder FLQ, d.h. Finite Line Source). Diese ist ein etabliertes analytisches Modell zur thermischen Simulation von Erdwärmesonden im geologischen Untergrund.

Die aus der endlichen Linienquelle resultierende Abkühlung wurde mit dem semianalytischen Modell von Cimmino (2018) verglichen (s. Kapitel 8.1). Dieses wird derzeit als das genaueste Modell für die thermische Berechnung von EWS angesehen. Für die vorliegende Anwendung ist es aufgrund seiner Komplexität jedoch ungeeignet. Der Vergleich beider Modelle zeigt, dass die endliche Linienquelle die Temperaturabkühlung um ca. 20% bis 30% überschätzt. Daher wurde die aus der endlichen Linienquelle resultierende Abkühlung pauschal um 20% abgeschwächt.

4.1.2 SIMULATION DES IST-ZUSTANDES (VORWÄRTSSIMULATION)

Mit einer Vorwärtssimulation wird die künftige gegenseitige thermische Beeinflussung durch bestehende Erdwärmesonden (EWS) berechnet. Anhand der Ergebnisse soll beurteilt werden, ob heute bereits kritische Zustände vorhanden sind bzw. ob diese aus der heutigen Verteilung von EWS-Anlagen entstehen können.

Die bestehenden Sonden sind in der kantonalen Bewilligungsdatenbank mit ihren Koordinaten und dem Bewilligungsdatum erfasst. Der Energiebedarf der einzelnen Parzellen wurde aus der aktuellen kantonalen Energiestatistik abgeleitet. Wenn mehrere Verbrauchswerte für eine Parzelle vorliegen, wurden diese summiert. Berücksichtigt wurden dabei nur Parzellen, die gemäss dem kantonalen Gebäude- und Wohnungsregister (kGWR) über eine Heizanlage verfügen. Zukünftige EWS-Anlagen wurden nicht berücksichtigt bzw. nicht simuliert.

Durch räumliche Überlagerung der Erdwärmesonden (EWS) mit den Parzellen und deren Energiebedarf wurden Sonden derselben Parzelle als eine gemeinsame EWS-Anlage gruppiert und der jeweilige Energiebedarf der Parzelle zugewiesen.

Anschliessend wurde für den Mittelpunkt jeder Parzelle mithilfe des ELQ-Modells die thermische Beeinflussung der bestehenden EWS-Anlagen in 50 Jahre berechnet. Bei dieser Berechnung werden keine künftigen EWS, d.h. kein Zubau von EWS-Anlagen, berücksichtigt.

4.1.3 WORKFLOW «ANFORDERUNGEN AN DIE AUSLEGUNG VON EWS»

Wie in Kapitel 8.3 nachgewiesen wird, sind Ansätze wie derjenige nach SIA, wonach ausgehend von einer mittleren Energiebedarfsdichte und einem mittleren Ausbauziel von EWS-Anforderungen an die Auslegung von EWS festgeschrieben werden, für Situationen mit heterogener Gebäudestruktur und ungleichmässiger Anordnung von EWS-Anlagen ungeeignet.

Stattdessen wird hier ein Ansatz vorgeschlagen, mit dem ausgehend von einer realistischen heterogenen Ausgangslage (Überbauungsstruktur, Energiebedarf, Bodenkennwerte) Anforderungen an die Auslegung auf kleiner räumlicher Skala hergeleitet werden können. Dazu wird für eine zufällige Verteilung von EWS-Anlagen mit vorgegebenem Ausbauziel (z.B. Ausbauziel $f_{GEO} = 40\%$) und Energiebedarf der Objekte berechnet, wie viel Mehrlänge oder wie viel Regeneration für jedes Objekt gegenüber einer Auslegung ohne Nachbarsonden erforderlich sind, damit die Wärmeträgertemperatur nach Ablauf einer bestimmten Betriebszeit über dem tiefsten zulässigen Wert nach SIA liegt.

Der für diese Untersuchung verwendete Ansatz erfordert mehrere Berechnungsschritte:

Schritt 1: Definition der Randbedingungen und des Szenarios

1. EWS-Anlagen pro Parzellen in einem bestimmten Gebiet (Vorgabe von f_{GEO}) zufällig verteilen. Es werden nur Parzellen berücksichtigt, für die gemäss dem kantonalen Gebäude- und Wohnungsregister (kGWR) eine Heizanlage vorliegt.
2. Energiebedarf der einzelnen Parzellen aus der aktuellen kantonalen Energiestatistik ableiten (sind mehrere Verbrauchswert pro Parzellen definiert, werden sie summiert).
3. Lokale geothermischen Bodenkennwerte ermitteln (Bodenoberflächentemperatur, Wärmeleitfähigkeit, Temperaturgradient, s. Kapitel 8.2)

Schritt 2: Auslegung aller EWS ohne gegenseitige Beeinflussung (iterativ)

4. EWS mit vereinfachtem Lastprofil nach SIA 384/6:2021 Anhang D.5 für einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren und auf eine minimale Wärmeträgertemperatur von $-1.5^{\circ}\text{C}^{14}$ auslegen. Es wird eine typische Arbeitszahl der Wärmepumpe und eine typische Vollbetriebsstundenzahl angenommen (s. Tabelle 3).
5. In ersten Iterationsschritt wird von einer EWS pro Parzelle mit einer Standard-Länge ausgegangen ($N = 1$). Diese EWS wird in der Mitte der Parzelle positioniert.
6. Je nach Szenario wird ein genereller Regenerationsgrad für alle Objekte angenommen.
7. Die gegenseitige Beeinflussung zwischen benachbarten EWS-Anlagen wird in diesem Schritt nicht berücksichtigt.
8. Objekte, für die die Auslegung eine EWS-Länge von weniger als 50 m ergibt, werden nicht weiter berücksichtigt.
9. Die lokale Bohrtiefenbegrenzung wird berücksichtigt, indem die EWS-Länge auf die maximale Bohrtiefe L_{max} begrenzt ist.
10. Wenn die ausgelegte EWS-Länge die maximale Bohrtiefe überschreitet, wird eine zusätzliche EWS vorgesehen. Die EWS werden in einer regelmässigen Anordnung mit 5 m Abstand untereinander auf der Parzelle positioniert. Die Lage von Gebäuden oder Grenzabstände werden der Einfachheit halber nicht berücksichtigt.

¹⁴ SIA 384/6:2021 Anhang D beschreibt eine Auslegungshilfe für EWS-Anlagen mit bis zu vier EWS. Grundsätzlich kann diese Methode auch für Anlagen mit mehr als vier EWS angewendet werden.

11. «Grosse» Objekte, für die die Auslegung mehr als 10 EWS (N_{max}) ergibt, werden grundsätzlich 100% regeneriert. Diese EWS-Anlagen üben daher keine thermische Beeinflussung auf benachbarte Anlagen aus. Ein hoher Regenerationsgrad stellt bei grossen Objekten durchaus Stand der Technik dar und ist wirtschaftlich.
12. Ergibt die Auslegung EWS-Längen, die über die Bohrtiefenbegrenzung hinausgehen, bzw. können keine weiteren EWS auf der Parzelle verteilt werden, wird die EWS-Anlage regeneriert, um das Auslegungsziel zu erreichen.
13. «Grosse» Objekte, für die die Auslegung eine Anzahl von EWS ergibt, die auf der vorhandenen Fläche nicht verteilt werden können, werden regeneriert. Falls die 100% Regeneration nicht reicht, wird die Entzugsleistung der EWS-Anlage gedrosselt.
14. *Zwischenergebnis*: Für jede Parzelle mit einer EWS-Anlage liegt eine realistische Auslegung vor (N : Anzahl EWS, L : Länge der EWS, Regenerationsgrad)

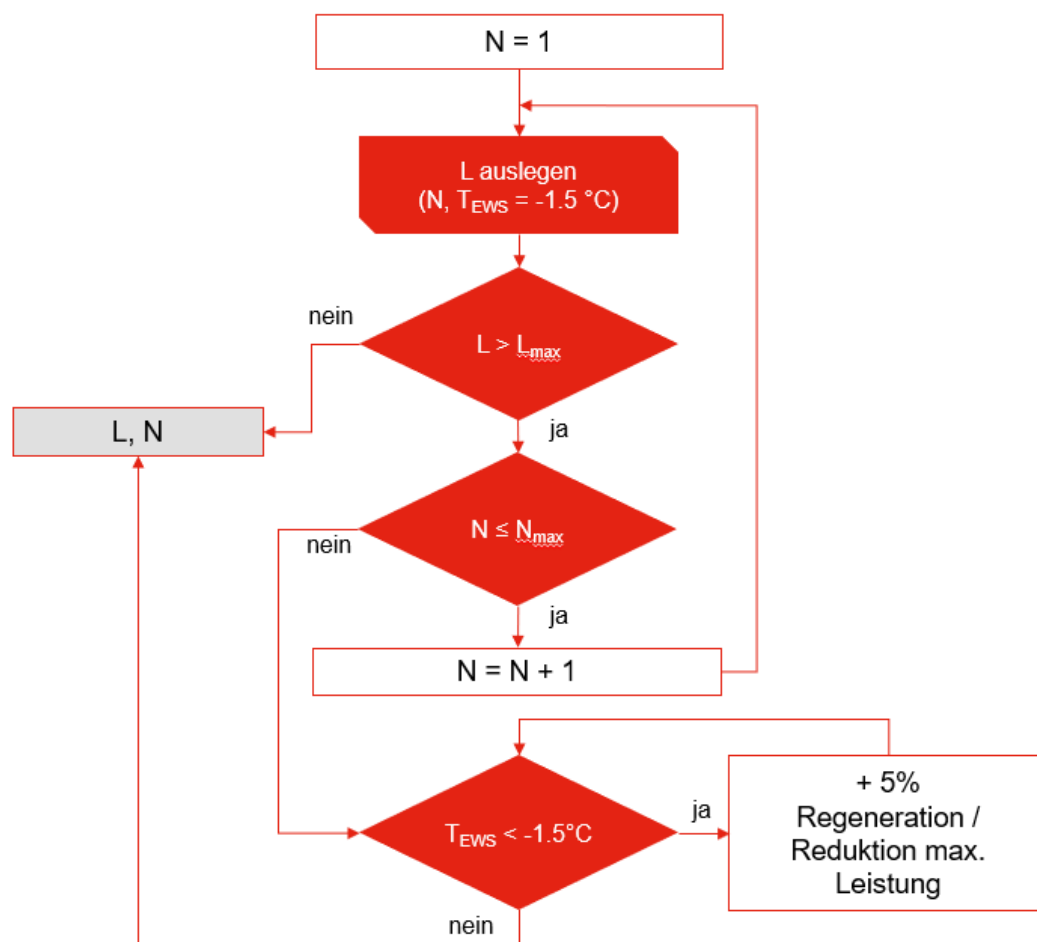


Abbildung 11: Flussdiagramm Auslegung der Erdwärmesonden-Anlagen.

Schritt 3: Korrektur: Gegenseitigen Beeinflussung (iterativ)

15. Für jeden EWS-Standort wird mit dem ELQ-Modell die durch die gegenseitige Beeinflussung der Anlagen verursachte Abkühlung berechnet.

16. Nach SIA 384/6 hat eine Abkühlung um weniger als 1 K keine Massnahmen zur Folge, was hier so interpretiert wird, dass bei einer korrekten Auslegung nach Norm eine Auslegungsreserve von 1 K vorhanden ist (s. auch SIA 384/6:2021 Ziffer C.2.3.2). Diese «Reserve» der Bodentemperatur wird hier so verwendet, indem EWS statt auf -1.5°C auf -2.5°C ausgelegt werden.
17. Die zusätzliche Abkühlung wird kompensiert, indem die EWS-Länge auf der jeweiligen Parzelle schrittweise erhöht wird, solange bis die maximal zulässige Bohrtiefe und die maximale Anzahl an EWS erreicht wird oder die Mehrlänge 100% beträgt.
18. Falls die Verlängerung der EWS bis 100% nicht genügen, wird der Regenerationsgrad schrittweise erhöht.
19. Falls die Verlängerung der EWS und die Erhöhung des Regenerationsgrades nicht genügen, wird die Entzugsleistung der EWS-Anlage gedrosselt.
20. *Ergebnis*: Für jede Parzelle mit einer EWS-Anlage liegt eine realistische Auslegung nach Norm mit Berücksichtigung der gegenseitigen Beeinflussung aller EWS-Anlagen untereinander vor (Anzahl EWS, Länge der EWS, Regenerationsgrad).

4.1.4 RANDBEDINGUNGEN UND MODELLANNAHMEN

Für die Auslegung werden anstelle der von SIA empfohlenen Boden- und Stoffkennwerte solche verwendet, die aus Messungen in EWS-Bohrungen und thermischen Response Tests im Kanton berechnet wurden (Kapitel 8.2).

Für die Modellrechnungen und Szenarien wurden folgende Randbedingungen und Annahmen getroffen, die mit der Begleitgruppe des Projektes abgestimmt wurden.

Tabelle 3: Randbedingungen und Annahmen für die Simulation verschiedener Szenarien.

Parameter	Wert
Energiebedarf, E (kWh)	variiert räumlich (gemäss dem kantonalen Gebäude- und Wohnungsregister)
Maximale Bohrtiefe, L_{max} [m]	variiert räumlich (Abbildung 13) (Minimale Sondenlänge [m] 50 m)
Wärmeleitfähigkeit: λ [W/m/K]	variiert räumlich (Kapitel 8.2)
Wärmekapazität des Untergrundes, $\rho \cdot c$ [J/m³/K]	$2 \cdot 10^6$ J/m³/K
Effektiver thermischer Widerstand, $R_{b,eff}$ [K·m/W]	0.08 K·m/W
Oberflächentemperatur: T_{BOT} [°C]	variiert räumlich (Kapitel 8.2)
Temperaturgradient: $Gradz$ [°C/m]	variiert räumlich (Kapitel 8.2)
Bohrradius: r_B [m]	0.0675 m
Simulationsdauer: t_{max} [a]	50 (Abbildung 32)
Dauer saisonale Belastung: Δt_{S+P} [s]	90 (Abbildung 32)
Dauer Spitzenbelastung: Δt_P [h]	24 (Abbildung 32)
Jahresarbeitszahl Wärmepumpe(n)	4.5
Vollbetriebsstunden [h/a]	2'300

4.1.5 SZENARIEN

In Abstimmung mit der Begleitgruppe wurden folgende vier verschiedene Szenarien definiert:

- Szenario 1 stellt ein Worst-Case Szenario dar, welches eine Erdwärmenutzung auf allen Parzellen (sofern unter den in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Annahmen möglich) mit dem heute aktuellen Energiebedarf vorsieht, für einen Auslegungszeitraum von 50 Jahren. Dieses Szenario wurde gewählt, um mögliche (Rand-) Gebiete in ländlichen Gebieten zu identifizieren, die selbst bei maximalem geothermischem Deckungsgrad ohne Massnahmen¹⁵ auskommen würden.
- Szenario 2 entspricht Szenario 1, jedoch wurde der Energiebedarf der Objekte so angepasst, dass diese in der Summe den Zielen gemäss Szenario ZERO der Energieperspektiven 2050+ des Bundes entspricht. Global entspricht dieses Szenario einer Abnahme der Komfortwärme um 30% im Jahr 2050 gegenüber dem Stand von 2020. In Szenario 2 wurde dazu der Energiebedarf jedes Objektes um 30% reduziert, unabhängig davon, ob ein Objekt in der Realität bereits erneuert wurde oder einen Energiebedarf gemäss Neubaustandard besitzt. Dies entspricht einer Energiedeckelung von ca. 87 kWh/a pro m² Energiebezugsfläche.
In Absprache mit der Begleitgruppe wurde der Energiebedarf dieses Szenarios als Basis für die Herleitung von Massnahmen zur Regulierung der Erdwärmenutzung definiert.
→ Mit Hilfe dieses Szenarios können Handlungsoptionen für starke lokale Häufungen hergeleitet werden.
- Szenario 3 entspricht Szenario 2, jedoch wurden die EWS-Anlagen so auf die einzelnen Parzellen verteilt, dass sich eine globale EWS-Anlagendichte von 40% ergibt. Diese Anlagendichte entspricht der doppelten maximal zu erwartenden durchschnittlichen EWS-Anlagendichte in den Gevierten mit höchster Dichte von EWS-Anlagen im Jahr 2050 (s. Kapitel 3.2.2)
→ Mit Hilfe dieses Szenarios können Massnahmen für Szenarien mit leichten lokalen Häufungen hergeleitet werden.
- Szenario 4 entspricht Szenario 2, jedoch wurden die EWS-Anlagen so auf die einzelnen Parzellen verteilt, dass sich eine globale EWS-Anlagendichte von 20% ergibt. Diese Anlagendichte entspricht der maximal zu erwartenden durchschnittlichen EWS-Anlagendichte in den Gevierten mit höchster Dichte von EWS-Anlagen im Jahr 2050 (s. Kapitel 3.2.2)

In den Szenarien 2 bis 4 wird von einer minimalen Regenerationsrate von 15% über die sommerliche Raumentwärmung in allen Objekten ausgegangen.

Aufgrund der differenzierten Fragestellung im politischen Auftrag (Kapitel 2.2), d.h. wo ist Regeneration erforderlich bzw. wo ist Regeneration aus gewässerschutzrechtlichen Aspekten unerwünscht, werden diese Szenarien ohne Grundwasserströmung untersucht, und zwar unabhängig von der realen Grundwassersituation im Untersuchungsgebiet. Die Auswirkungen von Grundwasserströmungen werden separat mit einem gesonderten Szenario untersucht.

¹⁵ In der technischen Diskussion wird der Begriff «Massnahmen» zur Beschreibung von Lösungsansätzen verwendet. In Kapitel «Schlussfolgerungen», wenn unterschiedliche regulatorische Ansätze skizziert werden, wird nur mehr von «Handlungsoptionen» anstelle von «Massnahmen» gesprochen.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Eigenschaften der im Rahmen der Studie untersuchten Szenarien.

Szenario	Wärmebedarf der einzelnen Objekte	Geothermischer Deckungsgrad f_{geo}	Minimale Regenerationsrate aller Objekte
1	Heutiger Bedarf gemäss Energiestatistik 2022	100%	0%
2	Energieperspektiven 2050+ (d.h. 70% des heutigen Wärmebedarfs)	100%	15%
3	wie Szenario 2	40%	15%
4	wie Szenario 2	20%	15%

4.1.6 AUSWERTUNG

Der Workflow (vgl. Kapitel 4.1.3) sowie die Simulation des Ist-Zustand (vgl. Kapitel 4.1.2) wurden auf Parzellenebene durchgeführt. Da die Daten der kantonalen Energiestatistik jedoch für eine detaillierte Parzellenauswertung in Einzelfällen zu ungenau sind, wurden die Ergebnisse zusätzlich für Gevierte ausgewertet.

Die Massnahmen zur Kompensation der Nachbarskühlung (zusätzliche Sondenlänge, Regeneration oder Reduktion des Energiebedarfs) wurden dabei über die Gevierte gemittelt.

Die Einstufung der Nachbarskühlung erfolgte gemäss den Anforderungsklassen der SIA-Norm (R1 bis R4) und basiert auf der Temperaturabkühlung, sowohl für Parzellen- als auch für Gevierte. Für die Gevierte wurde jeweils der Medianwert der Nachbarskühlung der zugehörigen Parzellen herangezogen.

Zusätzlich wurden die Gevierte basierend auf ihrer Wärmedarfsdichte wie folgt klassifiziert:

- Klasse 1: Energiebedarfsdichte < 400 MWh/ha
- Klasse 2: Energiebedarfsdichte zwischen 400 und 700 MWh/ha
- Klasse 3: Energiebedarfsdichte > 700 MWh/ha

4.1.7 UNTERSUCHUNGSGEBIET

Die in Kapitel 4.1.3 beschriebene Methode wird aus Gründen der Ressourceneffizienz nicht auf das gesamte Kantonsgebiet, sondern auf ein Gebiet mit hinreichender Grösse angewendet. Dieses Teilgebiet des Kantons, im folgenden Untersuchungsgebiet genannt, welches die Gemeinde Aesch und Reinach umfasst, wird als repräsentativ für den ganzen Kanton beurteilt:

- Das Untersuchungsgebiet enthält Quartiere im Zentrum mit hoher (> 700 MWh/ha) und am Rand solche mit geringer Wärmebedarfsdichte (< 400 MWh/ha).
- Der Energiebedarf der einzelnen Objekte wird aus den parzellenscharfen Daten der kantonalen Energiestatistik 2022 verwendet.
- Im Untersuchungsgebiet variiert die maximal zulässige Bohrtiefe zwischen 0 und 200 m.
- Das Gebiet enthält Bereiche mit Grundwasserströmung.

Weitere Attribute des Untersuchungsgebietes:

- 4'396 Parzellen, auf denen EWS-Bohrungen zulässig sind
- Gesamtenergiebedarf für Raumwärme und Warmwasser: 192 GWh/a (Stand 2020)

- 1.9 Millionen m² Energiebezugsfläche (eigene Berechnung)

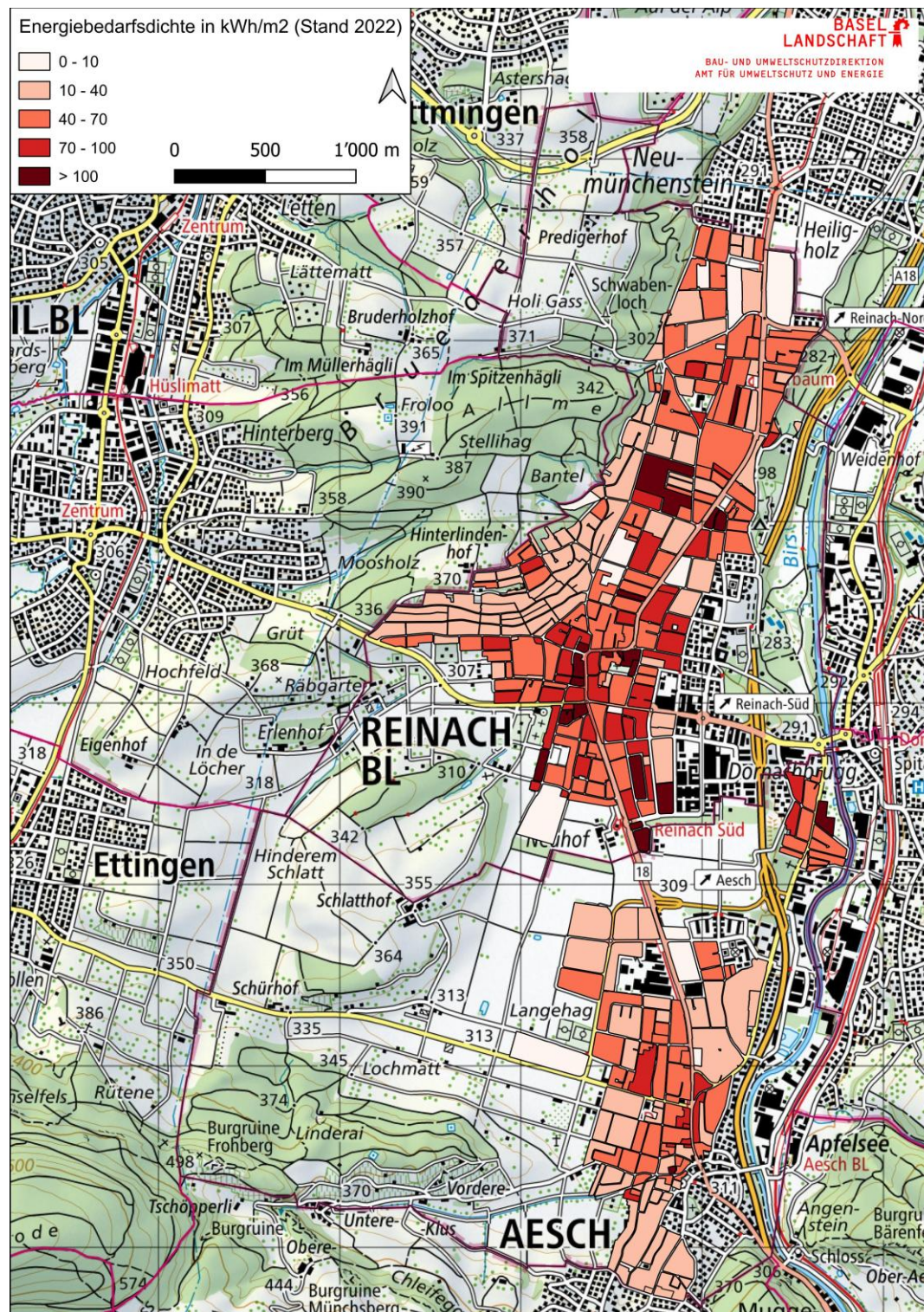


Abbildung 12: Wärmebedarfsdichte im Untersuchungsgebiet in kWh/m² pro Bodenfläche (dargestellt sind nur Gevierte, auf denen EWS-Bohrungen erlaubt sind und die maximale Bohrtiefe mindestens 50 m beträgt).

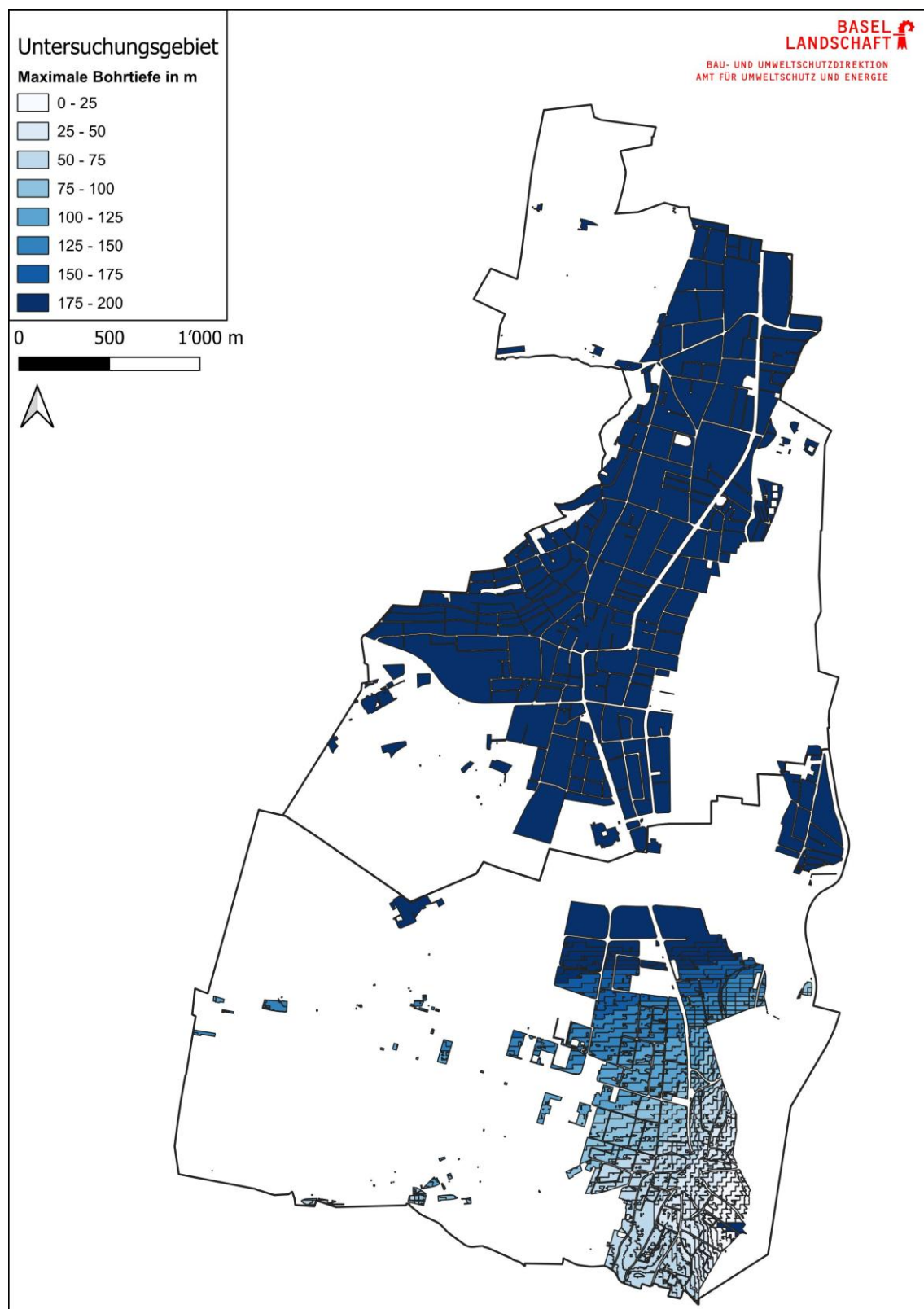


Abbildung 13: Maximal zulässige Bohrtiefe im Untersuchungsgebiet.

4.2 EINFLUSS DER REGENERATION AUF DIE GRUNDWASSERTEMPERATUR

Anhand einer 3D Modellierung der Grundwasserströmung und des Wärmetransports soll die Auswirkung von Wärmeeintrag und Wärmeentzug durch intensiven EWS-Betrieb auf die Grundwassertemperatur aufgezeigt werden. Zudem ist zu prüfen, ob die Temperaturveränderung in 100 m Abstrom der EWS die 3 K Grenze nicht überschreitet. Die Ergebnisse sollen aufzeigen, ob bzw. unter welchen Bedingungen aktive Regeneration eine aus gewässerschutzrechtlicher Sicht unerwünschte Auswirkung auf die Grundwassertemperatur hat.

In diesem Kontext wird der kumulative Effekt eines fiktiven Wohnquartiers mit 100 Einfamilienhäusern mit EWS mittels eines Grundwasserströmungs- und eines Wärmetransportmodells simuliert.

Für die Beurteilung der thermischen Auswirkungen des Wohnquartiers auf das Grundwasser wurde eine Simulation über 50 Jahre anhand eines vereinfachten Grundwassermodells mit der Software FEFLOW 10.0 durchgeführt. Die hydraulischen und thermischen Randbedingungen mit Ausnahme der EWS werden stationär berechnet. Da ein fiktives Wohnquartier modelliert wird bildet das Modell nicht direkt ein reales Gebiet ab, sondern einen idealisierten Quader; Parameter des Modells sind aber so gewählt, dass Grundwasserleiter und Stauer aber repräsentativ sind für typische Verhältnisse im Kanton Baselland.

Das Modell besteht aus 62 Schichten und beinhaltet 2.4 Millionen dreiecksprismatische Elemente und 1.2 Millionen Knoten. Das Modell ist 720 m lang, 525 m breit und 350 m tief (siehe Abbildung 14). Diese Modelltiefe wurde ausgewählt, um die Effekte der Randbedingungen am unteren Modellrand auf der Modellergebnisse zu minimieren.

Die Obergrenze des Modells folgt dem Grundwassergradient (0.3%). Die 15 obersten Schichten bilden den 25 m mächtigen Grundwasserleiter und die untersten 37 Schichten den Fels bis zu einer Tiefe von 350 m u.T. ab. Der Flurabstand beträgt ca. 10 m.

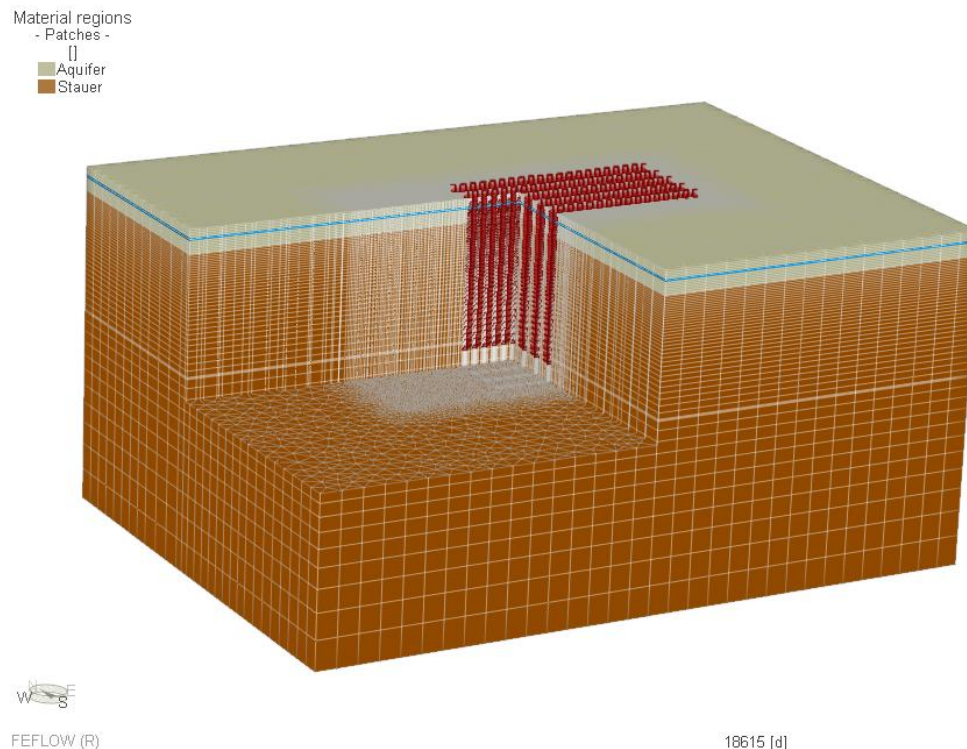


Abbildung 14: Geometrie des Grundwassermodells, Wasserspiegel, und modellierte EWS.

4.2.1 HYDROGEOLOGISCHE UND THERMISCHE EIGENSCHAFTEN

Die Tabelle 5 fasst die hydrogeologischen und thermischen Eigenschaften des Modells zusammen.

Tabelle 5: Hydrogeologische und thermische Eigenschaften

	Grundwasserleiter	Stauer
Hydrogeologie		
Hydraulische Leitfähigkeit [m/s]	10^{-3}	10^{-7}
Porosität (Drain/fillable Porosity) [-]	0.25	0.15
Für den Transport effektive Porosität [-]	0.10	0.05
Longitudinale Dispersivität [m]	20	10
Laterale Dispersivität [m]	5	2
Thermische Eigenschaften¹⁶		
Volumetrische Wärmekapazität [MJ/K/m ³]	2.3	2.10
Wärmeleitfähigkeit [W/m/K]	1.7	1.64

4.2.2 RANDBEDINGUNGEN

Im Modell wird angenommen, dass der hydraulische Gradient über das ganze Modellgebiet homogen und stationär ist. Das Modell wird so ausgerichtet, dass der südliche und nördliche Modellrand parallel zur Grundwasserfliessrichtung ausgerichtet sind und als undurchlässig implementiert werden können. Für den östlichen und westlichen Modellrand wurde ein festes Potenzial definiert mit einem Höhenunterschied von 2.16 m (entsprechend dem Gradienten von 0.3% über 720 m).

Da für die vorliegende Fragestellung nur Temperaturänderungen durch den Betrieb der Anlage relevant sind, wurden saisonal auftretende natürliche Änderungen der Grundwassertemperatur im Modell nicht berücksichtigt.

Die Modelloberfläche wird mit einer konstanten Temperatur von 10.93°C versehen. Der untere Modellrand wird mit einer konstanten Wärmestromdichte von 0.0785 W/m² belegt. Aus der konstanten Temperatur an der Oberfläche und der konstanten Wärmestromdichte aus der Tiefe kann der Temperaturgradient als Funktion der Tiefe berechnet werden. Da keine zuverlässigen Angaben zur Grundwassertemperatur vorliegen, wird die Temperatur des Grundwassers, das in das Modell hineinfliesst, gleich dem Temperaturgradienten gesetzt.

4.2.3 WÄRMENUTZUNGEN

Um ein Wohnquartier in vereinfachter Form zu modellieren, wurde angenommen, dass die Parzellen in einem regelmässigen Gitter von 5 x 20 Parzellen angeordnet sind, mit jeweils 11 m Abstand in Grundwasserfliessrichtung und 25 m Abstand rechtwinklig zur Fliessrichtung. In der Mitte der Parzelle ist jeweils eine EWS mit einer Tiefe von 150 m installiert (siehe Abbildung 14).

¹⁶ Empfohlene Werte nach SIA 384/6:2021

Pro Parzelle wurde ein Wärmeenergiebedarf von 21'000 kWh angenommen, was einer Entzugsenergie von 16'334 kWh bei einer durchschnittlichen Jahresarbeitszahl von 4.5 entspricht. Dieser Energiebedarf wurde gemäss den Heizgradtagen für die Station Basel-Binningen über das Jahr verteilt (Tabelle 6). Zudem wurde angenommen, dass die EWS 50% regeneriert werden (Tabelle 6).

Tabelle 6: Monatliches Energieprofil (50% Regenerationsrate).

	Monatliche Entzugsenergie [kWh]	Monatliche Zufuhrenergie [kWh]
Januar	3737	-
Februar	3004	-
März	1921	-
April	1048	5
Mai	209	276
Juni	23	1'587
Juli	0	2'943
August	0	3'024
September	93	311
Oktober	710	20
November	2317	-
Dezember	3271	-
SUMME	16'334	8'167

Anhand des Energiebedarfs (Tabelle 6), der entsprechenden JAZ und einer Abkühlung des EWS-Wärmeträgers um 3 K wurde der Durchfluss der EWS-Sole berechnet Abbildung 15.

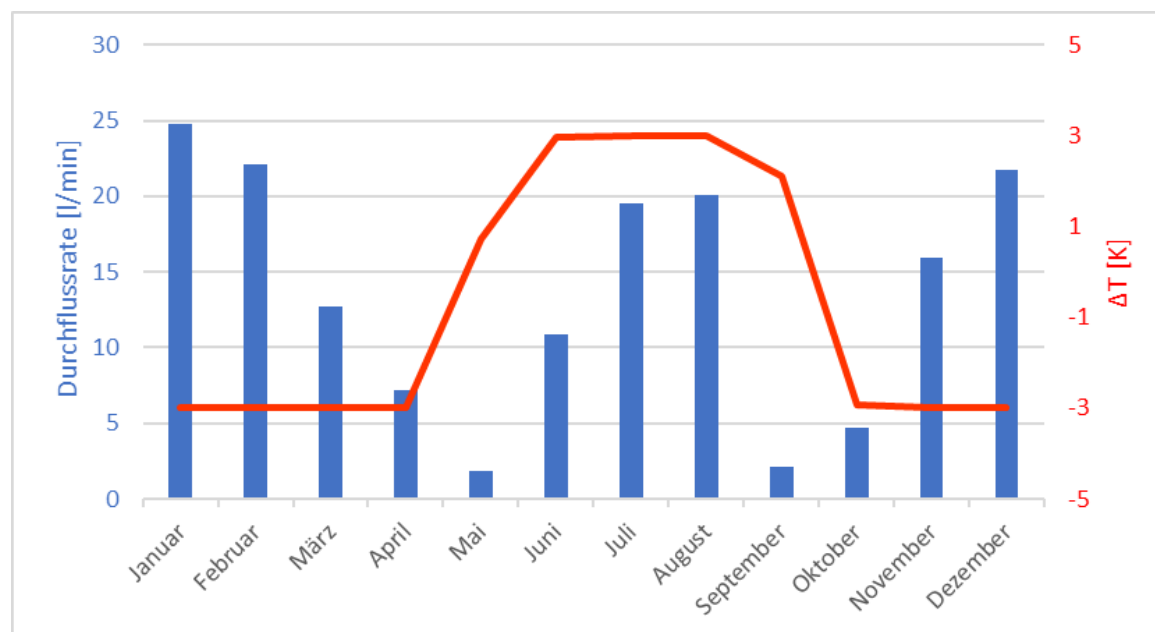


Abbildung 15: Monatliche Durchflussrate der EWS-Sole mit entsprechenden ΔT .

FEFLOW ermöglicht eine detaillierte Darstellung der EWS (Rohrdurchmesser, -länge und thermische Eigenschaften, Füllungseigenschaften, Kühlmittleigenschaften, etc.). Die EWS-Parameter sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Die einzelnen Erdwärmesonden werden als eingebettete 1D-Elemente (Doppel-U) simuliert und mit den Modell-Knoten entlang von Elementkanten verbunden.

Die thermische Auswirkung der EWS auf das Grundwasser ist über 50 Jahre simuliert.

Tabelle 7: Parameter der Erdwärmesonden

Eigenschaft	Wert
Sonde	
Bohrtiefe	150 m
Bohrdurchmesser	0.135 m
Typ	GEROtherm® DUPLEX Erdwärmesonde PN16
Sonden Aussendurchmesser	40 mm
Wandstärke Sondenrohr	3.7 mm
Wärmeleitfähigkeit Sondenrohr	$0.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Wärmeleitfähigkeit Hinterfüllung	$0.81 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Sondenfluid (Wärmeträger)	
Typ	Monoethylenglykol 20%
Wärmeleitfähigkeit	$0.5 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$
Viskosität	$0.0000035 \text{ m}^2/\text{s}$
Dichte	1037 kg/m^3

5 ERGEBNISSE

5.1 RESULTATE DER SIMULATION HEUTIGER EWS-ANLAGEN (VORWÄRTSSIMULATION IST-ZUSTAND)

Mit einer Vorwärtssimulation (s. Kapitel 4.1.2) soll aufgezeigt werden, welche Auswirkungen der Betrieb von heute bereits bestehenden EWS-Anlagen auf die Temperatur des Untergrundes in 50 Jahren (d.h. im Jahr 2072) hat. **Es werden keine neuen EWS berücksichtigt.**

Die durch den Betrieb der bestehenden EWS-Anlagen auf den jeweiligen Parzellen verursachte Abkühlung kann nach SIA einer Anforderungsklasse R1 bis R4 zugeordnet werden (Kapitel 3.6, Abbildung 10), siehe Tabelle 8 und Abbildung 16. Diese Klassen sind ein Mass dafür, wie stark eine EWS-Anlage durch (die bestehenden) Nachbar-EWS beeinflusst ist.

Für die Mehrheit der Parzellen gelten die Anforderungen der Klasse R1, was bedeutet, dass benachbarte EWS-Anlagen keinen nennenswerten Einfluss auf die jeweilige Anlage haben. Allerdings zeigen sich bereits lokale Häufungen von EWS-Anlagen, die in bestimmten Bereichen zu einer stärkeren thermischen Beeinflussung führen. Dies hat zur Folge, dass für rund 13 % der Parzellen erhöhte Anforderungen der Klassen R2 oder höher gelten. Bemerkenswert ist, dass selbst in Gevierten mit vergleichsweise geringem Energiebedarf (< 400 MWh/ha) durch Anlagenhäufungen erhöhte Anforderungen entstehen (vgl. Abbildung 17). Die Klassen R3 und R4 treten dabei nur vereinzelt auf und stellen eher die Ausnahme dar.

Tabelle 8: Anforderung gemäss SIA-Norm 384/6:2021 für die Parzellen im Untersuchungsgebiet (siehe Abbildung 16).

	R1	R2	R3	R4
Anteil betroffener Parzellen [%]	85	13	1.5	0.5

Die gegenseitige thermische Beeinflussung der bestehenden EWS-Anlagen dürfte künftig in einzelnen Fällen zu kritischen Situationen führen (vor allem, da sich die EWS-Dichte durch neue Anlagen noch erhöhen wird). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass lokale Häufungen der Hauptfaktor für das Auftreten erhöhter Anforderungen sind.

Man kann diese Ergebnisse so interpretieren, dass all diejenigen Anlagen, welche auf einer Parzelle mit höherer Klasse als R1 liegen, die thermische Beeinflussung durch Nachbar-Anlagen durch Mehrlänge oder Regeneration kompensieren müssten. Es entzieht sich aber unserer Kenntnis, wie die bestehenden EWS-Anlagen dimensioniert wurden. Die Mehrheit der Anlagen wurde vor der Einführung der neuen SIA-Norm 384/6:2021 erstellt. Es ist anzunehmen, dass sowohl die bestehenden als auch die zukünftigen EWS-Anlagen bei der ursprünglichen Dimensionierung weitgehend unberücksichtigt geblieben sind.

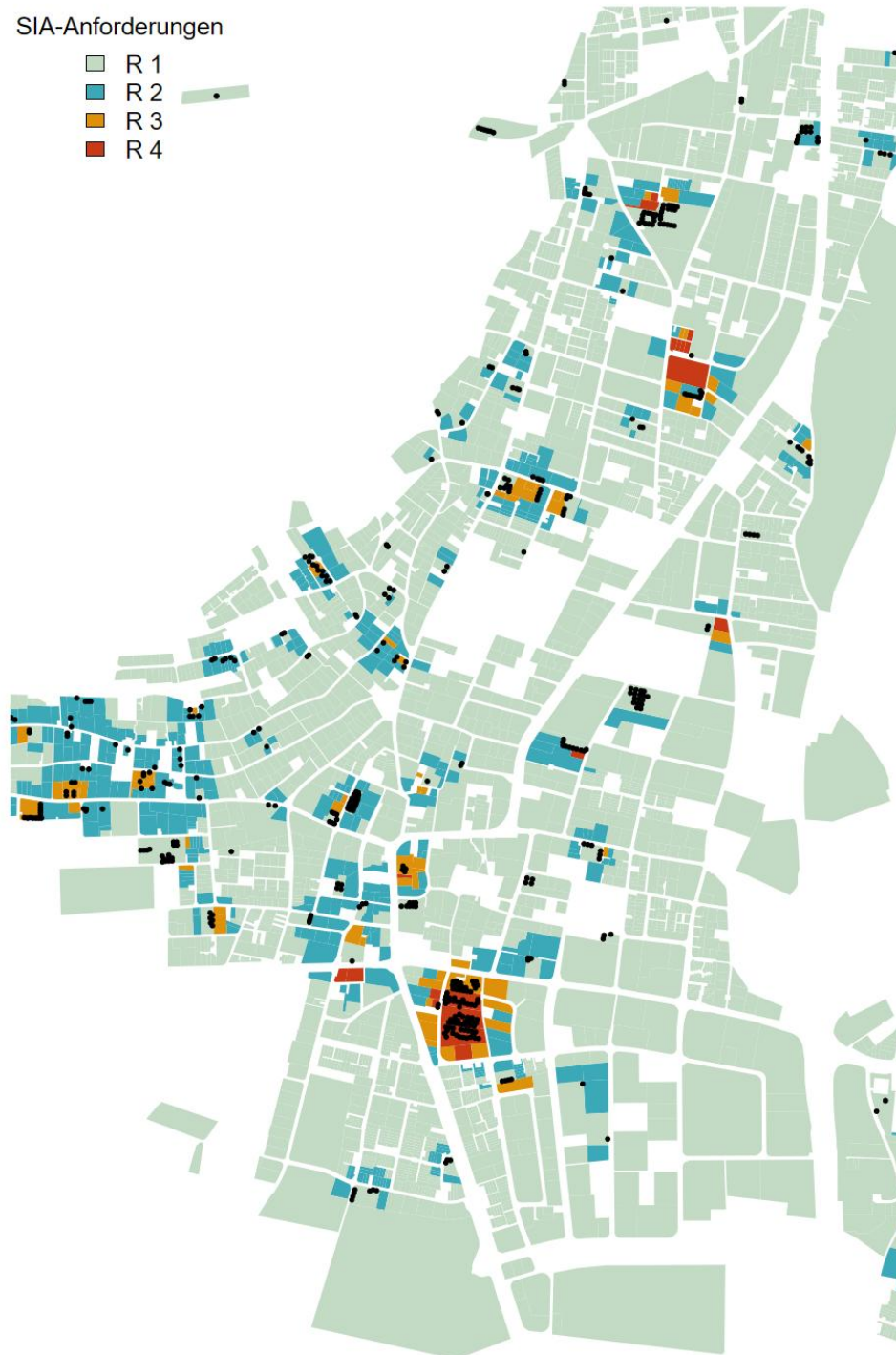


Abbildung 16: Aus der Nachbarauskühlung abgeleitete Anforderungen gemäss SIA-Norm 384/6:2021 für die Parzellen in Reinach (nördlicher Teil des Untersuchungsgebietes) über einen Zeithorizont von 50 Jahren (Berechnungsgrundlage: heutige EWS-Anlagen).

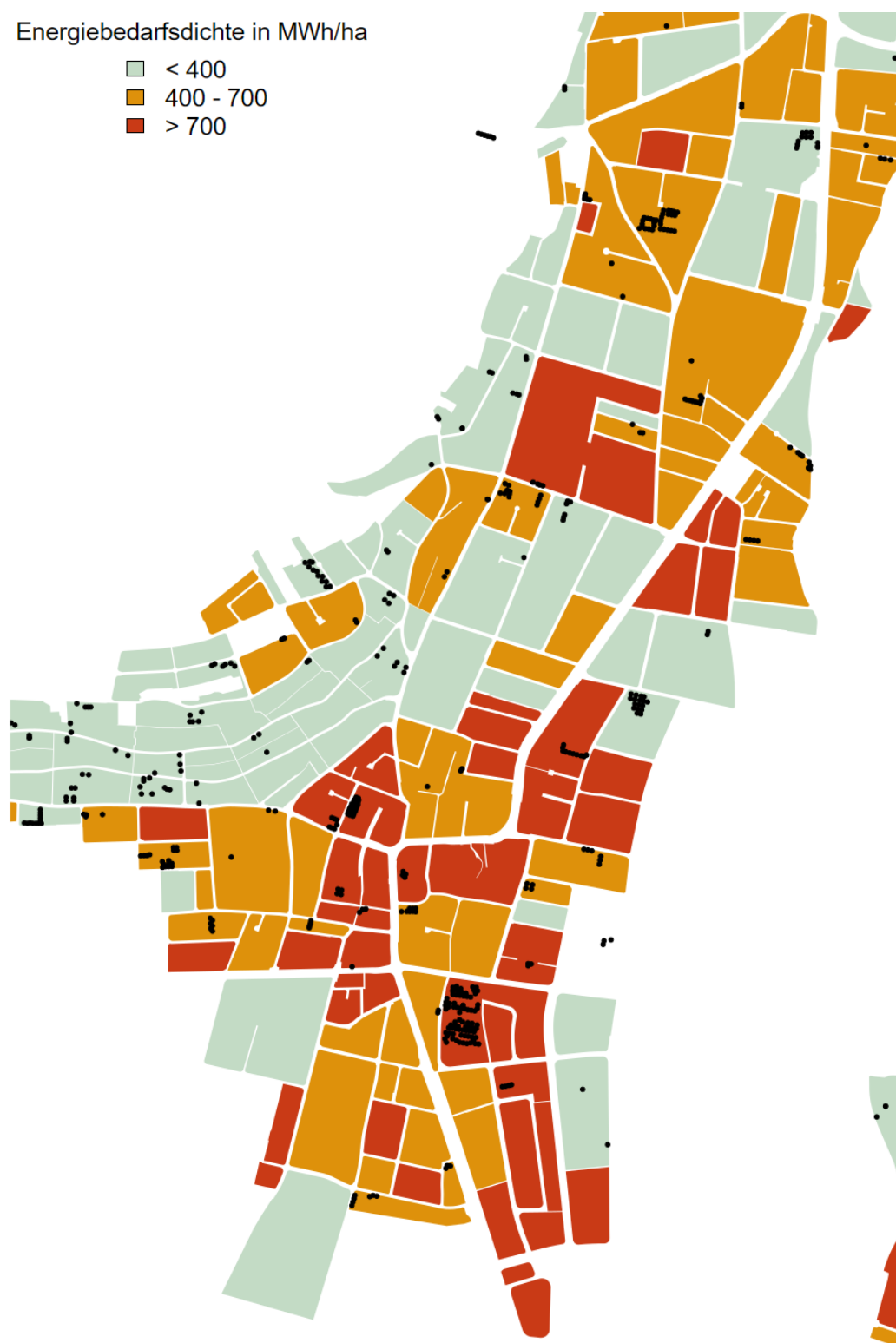


Abbildung 17: Wärmebedarfsdichte in MWh/ha in Reinach (nördlicher Teil des Untersuchungsgebietes). Die EWS sind mit schwarzen Punkten dargestellt.

5.2 RESULTATE DER SZENARIEN

Für die Auswertung der Resultate ist Folgendes zu beachten (s. Kapitel 4.1.3 und folgende):

- EWS-Anlagen mit mehr als 10 Sonden werden vollständig (100%) regeneriert. Daher ist in diesen Fällen keine zusätzliche Sondenlänge erforderlich.
- Beide Massnahmen (Mehrlänge und Regeneration) können die gleiche Wirkung erzielen. Im ausgewählten Workflow (s. Kapitel 4.1.3) wird als erste Massnahme Mehrlänge angewendet, und erst im nächsten Schritt, wenn diese Massnahme an Grenzen stösst (aufgrund lokaler Bohrtiefenbegrenzung oder unzureichender Platzbedarf für weitere EWS), wird der Regenerationsgrad erhöht. Grundsätzlich sind auch in der Wirkung äquivalente Massnahmen mit weniger Mehrlänge und mehr aktiver Regeneration (oder umgekehrt) denkbar (s. Kapitel 8.4).
- **Als Empfehlung pro Szenario werden diejenigen Massnahmen empfohlen, welche für 75% aller Fälle zutreffen (75%-Quantile). Die Investitionskosten werden ebenfalls für diese Verteilung berechnet.**

5.2.1 RESULTATE SZENARIO 1

Ohne Gegenmassnahmen beträgt die Temperaturabkühlung durch die gegenseitige thermische Beeinflussung im Durchschnitt 9 K (4 K Standardabweichung), was eine massive thermische Übernutzung darstellt. Etwa 90 % der Parzellen und 57% der Gevierte erreichen die Kategorie «erhöhte Anforderung R4» gemäss SIA-Norm 384/6:2021.

Rund 10 % der EWS-Anlagen verfügen bei der Auslegung über mehr als 10 Sonden. Für diese Anlagen wurde eine Regenerationsrate von 100% angenommen.

Abbildung 18 zeigt, mit welchen durchschnittlichen Massnahmen pro Geviert die thermische Übernutzung kompensiert werden kann:

- Im Durchschnitt pro Geviert EWS-Mehrlänge um 80%
- Zusätzlich im Durchschnitt pro Geviert 29 % Regeneration
- Zusätzlich im Durchschnitt pro Geviert 1% Reduktion der durch die EWS-Anlage erzeugten Leistung¹⁷

Die pro Geviert (Abbildung 18) visualisierten Massnahmen sind räumlich stark heterogen. Es zeigt sich, dass im Vergleich mit Abbildung 12 die EWS-Anlagen in Gevierten mit geringer Wärmebedarfsdichte tendenziell eher Mehrlänge und diejenigen EWS-Anlagen in Gevierten mit hoher Wärmebedarfsdichte eher einen hohen Regenerationsgrad als Massnahme aufweisen. In den Gevierten mit geringer Energiebedarfsdichte ist in der Regel ausreichend Fläche für weitere oder längere EWS vorhanden, weshalb diese Massnahme hier oft zum Ziel führt. In den Gevierten mit hoher Energiebedarfsdichte ist das Verhältnis aus Energiebezugsfläche zu Grundstücksfläche grösser und der Platzbedarf für zusätzliche EWS stösst schneller an Grenzen.

¹⁷ Kann die thermische Übernutzung durch zusätzliche Laufmeter EWS und Erhöhung des Regenerationsgrades alleine nicht kompensiert werden, wird der Energiebezug über die EWS-Anlage schrittweise reduziert. Diese Massnahme ist nur bei einzelnen EWS-Anlagen erforderlich (s. Abbildung 11) und hat im Durchschnitt über alle EWS-Anlagen eine Reduktion der Leistung von 1% zur Folge. Diese Massnahme kann daher aus den weiteren Überlegungen in diesem Szenario ausser Acht gelassen werden.

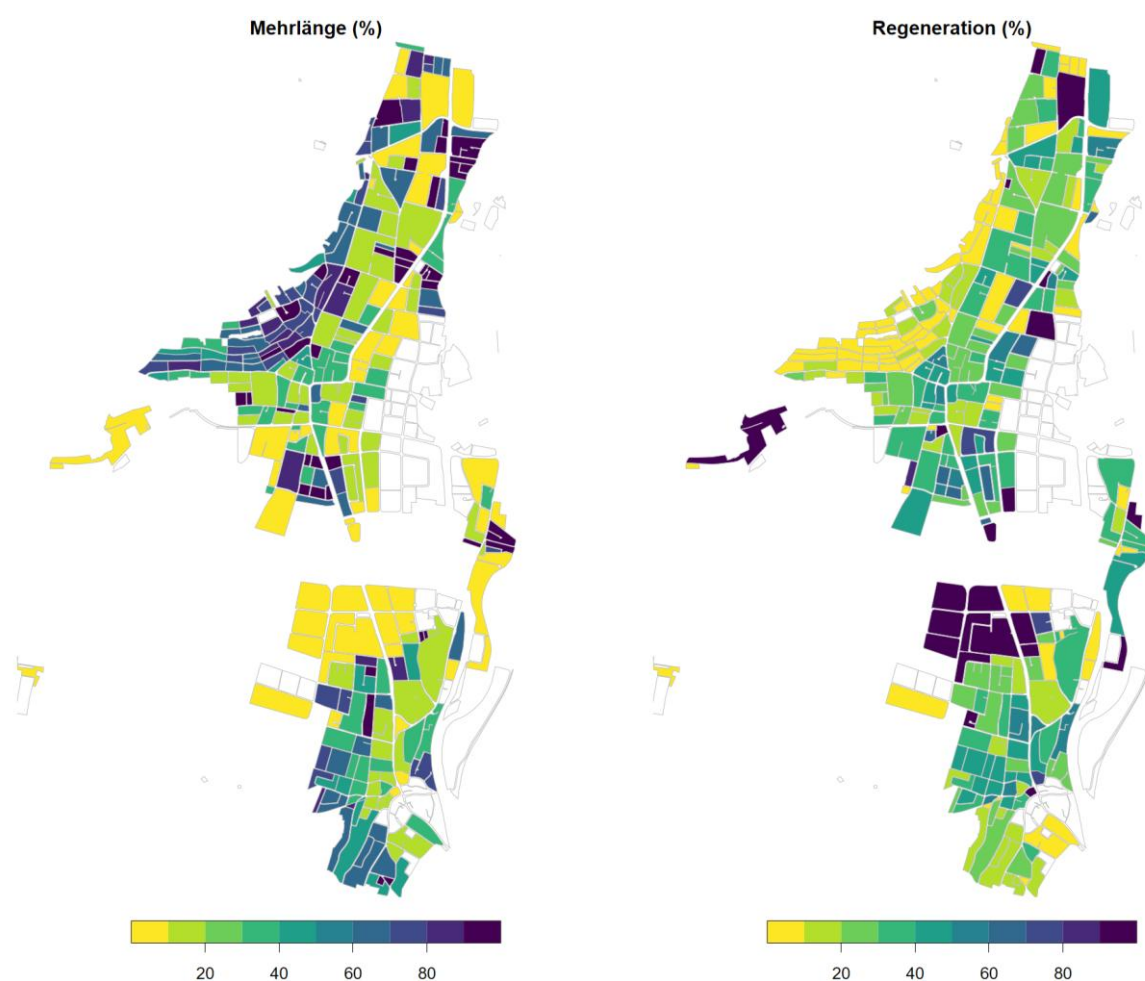


Abbildung 18: Szenario 1: Erforderliche Massnahmen, um die thermische Übernutzung zu kompensieren.

Der **Medianwert** der benötigten Mehrlänge beträgt ca. 80% für EWS-Anlagen der Gevierte mit einer Energiebedarfsdichte von unter 400 MWh/ha (siehe Abbildung 19). Für EWS-Anlagen in Gevierten mit einer Energiebedarfsdichte von über 400 MWh/ha bzw. 700 MWh/ha liegt dieser Wert sogar bei 100% und dazu einer Regenerationsrate von 30%, bzw. 20%.

Die Autoren der Studie empfehlen für Massnahmen und die Kostenschätzung von den 75%-Perzentil auszugehen.

Tabelle 9 fasst die für **75%** der EWS-Anlagen benötigten Massnahmen je Energieklassen zusammen. **Hinweis: Nicht zu verwechseln mit dem Medianwert.**

Obwohl ein globaler geothermischer Deckungsgrad von 100% nicht realistisch ist, veranschaulicht dieses Szenario die Auswirkung lokaler Häufung von EWS-Anlagen. **Es zeigt sich, dass es kaum ein Geviert gibt, bei dem eine flächendeckende EWS-Nutzung ohne einschneidende Massnahmen möglich ist.**

Die Massnahmen gemäss Tabelle 9 werden als «einschneidend» charakterisiert, da sie je nach Objektklasse zu erheblichen Mehrkosten von 40 bis 100% der Investitionskosten führen (vergleiche Kapitel 5.4).

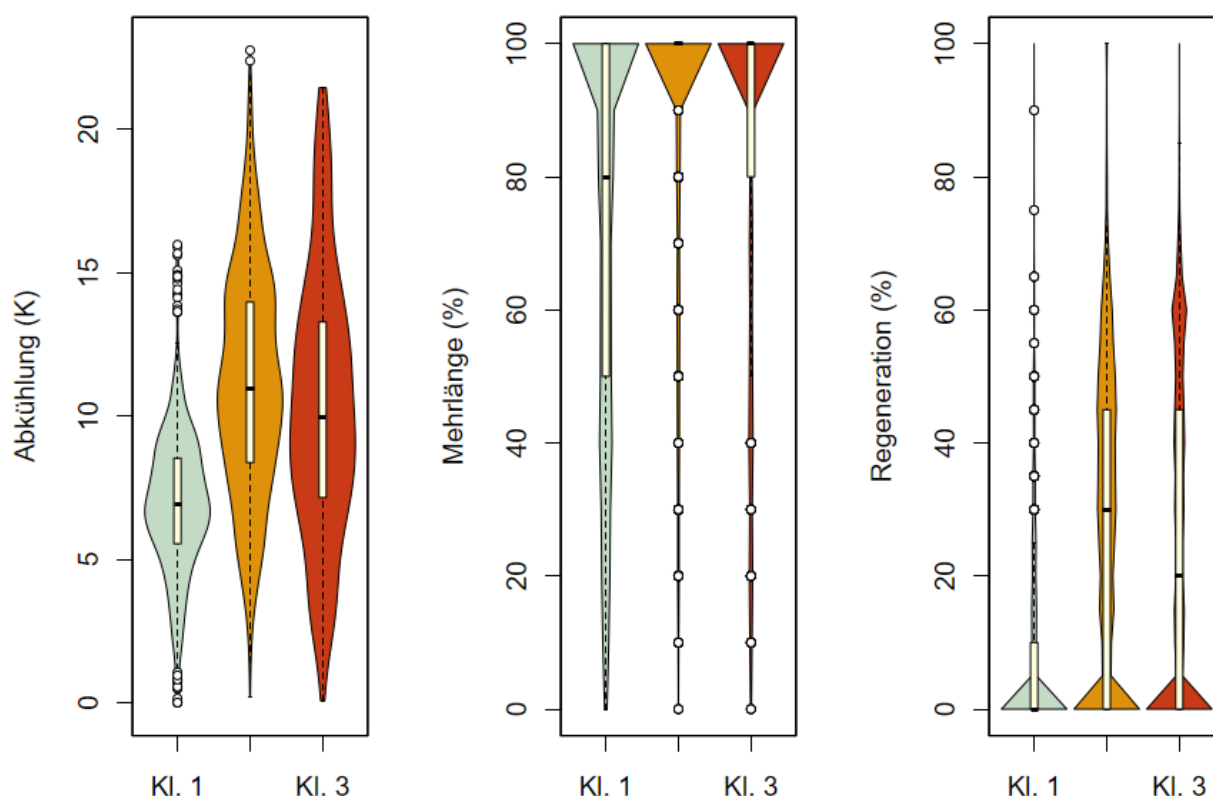


Abbildung 19: Szenario 1: Violinplot zur Darstellung der Verteilung der zur Kompensation der Nachbarauskühlung benötigten Mehrlänge und Regeneration (%) auf Parzellenebene pro Energieklassen (KI.1 = Energiebedarfsdichte des Geviertes < 400 MWh/ha, KI. 2 = Energiebedarfsdichte des Geviertes zwischen 400 MWh/ha und 700 MWh/ha, KI. 3 = Energiebedarfsdichte des Geviertes > 700 MWh/ha).

Ein Violinplot ist eine Kombination aus einem Boxplot und einem Dichtediagramm. Der Boxplot zeigt den **Median**, die untere und obere Quantile (25%- und 75%-Quantile) sowie Ausreißer. Der Dichtediagramm zeigt die **Verteilung der Werten** in Form einer gespiegelten Dichtekurve. Einzelne Punkte markieren Extremwerte, ähnlich wie bei einem Boxplot.

Tabelle 9: Szenario 1: 75%-Quantile der benötigten Massnahmen pro Energieklassen.

Energiebedarfsdichte [MWh/ha]	Abkühlung des Bodens durch Nachbarsonden [K]	Mehrlänge [%]	Regeneration [%]
< 400	8.5	100	10
400 – 700	14.0	100	45
> 700	13.3	100	45

5.2.2 RESULTATE SZENARIO 2

Szenario 2 entspricht Szenario 1 mit einer maximalen Dichte von EWS-Anlagen, jedoch ist der Wärmebedarf aller Objekte um etwa 30% reduziert. Der Energiebedarf über das ganze Gebiet entspricht einem Wert, der gemäss Szenario ZERO der Energieperspektiven 2050+ im Jahr 2050 zu erwarten ist. **Mit diesen Randbedingungen fällt die Temperaturabkühlung ohne Massnahmen um ca. 2 K kleiner aus und beträgt im Durchschnitt immer noch ca. 7 K (ca. 3 K Standardabweichung).** Die Anforderung R4 gilt immerhin für 75% der Parzellen und 43% der Quartiere.

Rund 6% der EWS-Anlagen verfügen bei der Auslegung über mehr als 10 Sonden. Für diese Anlagen wurde eine vollständige Regenerationsrate (100%) angenommen.

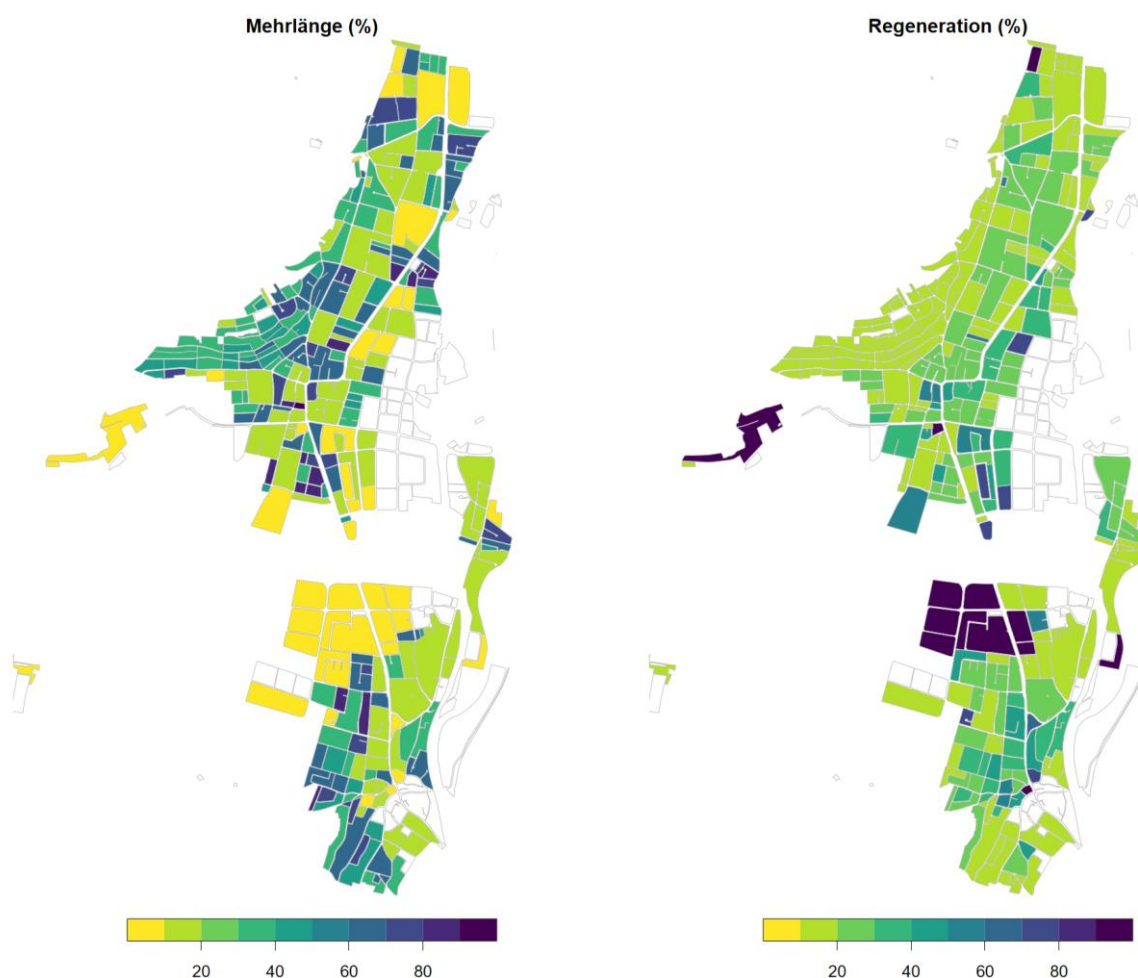


Abbildung 20 Szenario 2: Erforderliche Massnahmen, um die thermische gegenseitige Beeinflussung der EWS zu kompensieren.

Je nach Energiebedarfsdichte variiert der **Medianwert** der zusätzlich benötigten Sondenmehrlänge (Abbildung 21): etwa 50% bei unter 400 MWh/ha (Klasse 1), 65% im Bereich von 400–700 MWh/ha (Klasse 2) und 80% bei über 700 MWh/ha (Klasse 3). Der Median der erforderlichen Regenerationsraten beträgt für die EWS-Anlagen aller Geviertenklassen 15% und liegt damit im Rahmen der vorgegebenen Mindestregenerationsrate.

Tabelle 10 fasst die für **75%** der EWS-Anlagen benötigten Massnahmen je Energieklassen zusammen. Hinweis: **Nicht zu verwechseln mit dem Medianwert!**

Die Massnahmen gemäss Tabelle 10 sind vergleichbar mit denjenigen von Szenario 1 und werden als «einschneidend» charakterisiert.

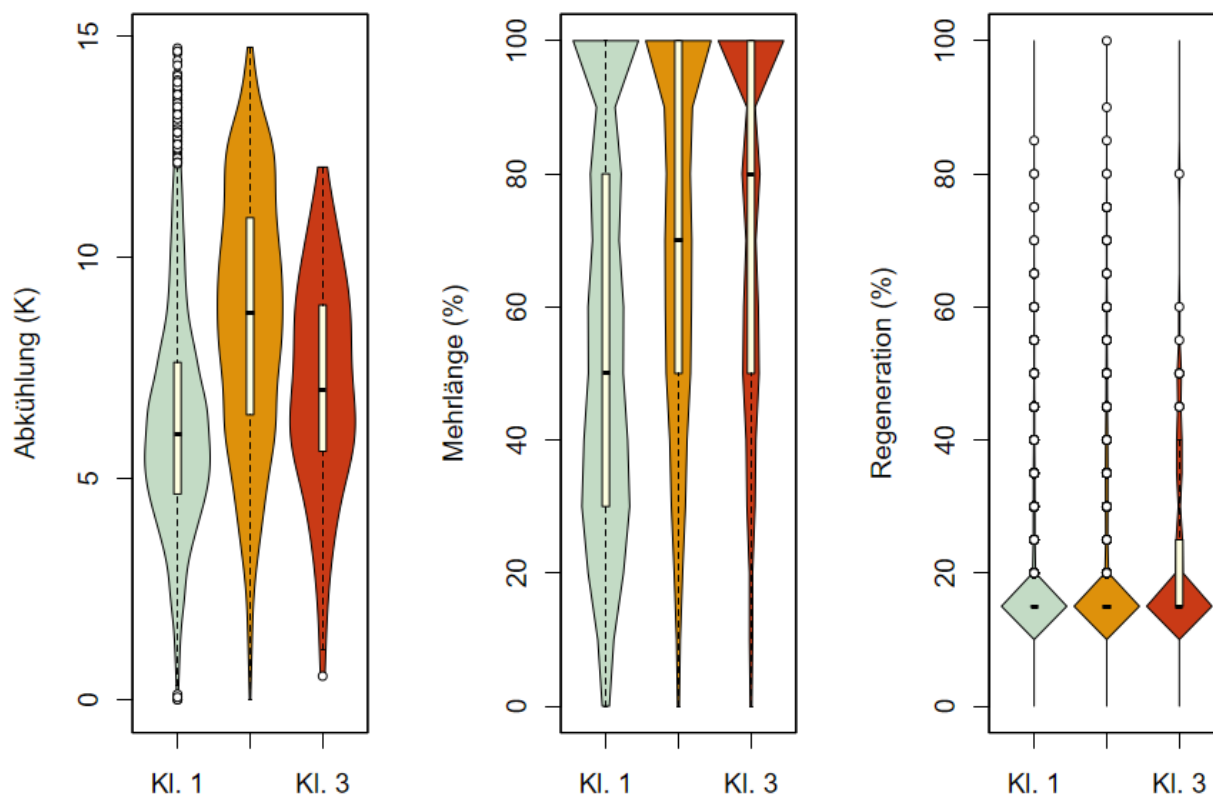


Abbildung 21: Szenario 2: Violinplot zur Darstellung der Verteilung der zur Kompensation der Nachbarkühlung benötigten Mehrlänge und Regeneration (%) auf Parzellenebene pro Energieklassen (KI.1 = Wärmebedarfsdichte des Geviertes < 400 MWh/ha, KI. 2 = Wärmebedarfsdichte des Geviertes zwischen 400 MWh/ha und 700 MWh/ha, KI. 3 = Wärmebedarfsdichte des Geviertes > 700 MWh/ha).

Tabelle 10: Szenario 2: 75-Quantile der benötigten Massnahmen pro Energieklassen.

Energiebedarfsdichte [MWh/ha]	Abkühlung des Bodens durch Nachbarsonden [K]	Mehrlänge [%]	Regeneration [%]
< 400	7.6	80	15
400 – 700	10.9	100	15
> 700	8.9	100	25

5.2.3 RESULTATE SZENARIO 3

Szenario 3 entspricht Szenario 2, jedoch mit einem geringeren Anteil von EWS-Anlagen. In Szenario 3 wird eine durchschnittliche EWS-Anlagendichte von 40% angenommen. Das entspricht etwa der doppelten Anlagendichte, welche im Jahr 2050 in den Gevierten mit dem höchsten EWS-Zubau zu erwarten ist, d.h. in Gevierten, in denen der spezifische Wärmebedarf heute unter 700 MWh/ha beträgt. Damit sind Situationen mit einer leichten lokalen Häufung von EWS-Anlagen realistisch berücksichtigt. **Ohne Massnahmen beträgt die Temperaturabkühlung im Durchschnitt nur noch ca. 3 K (ca. 1.5 K Standardabweichung).**

Rund 5% der EWS-Anlagen verfügen bei der Auslegung über mehr als 10 Sonden. Für diese Anlagen wurde eine Regenerationsrate von 100% angenommen.

Die Anforderung für die Parzellen und Quartiere sind in Tabelle 11 angegeben. Weil die Temperaturabkühlung über die Quartiere gemittelt ist, sind die Anforderungen gesamthaft betrachtet weniger streng als für die Parzellen. In seltenen Fällen gelten die Anforderungen R4.

Tabelle 11: Anforderung gemäss SIA-Norm 384/6:2021 für die Parzellen und Quartiere (Szenario 3)

	R1	R2	R3	R4
Anteil Parzellen [%]	9	49	35	7
Anteil Quartiere [%]	23	64	12	1

Der **Medianwert** der benötigten Mehrlänge beträgt ca. 10% für EWS-Anlagen in Gevierten mit einer Wärmebedarfsdichte unter 400 MWh/ha (Klasse 1, siehe Abbildung 23) und rund 20% für Gevierte mit einer Wärmebedarfsdichte über 400 MWh/ha (Klassen 2 und 3). Die mediane Regenerationsrate liegt für alle Gevierte bei den vorgegebenen 15%.

Tabelle 12 fasst die für **75%** der EWS-Anlagen benötigten Massnahmen je Energieklassen zusammen. **Nicht zu verwechseln mit dem Medianwert!**

Die Verringerung der Anlagendichte wirkt sich deutlich auf die Massnahmen aus.

Die Massnahmen gemäss

Tabelle 12 werden als «**moderat**» charakterisiert und verursachen zusätzliche Investitionskosten von **25 bis 35%** (vergleiche Kapitel 5.4).

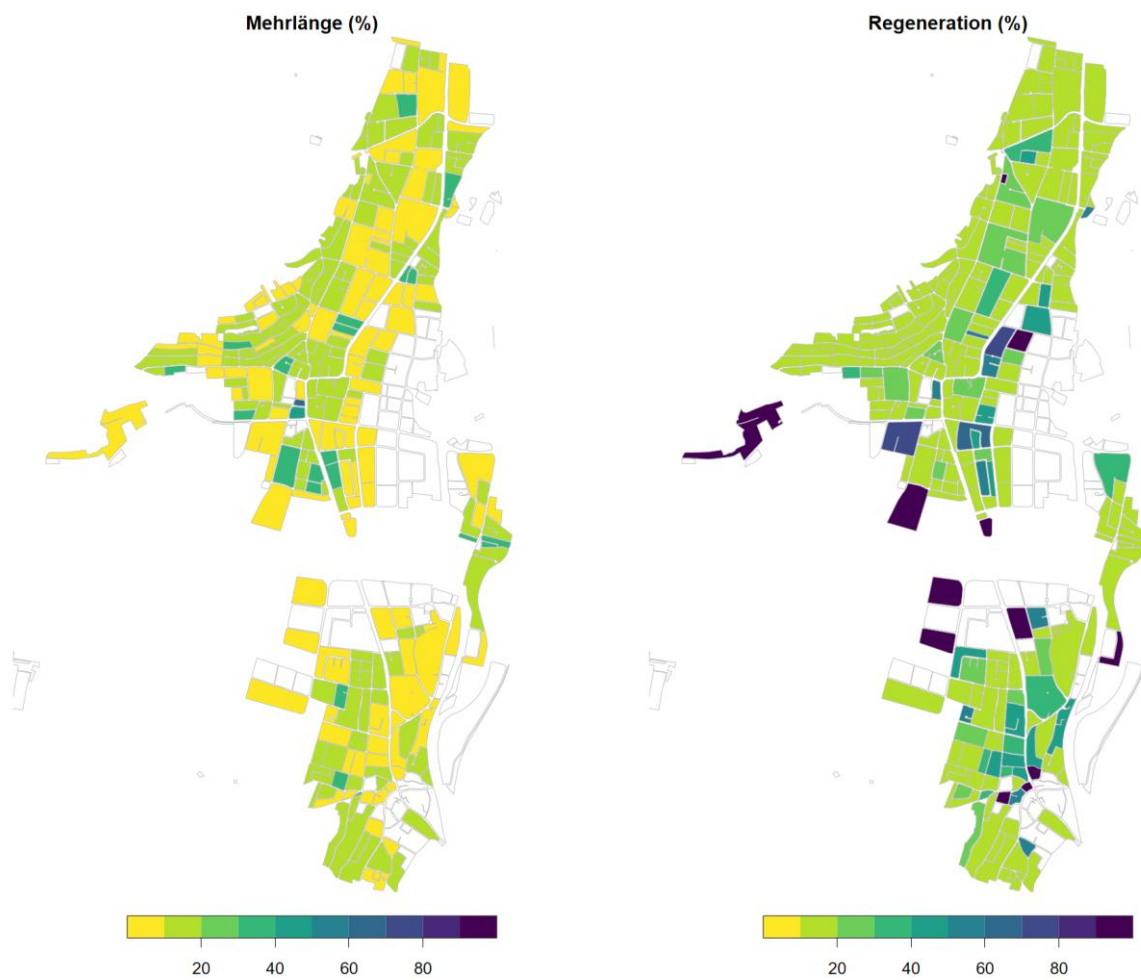


Abbildung 22 Szenario 3: Erforderliche Massnahmen, um die thermische gegenseitige Beeinflussung der EWS zu kompensieren.

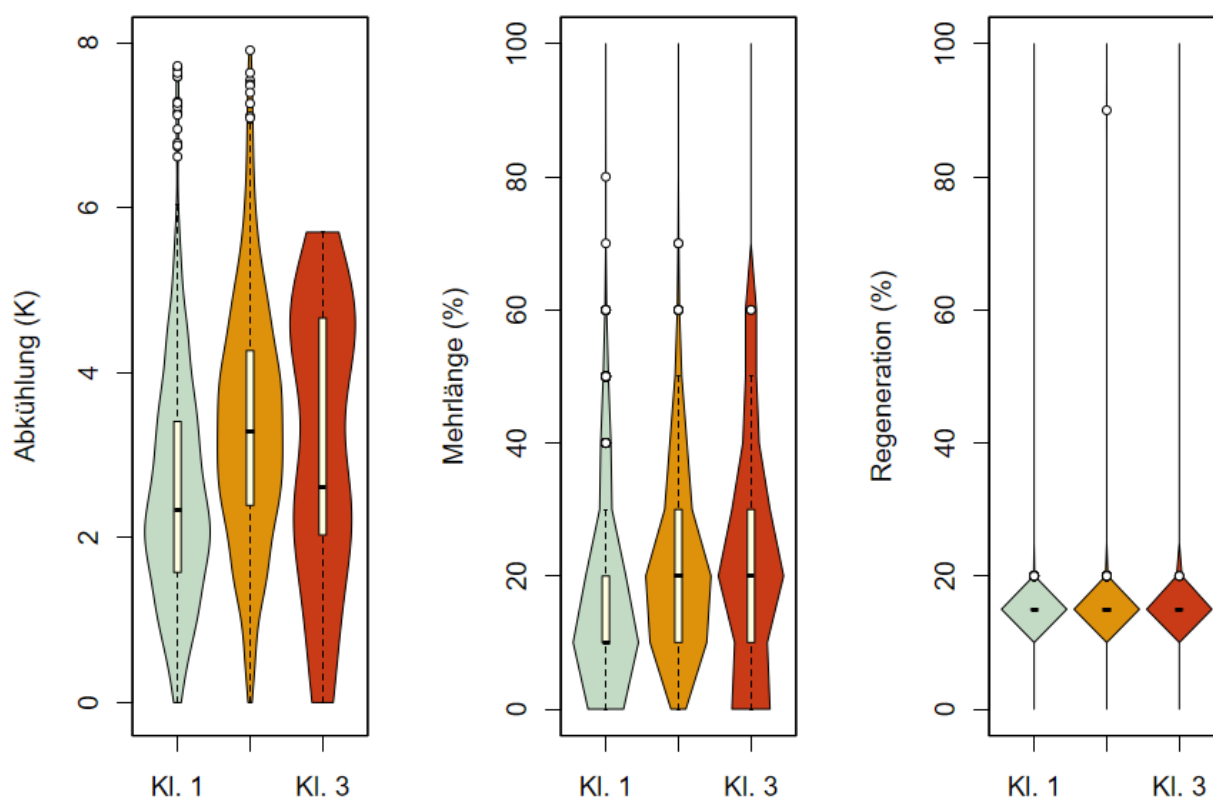


Abbildung 23: Szenario 3: Violinplot zu Darstellung der Verteilung der zur Kompensation der Nachbarauskühlung benötigten Mehrlänge und Regeneration (%) auf Parzellenebene pro Energieklassen (KI.1 = Wärmebedarfsdichte des Gebietes < 400 MWh/ha, KI. 2 = Wärmebedarfsdichte des Gebietes zwischen 400 MWh/ha und 700 MWh/ha, KI. 3 = Wärmebedarfsdichte des Gebietes > 700 MWh/ha).

Tabelle 12: Szenario 3: 75-Quantile der benötigten Massnahmen je Energieklassen.

Energiebedarfsdichte [MWh/ha]	Abkühlung des Bodens durch Nachbarsonden [K]	Mehrlänge [%]	Regeneration [%]
< 400	3.4	20	15
400 – 700	4.3	30	15
> 700	4.7	30	15

5.2.4 RESULTATE SZENARIO 4

Szenario 4 entspricht Szenario 2, jedoch mit einem geringeren Anteil von EWS-Anlagen von 20%. Diese durchschnittliche EWS-Anlagendichte entspricht derjenigen Anlagendichte, die im Jahr 2050 in den Gevierten mit dem höchsten EWS-Zubau zu erwarten ist. Mit diesem Szenario wird die durchschnittliche Situation des Jahres 2050 adäquat abgebildet, weshalb sich dieses Szenario für die Herleitung von allgemeinen Empfehlungen und Massnahmen eignet. **Ohne Massnahmen beträgt die Temperaturabkühlung im Durchschnitt nur noch ca. 1.5 K (ca. 1 K Standardabweichung).**

Rund 5% der EWS-Anlagen verfügen bei der Auslegung über mehr als 10 Sonden. Für diese Anlagen wurde eine vollständige Regenerationsrate (100%) angenommen.

Die Anforderung für die Parzellen und Quartiere sind in Tabelle 13 angegeben. Weil die Temperaturabkühlung über die Quartiere gemittelt ist, sind die Anforderungen gesamthaft betrachtet weniger streng als für die Parzellen. Nur in seltenen Fällen gelten die Anforderungen R3.

Tabelle 13: Anforderung gemäss SIA-Norm 384/6:2021 für die Parzellen und Quartiere (Szenario 4)

	R1	R2	R3	R4
Parzellen [%]	37	59	4	0
Quartiere [%]	50	38	0	0

Nur für EWS-Anlagen in Gevierten mit einer Wärmebedarfsdichte zwischen 400 und 700 MWh/ha beträgt der **Medianwert** der benötigten Mehrlänge ca. 10%. Die mediane Regenerationsrate liegt für alle Gevierte beträgt bei den vorgegebenen 15%.

Tabelle 14 fasst die für **75%** der EWS-Anlagen benötigten Massnahmen je Energieklassen zusammen. **Nicht zu verwechseln mit dem Medianwert!**

Die durch diese geringe Dichte von EWS-Anlagen verursachte thermische Übernutzung kann mit «einfachen Massnahmen» kompensiert werden. Diese verursachen zusätzliche Investitionskosten von 20 bis 25% (vergleiche Kapitel 5.4).

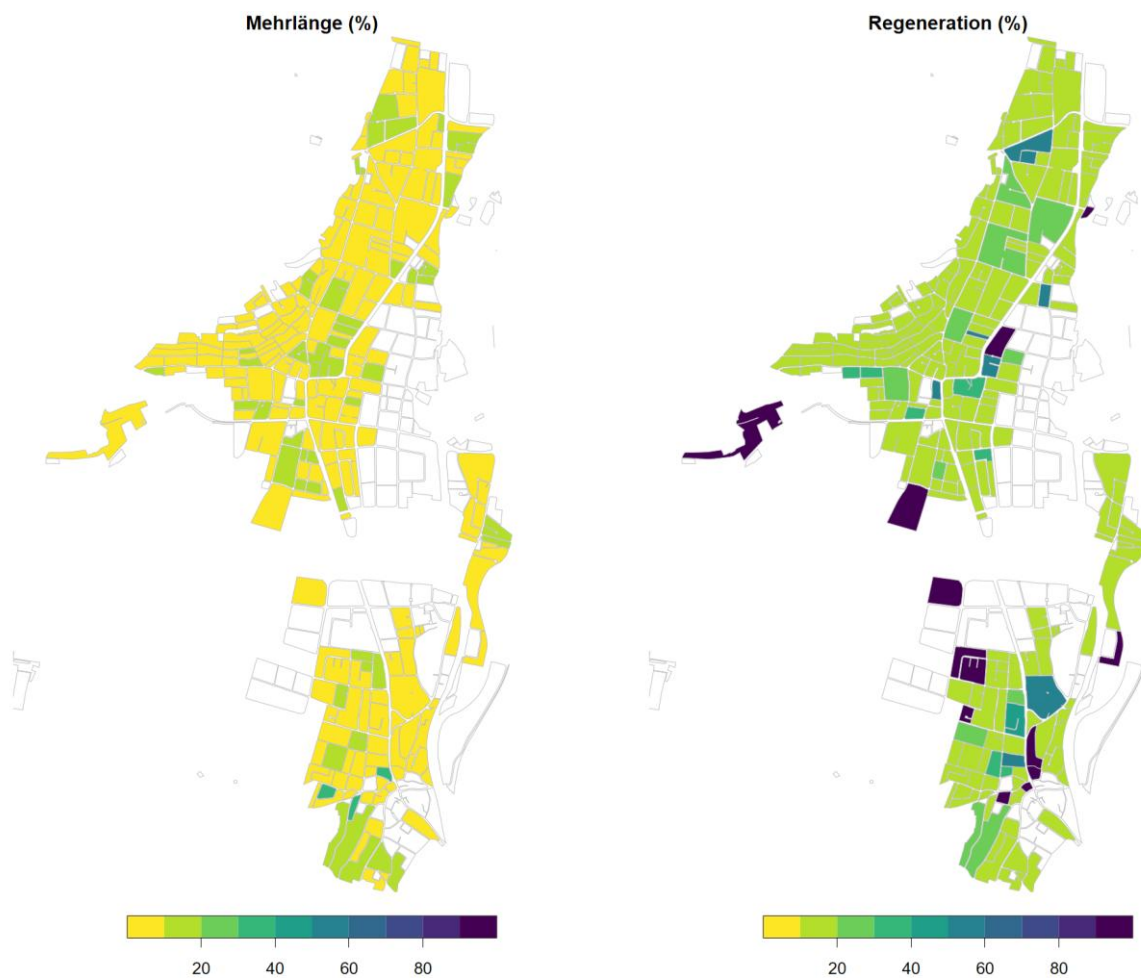


Abbildung 13 Szenario 3: Erforderliche Massnahmen, um die thermische gegenseitige Beeinflussung der EWS zu kompensieren.

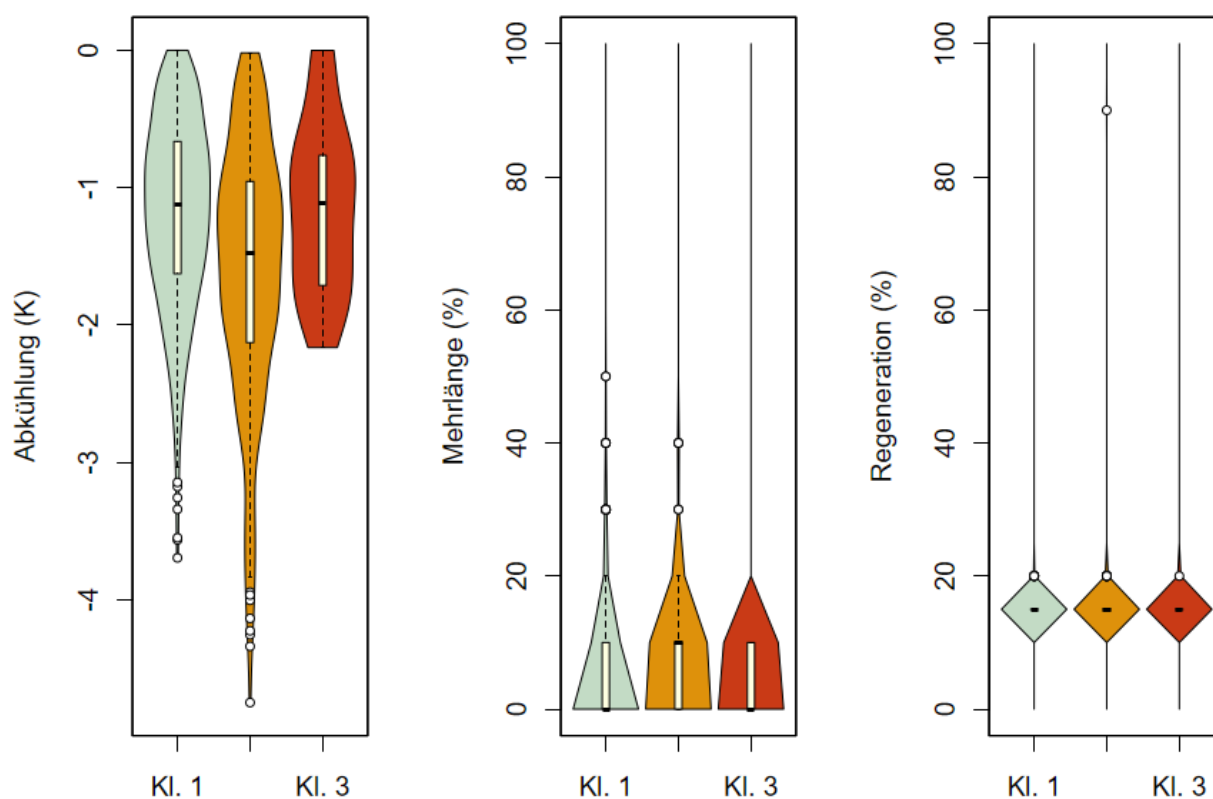


Abbildung 24: Violinplot zur Darstellung der Verteilung der zur Kompensation der Nachbarauskühlung benötigten Mehrlänge und Regeneration (%) auf Parzellenebene pro Energieklassen (KI.1 = Wärmebedarfsdichte des Geviertes < 400 MWh/ha, KI. 2 = Wärmebedarfsdichte des Geviertes zwischen 400 MWh/ha und 700 MWh/ha, KI. 3 = Wärmebedarfsdichte des Geviertes > 700 MWh/ha).

Tabelle 14: 75-Quantile der benötigten Massnahmen pro Energieklassen.

Energiebedarfsdichte [MWh/ha]	Abkühlung des Bodens durch Nachbarsonden [K]	Mehrlänge [%]	Regeneration [%]
< 400	1.6	10	15
400 – 700	2.1	10	15
> 700	1.7	10	15

5.2.5 ZUSAMMENFASSUNG DER RESULTATE

Die erforderlichen Massnahmen (75-Quantile), um die gegenseitige thermische Beeinflussung zu kompensieren, sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15: Zusammenfassung der erforderlichen Massnahmen pro Szenarien, um die thermische gegenseitige Beeinflussung in 75% aller Fälle zu kompensieren.

Szenarien	Massnahmen	Kleine Anlagen Energiebedarfsdichte pro Gevierte			Anzahl und Anteil Grossanlagen mit 100% Regeneration an allen Anlagen
		< 400	400 – 700	> 700	
Szenario 1	Mehrlänge (%)	100	100	100	423 (10%)
	Regeneration (%)	10	45	45	
	Abkühlung des Bodens [K]	8.5	14.0	13.3	
Szenario 2	Mehrlänge (%)	80	100	100	242 (6%)
	Regeneration (%)	15	15	25	
	Abkühlung des Bodens [K]	7.6	10.9	8.9	
Szenario 3	Mehrlänge (%)	20	30	30	101 (6%)
	Regeneration (%)	15	15	15	
	Abkühlung des Bodens [K]	3.4	2.0	4.7	
Szenario 4	Mehrlänge (%)	10	10	10	47 (5%)
	Regeneration (%)	15	15	15	
	Abkühlung des Bodens [K]	1.6	2.1	1.7	

Die Szenarien 1 und 2 stellen Extremfälle mit einem geothermischen Deckungsgrad von 100% dar. Die hierfür erforderlichen Massnahmen sind einschneidend. Diese Szenarien eignen sich dazu, Massnahmen bei einer lokalen Häufung von Erdsonden-Wärmesystemen (EWS) zu veranschaulichen.

Die aus den Szenarien 3 bzw. 4 abgeleiteten Massnahmen werden als «moderat» bzw. «einfach» umsetzbar charakterisiert.

5.3 RESULTATE DER THERMISCHEN GRUNDWASSERMODELLIERUNG

Die EWS des simulierten Wohnquartiers kühlen das Grundwasser im Abstrom des EWS-Feldes, ohne eine Wärmefahne auszubilden. Im Abstrom in 100 m Abstand der letzten EWS beträgt die maximale Grundwassertemperaturänderung -1.7 K (vgl. Abbildung 25). Während des Kühlbetriebs vermindert sich die Absenkung der Grundwassertemperatur.

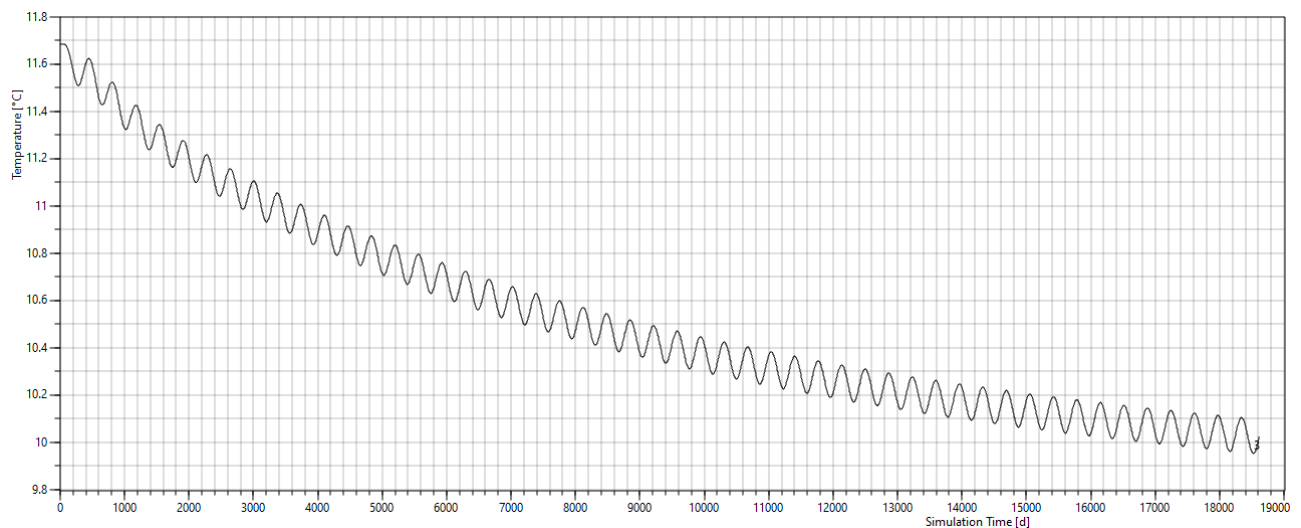


Abbildung 25: Temperaturentwicklung in 100 m Abstrom der letzten EWS (Siehe Abbildung 26 für den genauen Standort) über 50 Jahre.

Ein Horizontalschnitt im unteren Bereich des Grundwasserleiters (Abbildung 26) zeigt, dass die Temperaturänderungen in der mittleren Reihe der EWS am grössten sind.

Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen das Temperaturprofil in den EWS und ihrer Hinterfüllung und illustrieren, dass der Grundwasserleiter überproportional stark Wärme aufnimmt und abgibt, da durch die Grundwasserströmung ständig Wärmeenergie transportiert wird und die Temperatur in der direkten Umgebung der EWS im Grundwasserleiter deshalb sehr viel näher bei der ungestörten Temperatur bleibt.

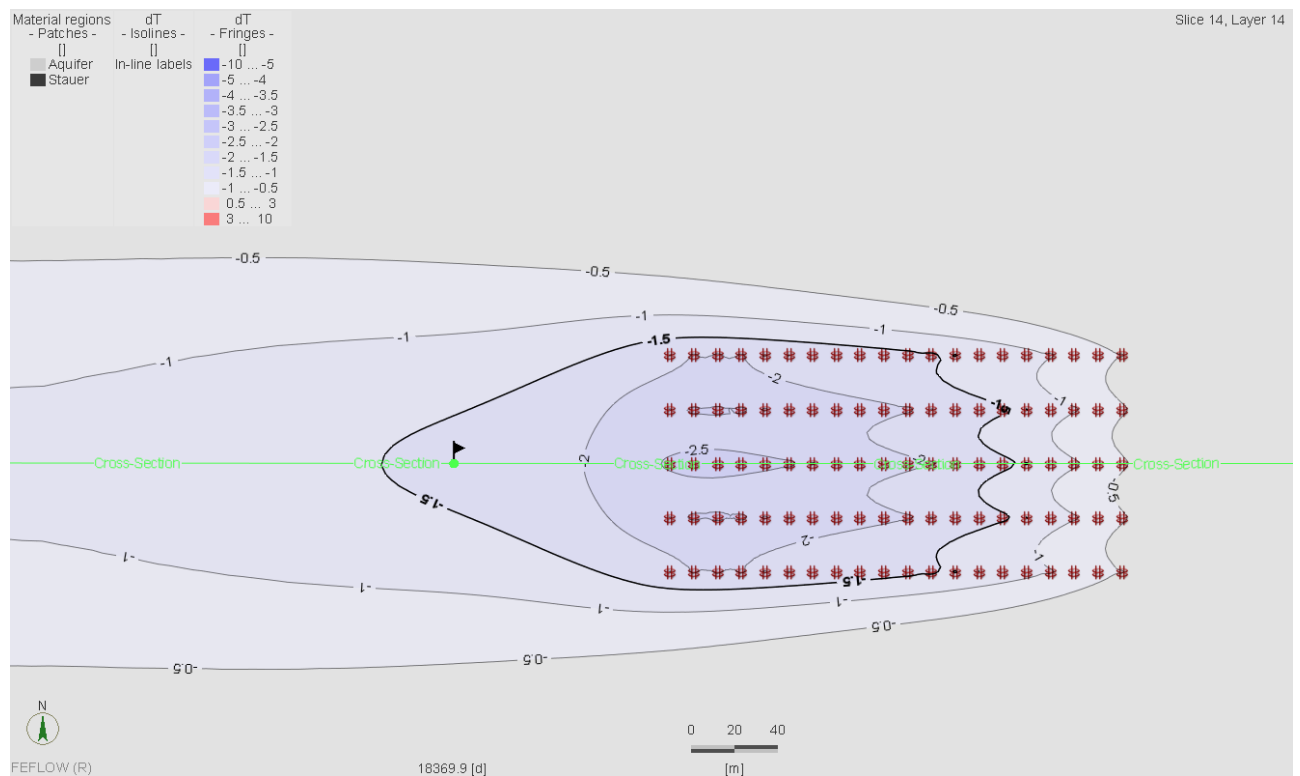


Abbildung 26: Maximale Ausbreitung der Kühlfahne (Ende April) im Grundwasser nach 50 Jahren. Die schwarze Fahne zeigt den Standort der Zeitreihe 100 m im Abstrom der letzten EWS. Die grüne Linie zeigt den Standort des Querschnittes der nachfolgenden Abbildungen.

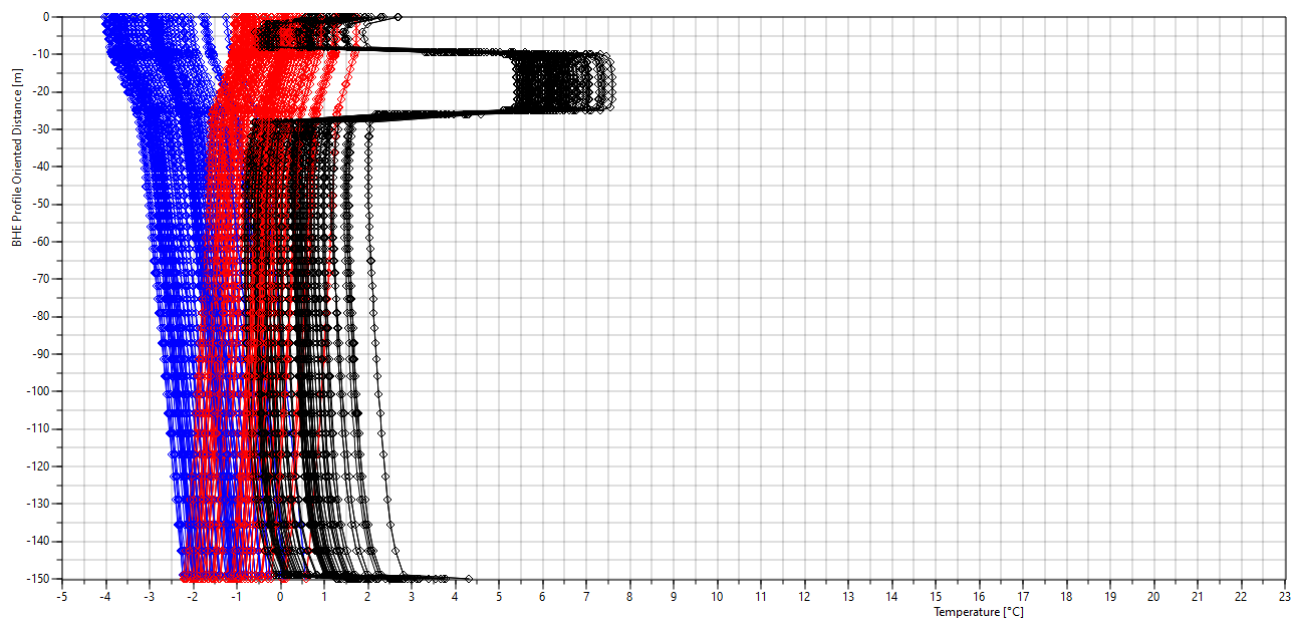


Abbildung 27: Temperaturprofil in allen EWS, wenn die EWS am kältesten sind (Ende Februar), nach 50 Jahren Betriebszeit. Blau ist die Temperatur beim Abwärtsfließen; rot beim Aufwärtsfließen; und schwarz die Temperatur in der Hinterfüllung.

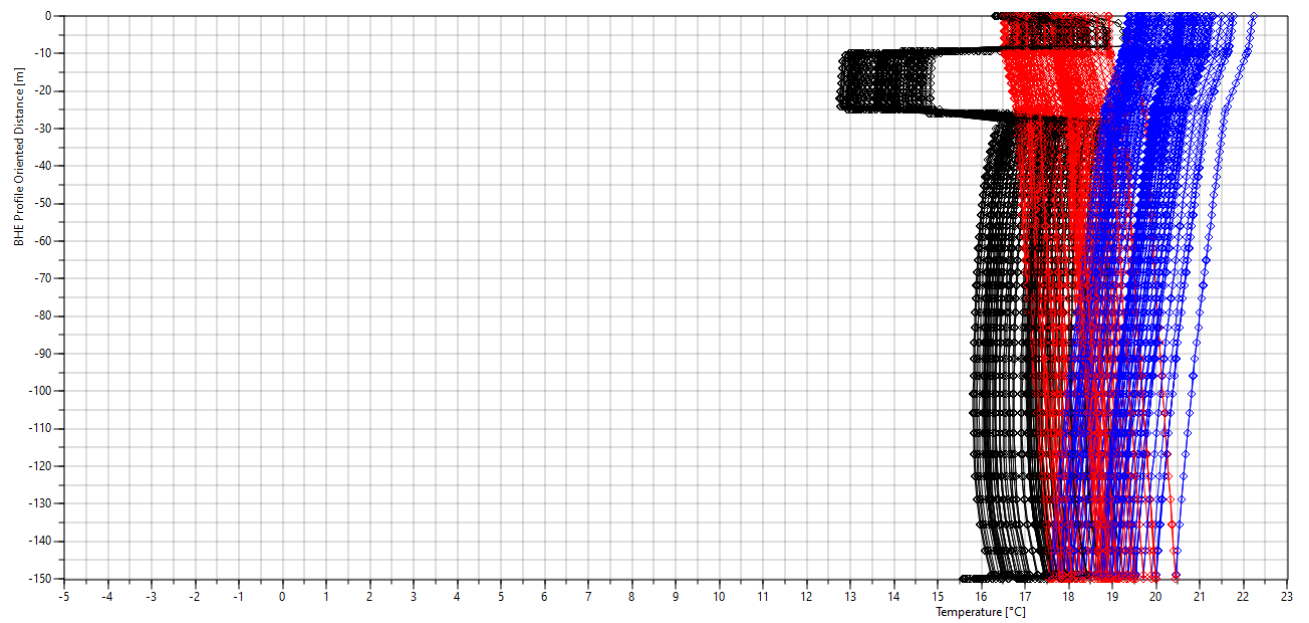


Abbildung 28: Temperaturprofil in allen EWS, wenn die EWS am wärmsten sind (Ende August), nach 50 Jahren. Blau ist die Temperatur beim Abwärtsfließen; rot beim Aufwärtsfließen; und schwarz die Temperatur in der Hinterfüllung.

5.4 KOSTEN VON MASSNAHMEN ZUR ABWENDUNG EINER THERMISCHEN ÜBERNUTZUNG

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, welche Investitionskosten die Massnahmen zur Abwendung einer thermischen Übernutzung des Untergrundes nach sich ziehen. **Die Investitionskosten beziehen sich auf Mehrkosten im Vergleich zu Anlagen, bei denen die Beeinflussung durch künftige EWS nicht berücksichtigt sind.**

Die Investitionskosten werden für typische Objekte und für eine Bandbreite verschiedener Regenerationsgrade und Leistungsreserven (Mehrlänge) durchgeführt.

5.4.1 ANSATZ

Für die Regeneration von EWS bieten sich verschiedene Wärmequellen an. Es wurden folgende in der Praxis üblichen Regenerationsquellen untersucht:

- PVT-Hybridkollektoren (Strom und Wärme in einem Solarkollektor)
- Unabgedeckte selektive Solarthermiekollektoren
- Aussen aufgestellte Luft-Wärmetauscher

Andere Regenerationsquellen, wie z.B. Abwärme aus der Kühlung der Zuluft von Lüftungsanlagen (Kriesi, 2017) wurden nicht untersucht, da viele Bestandesbauten im Wohnsektor keine mechanische Lüftung besitzen. Ebenso wurde die Regeneration über Niedertemperatur-Abwärme aus der direkten Nachbarschaft nicht weiter untersucht, da diese Situation nicht einem Regelfall entspricht und die Investitionskosten meist so tief sind, dass es wirtschaftlich ist, die Quelle zu erschliessen, womit sich keine Mehrkosten ergeben.

Die Autoren der Studie gehen von einer Erschliessung der Regenerationsquelle als Teil einer Gesamtanlage aus. Das heisst, dass bezüglich der Investitionskosten für die zusätzliche Regeneration lediglich die Zusatzkosten berücksichtigt werden, welche durch den zusätzlichen Teil der Regeneration verursacht wird. Beispielsweise bestehen die Investitionskosten der solaren PVT-Regeneration aus Arbeitsaufwand, Materialkosten Solarkollektor und sämtlichen hydraulischen und mechanischen sowie elektrisch notwendigen Installationen zusätzlich zu einer PV-Anlage. Gerüst, generelle Baumeisterarbeiten und ähnliches sind Teil der restlichen Anlage und ausserhalb der hier angegebenen Kosten. Planungskosten (typischerweise rund 10-15% der Gesamtkosten) und Mehrwertsteuer sind ebenfalls nicht enthalten.

In der folgenden Kostenbetrachtung wurden Investitionskosten verwendet, welche sich auf gute Rahmenbedingungen beziehen. Dies trifft auf Liegenschaften zu, bei denen der Rückkühler auf dem Dach oder im naheliegenden Garten platziert werden kann oder eine Solaranlage mit einfacher Dachgeometrie und grossen einheitlichen Flächen realisiert werden kann. Gleichzeitig wurden wie oben beschrieben die Investitionskosten der Regeneration als Teil einer Gesamtanlage gerechnet, welche zu einem günstigen Zeitpunkt realisiert wird. Das heisst, dass die Regeneration entweder im Neubau Teil einer kompletten neuen Anlage, in bestehenden Gebäuden Teil eines Heizungersatzes, Bau einer PV-Anlage oder einer umfassenden energetischen Sanierung ist. Für den Fall, dass die Regeneration als separate Einzelmassnahme realisiert wird, können die Kosten deutlich höher ausfallen. Ebenso sind Durchschnittswerte über eine Grosszahl von Anlagen gerechnet und im Einzelfall können die Investitionskosten deutlich abweichen.

5.4.2 KOSTEN UNTERSCHIEDLICHER REGENERATIONSQUELLEN

Für die Erschliessung einer Regenerationsquelle sind folgende Anlagenteile erforderlich:

- Regenerationsquelle
- Hydraulik zur Erschliessung und Anbindung der Regenerationsquelle: Verbindungsleitung von der Regenerationsquelle zum Technikraum, Umwälzpumpe, hydraulischer Anschluss an Solekreis und Systemtrennung
- Regelung zum Betrieb der Regenerationsquelle

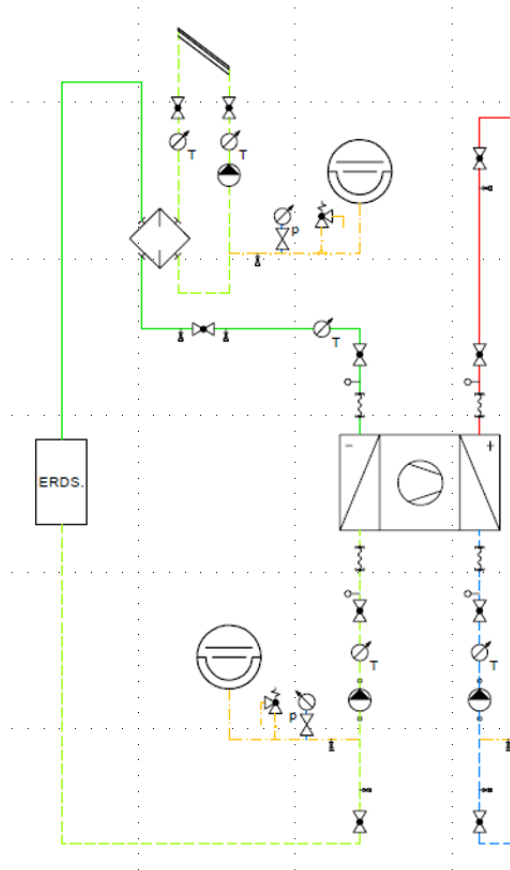


Abbildung 29: Beispiel einer primärseitigen hydraulischen Einbindung von solarer Regeneration in den EWS-Kreis

Die Investitionskosten lassen sich in

- **Initialkosten**, welche bei ähnlichen Anlagenklassen in gleicher Grössenordnung liegen und
 - **Grenzkosten**, welche in unterschiedlichen Anlagengrössen proportional skalieren,
- einteilen.

Die Initialkosten für die Regeneration belaufen sich je nach Regenerationsquelle auf etwa:

- | | |
|--|------------|
| - Solare Regeneration über thermisch unverglaste Kollektoren: | 10'000 CHF |
| - Solare Regeneration über Photovoltaik/thermische Kollektoren ¹⁸ : | 12'000 CHF |
| - Aussenluft Regeneration über Rückkühler: | 25'000 CHF |

¹⁸ Die Initialkosten beziehen sich ausschliesslich auf den thermischen Teil der kombinierten PVT-Kollektoren sowie die benötigten hydraulischen Installationen. Der elektrische Teil ist nicht eingerechnet.

Die Investitionskosten für eine Regeneration mit einem Regenerationsgrad von 20% entsprechen etwa den Initialkosten der entsprechenden Anlagenklasse. Die zusätzlichen Investitionskosten zur Erreichung eines höheren Regenerationsgrades bestehen grösstenteils aus den Grenzkosten.

Sobald

- die Solarinstallation kleinteiliger,
- der Installationsort der Solaranlage oder
- der Aufstellungsort des Rückkühlers komplexer, oder die
- Leitungsführung lang oder aufwendig

ausgeführt werden muss, können sich die Installationskosten massiv erhöhen und von der folgenden Standard-Kostenbetrachtung abweichen.

Die Kosten wurden für die in Tabelle 16 aufgelisteten Objektklassen ermittelt.

Tabelle 16: Objektklassen für die Ermittlung von Investitionskosten

Objektklasse	Heizleistung	Objekttyp	Gebäudehülle
1	5 kW	Einfamilienhaus	Neubau-Standard
2	10 kW	Einfamilienhaus	GEAK-Klasse D
3	15 kW	Mehrfamilienhaus (4 Wohnungen)	Neubaustandard
		Mehrfamilienhaus (2 Wohnungen)	GEAK-Klasse D
4	50 kW	Mehrfamilienhaus (15 Wohnungen)	Neubaustandard
		Mehrfamilienhaus (7 Wohnungen)	GEAK-Klasse D
5	150 kW	Mehrfamilienhaus (45 Wohnungen)	Neubaustandard
		Mehrfamilienhaus (21 Wohnungen)	GEAK-Klasse D

Die folgende Abbildung 30 zeigt die Minimalkosten für die Regeneration in Abhängigkeit unterschiedlicher Heizleistungen (entspricht unterschiedlicher Gebäudegrössen) für Regenerationsgrade zwischen 20 und 100%.

Bei kleinen Gebäuden (Einfamilienhäuser und kleine MFH) sind die prozentualen Mehrkosten für die Anfangsinvestition hoch. Je grösser der Heizbedarf und je grösser die EWS-Anlage wird, desto geringer wird der Anteil der zusätzlichen Anlageinvestitionen an den gesamten Investitionskosten. Der Anteil der Grenzkosten nimmt mit der Anlagengrösse zu. Gleichzeitig reduziert die Regeneration den Anteil an nötigen Bohrm Metern und den Strombedarf.

Bei grossen EWS-Anlagen (EWS-Feldern), z.B. bei Liegenschaften mit mehreren Gebäuden, beeinflussen sich die EWS innerhalb des Feldes bereits so stark, dass der Betrieb der Anlage ohne Regeneration nicht möglich ist. Ein Regenerationsgrad von 50% ist relativ einfach und wirtschaftlich effizient zu erreichen. Mit einem zunehmend höheren Regenerationsgrad nehmen die Investitionskosten der Solaranlage als Regenerationsquelle aufgrund der gegenseitigen Beeinflussung überproportional zu.

Bei kleinen Gebäuden ist die solare Regeneration i.d.R. deutlich günstiger als die Regeneration über einen Aussenwärmetauscher, bei dem die Initialkosten deutlich höher sind. Bei MFH mittlerer Grösse sind die drei Regenerationsquellen bezüglich Kosten bei guten Rahmenbedingungen identisch. Je grösser die Anlage, desto vorteilhafter wird der Aussenluftwärmetauscher als Regenerationsquelle, da dieser sehr tiefe Grenzkosten besitzt.

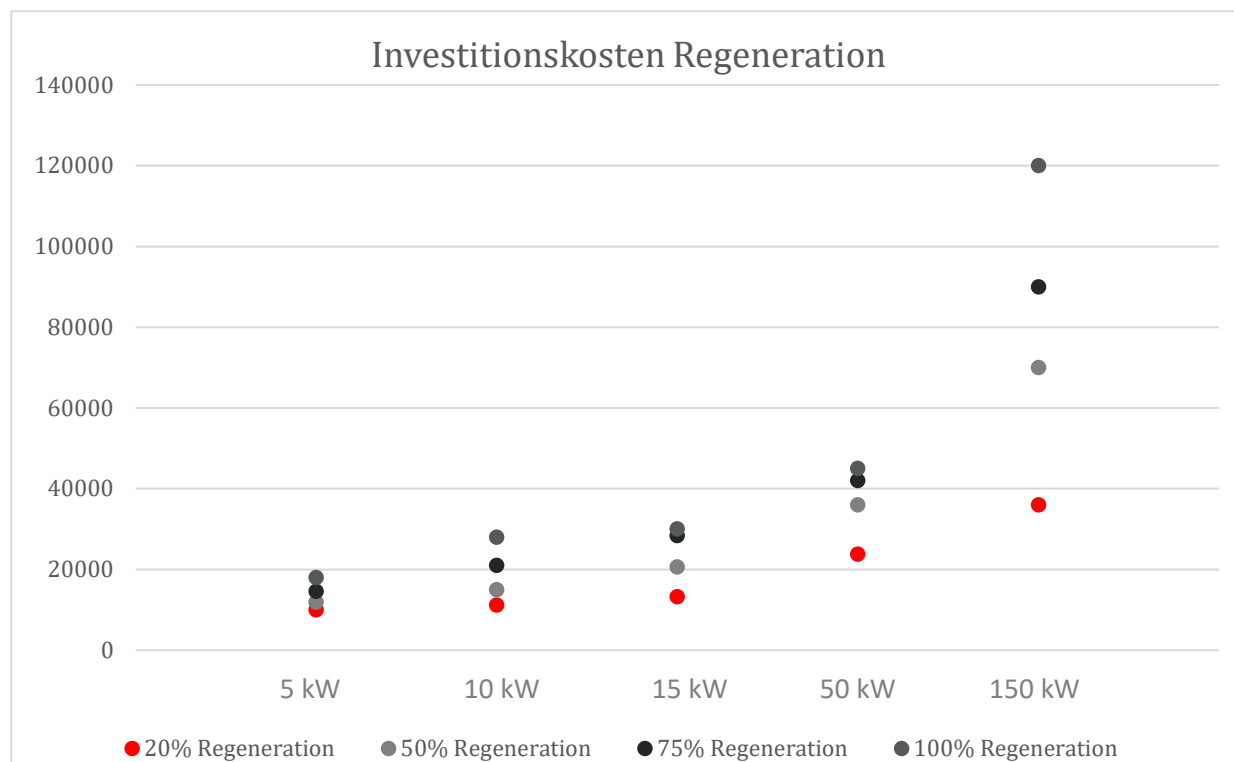


Abbildung 30: Investitionskosten der Regeneration in Abhängigkeit der installierten Heizleistung (entsprechend der Objektklassen 1 – 5). Die Kurve mit 20% Regenerationsanteil entspricht etwa den Initialkosten für jede Objektklasse. Es wurden die Investitionskosten sämtlicher Regenerationsquellen gerechnet und jeweils die kostengünstigste Quelle ausgewählt.

Tabelle 17: Investitionskosten für unterschiedliche Regenerationsgrade zusätzlich zu den Grundkosten ohne Regeneration

	Investitionskosten Heizungsanlage [CHF]	Investitionskosten für Regeneration [CHF] ¹⁹			
	keine Massnahme ²⁰	Regenerationsgrad			
Objektklasse		20%	50%	75%	100%
1	50'000	10'000	12'000	15'000	18'000
2	60'000	11'000	15'000	21'000	28'000
3 ²¹	70'000	14'000	21'000	28'000	30'000
4 ²¹	110'000	24'000	36'000	42'000	45'000
5 ²¹	380'000	36'000	70'000	90'000	120'000

¹⁹ Es wurden die Investitionskosten sämtlicher drei Regenerationsquellen für die entsprechende Gebäudegrösse und den entsprechenden Regenerationsgrad kalkuliert. In dieser Darstellung werden jeweils die tiefsten Kosten verwendet.

²⁰ Die Grundkosten ohne Regeneration beziehen sich auf eine Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlage ohne Regenerationsmassnahmen. Die Kostenquelle ist der Heizkostenrechners von erneuerbar heizen von Energie Schweiz: www.erneuerbarheizen.ch

²¹ Die Auslegung der unterschiedlichen Gebäude und entsprechende Kostenkalkulation erfolgte auf unterschiedliche Heizleistungen. Somit entspricht das gleiche Resultat einer bestimmten Heizleistung in Neubau-Energiestandard mit mehr Energiebezugs-fläche, resp. Wohneinheiten als ein bestehendes Gebäude mit der GEAK Klasse D.

Tabelle 18: Für die solare Regeneration (mittels solarthermischen unverglasten Kollektoren) benötigte Fläche

Objektklasse	Fläche für solare Regeneration in m ² für verschiedene Regenerationsgrade			
	Regenerationsgrad			
	20%	50%	75%	100%
1	4	7	11	16
2	6	14	21	33
3	10	24	35	53
4	30	54	79	114
5	90	134	170	250

Die für die solare Regeneration erforderliche Fläche ist insbesondere bei kleineren Objekten und Regenerationsgraden bis 75% relativ überschaubar. Grundsätzlich sollten damit auch bei solarthermischen Kollektoren noch ausreichend Fläche für die Installation einer PV-Anlage vorhanden sein. Falls die Fläche für eine PV-Anlage zu klein sein sollte, ist es möglich anstelle von Solarthermiekollektoren Solar PV/T Kollektoren zu installieren, damit keine wertvolle Dachfläche für die Produktion von Eigenstrom neben der Regenerationswärme verloren geht. Der Konflikt der Dachnutzung besteht diskussionslos und die Interessen müssen in jedem Einzelfall vorsichtig abgewogen werden.

Bei grösseren Anlagen ist die Regeneration über Aussenluft-Wärmetauscher wirtschaftlich vorteilhafter und somit die Dachfläche weiterhin frei für die Eigenstromproduktion.

5.4.3 KOSTEN VON MEHRLÄNGE

Die Kosten der Mehrlänge von Erdwärmesonden sind annähernd proportional zur zusätzlich benötigten Länge. Initialkosten sind verschwindend klein. Bei zunehmender Anlagengrösse sind die spezifischen Kosten pro Laufmeter Länge leicht abnehmend.

Bei kleinen EWS-Anlagen liegen die Kosten für Mehrlänge im Bereich von rund 80 CHF/lm, bei mittleren Anlagen bei 65 bis 70 CHF/lm und bei grossen bei rund 55 bis 60 CHF/lm.

Tabelle 19: Zusammenstellung der Investitionskosten der Mehrlänge von EWS in Abhängigkeit der Mehrlänge in Prozent. **ACHTUNG: Nicht zu verwechseln mit dem Regenerationsgrad!**

	Investitionskosten Heizungsanlage [CHF]	Kosten der EWS-Mehrlänge [CHF]		
	keine Massnahme ²²	Mehrlänge		
Objektklasse		50%	75%	100%
1	50'000	5200	7800	10400
2	60'000	8800	13200	17600
3	70'000	11900	17850	23800
4	110'000	33000	49500	66000
5	380'000	158400	237600	316800

5.4.4 KOSTENVERGLEICH REGENERATION UND MEHRLÄNGE

Wie in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben, kann der nachbarschaftlichen Beeinflussung entweder mit Mehrlänge oder mit Regeneration entgegengewirkt werden. Technisch funktionieren beide Massnahmen. Der Kostenvergleich kann einfach über die spezifischen Kosten pro Laufmeter EWS gemacht werden.

Die absoluten Kosten der Regeneration wurden in der folgenden Darstellung auf die Länge der EWS umgerechnet, um die spezifischen Kosten zu erhalten.

Die spezifischen Kosten der Regeneration sind bei kleinen Anlagen höher als die spezifischen Kosten der Mehrlänge. Bei Mehrfamilienhäusern mit mehr als 5 Wohneinheiten kommen die spezifischen Kosten in einen spannenden Bereich. Bei Gebäuden über 50 kW Heizleistung liegen die Kosten der Regeneration tiefer als die Kosten der Mehrlänge.

Bei kleinen Anlagen ist die Variabilität der Kosten unterschiedlicher Regenerationsgrade gross. Je grösser die Anlagen werden, desto kleiner wird die Differenz.

²² Die Grundkosten ohne Regeneration beziehen sich auf eine Erdwärmesonden-Wärmepumpenanlage ohne Regenerationsmassnahmen. Die Kostenquelle ist der Heizkostenrechners von erneuerbar heizen von Energie Schweiz: www.erneuerbarheizen.ch

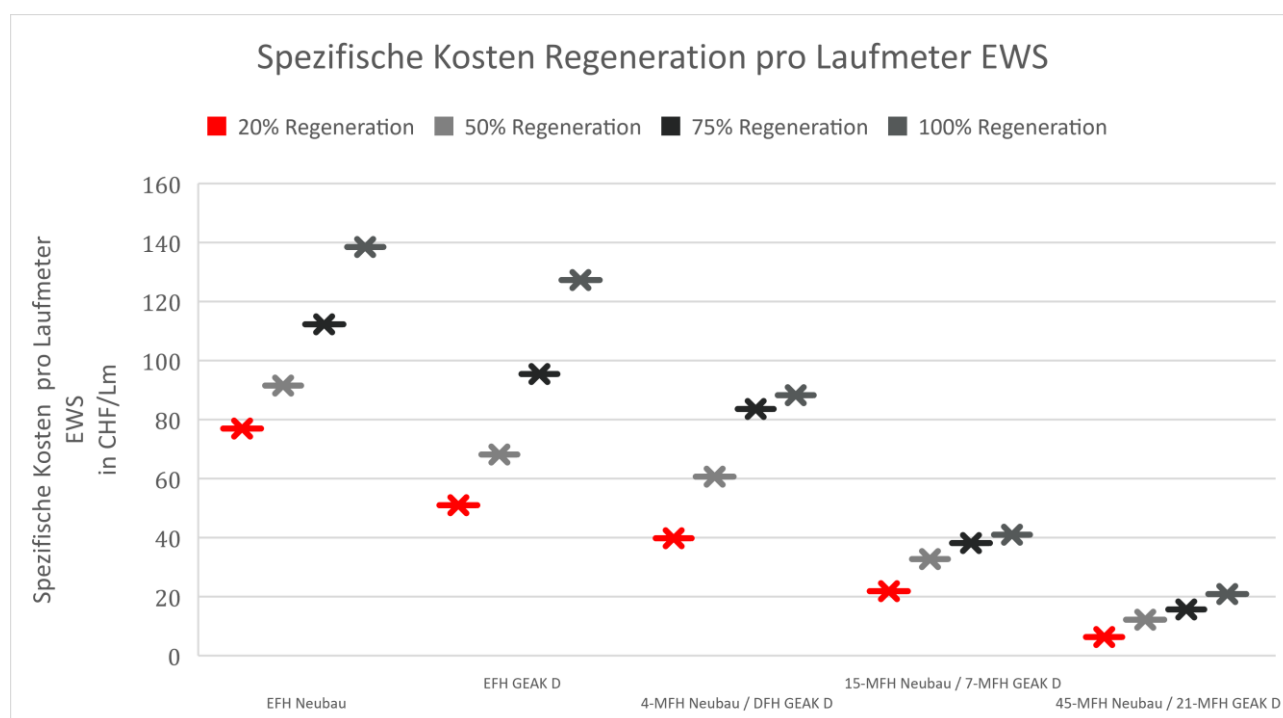


Abbildung 31: Spezifische Kosten der Regeneration pro Laufmeter EWS. Umrechnung der Investitionskosten der Regeneration auf die Erdwärmesondenlänge pro Objektklasse

Tabelle 20: Spezifische Kosten der Regeneration pro Laufmeter EWS. Umrechnung der Investitionskosten der Regeneration auf die Erdwärmesondenlänge pro Objektklasse

Objektklasse	Spezifische Kosten der Regeneration in CHF pro Laufmeter EWS		
	50% Regeneration	75% Regeneration	100% Regeneration
1	92	112	138
2	68	95	127
3	61	84	88
4	33	38	41
5	12	16	21

6 DISKUSSION

6.1 METHODIK

Den Autoren sind mit Ausnahme der Arbeiten von Walch et al. 2021 & 2022 keine Untersuchungen bekannt, mit denen die thermische Übernutzung, verursacht durch eine hohe Dichte von EWS-Anlagen, und die daraus abgeleitete Massnahmen, in der räumlichen Auflösung auf Stufe Parzelle und Gevierte mit der in der vorliegenden Studie erreichten Genauigkeit vorgenommen wurde.

Das Berechnungsmodell zur Auslegung von einzelnen EWS-Anlagen unter Berücksichtigung ihrer gegenseitigen Beeinflussung basiert auf etablierten Berechnungsmodellen für EWS (endliche Linienquelle, Auslegung nach SIA 384/6:2021 Ziffer D.5), die ausgiebig getestet und mit Auslegungen nach SIA verglichen wurden. Neu ist hingegen die Anwendung im Kontext einer energieplanerischen und regulatorischen Fragestellung.

Mögliche Quellen für Ungenauigkeiten:

- **Wärmebedarf:** Die gebäudespezifischen Daten der kantonalen Energiestatistik basieren teils auf objektscharfen Messungen (bei Gebäuden mit Gasanschluss) und teils auf daraus abgeleiteten Berechnungen und sind deshalb grundsätzlich nur in ihrer Gesamtbilanz bzw. bezogen auf einen bestimmten Untersuchungsperimeter als genau zu bewerten. Die Anwendung dieser Daten für die Auslegung von einzelnen Heizungsanlagen ist daher nicht zulässig, jedoch für Aussagen als eine Summe von Anlagen in einzelnen Gevierten geeignet.
Bei einer «realen», normgerechten Planung wird der Energiebedarf anhand des bekannten Verbrauchs des Energieträgers oder anderweitig berechnet (Energienachweis, GEAK, etc.), oft aber auch nur geschätzt. Die Autoren der Studie gehen davon aus, dass die Verwendung der Daten der kantonalen Energiestatistik hier insgesamt zu genaueren Ergebnissen führt.
- **Schwierige Prognose des künftigen Wärme- und Kältebedarfs** aufgrund des Klimawandels und veränderter Ansprüche der Bevölkerung.
- **Positionierung der EWS:** Bei der automatisch erfolgenden Positionierung der EWS auf den jeweiligen Parzellen kann auf die reale lokale Situation, v.a. Einschränkungen durch bebautes Gelände, Tiefgaragen, Baumbestand, etc. keine Rücksicht genommen werden. Möglicherweise führt dies vereinzelt zu Ergebnissen, bei denen EWS-Anlagen berücksichtigt werden, die in der Realität niemals gebaut werden können.
- **Bodenkennwerte:** Die hier verwendeten Bodenkennwerte wurden aus Messungen in Erdwärmesonden abgeleitet. Die damit erzielten Ergebnisse sollten im Vergleich zu den nach SIA empfohlenen Bodenkennwerten zu genaueren Ergebnissen führen.
- **Wahl des «Workflows»:** In Schritt 3 des Workflows (s Kapitel 4.1.3) erfolgt die Kompensierung der gegenseitigen Beeinflussung zunächst durch eine Verlängerung der EWS bzw. durch zusätzliche EWS, bis zu einer maximalen Verlängerung um 100%. Erst wenn diese Massnahme ausgeschöpft wird, wird der Regenerationsgrad erhöht. Ebenso gut könnte zuerst der Regenerationsgrad erhöht und anschliessend, falls erforderlich, die Sonden verlängert werden. Die hier bevorzugte Reihenfolge - zuerst Mehrlänge, dann Regeneration -, wurde gewählt, da
- **Zusätzliche Bohrmeter** in der Regel einfacher zu realisieren und günstiger sind als eine aktive Regeneration. Jede EWS ist ein Eingriff in den Untergrund. Aus gewässerschutzrechtlichen Gründen kann an bestimmten Standorten eine Regeneration erwünschter sein als zusätzliche und längere Erdwärmesonden.

6.2 SZENARIEN

- Für die Herleitung der Massnahmen wurde der Komfortwärmebedarf gemäss Szenario ZERO der Energieperspektiven 2050+ des Bundes verwendet, was einer Abnahme des Energiebedarfs um etwa 30% gegenüber dem heutigen Bedarf entspricht. In der vorliegenden Studie wurde der Energiebedarf aller Objekte um pauschal 30% reduziert. Tatsächlich besitzen Neubauten bereits heute einen Energiebedarf, der in den kommenden Jahrzehnten wohl kaum mehr weiter reduziert werden kann.
- Bei Szenarien 2 - 4 wird von Beginn weg eine Regeneration von 15% für alle Objekte angenommen. Dies ist bei Neubauten leicht realisierbar (Geocooling über die Fussbodenheizung), hat praktisch keine zusätzlichen Kosten zur Folge und ist Stand der Technik. In bestehenden Gebäuden mit Radiatoren als Wärmeabgabesystem ist die Regeneration von EWS aufwändiger umzusetzen. Die Autoren der Studie gehen aber davon aus, dass mit den Auswirkungen des Klimawandels das Bedürfnis nach mehr Komfort im Sommer stark zunehmen wird und in bestehenden Gebäuden zunehmend über Umluftklimageräte gekühlt wird, deren Abwärme für die Regeneration genutzt werden könnte.
- Szenario 3 ($f_{geo} = 40\%$) besitzt eine durchschnittliche EWS-Anlagendichte, die etwa der doppelten Anlagendichte, die im Jahr 2050 in den Gevierten mit dem höchsten EWS-Zubau zu erwarten ist, entspricht. Mit diesem Szenario werden aus unserer Sicht die meisten auftretenden Situationen (mit Ausnahme von starken lokalen Häufungen) im Jahr 2050 adäquat abgebildet. **Dieses Szenario eignet sich aus unserer Sicht am besten für die Herleitung von allgemeinen Massnahmen.**

Aufgrund der in Kapitel 6.1 beschriebenen Einschränkungen sind Aussagen zu einzelnen Objekten nicht möglich. Daher wird empfohlen, einzelne Gevierte als kleinräumlichen Betrachtungsperimeter für allgemeine Aussagen zu wählen.

6.3 ERGEBNISSE

6.3.1 VORWÄRTSSIMULATION UND SZENARIEN

Die Simulationsergebnisse in Kapitel 5.2 zeigen klar auf, dass die im Jahr 2050 erwartete durchschnittliche Verteilung von EWS-Anlagen, inkl. leichter Anlagenhäufungen von bis 40%, zu einer thermischen Übernutzung führt, die mit moderaten Massnahmen kompensiert werden kann. Die Auswirkungen unkontrolliert auftretender, starker lokaler Häufungen müssen dagegen mit sehr einschneidenden Massnahmen kompensiert werden.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die zu treffenden Massnahmen vom spezifischen Energiebedarf der Gevierte abhängen (Kapitel 5.2.5).

Die Ergebnisse lassen sich auf andere Gebiete mit vergleichbaren Rahmenbedingungen – wie Energiebedarfsdichte, maximal zulässige Bohrtiefe und geologischen Voraussetzungen – übertragen. Das untersuchte Pilotgebiet ist grundsätzlich repräsentativ für weitere Regionen im Kanton Basel-Landschaft.

Je näher ein Gebiet an die Stadt Basel liegt, desto dichter ist es in der Regel besiedelt – allerdings steigt damit auch die Eignung für eine Versorgung mit Fernwärme.

Eine direkte Übertragung der Ergebnisse auf andere Kantone ist hingegen nicht ohne weiteres möglich. Insbesondere in stärker urban geprägten und dichter besiedelten Kantonen sind abweichende Rahmenbedingungen zu erwarten, die eine angepasste Betrachtung erfordern.

6.3.2 EINFLUSS DER REGENERATION AUF DIE GRUNDWASSTERTEMPERATUR

Die Ergebnisse der Grundwassermodellierung weisen darauf hin, dass die Änderung der Grundwassertemperatur durch den Betrieb des fiktiven Einfamilienhausquartiers in 100 m Abstand des EWS-Feldes weniger als 3 K beträgt, nämlich < 1.7 K) bei 50% Regeneration. Selbst am Ende der Kühlperiode im Sommer ist das Wasser nach 50 Jahren kühler als die ungestörte Temperatur des Grundwassers.

Somit sind die gesetzlichen Vorgaben aus Sicht Grundwasserschutz (3 K-Kriterium) erfüllt und auch eine Regeneration bis zu 50% ist problemlos möglich.

Das simulierte Wohnquartier stellt dabei einen Extremfall dar: Es weist eine hohe Wärmebedarfsdichte auf; die Erdwärmesonden (EWS) sind entlang der Grundwasserfließrichtung ausgerichtet, um Kaskadeneffekte zu maximieren; die Regenerationsrate beträgt 50%; und die EWS sind vergleichsweise kurz (150 m).

Daher lassen sich diese Ergebnisse vor allem auf Wohnquartiere mit ähnlichen hydrogeologischen Bedingungen übertragen, bei denen die EWS durch Geocooling regeneriert werden – wobei hier mit einer maximalen Regenerationsrate von etwa 15 % zu rechnen ist.

6.3.3 KOSTEN DER REGENERATION UND MEHRLÄNGE

Die Mehrkosten für Regeneration und Mehrlänge gemäss Szenario 3 liegen etwa im folgenden Bereich:

- EFH: 11'000 - 14'000 Franken
- MFH mit 4 Wohnungen: 17'000 - 20'000 Franken
- MFH mit 15 Wohnungen: 30'000 - 55'000 Franken

In Bezug auf die Gesamtanlagekosten liegen die Mehrkosten im Bereich von 25 - 35%.

Bei kleinen Anlagen ist es wirtschaftlicher, der nachbarschaftlichen Beeinflussung mit Mehrlänge entgegenzuwirken. Je grösser die Anlage, desto wirtschaftlicher ist die Regeneration als Massnahme. In Gebäuden mit etwa 10 Wohnungen im Neubau-Standard oder 5 Wohnungen im Bestand mit GEAK-Klasse D sind beide Massnahmen betreffend der Investitionskosten etwa gleichwertig.

Bei grösseren Anlagen mit einer Heizleistung von über 80 kW werden die Kosten für eine Regeneration mit zunehmendem Regenerationsgrad annähernd kompensiert, da weniger oder kürzere EWS im Vergleich zu einer Anlage ohne Regeneration erforderlich sind. Ab etwa 120 kW Heizleistung ist eine vollständige Regeneration (100%) wirtschaftlich.

7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Zubau von EWS-Anlagen

Der aktuelle Anteil von EWS-Anlagen an allen Heizungen beträgt etwa 4%. Im Jahr 2050 wird die Dichte der EWS-Anlagen voraussichtlich um den Faktor 2 bis 2.5 über dem aktuellen Niveau liegen.

Die bestehenden Anlagen konzentrieren sich auf Gevierte mit geringer Wärmebedarfsdichte ($< 700 \text{ MWh/ha}$), das heisst vorwiegend auf Gevierte mit Einfamilien- und kleineren Mehrfamilienhäusern. Die Autoren der Studie gehen davon aus, dass dieser Trend weiter anhält.

Der erwartete Zubau von EWS-Anlagen wird, solange diese nicht regeneriert und/oder mit entsprechenden Leistungsreserven (Mehrlänge) ausgestattet sind, in allen angenommenen Fällen negative Auswirkungen auf den langfristigen und effizienten Betrieb dieser EWS-Anlagen haben.

Auswirkungen des erwarteten EWS-Zubaus und Gegenmassnahmen

Bis zu einer EWS-Anlagendichte von 40% kann die mittlere thermische Übernutzung des Erdreichs mit «moderaten Anforderungen» ausgeglichen werden, d.h. mit 20% - 30% Mehrlänge und 15% aktiver Regeneration. Die Autoren beurteilen diese Anforderungen hinsichtlich der zusätzlichen Kosten als «moderat»

Szenarien mit einer durchschnittlichen EWS-Anlagendichte von 40% stellen gegenüber dem heutigen Stand eine Zunahme um den Faktor 10 dar. Mit diesem Szenario sind daher moderate lokale Häufungen berücksichtigt. Da lokale Häufungen eher der Standard als die Ausnahme sind, wird dieses Szenario für allgemeine Empfehlungen herangezogen

Lokale Häufungen von EWS-Anlagen

Der Zubau von EWS erfolgt unkontrolliert. Es können auf kleiner räumlicher Skala lokale Häufungen mit EWS-Anlagendichten von bis zu 100% entstehen. Solch hohe Anlagendichten sind heute bereits vereinzelt anzutreffen.

Starke lokale Häufungen von nicht regenerierten EWS-Anlagen verursachen lokal thermische Übernutzungen, die mit den oben beschriebenen moderaten Anforderungen nicht kompensiert werden können. Geeignete Massnahmen haben sehr hohe Mehrkosten zur Folge.

Situationen mit starken lokalen Häufungen sollten nicht mit generellen Anforderungen begegnet, sondern einzeln geprüft werden.

Rechtliche Situation

Das Recht auf eine eigene Erdwärmesonde, sofern deren Installation nicht in Konflikt mit übergeordnetem Recht steht, darf nicht abgesprochen werden.

Die Auswirkungen der Erdwärmenutzung auf die Bodentemperatur von Nachbargrundstücken ist ein nachbarrechtliches Problem. Die Autoren gehen davon aus, dass die Umsetzung moderater Anforderungen, wie für das Ausbauziel von bis zu 40% empfohlen, das Risiko privatrechtlicher Klagen reduziert.

SIA 384/6/2021 verlangt für neu erstellte Erdwärmesonden Massnahmen wie Mehrlänge und Regeneration, um bestehende EWS-Anlagen in der unmittelbaren Umgebung vor Wärmeentzug zu schützen. Diese Anforderung könnte dem nationalen Recht (ZGB) widersprechen, das beiden Grundstückbesitzenden das gleiche Eigentumsrecht zuspricht.

Aktuelle Regeln der Baukunst

Die Branche ist sich den Auswirkungen einer thermischen Übernutzung des Bodens bisher erst vereinzelt und noch zu wenig bewusst, insbesondere wird die gegenseitige Beeinflussung von EWS von Fachplanern selten ausreichend berücksichtigt.

Die aktuelle SIA-Norm 384/6:2021 liefert nur bedingt geeignete Grundlagen, um eine thermische Übernutzung abzuwenden. Die Grundlagen gehen von homogenen Strukturen aus, welche der Realität nur ungenügend entsprechen.

Rolle des Kantons

Der Handlungsspielraum des Kantons ist eingeschränkt.

Der Zubau von Erdwärmesonden erfolgt unkontrolliert. Die Eigentümerschaft trifft die Entscheidung über das zu installierende Heizungssystem unter Berücksichtigung der übergeordneten gesetzlichen Bestimmungen. Der Kanton hat in diesem Rahmen keine direkte Einflussmöglichkeit auf die Wahl des Heizsystems. Er kann mit Fördergeldern Anreize setzen.

Aktuell kann der Kanton aus rechtlichen Gründen den Zubau von EWS-Anlagen nicht regulieren.

Handlungsoptionen

Massnahmen, die allen Situationen und insbesondere den unvermeidlichen starken lokalen Anlagenhäufungen gerecht werden, d.h. eine flächendeckende, präventive Regeneration sämtlicher EWS-Anlagen, sind mit hohen Kosten verbunden und unverhältnismässig.

Aus diesem Grund wird vorgeschlagen, **angemessene Anforderungen** an die Auslegung von EWS-Anlagen zu stellen, die für alle Gebietsklassen zutreffen und mit denen das Risiko einer thermischen Übernutzung reduziert wird:

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie ergibt sich im Kanton Basel-Landschaft folgender Handlungsbedarf:

Grosse Anlagen

- Grosse Anlagen > 10 Sonden oder > 2'000 m Laufmeter sollen möglichst vollständig regeneriert werden. Dies ist meist auch wirtschaftlich.

Kleine Anlagen

- Kleine Anlagen in Gevierten mit einem spezifischen Wärmebedarf < 400 MWh/ha: Regeneration von 15% sowie 20% Mehrlänge (oder gleichwertige Massnahme).
- Kleine Anlagen in Gevierten mit einem spezifischen Wärmebedarf zwischen 400 und 700 MWh/ha: Regeneration von 15% sowie 30% Mehrlänge (oder gleichwertige Massnahme).

- Kleine Anlagen in Gevierten mit einem spezifischen Wärmebedarf $> 700 \text{ MWh/ha}$: In diesen Gevierten wird eine sehr geringe Dichte von EWS-Anlagen erwartet. Zusätzlich sind diese für eine Erschliessung mit thermischen Netzen geeignet: Verzicht auf Vorgaben zur Regeneration; stattdessen erhöhte finanzielle Anreize zum Anschluss an Wärmeverbunde.

Generell

- Information und Sensibilisierung, um lokale Häufungen zu vermeiden: Um lokale Häufungen zu vermeiden sollte der Kanton Gebiete identifizieren, in welcher die Dichte von EWS-Anlagen 40% überschreitet, diese Gebiete im Geoportal des Kantons ausweisen sowie Hinweise und Empfehlungen dazu veröffentlichen.

Handlungsoption 1: Verzicht auf ordnungsrechtliche Anforderungen und Appell auf Eigenverantwortung	
Beschreibung	Keine neuen Anforderungen an EWS-Anlagen. Die Eigentümerschaften tragen die Verantwortung für die korrekte Auslegung von EWS nach SIA 384/6:2021.
Begründung	Die thermische Übernutzung des Untergrundes ist durch eine (privatrechtliche) Planung nach SIA 384/6:2021 Ziffer 3.5 zu vermeiden. Für die künftige EWS-Anlagendichte sind plausible Annahmen entsprechend dem erwarteten Zubau von EWS-Anlagen im Jahr 2050 zu treffen (z.B. 40%).
Regulatorische Auswirkungen	Keine
Finanzielle Auswirkungen	Eigentümerschaft: Umsetzung der Anforderungen nach SIA 384/6:2021
Personelle Auswirkungen Kanton	Keine
Chancen	Keine Anpassung der Bewilligungspraxis, kein zusätzlicher Vollzugsaufwand.
Risiken	• SIA 384/6:2021 Ziffer 3.5 wird in der Praxis kaum angewandt. • Ohne eine Verpflichtung werden Anforderungen zur Vermeidung der gegenseitigen Beeinflussung nach SIA 384/6:2021 Ziffer 3.5 vermutlich nicht oder nur in wenigen Fällen umgesetzt. Als Folge muss mittelfristig mit einer Zunahme von Schäden an EWS gerechnet werden. • Es muss damit gerechnet werden, dass die Folgen der thermischen Übernutzung zunehmend Gegenstand juristischer Auseinandersetzungen werden.
Optionen	Der Kanton kann Gebiete, in denen eine Regeneration geboten ist, auf dem Geoportal des Kantons kennzeichnen und dort geeignete Massnahmen empfehlen. Ebenso kann er Gevierte kennzeichnen, in denen sich eine hohe Dichte von EWS-Anlagen abzeichnet. Damit liefert er wichtige Hilfestellungen für die Anwendung der SIA 384/6:2021.

Handlungsoption 2: Erlass von moderaten Anforderungen für «kleine» EWS-Anlagen in Gevierten mit Wärmebedarfsdichten von weniger als 700 MWh/ha	
Beschreibung	Für «kleine» EWS-Anlagen (< 10 EWS oder weniger als 2'000 EWS-Laufmeter) gelten in Gebieten mit Wärmebedarfsdichten von weniger als 700 MWh/ha moderate Anforderungen an die Auslegung.
Begründung	EWS-Anlagen sind mehrheitlich in Gevierten mit weniger als 700 MWh/ha anzutreffen. Anforderungen an EWS-Anlagen in diesen Gevierten erzielen daher eine grosse Wirkung. Aufgrund der prognostizierten Anlagendichte sind in diesen Gevierten «moderate» Anforderungen (siehe «Vorgehen») ausreichend, um eine thermische Übernutzung zu verhindern. Die Anforderungen sind wirksam für EWS-Anlagendichten von bis zu 40% (bei gleichmässiger Verteilung der Anlagen). Abgrenzung: • «Grosse» EWS-Anlagen, siehe Handlungsoption 3 • EWS-Anlagen in Gevierten mit > 700 MWh/ha: siehe Handlungsoption 4 • Starke Lokale Häufungen (hohe EWS-Dichten), siehe Handlungsoption 6
Vorgehen	Für kleine EWS-Anlagen gelten in Gevierten mit folgender Wärmebedarfsdichte folgende Anforderungen: • Durchschnittliche Wärmebedarfsdichte im Geviert < 400 MWh/ha: 20% Mehrlänge und 15% Regeneration • Durchschnittliche Wärmebedarfsdichte im Geviert 400 – 700 MWh/ha: 30% Mehrlänge und 15% Regeneration Diese Anforderungen (Mehrlänge <u>und</u> Regeneration) gelten im Vergleich zu einer Auslegung ohne Einfluss von Nachbar-EWS. Es können andere Kombinationen von Mehrlänge und/oder Regenerationsgraden gewählt werden, sofern diese die gleiche Wirkung wie die oben beschriebenen Anforderungen erzielen. Objekte mit geringem Wärmeentzug aus dem Boden (siehe Handlungsoption 5) sind ausgenommen.
Mengengerüst	Mehr als 90% aller künftigen EWS-Anlagen bzw. im Durchschnitt mindestens 120 EWS-Anlagen pro Jahr
Umsetzung	Umsetzungsvariante 1: Ordnungspolitische Vorgabe • Chancen: Verbindliche Vorgaben senken das Risiko der thermischen Übernutzung und schaffen Klarheit. • Risiken: Erhöhter Vollzugs- und Bürokratieaufwand, Zubau von Luft-Wasser-Wärmepumpen auf Kosten von EWS-Anlagen. Umsetzungsvariante 2: Eigenverantwortung mit oder ohne finanzielle Anreize • Risiken: Freiwillige Massnahmen werden nicht umgesetzt; Konflikte und Schäden nehmen zu; Eigentümerschaften, die Massnahmen freiwillig umsetzen, werden durch benachbarte Anlagen ohne Massnahmen beeinträchtigt.
Finanzielle Auswirkungen	Zusätzliche Investitionen von 25 - 35% gegenüber den Investitionen einer EWS-Anlage, bei der der Einfluss durch künftige Nachbar-EWS nicht berücksichtigt ist.
Personelle Auswirkungen Kanton	Umsetzungsvariante 1: Ordnungspolitische Vorgabe • hoch Umsetzungsvariante 2: Der Kanton stellt Informationen zum Zustand der Erdwärmenutzung zur Verfügung und gibt entsprechende Empfehlungen ab. • Gering
Gesetzesgrundlage	EnG BL §23 Abs. 2: Der Kanton bezeichnet Gebiete, in welchen für neue Installationen eine Regeneration geboten ist.
Chancen	Siehe Umsetzungsvarianten

Risiken	Siehe Umsetzungsvarianten
Bemerkung	Hinweis: Da sich bei einer korrekten Auslegung nach SIA 384/6:2021 Investitionen für eine Regeneration oder Mehrlänge automatisch ergeben, stellt sich die Frage, ob es sich hierbei um Ohnehinkosten handelt. Die Berücksichtigung künftiger Nachbar-EWS entspricht allerdings nicht der gängigen Praxis. Geocooling (Regenerationsraten bis 15%), als eine der möglichen Anforderungen, erhöht ohne Mehrkosten den Wohnkomfort im Sommer und wird heute bereits häufig genutzt. Geocooling entspricht dem Stand der Technik in Neubauten. In Objekten ohne Fussbodenheizung oder TABS ist hingegen die Realisierung einer Regenerationsrate von 15% aufwändig und verursacht hohe Zusatzkosten.

Handlungsoption 3: Erlass von Anforderungen zur vollständigen Regeneration von «grossen» EWS-Anlagen	
Beschreibung	Minimierung der durch «grosse» EWS-Anlagen (mehr als 10 EWS oder mehr als 2'000 EWS-Laufmeter pro Anlage) verursachten Veränderung der Bodentemperatur auf benachbarten Parzellen.
Begründung	Grosse EWS-Anlagen können die Bodentemperatur auf benachbarten Parzellen so stark beeinflussen, dass dort eine EWS-Nutzung nur noch eingeschränkt möglich ist. Durch eine aktive Regeneration mit hoher Regenerationsrate (70 - 100%) werden die Auswirkungen auf Nachbargrundstücke minimiert.
Vorgehen	Grosse EWS-Anlagen werden grundsätzlich regeneriert (Regenerationsgrad mindestens 70%). Diese Anforderungen gelten in allen Gevierten, unabhängig von der Wärmebedarfsdichte und der Dichte von bestehenden oder erwarteten EWS-Anlagen. Falls aufgrund von Parzellengrösse und Objektumgebung eine EWS-Anlage ohne Regeneration keine negativen Auswirkungen auf Nachbarparzellen verursacht, kann mit entsprechendem Nachweis auf eine Regeneration verzichtet werden.
Mengengerüst	Die Handlungsoption betrifft voraussichtlich weniger als 4% aller neuen EWS-Anlagen bzw. weniger als 5 Anlagen pro Jahr.
Umsetzung	Umsetzungsvariante 1: Ordnungspolitische Vorgabe Umsetzungsvariante 2: Eigenverantwortung
Finanzielle Auswirkungen	Bei grossen EWS-Anlagen ist eine Regeneration > 70% in der Regel wirtschaftlich.
Personelle Auswirkungen Kanton	Gering (unabhängig von der Umsetzungsvariante)
Chancen	Umsetzungsvariante 2: Entschärfung des Problems ohne Vorgaben
Risiken	Umsetzungsvariante 2: Eigenverantwortung wird nicht wahrgenommen
Bemerkungen	Die Erschliessung geeigneter Regenerationsquellen ist in Bestandesbauten aufwändig. Die Anforderungen bei Bestandesbauten können in Absprache mit dem Kanton zu einem geeigneten Zeitpunkt (z.B. Gesamtinstandsetzung) realisiert werden.

Handlungsoption 4: Verzicht auf Anforderungen an EWS-Anlagen in Gebieten mit Fernwärme bzw. hoher Wärmebedarfsdichte	
Beschreibung	In Gebieten, in denen die Wärmeversorgung über thermische Netze besteht, vorgesehen oder grundsätzlich geeignet ist, werden keine Anforderungen an die Auslegung von EWS gestellt.
Begründung	Nur 4% aller heutigen EWS-Anlagen sind in Gevierten anzutreffen, die sich für thermische Netze eignen (Wärmebedarfsdichte > 700 MWh/ha). Der Anteil von EWS-Anlagen an allen Heizungen beträgt dort nur 4%. Es wird davon ausgegangen, dass sich die räumliche Verteilung von EWS-Anlagen in Zukunft nicht wesentlich ändert. In den Gevierten mit Energiebedarfsdichten > 700 MWh/ha ist eine thermische Übernutzung unwahrscheinlich und zusätzliche Anforderungen an die Auslegung nicht erforderlich. Abgrenzung: «Grosse» EWS-Anlagen, siehe Handlungsoption 3
Mengengerüst	Etwa 4% aller künftigen EWS-Anlagen oder durchschnittlich etwa 5 Anlagen pro Jahr
Umsetzung	In einem Geviert mit Energiebedarfsdichte > 700 MWh/ha werden keine Anforderungen an die Auslegung von EWS gestellt.
Finanzielle Auswirkungen	Keine
Personelle Auswirkungen Kanton	Gering
Chancen	Keine
Risiken	Falls das Geviert nicht an ein thermisches Netz angeschlossen wird, muss mit einem höheren Anteil an EWS-Anlagen gerechnet werden. Aus volkswirtschaftlichen Überlegungen sollten in einem Fernwärmegebieten möglichst wenig individuelle Heizungsanlagen erstellt werden, um die Anschlussdichte hoch und somit die Wärmekosten des gesamten Netzes gering zu halten.
Bemerkung	Die Attraktivität von Fernwärmeanschlüssen kann z.B. mittels Förderung erhöht werden.

Handlungsoption 5: Verzicht auf Anforderungen für Gebäude mit geringem Energiebedarf	
Beschreibung	An EWS-Anlagen, die keine thermische Übernutzung verursachen, werden keine Anforderungen gestellt Ausnahmeregelung von Handlungsoption 2
Begründung	EWS-Anlagen, die eine Netto-Wärmeentzugsdichte von weniger als 4 kWh/m ² /a aus dem Erdreich verursachen, haben keine relevanten Auswirkungen auf benachbarte Grundstücke.
Vorgehen	An EWS-Anlagen, die einen Wärmeentzug von weniger als 4 kWh/m ² /a aus dem Boden verursachen, werden keine Anforderungen gestellt.
Mengengerüst	Gering
Finanzielle Auswirkungen	Liegenschaftsbesitzer: keine
Personelle Auswirkungen Kanton	Gering

Handlungsoption 6: Information über lokale Häufung von EWS-Anlagen	
Beschreibung	Durch Bereitstellung geeigneter Informationen Information wird das Auftreten starker lokaler Häufungen (40 - 100% Dichte von EWS-Anlagen) vermieden.
Begründung	Starke lokale Häufungen entstehen unvorhersehbar, sind aber eher selten. Für solche Situationen sind fallbezogene Anforderungen zu treffen.
Vorgehen	Der Kanton informiert in regelmässigen Abständen über den Zubau von EWS-Anlagen und stellt damit Liegenschaftsbesitzern Grundlagen zur Verfügung, damit diese auf eine eintretende Anlagenhäufung reagieren können
Mengengerüst	Nicht prognostizierbar (vermutlich gering).
Umsetzung	Umsetzungsvariante 1: Ordnungspolitische Vorgabe. Der Kanton analysiert die Dichte von EWS-Anlagen regelmässig (z.B. 2-Jahresrhythmus) und legt angemessene Anforderungen für die betroffenen Gevierte fest. Mit einem Widerspruchsvorbehalt kann sich der Kanton bei der Bewilligung der EWS-Anlage das Recht zusprechen, nachträglich eine Regeneration oder andere geeignete Anforderungen einzufordern, wo eine hohe EWS-Anlagendichte dies verlangt. • Chancen: Prävention von Schäden bei lokalen Häufungen • Risiken: Planungsunsicherheit für Liegenschaftsbesitzende, hohe Kosten für nachträgliche Umsetzung von Anforderungen, voraussichtlich drastische Abnahme des EWS-Zubaus, hoher Vollzugsaufwand für Kanton Umsetzungsvariante 2: Verbot für neue EWS-Anlagen in kritischen Gebieten Der Kanton analysiert die Dichte von EWS-Anlagen regelmässig. Der Kanton verwehrt die Bewilligung von EWS-Anlagen in Gebieten, in denen sich eine thermische Übernutzung durch starke lokale Häufung (Anlagendichte > 40%) abzeichnet. EWS-Anlagen mit hoher Regenerationsrate können vom Verbot ausgenommen werden. • Chancen: Schutz bestehender EWS-Anlagen • Risiken: Ungerechtes "first come, first serve" – Prinzip. Ohne Schaffung geeigneter Rechtsgrundlagen ist mit zivilrechtlichen Klagen gegen den Kanton zu rechnen, da nach gegenwärtiger Rechtsauffassung der Kanton den Bau von EWS-Anlagen, ausser nach heute bekanntem übergeordneten Recht (z.B. Gewässerschutz) nicht verbieten kann. Umsetzungsvariante 3: Eigenverantwortung Der Kanton kennzeichnet auf dem Geoportal des Kantons diejenigen Gevierte, in denen sich eine hohe Dichte von EWS-Anlagen abzeichnet und empfiehlt dort, auf den Zubau von EWS-Anlagen zu verzichten. • Chancen: Geringer bürokratischer Aufwand • Risiken: Liegenschaftsbesitzer, die sich in gekennzeichneten Gevierten entgegen der Empfehlung des Kantons für den Bau einer EWS-Anlage entscheiden, beeinträchtigen den Betrieb benachbarter EWS-Anlagen bzw. sind Verursacher einer thermischen Übernutzung.
Finanzielle Auswirkungen	Umsetzungsvariante 1: Liegenschaftsbesitzende müssen evtl. mit sehr hohen Kosten für eine nachträgliche Aufrüstung ihrer EWS-Anlage rechnen. Umsetzungsvariante 2: keine Umsetzungsvariante 3: Eine thermische Übernutzung kann Schäden an bestehenden Anlagen verursachen.
Personelle Auswirkungen Kanton	Umsetzungsvariante 1: Sehr hoch Umsetzungsvariante 2: gering Umsetzungsvariante 3: gering

Handlungsoption 7	Pflicht oder Appell zur Messung des Regenerationsgrads
Beschreibung	Bei Objekten mit Auflagen wird der geforderte Regenerationsgrad überwacht.
Begründung	Mit der Erhebung relevanter Daten im Anlagenbetrieb kann die reale Situation eingeschätzt und das Risiko langfristiger Schäden durch frühzeitige Massnahmen reduzieren.
Vorgehen	EWS-Anlagen, für die Anforderungen nach Handlungsoption 2-4 gelten, werden mit geeigneter Mesttechnik zur Überwachung der EWS-Temperatur und zur Messung des Netto-Wärmeentzugs aus dem Boden ausgerüstet. Die Daten werden in geeigneter Form und in regelmässigen Abständen dem Kanton übermittelt.
Mengengerüst	Hoch
Umsetzung	Umsetzungsvariante 1: Ordnungspolitische Vorgabe • Chancen: Überwachung der Regeneration • Risiken: Sehr hoher Aufwand zur Aufbereitung und Interpretation der Daten durch den Kanton. Umsetzungsvariante 2: Eigenverantwortung • Chancen: siehe Umsetzungsvariante 1 • Risiken: siehe Umsetzungsvariante 1
Finanzielle Auswirkungen	Ca. 3'000 Franken pro EWS-Anlage.
Personelle Auswirkungen	Kanton: sehr hoch
Bemerkungen	Die Übermittlung der Daten an den Kanton muss geklärt werden.

Handlungsoption 8	Erhöhung der Förderbeiträge für die Regeneration
Beschreibung	Die Kosten, die durch Umsetzung der Anforderungen zur Abwendung der thermischen Übernutzung den Liegenschaftsbesitzenden entstehen, werden über das Baselbieter Energiepaket gefördert.
Begründung	Zusätzliche Anforderungen zur Abwendung einer thermischen Übernutzung führen zu Mehraufwand bei Liegenschaftsbesitzern und beim Kanton und zu Mehraufwand und Verzögerungen bei planenden und ausführenden Unternehmen. Zusätzliche Anforderungen geniessen keine hohe Akzeptanz. Durch die Förderung von Massnahmen wie Regeneration oder Mehrlänge kann die Akzeptanz der Anforderungen erhöht werden und der finanzielle Aufwand für Liegenschaftsbesitzende reduziert werden.
Vorgehen	Anpassung des Förderpaketes. Förderung von • Aktiver Regeneration • EWS mit Leistungsreserve (Mehrlänge) oder Förderung von EWS, die mit Wasser als Wärmeträger betrieben werden (diese müssen gegenüber EWS mit frostbeständigem Wärmeträger um 20-30% länger erstellt werden. Dies entspricht einer Leistungsreserve, wenn bei Bedarf die Wasserfüllung durch eine Fristschutzmittelfüllung ersetzt wird). • Aktive Regeneration über Klimaanlage: In Bestandesbauten ohne Fussbodenheizung sollen Anreize geschaffen werden, Umluftkühlgeräte so zu betreiben, dass diese ihre im Betrieb anfallende Abwärme analog zur freien Kühlung über EWS in den Solekreis einer EWS-Anlage einspeisen können.
Mengengerüst	Vermutlich sehr hoch (> 90% aller Anlagen oder 100 Gesuche pro Jahr)
Finanzielle Auswirkungen	Anlagenbesitzer: finanzielle Entlastung Kanton: Mehrbedarf an Fördermitteln
Personelle Auswirkungen Kanton	moderat
Chancen	• Grössere Akzeptanz von Massnahmen gegen nachbarschaftliche Beeinflussung. • Zusatzkosten für Massnahmen zur Abwendung einer thermischen Übernutzung werden durch Förderung abgemildert.
Risiken	Hoher Mehrbedarf an Fördermitteln

Handlungsoption 9	Information und Sensibilisierung zur Thematik
Beschreibung	Der Kanton informiert aktiv und in regelmässigen Abständen über den Zustand der oberflächennahen Erdwärmennutzung und stellt entsprechende Daten auf dem Geoportal des Kantons und über andere geeignete Medien zur Verfügung. Der Kanton sorgt dafür, dass im Rahmen der üblichen Beratungsangebote auf die Massnahmen zur Abwendung einer thermischen Übernutzung des Kantons hingewiesen wird.
Begründung	Verbesserung des Informationsangebotes und passive Lenkung des EWS-Zubaus über unverbindliche Empfehlungen.
Vorgehen	Der Kanton informiert über das erwartete Ausmass der gegenseitigen Beeinflussung von EWS sowie über drohende Folgen bei lokalen Häufungen. Er stellt konkrete und unverbindliche Empfehlungen für die Abwendung einer thermischen Übernutzung zur Verfügung.
Personelle Auswirkungen Kanton	gering
Chancen	Sensibilisierung, Vermeidung von Konflikten
Risiken	keine

Handlungsoption 10	Anforderung zu Geocooling bei Neubauten
Beschreibung	Effekt des Geocoolings bei allen Neubauten nutzen
Begründung	Geocooling ist im Neubau Stand der Technik, sorgt für zusätzlichen Raumkomfort und ist mit vernachlässigbaren Investitionskosten erreichbar und entschärft Situation der lokalen Häufung
Vorgehen	Der Kanton schreibt Geocooling bei allen Neubauten vor
Mengengerüst	Bei allen Neubauten, vermutlich 10%-20% aller Anlagen
Finanzielle Auswirkungen	Liegenschaftsbesitzer: keine
Umsetzung	Ordnungspolitische Vorgabe
Personelle Auswirkungen Kanton	gering
Chancen	Vermehrte Nutzung von Geocooling als Regenerationsquelle
Nachteile	keine

8 ANHANG

8.1 AUSLEGUNGSMETHODIK

Ein Auslegungswerkzeug für EWS-Anlagen bzw. ein entsprechendes Modell, mit dem die in dieser Studie untersuchte Fragestellung gelöst werden kann, muss folgenden Anforderungen genügen:

1. Berechnung der Wärmeträgertemperatur T_{EWS} einer EWS oder eines EWS-Feldes für ein vorgegebenes Lastprofil $q(t)$ als Funktion der Zeit:

Die mittlere Wärmeträgertemperatur T_{EWS} einer EWS kann als Funktion der Zeit t in guter Näherung für beliebige Lastprofile $q(t)$ wie folgt berechnet werden:

$$T_{EWS}(t) = T_{B,0} - q_{nq} R_{b,eff} - \underbrace{\frac{1}{2\pi\lambda} \sum_{i=1}^{nq} [q_i - q_{i-1}] g(t - t_{i-1})}_{> -1.5^\circ\text{C nach SIA 384/6}} - \Delta T_{NB}(t), \quad t \geq t_i \quad \text{Gl. 3}$$

Hier ist $T_{B,0}$ die ungestörte Bodentemperatur (Mittelwert über die Länge der EWS), ΔT_{NB} die durch bestehende (oder prinzipiell auch durch künftige) Nachbarsonden zur Zeit t verursachte Veränderung der Bodentemperatur am Ort der EWS, λ in W/m/K die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Bodens, $R_{b,eff}$ in K·m/W der thermische Widerstand der Sonde, q_i die spezifische Sondenbelastung in W/m zur Zeit t_i , und nq die Anzahl der schrittweise zwischen t_i und t_{i-1} konstanten Lastprofile q_i .²³

Das Lastprofil $q(t)$ in Gl. 3 beschreibt den zeitlich veränderlichen spezifischen Wärmeentzug oder Wärmeeintrag in die EWS in W/m über die gesamte Betriebszeit der EWS. Dieses Lastprofil folgt aus dem zeitlich veränderlichen Energiebedarf des Objektes für Raumwärme und Warmwasser und den Parametern der Wärmepumpe. Die meisten Auslegungswerkzeuge verwenden Lastprofile mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde («Stundenlastprofile»), das ergibt für einen Auslegungszeitraum von 50 Jahre $nq = 24 \cdot 365.25 \cdot 50 = 438'300$ Lasten. Für die vorliegende Aufgabe, d.h. die Auslegung einer grossen Zahl von einzelnen EWS-Anlagen mit gegenseitiger Wechselwirkung, ist die Verwendung von Stundenlastprofilen pro EWS-Anlage zu aufwändig. Nach Wagner (2019) lassen sich die Stundenlastprofile für einfache Anwendungen wie den Heizbetrieb durch ein künstliches Lastprofil ersetzen, dass mit nur drei Lasten einfacher zu berechnen ist, im Ergebnis aber die gleiche Wärmeträgertemperatur nach einer bestimmten Betriebszeit t ergibt (Abbildung 32).

²³ Für eine ausführliche Diskussion der verschiedenen EWS-Berechnungsmodelle und ihrer Genauigkeit siehe Wagner (2021)

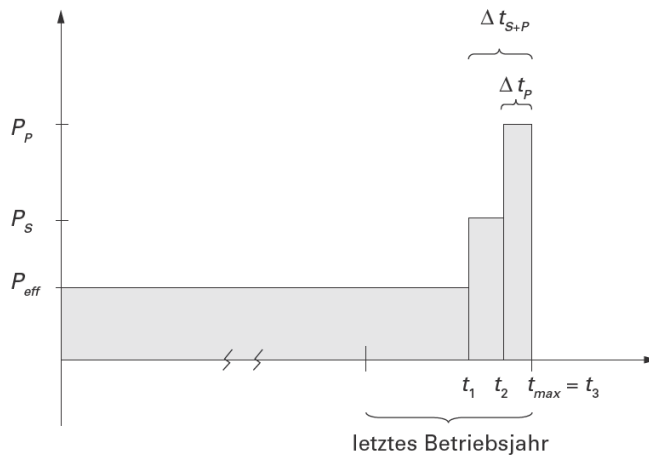


Abbildung 32: Vereinfachtes Lastprofil für die Auslegung einer EWS-Anlage. Die Betriebszeit bis zum vorletzten Jahr wird durch eine zeitlich konstante Entzugsleistung P_{eff} beschrieben. Im letzten Betriebsjahr wird das Verhalten der Sonde durch die Lastspitzen P_S (saisonale Belastung, von t_1 bis t_2 , z.B. 3 Monate) und P_P (Spitzenlast, von t_2 bis t_{max} , z.B. 24 Stunden) charakterisiert (SIA 384/6:2021 Anhang D5).

Der Faktor g in Gl. 3 ist die sog. « g -Funktion», welche die Temperaturänderung im Boden als Folge einer sprunghaften Änderung der Entzugsleistung q_i angibt. Sie hängt von geometrischen Eigenschaften der Sonde ab und kann für Einzelsonden wie für EWS-Felder berechnet werden (Eskilson, 1987).

Die Auslegung einer EWS nach SIA geschieht, indem die spezifische Entzugsleistung q durch Veränderung der EWS-Länge oder deren Anzahl so lange angepasst wird, bis nach einer definierten Betriebszeit von z.B. $t = 50$ Jahren die mittlere Wärmeträgertemperatur $T_{EWS} - 1.5^\circ\text{C}$ beträgt (oder über diesem Wert liegt).

2. Berechnung der Bodentemperatur T_B ausserhalb der EWS als Funktion des Abstandes von der EWS und der Zeit.

Um den Einfluss einer bestehenden Nachbarsonden k auf eine zu planende Sonde i zu berechnen, muss lediglich deren Temperatursenke $\Delta T_{NB,k,i}$ am Ort der zu planenden Sonde(n) berechnet werden. Bei mehreren Nachbarsonden werden die einzelnen Einflüsse addiert. Für diese Berechnung kann vereinfachend angenommen werden, dass die Nachbarsonde k über ihre gesamte Betriebszeit von $t_{NB,IBS,k}$ (IBS = Inbetriebsetzung) bis $t_{NB,k}$ mit einer durchschnittlichen Leistung $q_{NB,k}$ in Betrieb sind²⁴ (Wagner, 2019):

$$\Delta T_{NB,k,i}(t) = -\frac{1}{2\pi\lambda} q_{NB,k} \left(g_{NB,k}(B_{k,i}, t - t_{NB,IBS,k}) - g_{NB,k}(B_{k,i}, t - t_{NB,k}) \right), \quad \text{Gl. 4}$$

$$t_{NB,k} \leq t$$

$g_{NB,k}$ ist die g -Funktion der Nachbarsonde k .

Die durchschnittliche Leistung bestehender Nachbarsonden lässt sich aus der EWS-Länge abschätzen oder anhand weiterer Daten aus den Geoportalen der Kantone herleiten.

²⁴ $t_{NB,k}$ fällt hier mit dem Auslegungszeitraum zusammen, kann aber auch davor liegen, wenn die Nachbarsonde vorzeitig ausser Betrieb geht.

Für die weiteren Berechnungen werden alle Sonden als endliche Linienquellen (ELQ) angenähert (Eskilson, 1987). In diesem Fall lässt sich die g -Funktion einer Sonde wie folgt berechnen:

$$\begin{aligned}
 g_{FLS}(t, r, z, L, D) &= \frac{1}{2} \int_D^{L+D} \left(\frac{1}{\sqrt{r^2 + (z-s)^2}} \operatorname{erfc} \frac{\sqrt{r^2 + (z-s)^2}}{\sqrt{4a_B t}} \right. \\
 &\quad \left. - \frac{1}{\sqrt{r^2 + (z+s)^2}} \operatorname{erfc} \frac{\sqrt{r^2 + (z+s)^2}}{\sqrt{4a_B t}} \right) ds
 \end{aligned}
 \tag{Gl. 5}$$

a_B ist die Temperaturleitfähigkeit oder thermische Diffusivität des Bodens in m^2/s , das ist der Quotient aus Wärmeleitfähigkeit und spezifischer Wärmekapazität.

Bei der Herleitung und Anwendung der endlichen Linienquelle werden mehrere wesentliche Annahmen und Vereinfachungen getroffen:

- **Homogenität und Isotropie des Bodens:** Es wird angenommen, dass der Boden in seinen thermischen Eigenschaften (Leitfähigkeit und Diffusivität) homogen und isotrop ist.
- **Unendliches Medium:** Der Boden wird als unendlich ausgedehnt betrachtet, sodass Randbedingungen (wie etwa die Bodenoberfläche oder geologische Diskontinuitäten) vernachlässigt werden können.
- **Konstanter Wärmestrom:** Es wird vorausgesetzt, dass der Wärmestrom entlang der gesamten Bohrlochlänge konstant ist.
- **Vernachlässigung konvektiver Effekte:** Die Wärmeübertragung im Boden erfolgt ausschliesslich durch Diffusion; konvektive Transporteffekte durch z.B. Grundwasser werden ignoriert.
- Die Temperaturänderung an der Oberfläche (durch das Klima oder anthropogene Faktoren verursacht) wird nicht berücksichtigt.

Die Näherung der EWS bzw. ihrer g -Funktion durch eine endliche Linienquelle bietet dennoch viele Vorteile, nämlich eine einfache Parametrisierung und folglich eine effiziente, schnelle Berechnung, jedoch auch einen entscheidenden Nachteil: da die endliche Linienquelle eine homogene Entzugsdichte besitzt, werden vertikale Effekte nicht berücksichtigt, was im Ergebnis zu konservativen Ergebnissen, d.h. einer Überschätzung der Abkühlung des Bodens, führt. Genauere Modelle z.B. nach Cimmino (2018), mit denen die Sonden in zahlreiche Segmente aufgeteilt werden und sich so eine mit der Tiefe variable Entzugsdichte ergibt, sind numerisch jedoch deutlich aufwändiger zu lösen und für die vorliegende Fragestellung daher ungeeignet.

Um zu vermeiden, dass sich mehrere konservativ getroffene Annahmen im Ergebnis aufsummieren, wurde im Rahmen der vorliegenden Studie der Unterschied zwischen Ergebnissen, die mit der endlichen Linienquelle (ELQ) als Näherung für die g -Funktion erzielt wurden, mit denjenigen verglichen, die mit der g -Funktion nach Cimmino berechnet wurden. Abbildung 33 zeigt den Unterschied beider Berechnungsansätze im simulierten Untersuchungsgebiet. Im Ergebnis zeigt sich, dass das «realistischere» EWS-Modell nach Cimmino generell etwa 20 - 30% geringere Abkühlungen verursacht als das ELQ-Modell.

Daher werden hier die Ergebnisse, die mit dem effizienten ELQ-Modell erzielt werden, pauschal um 20% korrigiert.

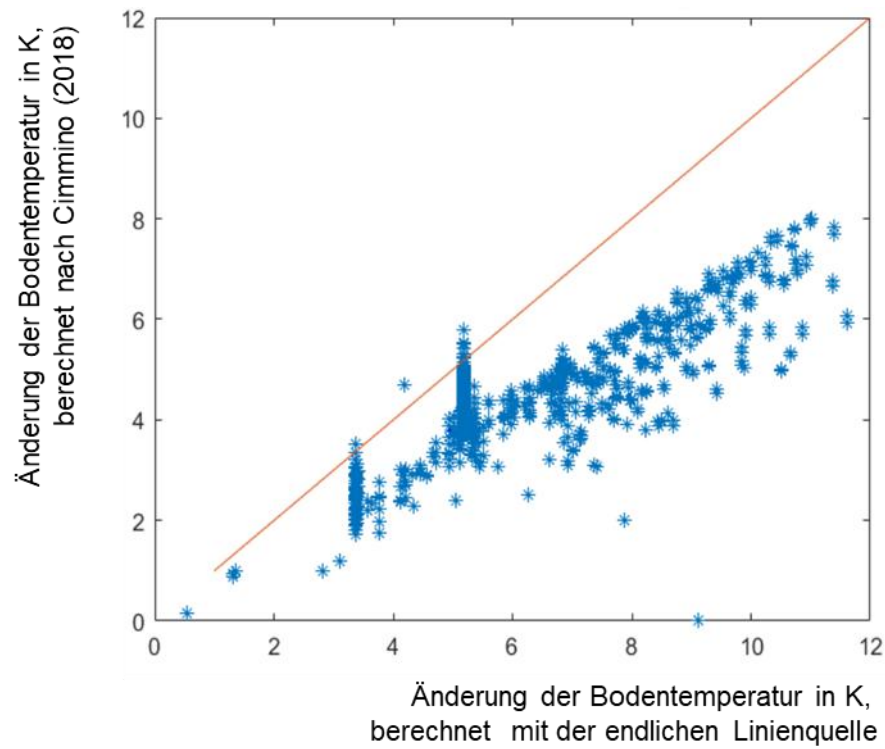


Abbildung 33: Unterschied zwischen der Änderung der Bodentemperatur durch den Einfluss von Nachbarsonden, der sich durch Verwendung zweier unterschiedlicher Näherungen für EWS ergibt (Cimmino, 2018, vs. ELQ).

8.2 GEOTHERMISCHE BODENKENNWERTE

Siehe separater Bericht «Bodenoberflächentemperatur, geothermischer Gradient und Wärmeleitfähigkeit im Kanton Basel-Landschaft» von Geotest vom 31.10.2024 (Remund, 2024).

8.3 VERGLEICH MIT SIA-METHODE (R1, R2, R3, R4)

In der vorliegenden Studie wurde die gegenseitige Beeinflussung jeder einzelnen Sonde auf alle anderen Sonden berechnet und aufsummiert. Diese Berechnung ist aufwändig und komplex. Für die Beurteilung durch einzelne Planer oder Behörden wäre eine einfachere Möglichkeit zur Beurteilung der gegenseitigen Beeinflussung wünschenswert. Einen deutlich einfacheren Ansatz bietet die SIA 384/6 (s. Kapitel 3.6)

Diese Vereinfachung nach SIA 384/6:2021 kann zu einer Fehlinterpretation der Situation führen:

- Die Methode geht davon aus, dass die Situation in der Nachbarschaft ähnlich wie bei der betrachteten Parzelle ist. Für die Beeinflussung ist die Nachbarschaft jedoch entscheidend und dort kann die Entzugsdichte deutlich höher oder niedriger sein als bei der betrachteten Parzelle.
- Die Methode berücksichtigt weder Bohrtiefenbeschränkungen noch andere Eigenschaften des Untergrunds.

Im Bestreben, eine einfache Beurteilungsmethode für die nachbarschaftliche Beeinflussung zu finden, wurde die Beurteilung um unterschiedliche Bodeneigenschaften und Bohrtiefenbeschränkungen ergänzt, auf das Beispielgebiet angewendet und mit der komplexeren Berechnungsmethode verglichen. Dazu wurden in einem ersten Schritt die Grafiken zur Quantifizierung des Nachbareinflusses erweitert, sodass für unterschiedliche Bohrtiefenbeschränkungen und unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten des Untergrundes spezifische Werte abgelesen werden können.

Abbildung 34 zeigt ein Beispiel einer solchen Erweiterung für unterschiedliche Bohrtiefenbeschränkungen, in Abbildung 35 werden die entsprechenden Grafiken für unterschiedliche Wärmeleitfähigkeiten des Untergrundes gegeben. Die Beeinflussung weicht dabei vor allem bei geringen Bohrtiefen und bei hohen Leitfähigkeiten deutlich von den Vorgaben der SIA384/6 ab und kann mehr als doppelt so hoch sein. Zur Berechnung dieser Werte wurde das semianalytische Sondenmodell von Cimmino (2018) und ein regelmässiges Sondenfeld von 41 x 41 Sonden verwendet. Eine genauere Beschreibung des Vorgehens, sowie eine Validierung der Methode inklusive eines Vergleiches mit der SIA 384/6 kann im Abschlussbericht des BFE Projektes Cool2Regen (Ruesch et al, 2022) nachgelesen werden.

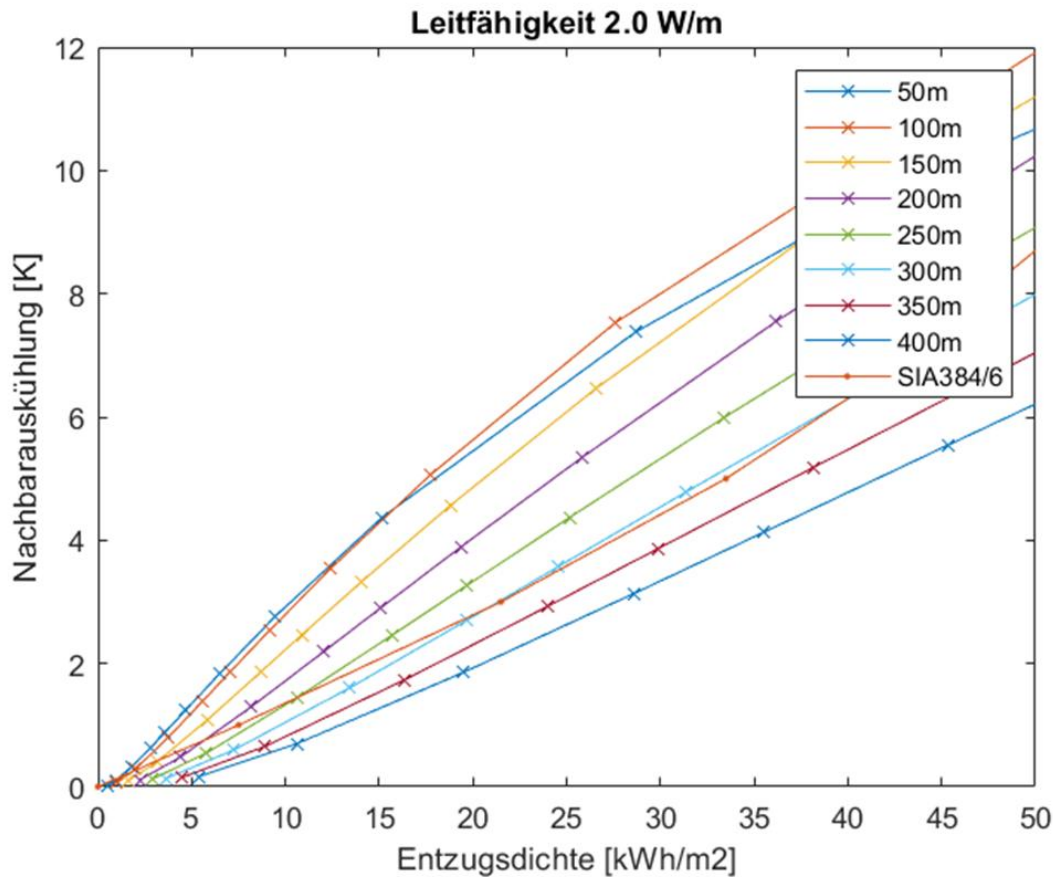


Abbildung 34: Nachbarsenkung durch grundstücksflächenbezogenen Wärmeentzug für unterschiedliche Bohrtiefenbeschränkungen, einer Wärmeleitfähigkeit von 2 W/m/K im Vergleich zu den Angaben der SIA 384/6.

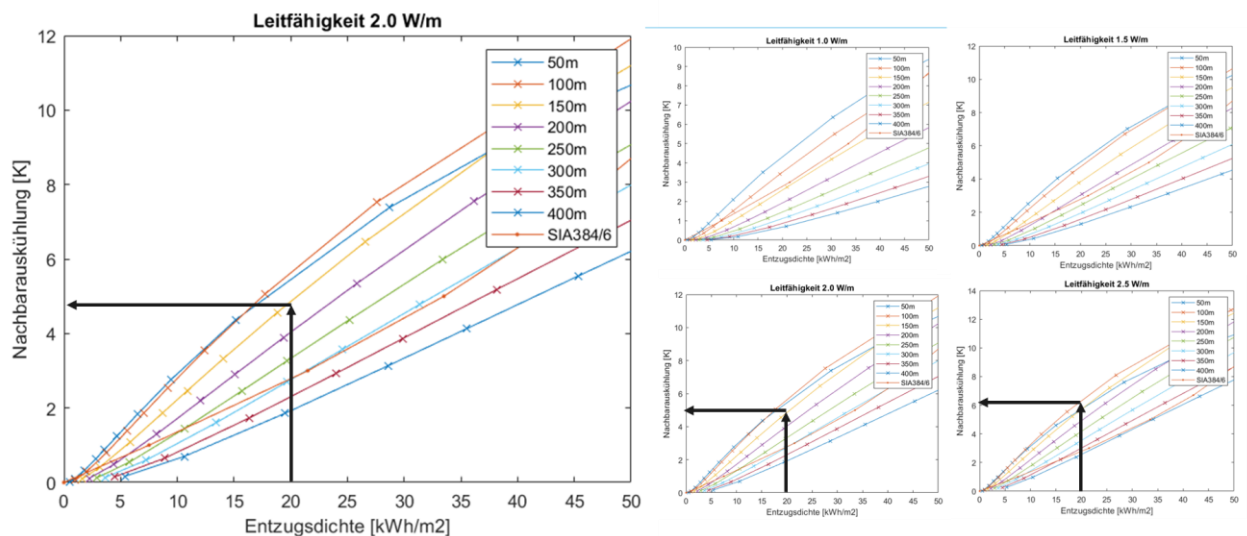


Abbildung 35: Nachbarsenkung für unterschiedliche Bohrtiefenbeschränkungen und unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeiten im Vergleich zu den Angaben der SIA 384/6.

In einem zweiten Schritt wurden diese korrigierten Werte der nachbarschaftlichen Beeinflussung übernommen und auf das Beispielquartier angewendet. Dazu wurde für die Parzellen mit EWS die grundstücksspezifische Entzugsdichte berechnet, wobei die unterschiedlichen Annahmen bezüglich der EWS-Verbreitung der jeweiligen Szenarien beachtet wurden. Je nach Entzugsdichte, Bohrtiefenbeschränkung und Wärmeleitfähigkeit wurde aus den oben

gegebenen Grafiken Abbildung 34) die nachbarschaftliche Auskühlung interpoliert und daraus die Kategorie R1–R4 abgeleitet. In den folgenden Abbildungen sind diese Berechnungen den Sonden-genauen Berechnungen aus dem Hauptteil des Berichts gegenübergestellt. Der Vergleich wurde für vier Szenarien mit abnehmendem Wärmeentzug durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass im Durchschnitt zwar eine ähnliche Größenordnung der Nachbarauskühlung ermittelt wird, die einzelnen Werte aber sehr stark streuen. Auch wenn die Methode der SIA 384/6 mithilfe der Bohrtiefenbeschränkungen und der Wärmeleitfähigkeit im Untergrund verbessert wird, vermag sie dennoch nicht, die lokale Situation von Einzelobjekten zuverlässig abzuschätzen. So werden bei den ersten beiden Szenarien mit starker gegenseitiger Beeinflussung etwa zwei Drittel der Anlagen in eine andere bzw. falsche Kategorie eingeteilt. Bei den beiden letzten Szenarien mit geringer Beeinflussung (fast alle Anlagen in R1 oder R2) können etwa zwei Drittel der Anlagen in die richtige Kategorie eingeteilt werden. Dies liegt jedoch vor allem an der generell geringen Beeinflussung und der daraus folgenden Einteilung in eine tiefe Kategorie. Auch hier bleiben deutliche Unterschiede zwischen den beiden Methoden bestehen (runde Form der Punktwolke in Abbildung 41 und Abbildung 43).

Szenario 1

Mehr als 50% der Quartiere entfallen in Kategorie R4!

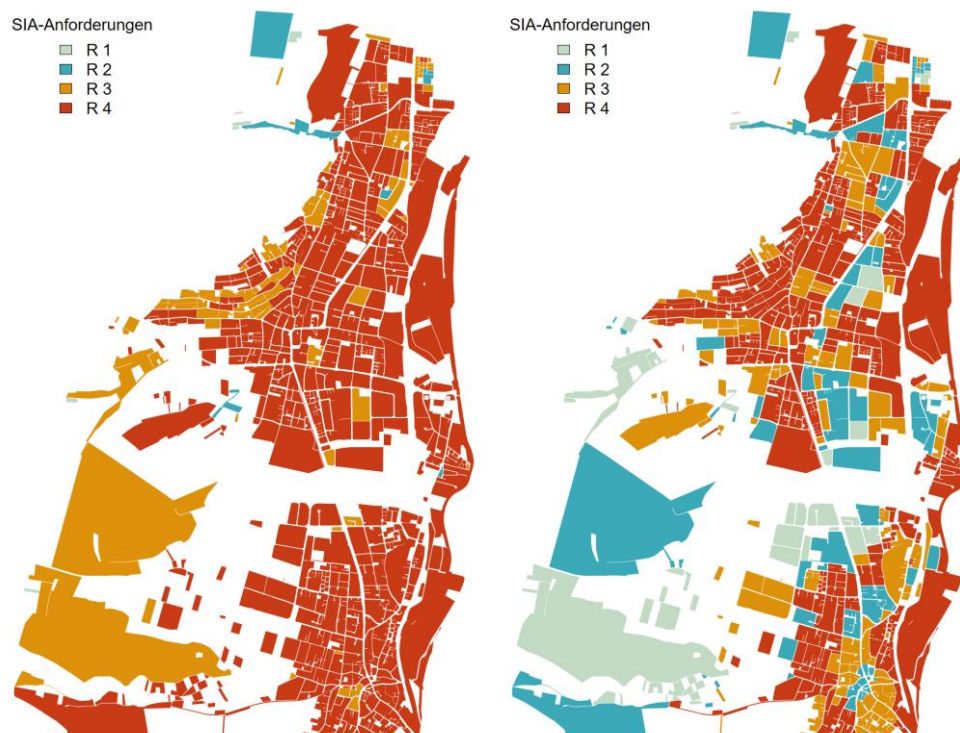


Abbildung 36: Links: Angepasste SIA-Methode; Rechts: Projekt-Methode.

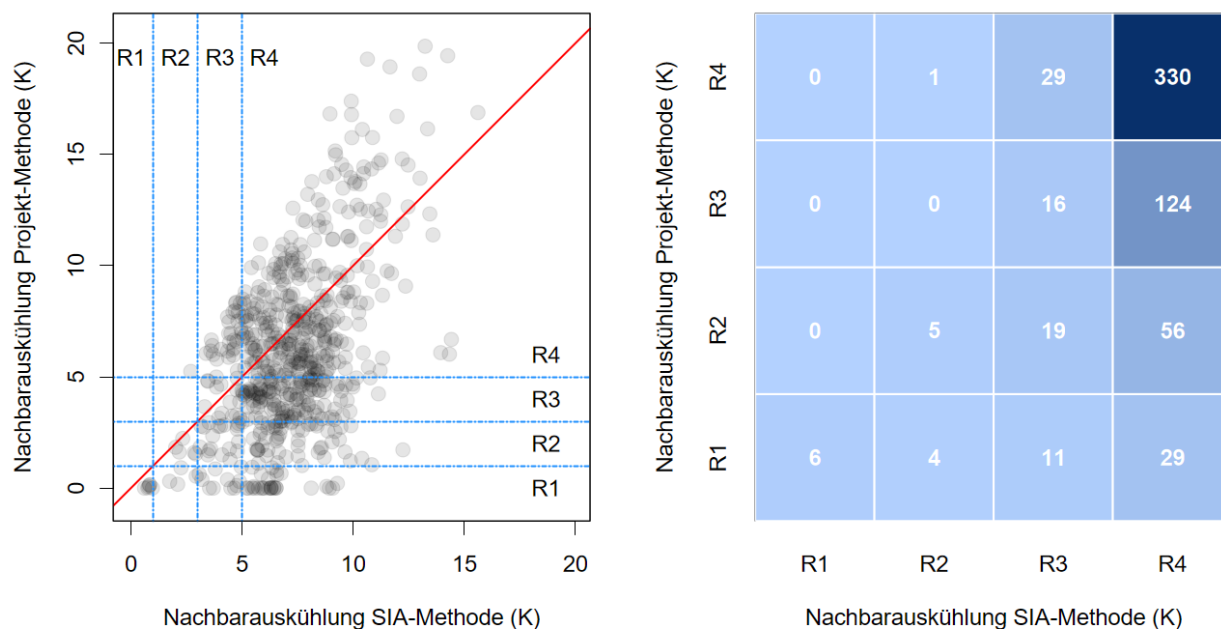


Abbildung 37: Vergleich von zwei Methoden zur Berechnung der Nachbarschaftlichen Auskühlung anhand des Beispielquartiers. X-Achse: SIA384/6 mit in diesem Kapitel beschriebenen Anpassungen. Y-Achse: Projekt-Methode mit Sonden-genauer Berechnung des Einflusses aller Sonden.

Szenario 2

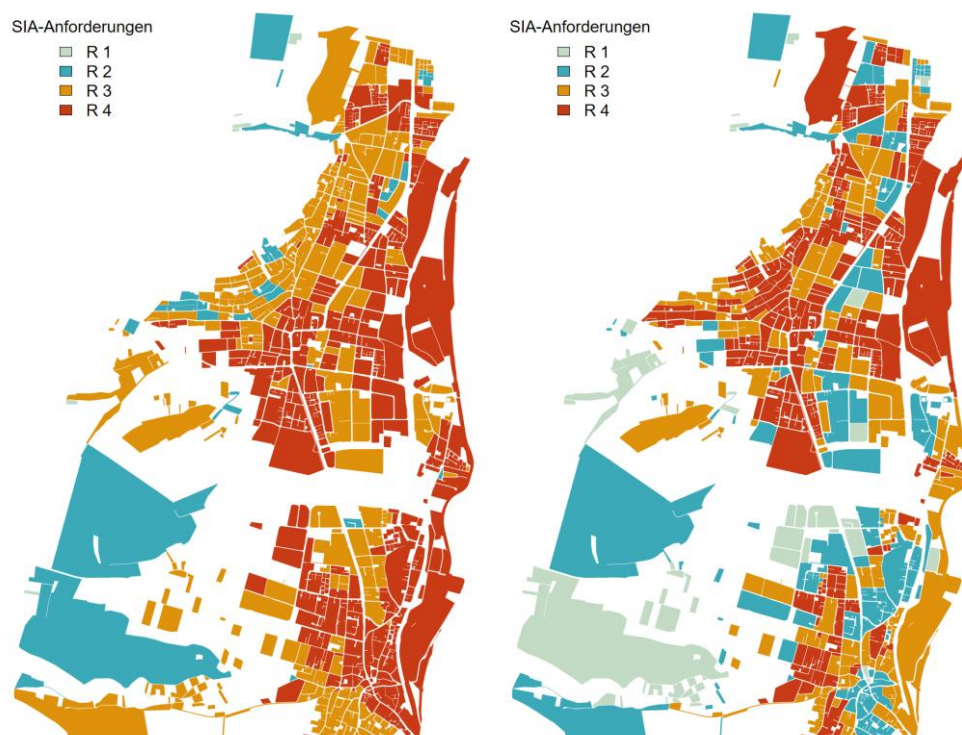


Abbildung 38: Links: Angepasste SIA-Methode; Rechts: Projekt-Methode.

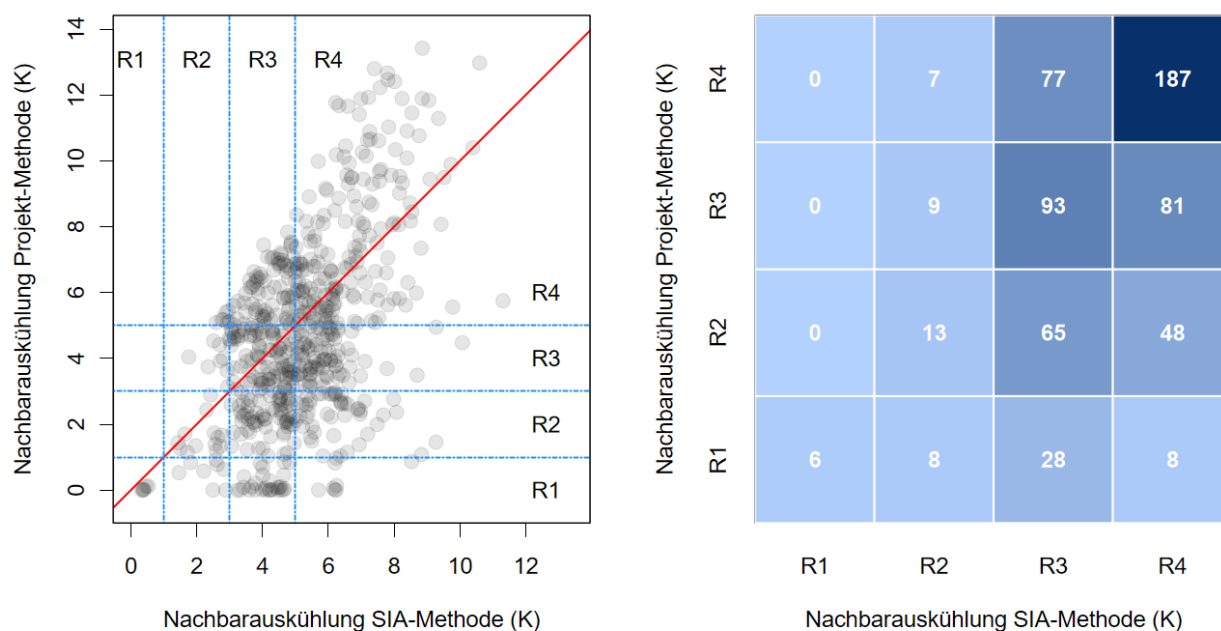


Abbildung 39: Vergleich von zwei Methoden zur Berechnung der Nachbarschaftlichen Auskühlung anhand des Beispielquartiers. X-Achse: SIA384/6 mit in diesem Kapitel beschriebenen Anpassungen. Y-Achse: Projekt-Methode mit Sonden-genauer Berechnung des Einflusses aller Sonden.

Szenario 3

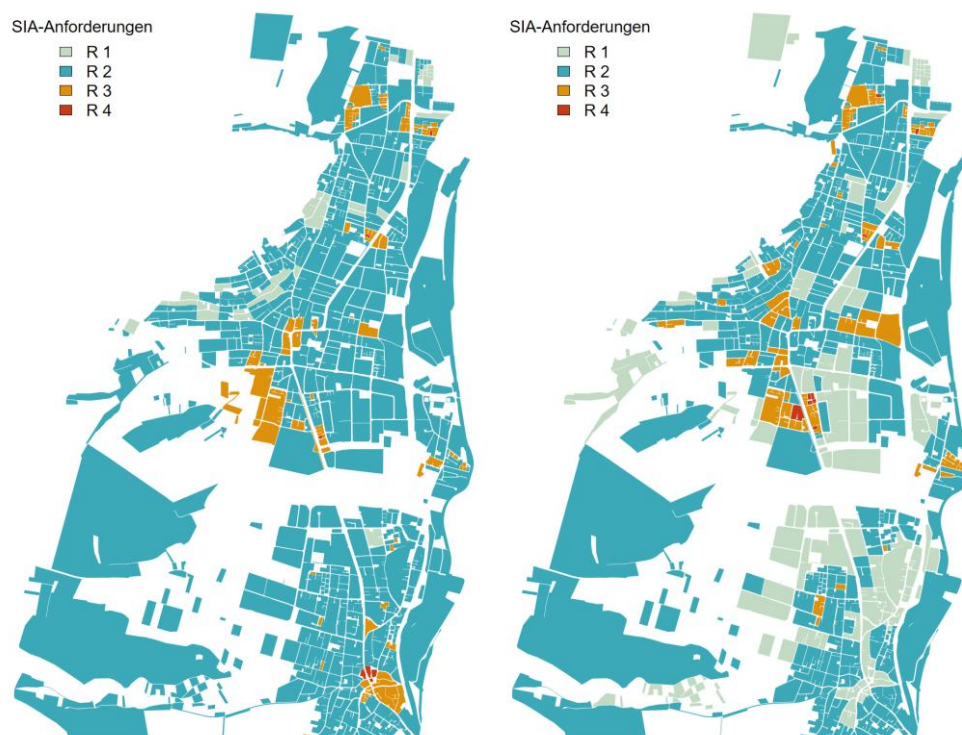


Abbildung 40: Links: Angepasste SIA-Methode; Rechts: Projekt-Methode.

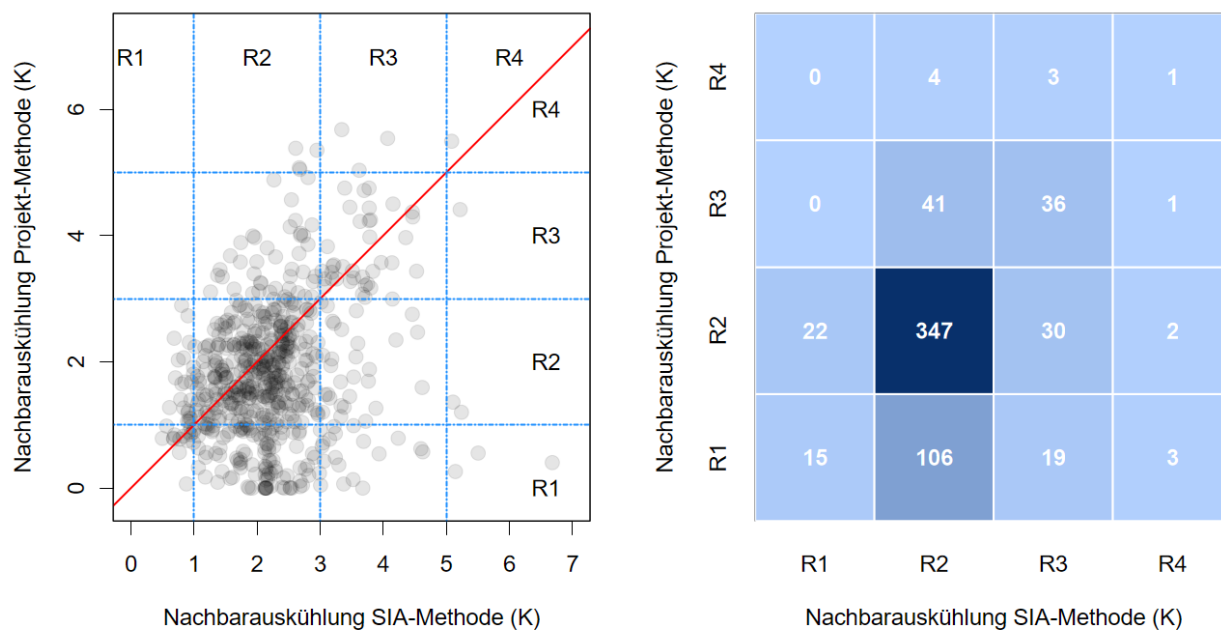


Abbildung 41: Vergleich von zwei Methoden zur Berechnung der Nachbarschaftlichen Auskühlung anhand des Beispielquartiers. X-Achse: SIA384/6 mit in diesem Kapitel beschriebenen Anpassungen. Y-Achse: Projekt-Methode mit Sonden-genauer Berechnung des Einflusses aller Sonden.

Szenario 4

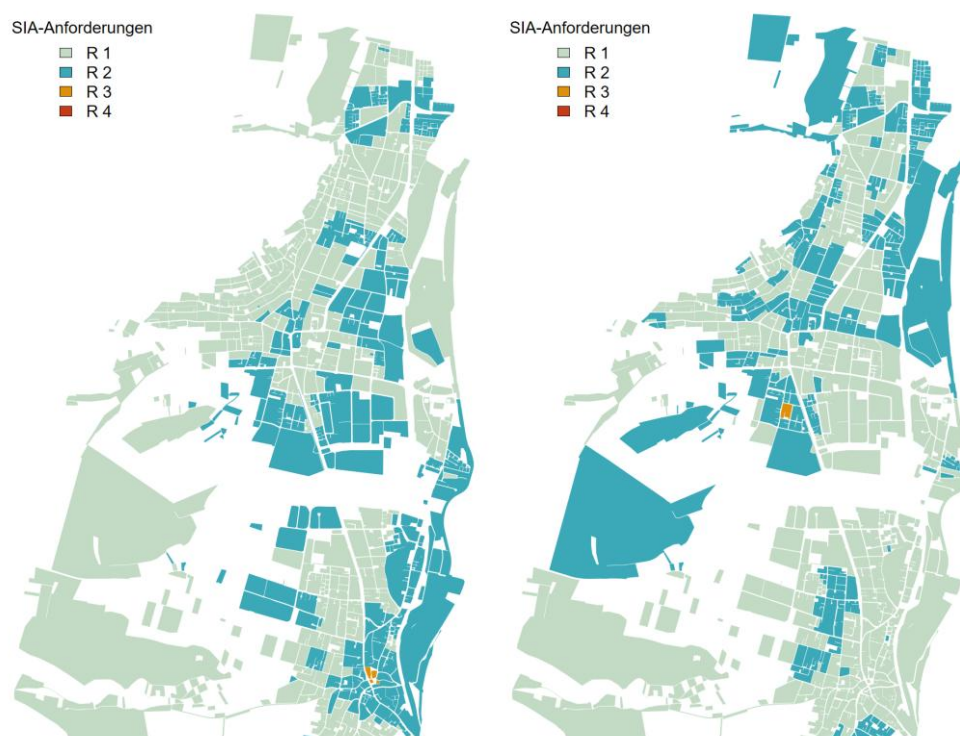


Abbildung 42: Links: Angepasste SIA-Methode; Rechts: Projekt-Methode.

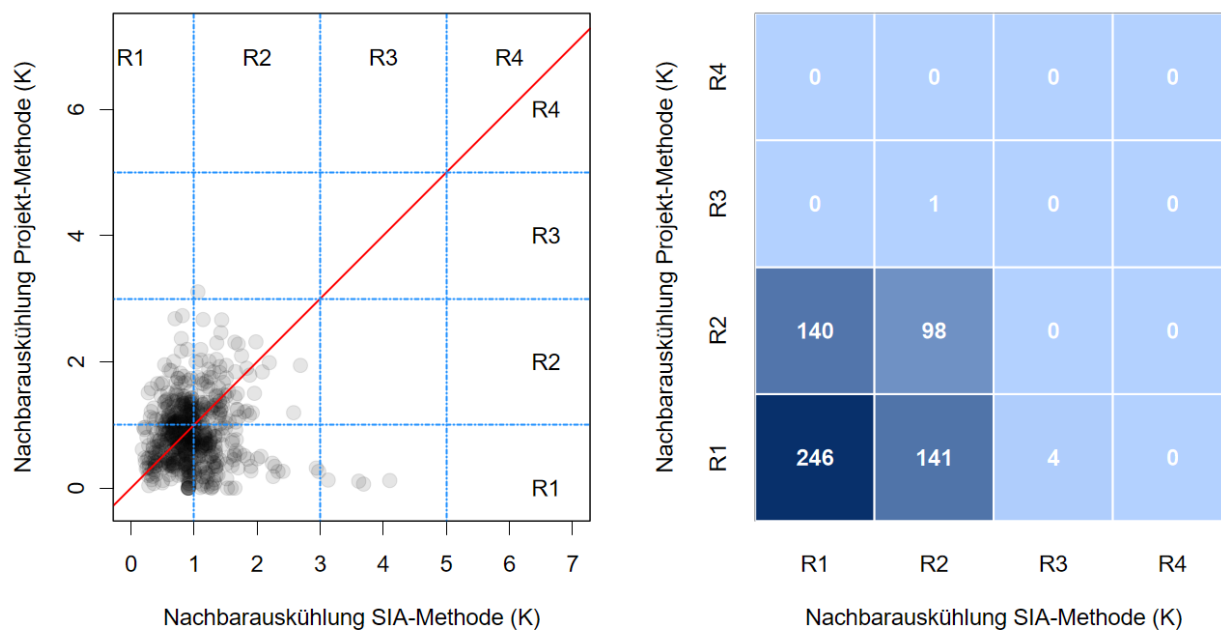


Abbildung 43: Vergleich von zwei Methoden zur Berechnung der Nachbarschaftlichen Auskühlung anhand des Beispielquartiers. X-Achse: SIA384/6 mit in diesem Kapitel beschriebenen Anpassungen. Y-Achse: Projekt-Methode mit Sonden-genauer Berechnung des Einflusses aller Sonden.

8.4 ZUR GLEICHWERTIGKEIT VON MASSNAHMEN

In der vorliegenden Studie werden Massnahmen zur Kompensierung einer thermischen Übernutzung des Untergrundes als Folge einer übermässigen Erdwärmenutzung aufgezeigt. Diese Massnahmen bestehen darin, EWS-Anlagen länger auszulegen **und** die Bodentemperatur aktiv zu regenerieren (z.B. 20% Mehrlänge und 15% Regeneration in Gevierten mit einer Wärmebedarfsdichte von bis zu 400 MWh/ha), dies im Vergleich zu einer Anlagenplanung, bei der künftige Nachbarsonden nicht berücksichtigt sind.

Die in der vorliegenden Studie vorgeschlagenen Massnahmen folgen aus dem in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Workflow. Grundsätzlich sind beliebige andere Kombinationen von Mehrlänge und Regeneration möglich, oder Massnahmen nur mit Regeneration oder Mehrlänge, sofern sie eine äquivalente Wirkung erzielen.

Im Rahmen der vorliegenden Studie konnte nicht weiter aufgezeigt werden, welche alternativen Kombinationen von Massnahmen möglich sind. Stattdessen wird hier kurz ein mögliches Vorgehen skizziert, mit dem äquivalente Massnahmen hergeleitet werden können, falls die im Bericht vorgeschlagenen Massnahmen entweder nicht umsetzbar oder unwirtschaftlich sind.

In einem ersten Schritt wird dazu die neue EWS-Anlage auf eine definierte Auslegungstemperatur nach z.B. 50 Jahren Betriebszeit ausgelegt. Üblicherweise geschieht dies, indem die EWS-Länge so gewählt wird, dass die mittlere Wärmeträgertemperatur der EWS während 50 Jahren nicht unter -1.5°C sinkt. Bestehende EWS sind zwingend zu berücksichtigen. Ein Wärmeeintrag, wie er sich durch Geocooling ergibt, kann bei der Auslegung bereits berücksichtigt werden.

Im zweiten Schritt ist die durch die künftigen Nachbarsonden verursachten Abkühlung der Bodentemperatur zu berücksichtigen, z.B. 3.4 K in Gebietsklasse 1 (s. Kapitel 5.2.3). Die Auslegung wird nun mit den gleichen Parametern wiederholt, jedoch wird nun die Auslegungstemperatur um 3.4 Kelvin erhöht. Mit dieser «künstlichen» Verringerung des Temperaturpotenzials können nun beliebige Kombinationen von Mehrlänge und/oder Regeneration getestet werden. Im Ergebnis sind alle Massnahmen gültig, welche die erhöhte Auslegungstemperatur von $-1.5^{\circ}\text{C} + 3.4\text{ K}$ nicht unterschreiten.

8.5 QUELLENANGABEN

Fachliteratur

Cimmino, M., *Pygfunction: an open-source toolbox für the evaluation of thermal response factors for geothermal borefields*, Proceedings of eSim 2018, the 10th conference of IBPSA—Canada, Montréal, QC, Canada, May 9-10, 2018

Eskilson, P., *Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes*, Departement of Mathematical Physics, University of Lund, Sweden, 1987

Rivera, J. A., Blum, P., und Bayer, P., *Increased ground temperatures in urban areas: Estimation of the technical geothermal potential*, Renewable Energy, Vol. 103, Seiten 388 – 400, 2017

Walch, A., Mohajeri, N., Gudmundsson, A. und Scartezzinie, J.-L., *Quantifying the technical geothermal potential from shallow borehole heat exchangers at regional scale*, Renewable Energy 165, 2021

Walch, A., Li, X., Chambers, J., Mohajeri, N., Yilmaz, S., Patel, M., und Scartezzinie, J.-L., *Shallow geothermal energy potential for heating and cooling of buildings with regeneration under climate change scenarios*, Energy 244, 2022

Fachartikel

Huber, *Speicherung von Wärme in Erdwärmesonden, Möglichkeiten und Grenzen*, Ostschweizer Energiepraxis, April 2012

aeesuisse: Faktenblatt Regeneration Erdsonden

suissetec: Merkblatt «Erdwärmesonden: Entlastung oder Regeneration»).

Studien und Berichte

Dörig, L., *Statistik zur Entwicklung von Erdwärmesonden in der Schweiz 1980-2017*, ZHAW School of Management and Law (Hrsg.), 2019

EnergieSchweiz, *Bewilligungsverfahren Erdwärmesonden in den Kantonen, Übersicht über die Bewilligungsverfahren für Erdwärmesonden in den Kantonen*, EnergieSchweiz, 2017

Ernst Basler und Partner, *Energieversorgung des Kantons Basel-Landschaft, Ergänzung zum Energieplanungsbericht 2022*, Bericht im Auftrag des Amtes für Umweltschutz und Energie des Kantons Basel-Landschaft, 25. November 2022.

Frischknecht, R., *Ökobilanz der monatlichen Strombereitstellung Schweiz und Europa*, Bericht im Auftrag des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich, 2025

Huber, A. und Pahud, D., *Untiefe Geothermie: Woher kommt die Erdwärme?*, Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Energie, 1999

Kriesi, R., *Analyse von Erdwärmesondenanlagen, Abschätzung des Anteils unterkühlter Erdwärmesonden von Anlagen, die vor Einführung der SIA 384/6 erstellt wurden*, Bericht im Auftrag von EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie, Ittigen, 2017

Kriesi, R., *Methoden der Erdsonden-Regeneration*, Bericht im Auftrag der Stadt Zürich, 2017

Kriesi, R., *Bewertung älterer Erdsonden in der Stadt Zürich*, Bericht im Auftrag des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich, 2018

Link, K., *Statistik der geothermischen Nutzung in der Schweiz, Ausgabe 2023*, Bericht im Auftrag von EnergieSchweiz, 2024

Pahud, D., Kohl, T., Mégel, T., und Brenni, R., *Langzeiteffekt von Mehrfach-Erdwärmesonden*, Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Energie, 2002

Poppeo, J., und Huber, A., *Beiträge zur strategischen Planung von Erdwärmesonden*, Bericht im Auftrag des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich, 2019

Remund, R., «Bodenflächentemperatur, geothermischer Gradient und Wärmeleitfähigkeit im Kanton Basel-Landschaft, GEOTEST AG, 31.10.2024

Rohrbach, N, *Dokumentation Geodatenmodell Thermische Netze: Wärme- und Kälteangebot, Thermische Netze: Nachfrage Wohn- und Dienstleistungsgebäude, Thermische Netze: Nachfrage Industrie*; Version 1.0, 01.04.2022, Bundesamt für Energie

Ruesch et al., *Cool2Regen, Aktives Kühlen von Gebäuden mit Wärmepumpen und Erdsonden für hohe Regenerationsgrade*, Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Energie, 2022

Wagner, R., und Weisskopf, T., *Erdsondenpotenzial in der Stadt Zürich*, Bericht im Auftrag des Amtes für Hochbauten der Stadt Zürich, 2014

Wagner, R., *Erdsonden, Auslegung von Kleinanlagen mit Berücksichtigung von Nachbarsonden*, Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, 2019

Normen und Richtlinien

BAFU, *Wärmenutzung aus Boden und Untergrund, Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmenutzung*, Reihe Umwelt-Vollzug, Bundesamt für Umwelt, Bern, 2009

SIA 384/6:2021, *Erdwärmesonden*, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein (Hrsg.), Zürich, 2021

Fachverbände

GeothermieSchweiz, *Leitfaden Erdwärmesonden (EWS), Fragen – Antworten – Lösungen im Überblick*, Ausgabe 30.04.2028

FWS, 2023: Fachvereinigung Wärmepumpen Schweiz, *Statistik 2023*, www.fws.ch