



# MASTERARBEIT | MASTER'S THESIS

Titel | Title

Methodenwahl zur Temperaturinterpolation von  
Fließgewässerdaten und daraus folgenden Potenzialanalysen  
von flusswassergespeisten Wärmepumpen in Österreich

verfasst von | submitted by

Lisa Maria Stier BSc

angestrebter akademischer Grad | in partial fulfilment of the requirements for the degree of  
Master of Science (MSc)

Wien | Vienna, 2024

Studienkennzahl lt. Studienblatt | Degree  
programme code as it appears on the  
student record sheet:

UA 066 856

Studienrichtung lt. Studienblatt | Degree  
programme as it appears on the student  
record sheet:

Masterstudium Kartographie und Geoinformation

Betreut von | Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Andreas Riedl

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung: Hintergrund, Motivation, Zielsetzung und Struktur der Arbeit</b>	<b>3</b>
1.1	Problemstellung und Zielsetzung . . . . .	3
1.2	Arbeitstitel und Forschungsfrage . . . . .	4
1.3	Forschungsleitziel . . . . .	5
1.4	Aufbau und Struktur der Arbeit . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Flusswassergespeiste Wärmepumpen - Stand der Forschung</b>	<b>10</b>
2.1	Ansätze für eine österreichische Wärmepotenzialkarte . . . . .	10
2.2	Wärmebedarf und Netzverluste . . . . .	11
2.3	Erkenntnisse der Wärmenutzung von Oberflächengewässern in Großbritannien . . . . .	12
2.4	Flusswassergespeiste Wärmepumpen in Österreich . . . . .	14
2.5	Restriktionsgebiete . . . . .	15
2.6	Fazit aus dem Forschungsstand . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Erstellung einer Wärmepotenzialkarte</b>	<b>17</b>
3.1	Vorgehensweise . . . . .	17
3.2	Datengrundlage . . . . .	19
3.2.1	Wärmepotenzialdaten . . . . .	20
3.2.2	Daten von Nutzungs- und Restriktionsgebieten . . . . .	22
3.3	Offene Fragen, Innovationsgehalt und Relevanz der Arbeit . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Interpolationsmethoden - Stand der Forschung</b>	<b>26</b>
4.1	Interpolationsmethoden Ansprüche . . . . .	26
4.2	Lineare Regression von Fließgewässertemperaturen in Abhängigkeit von der Seehöhe . . . . .	27
4.3	Kriging . . . . .	28
4.3.1	Berücksichtigung der Fläche beim Kriging . . . . .	29
4.4	Top Kriging . . . . .	32
4.5	Interpolation mit R . . . . .	34
4.5.1	Anwendung von rtop Package . . . . .	37
4.6	Methodenvergleich und Bewertung . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Erstellung einer Temperaturdatenkarte von Fließgewässern</b>	<b>44</b>
5.1	Temperaturdatenaufbereitung mit Python . . . . .	44
5.2	Temperaturdatenaufbereitung: Von CSV-Tabelle zur Karte mit QGis . . . . .	51



5.3	Datenverarbeitung: Interpolation der Temperaturdaten mit Top Kriging . . . . .	56
5.4	Datenverarbeitung: Interpolation kartografisch visualisieren . .	59
5.5	Datenauswertung der Fließgewässertemperatur . . . . .	68
<b>6</b>	<b>Wärmepotenzialkarte erstellen</b>	<b>82</b>
6.1	Wärmekapazität . . . . .	82
6.2	Datenaufbereitung der Durchflussraten in QGis . . . . .	84
6.3	Verknüpfung von Durchfluss und Temperatur . . . . .	86
6.4	Q Effektiv - Teilstromberechnung . . . . .	88
6.5	Wärmepotenzial in QGis berechnen . . . . .	89
6.6	Berechnetes Wärmepotenzial visualisieren . . . . .	91
6.7	Kartengestaltung für Wärmepotenzial . . . . .	96
<b>7</b>	<b>Datenauswertung</b>	<b>99</b>
7.1	Temperaturvergleich der original Messtellen . . . . .	101
7.2	Darstellung des Wärmepotenzials . . . . .	107
7.3	Standorte mit hohem Wärmebedarf . . . . .	120
7.4	Restriktionsgebiete . . . . .	122
7.5	Netzverluste . . . . .	123
7.6	Versorgungsschwankungen und Verteilkapazitäten . . . . .	125
7.7	Wärmepotenzialkarte mit Standortempfehlung . . . . .	126
7.8	Vergleich der Wärmepotenzialkarte mit den Thermalquellen Österreichs . . . . .	128
<b>8</b>	<b>Résumé</b>	<b>129</b>
8.1	Fazit Methodenwahl . . . . .	129
8.2	Fazit Workflow . . . . .	130
8.3	Analyse des Wärmepotenzials . . . . .	136
8.4	Wärmenutzungsanalyse . . . . .	138
8.5	Analyse zu Nutzungsrestriktionen . . . . .	139
8.6	Analyse zu Netzverlusten und Distanzen . . . . .	140
<b>9</b>	<b>Zukunftsablick</b>	<b>140</b>
<b>10</b>	<b>Referenzen, Datenquellen und Anhang</b>	<b>144</b>

## Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

1	Oberflächengewässerwärmepumpen: Faktoren des tatsächlichen Nutzungspotenzials, Stier 2024 . . . . .	7
2	Tabelle, Datenquelle Gesamtgewässernetz - Fließgewässer (Routen) , Umweltbundesamt GmbH 2024 . . . . .	20
3	Tabelle, Datenquelle Gesamtgewässernetz - Basiseinzugsgebiete, Umweltbundesamt GmbH 2024 . . . . .	21
4	Tabelle, Datenquelle Gliederung Österreichs in Gemeinden , Statistik Austria 2024 . . . . .	23
5	Tabelle, Datenquelle Nationalparks, Umweltbundesamt GmbH 2024 . . . . .	23
6	Tabelle, Datenquelle Siedlungseinheiten, Statistik Austria 2024 . . . . .	24
7	CSV in QGIS importieren, Stier 2024 . . . . .	52
8	Messstellen Punktlayer, Stier 2024 . . . . .	53
9	QGIS Anwendung Vektorlayer speichern, Stier 2024 . . . . .	54
10	QGIS Datenquellverwaltung getrennte Texte, Stier 2024 . . . . .	60
11	Ausschnitt der Basiseinzugsgebiete mit Temperatur Interpolation von Dezember 2020, Stier 2024 . . . . .	61
12	QGIS: Routen nach Basiseinzugsgebieten verschneiden, Stier 2024 . . . . .	63
13	QGIS: Interpolationslayer mit Routen verknüpfen, Stier 2024 . . . . .	64
14	Ausschnitt der interpolierten Temperaturen von Dezember 2020 auf den Gewässerrouten, Stier 2024 . . . . .	65
15	Legende der Messpunktdaten und der interpolierten Temperaturlinien, Stier 2024 . . . . .	66
16	Ausschnitt der interpolierten Temperaturen zur visualisierung der Farbgebungsproblematik 1, Stier 2024 . . . . .	67
17	Ausschnitt der interpolierten Temperaturen zur visualisierung der Farbgebungsproblematik 2, Stier 2024 . . . . .	68
18	Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Januar 2020, Stier 2024 . . . . .	69
19	Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Februar 2020, Stier 2024 . . . . .	70
20	Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer März 2020, Stier 2024 . . . . .	71
21	Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer April 2020, Stier 2024 . . . . .	72
22	Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Mai 2020, Stier 2024 . . . . .	73

23	Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Juni 2020, Stier 2024 . . . . .	74
24	Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Juli 2020, Stier 2024 . . . . .	75
25	Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer August 2020, Stier 2024 . . . . .	76
26	Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer September 2020, Stier 2024 . . . . .	77
27	Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Oktober 2020, Stier 2024 . . . . .	78
28	Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer November 2020, Stier 2024 . . . . .	79
29	Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Dezember 2020, Stier 2024 . . . . .	80
30	QGis: Durchflusslayer, Stier 2024 . . . . .	85
31	QGis: Durchflusslayer Verknüpfung mit Basiseinzugsgebieten, Stier 2024 . . . . .	85
32	QGis Anwendung nach Feldwert verknüpfen, Stier 2024 . . . . .	87
33	QGis Anwendung Feldrechner, Stier 2024 . . . . .	90
34	QGis: Interpolierte Temperaturlinien mit Wärmelayer verknüpfen, Stier 2024 . . . . .	92
35	QGis Anwendung: Abfrageerstellung, Stier 2024 . . . . .	94
36	QGis Anwendung Filterfunktion, Stier 2024 . . . . .	95
37	QGis Wärmesymbolisierung, Stier 2024 . . . . .	96
38	QGis Anwendung Beschriftung, Stier 2024 . . . . .	97
39	QGis Anwendung Abfrageerstellung, Stier 2024 . . . . .	98
40	QGis Kartengestaltung, Stier 2024 . . . . .	99
41	Thermal- und Mineralwässer. Vereinfacht nach: Hobiger, G. et al. (2005), © BMLFUW (Ed.): Hydrologischer Atlas Österreichs, GeoSphere Austria 2024 . . . . .	100
42	Temperaturdatenauswertung Vorarlberg, Stier 2024 . . . . .	101
43	Temperaturdatenauswertung Tirol, Stier 2024 . . . . .	102
44	Temperaturdatenauswertung Salzburg, Stier 2024 . . . . .	102
45	Temperaturdatenauswertung Kärnten, Stier 2024 . . . . .	103
46	Temperaturdatenauswertung Steiermark, Stier 2024 . . . . .	103
47	Temperaturdatenauswertung Oberösterreich, Stier 2024 . . . . .	104
48	Temperaturdatenauswertung Niederösterreich, Stier 2024 . . . . .	104
49	Temperaturdatenauswertung Wien, Stier 2024 . . . . .	105
50	Temperaturdatenauswertung Burgenland, Stier 2024 . . . . .	105
51	Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Januar 2020, Stier 2024 . . . . .	108

52	Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Februar 2020, Stier 2024 . . . . .	109
53	Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer März 2020, Stier 2024 . . . . .	110
54	Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer April 2020, Stier 2024 . . . . .	111
55	Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Mai 2020, Stier 2024 . . . . .	112
56	Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Juni 2020, Stier 2024 . . . . .	113
57	Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Juli 2020, Stier 2024 . . . . .	114
58	Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer August 2020, Stier 2024 . . . . .	115
59	Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer September 2020, Stier 2024 . . . . .	116
60	Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Oktober 2020, Stier 2024 . . . . .	117
61	Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer November 2020, Stier 2024 . . . . .	118
62	Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Dezember 2020, Stier 2024 . . . . .	119
63	Bevölkerungsdichte Österreich 2020, Stier 2024 . . . . .	120
64	Austrian Heat Map 2021, Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie . . .	122
65	Nationalparks und Bevölkerungsdichte 2020, Stier 2024 . . . .	124
66	Fernwärmenetze in Österreich 2021, Bundesministerium Kli- maschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Tech- nologie . . . . .	125
67	Wärmepotenzialkarte mit Eignungsstädten, Stier 2024 . . . . .	126
68	Faktoren von Flusswasserwaermepotenzial, Stier 2024 . . . . .	131
69	Layer Übersicht, Stier 2024 . . . . .	133
70	Workflow Temperaturdatena, Stier 2024 . . . . .	134
71	Workflow Schritte, Stier 2024 . . . . .	135

### Kurzfassung

Diese Masterarbeit untersucht die Potenzialanalyse von flusswassergespeisten Wärmepumpen zur Wärmeversorgung in Österreich. Ziel der Arbeit ist es, das regional variierende Potenzial der Nutzung von Oberflächengewässern als Wärmequelle zu analysieren. Die zentrale Forschungsfrage lautet: Mit welchen Methoden können GIS-gestützte Wärmepotenzialkarten erstellt werden, um das regional variierende Potenzial flusswassergespeister Wärmepumpen in österreichischen Fließgewässern zu analysieren? Hierfür wird eine umfassende Wärmepotenzialkarte erstellt, die die Durchflussmenge, Wassertemperatur und den regionalen Wärmebedarf integriert. Temperaturdaten von Messstellen entlang österreichischer Fließgewässer werden mittels der geostatistischen Methode Top-Kriging interpoliert. Diese Temperaturdaten werden mit einem Python-Skript aufbereitet und in QGis kartografisch visualisiert. Durch die Verknüpfung der interpolierten Temperaturdaten mit den Durchflussmengen entsteht eine detaillierte Wärmepotenzialkarte, die eine präzise Analyse der regionalen Nutzungsmöglichkeiten von flusswassergespeisten Wärmepumpen ermöglicht.

### Abstract

This master's thesis explores the potential analysis of river-water heat pumps for heating supply in Austria. The aim of the study is to analyze the regionally varying potential of using surface waters as a heat source. The central research question is: Which methods can be used to create GIS-supported heat potential maps to analyze the regionally varying potential of river-water heat pumps in Austrian watercourses? For this purpose, a comprehensive heat potential map is created, integrating flow rates, water temperature, and regional heat demand. Temperature data from measurement stations along Austrian watercourses are interpolated using the geostatistical method of Top-Kriging. These temperature data are processed with a Python script and cartographically visualized in QGIS. By linking the interpolated temperature data with flow rates, a detailed heat potential map is generated, enabling a precise analysis of the regional utilization possibilities of river-water heat pumps.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Betreuern von AEE Intec und der Universität Wien für die hilfreiche Unterstützung während der Erstellung dieser Masterarbeit bedanken. Weiters möchte ich mich bei meiner Mutter bedanken, die mir diesen Weg ermöglicht hat, bei meinen Cousins für die stetige Ermutigung und bei dem starken Netzwerk an klugen Frauen um mich herum, ohne die ich heute nicht da wäre, wo ich bin.

# 1 Einleitung: Hintergrund, Motivation, Zielsetzung und Struktur der Arbeit

Da ich mich persönlich bereits seit meinem 13. Lebensjahr als Aktivistin für den Klimaschutz einsetze, ist es naheliegend, dass ich auch in meiner universitären und beruflichen Laufbahn den Schwerpunkt auf klimarelevante Wissenschafts- und Wirtschaftsbereiche lege. Neben meinem Bachelor in Geographie und Regionalforschung habe ich den Titel "Climate Reality Leader" bei einem Seminar des ehemaligen US-Vizepräsidenten Al Gore erworben. Mit meiner Masterarbeit einen wissenschaftlichen Beitrag zur Bewältigung der Energiewende zu leisten, ist mir ein wichtiges persönliches Anliegen und motiviert mich sehr, mich den Herausforderungen dieser Arbeit zu stellen. Ziel dieser Arbeit ist es, mithilfe von GIS Methoden geeignete Wärmepumpenstandorte bei fließenden Oberflächengewässern in Österreich zu identifizieren. Im Laufe des Arbeitsprozesses sollen Wärmepotenzionalkarten von Österreich entstehen, die dann als Guide genutzt werden können, um Standorte für den Bau von Wärmepumpensystemen in Fließgewässern österreichweit ausfindig zu machen. Durch die Nutzung von Gewässerwärme würde die Energiewende vorangetrieben und große Mengen an CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden.

## 1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Aufgrund der globalen Klimaerwärmung und der internationalen Ressourcenabhängigkeiten strebt Österreich eine Energiewende an. Im Zuge dessen sollen mit der Wärmewende neue Wege für Heiz- und Kühlprozesse gefunden werden. Während andere erneuerbare Energieträger wie Solar- und Windenergie bereits grundlegend erforscht sind und großflächig genutzt werden, gibt es im Bereich der Wärmepotenziale in Oberflächengewässern noch einige Forschungslücken. Diese Arbeit soll dazu beitragen, den Stand der Forschung aufzuarbeiten und offene Fragen zur Nutzbarkeit für Österreich zu beantworten. Der große Reichtum an Wasserressourcen in Österreich könnte auf eine Korrelation mit großen Wärmeressourcen in ebendiesen Gewässern hindeuten. Ziel dieser Arbeit ist es daher aufzuzeigen, wie das Wärmepotenzial von Oberflächengewässern mit GIS-gestützten Methoden ausfindig gemacht werden kann.

Des Weiteren fokussiert sich diese Arbeit darauf, die bisher thermisch kaum genutzten Wärmeressourcen unserer zahlreichen Gewässer zu visualisieren. Die Wärmeenergie unserer Oberflächengewässer könnte potenziell sowohl zum Heizen im Winter als auch zum Kühlen im Sommer genutzt werden. Für

Kühlungsprozesse gibt es derzeit im Vergleich zu Heizprozessen zwar weniger Bedarf, doch im weiteren Verlauf der globalen Klimaerwärmung könnte sich das Bedarfsverhältnis von Kühl- und Wärmeprozessen durchaus verändern. Bei einem großflächigen Einsatz der Technologie könnten sich zudem die technischen Gegebenheiten der Wärmepumpen noch effizient verbessern, sodass auch der mögliche Einsatz von Wärmepumpen bei Wasserleitungen in Städten untersucht werden könnte.

## 1.2 Arbeitstitel und Forschungsfrage

Arbeitstitel: Methodenwahl zur Temperaturinterpolation von Fließgewässerdaten und daraus folgenden Potenzialanalysen von flusswassergespeisten Wärmepumpen in Österreich

Der Arbeitstitel meiner Masterarbeit lautet "Methodenwahl zur Temperaturinterpolation von Fließgewässerdaten und daraus folgenden Potenzialanalysen von flusswassergespeisten Wärmepumpen in Österreich". Im Fokus der Arbeit steht die Evaluierung verschiedener Interpolationsmethoden zur präzisen Analyse der Temperaturverteilung in Fließgewässern. Diese Analysen sollen als Grundlage dienen, um das Potenzial flusswassergespeicherter Wärmepumpen besser einschätzen zu können. Hierbei werden hydrologische Daten, Umweltfaktoren und technologische Anforderungen berücksichtigt, um das für die Potenzialanalyse am besten geeignete Verfahren zu identifizieren und praxisnah anzuwenden.

Zur Erstellung der Wärmepotenzialkarten kommen GIS-gestützte Methoden zum Einsatz. Diese ermöglichen eine räumliche Darstellung der interpolierten Temperaturdaten und helfen, das Wärmepotenzial in verschiedenen Regionen zu visualisieren. Auf dieser Grundlage können dann fundierte Entscheidungen zur Nutzung von Oberflächengewässern als Wärmequelle für Wärmepumpen getroffen werden.

Anhand der leitenden Forschungsfrage, "Mit welchen Methoden können GIS-gestützte Wärmepotenzialkarten erstellt werden, um das regional variierende Potenzial flusswassergespeicherter Wärmepumpen in österreichischen Fließgewässern zu analysieren?", wird untersucht, welche Interpolationsmethoden und Ansätze am besten geeignet sind, um räumlich differenzierte Wärmepotenzialkarten zu entwickeln. Diese Karten dienen dazu, das Potenzial zur Nutzung von Oberflächengewässern als Wärmequelle für Wärmepumpen auf regionaler Ebene zu erfassen und zu bewerten. Dabei liegt der Fokus auf der Analyse der spezifischen Eigenschaften der österreichischen Fließgewässer, unter Berücksichtigung von hydrologischen Daten, Umweltfaktoren und technologischen Rahmenbedingungen.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein effizientes und praxisnahes Verfahren zu



identifizieren, das eine Analyse des regional variierenden Wärmepotenzials ermöglicht und somit eine fundierte Grundlage für zukünftige Anwendungen bietet. Um die Beantwortung der Hauptforschungsfrage zu unterstützen, werden spezifische Subfragestellungen formuliert, die verschiedene methodische und inhaltliche Aspekte der Potenzialanalyse vertiefen und beleuchten sollen. Subfragestellungen:

1. Mit welcher Datengrundlage kann die Wärmepotenzialkarte für Österreich umgesetzt werden?

Diese Subfragestellung zielt darauf ab, die erforderlichen Datenquellen zu identifizieren, die für die Erstellung einer Wärmepotenzialkarte notwendig sind. Dazu gehören hydrologische Daten, Temperaturmessungen und Umweltinformationen, die zusammen eine fundierte Basis für die Potenzialanalyse bieten.

2. Welche geostatistischen Methoden eignen sich, um Punktdaten von Gewässertemperaturen zu Liniendaten zu interpolieren?

Hier wird untersucht, welche geostatistischen Methoden am besten geeignet sind, um Punktdaten, die an spezifischen Messstellen entlang der Fließgewässer gesammelt wurden, in kontinuierliche Liniendaten zu interpolieren. Dies ist entscheidend, um eine umfassende Wärmepotenzialkarte für ganz Österreich zu erstellen.

3. Wie kann technisch realisierbares Wärmepotenzial aus theoretischem Wärmepotenzial abgeleitet werden?

Diese Subfragestellung befasst sich mit der Unterscheidung zwischen theoretischem und praktisch nutzbarem Wärmepotenzial. Denn nur weil Energie theoretisch vorhanden ist, bedeutet das nicht, dass sie auch praktisch nutzbar ist. Faktoren wie Restriktionen aufgrund von beispielsweise Umweltschutzgebieten können die praktische Umsetzung der Energiegewinnung verhindern. Und auch die Entfernung zum Verbraucher spielt eine entscheidende Rolle, da Energieverluste durch zu weite Transportwege berücksichtigt werden müssen um die technische Umsetzbarkeit und die ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit des Vorhabens zu überprüfen.

### **1.3 Forschungsleitziel**

Diese Arbeit zielt darauf ab, den aktuellen Forschungsstand zur Temperaturinterpolation von Fließgewässerdaten zu erfassen und offene Fragen zur Anwendbarkeit in Österreich zu klären. Der allgemein hohe Wasserreichtum

in Österreich deutet darauf hin, dass in diesen Gewässern ein erhebliches Wärmepotenzial vorhanden sein könnte. Ziel dieser Untersuchung ist es daher, eine geeignete Methode zur Temperaturinterpolation auszuwählen, mit der das Wärmepotenzial der österreichischen Fließgewässer ermittelt werden kann. Diese Methode wird anschließend zur Erstellung einer Wärmepotenzialkarte angewendet, die das regional variierende Potenzial flusswassergespeister Wärmepumpen darstellt. Das Endprodukt der Arbeit sind somit Wärmepotenzialkarten der Oberflächengewässer in Österreich, die als Grundlage für weitere Analysen und Anwendungen genutzt werden können.

Um die tatsächliche Praxistauglichkeit der herausgearbeiteten Gebiete mit hohem Wärmepotenzial zu testen, wird der Karte dann ein zusätzlicher Layer hinzugefügt, der die räumliche Verteilung von Wärmebedarf mit Hilfe von Bevölkerungsdaten darstellt. Dadurch können Überlappungsbereiche dargestellt werden, die sowohl einen hohen Wärmebedarf, als auch ein hohes Wärmepotenzial der Oberflächengewässer aufweisen. Diese können dann weiter analysiert werden, um die Möglichkeiten für den Einsatz von Wärmepumpen zu prüfen. Nach erfolgreicher Umsetzung werden dann zuguterletzt außerdem noch Restriktionsgebiete wie beispielsweise Naturschutzgebiete zur Berücksichtigung von Umweltschutz hinzugefügt.

Diese Arbeit soll die potenzielle Realisierung der Nutzung des Wärmepotenzials aller österreichischen Oberflächengewässer einleiten. Damit hat diese Arbeit nicht nur wissenschaftliche Relevanz, sondern sie zielt auch darauf ab, für die praktische Umsetzung der Wärmepumpennutzung zur Bewältigung der Energiewende genutzt zu werden. Durch die gezielte Analyse und Identifizierung geeigneter Standorte für Oberflächengewässer-Wärmepumpen soll ein Beitrag zur nachhaltigen Energiegewinnung geleistet werden. Dabei werden ausschließlich Fließgewässer und keine stehenden Gewässer herangezogen, um den Umfang der Arbeit zu begrenzen. Die Ergebnisse dieser Arbeit könnten als Grundlage für politische Entscheidungen und Investitionen dienen, um die Energieversorgung in Österreich umweltfreundlicher und effizienter zu gestalten.

In der bereits vorhandenen Literatur finden sich bereits einige methodische Ansätze, die im Folgenden Kapitel vorgestellt werden.

## **1.4 Aufbau und Struktur der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in mehrere Kapitel, die logisch aufeinander aufbauen und Schritt für Schritt durch das Thema der Erstellung einer Wärmepotenzialkarte für fließende Oberflächengewässer in Österreich führen. Im ersten Kapitel "Hintergrund und Motivation und Zielsetzung" wird der Hintergrund der Arbeit erläutert, indem auf die Problemstellung und die

## Oberflächengewässerwärmepumpen: Faktoren des tatsächlichen Nutzungspotentials

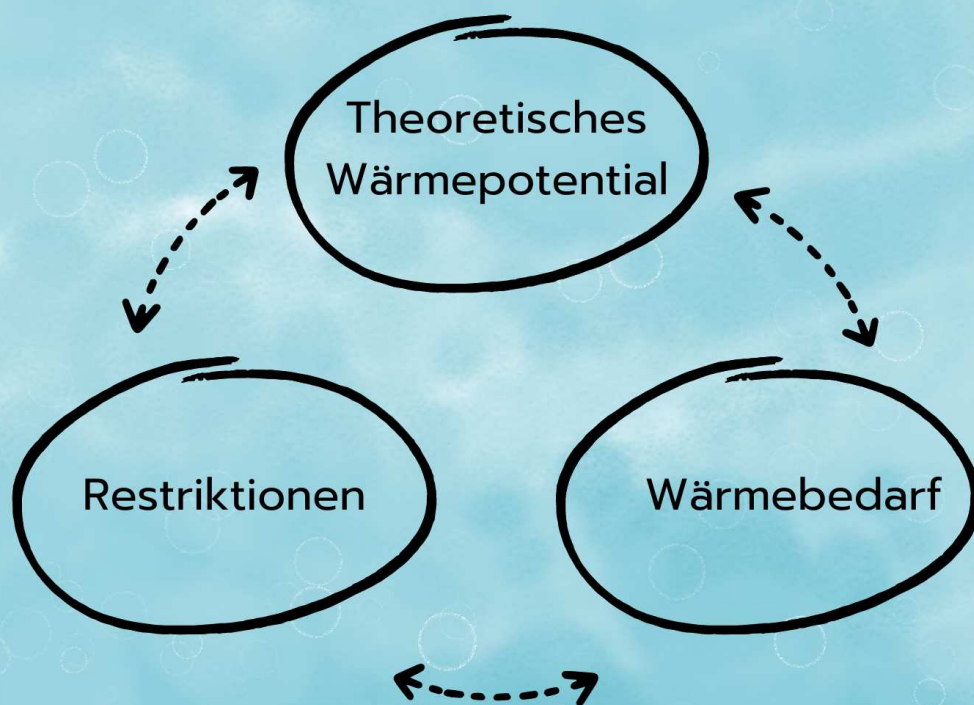


Abbildung 1: Oberflächengewässerwärmepumpen: Faktoren des tatsächlichen Nutzungspotenzials, Stier 2024

Zielsetzung eingegangen wird. Hierbei wird zunächst die Motivation hinter der Forschung dargestellt, bevor die Forschungsfrage und das Forschungsleitziel formuliert werden.

Im zweiten Kapitel "Flusswassergespeiste Wärmepumpen - Stand der Forschung" wird der aktuelle Stand der Forschung in Bezug auf flusswassergespeiste Wärmepumpen beleuchtet. Dieses Kapitel beginnt mit einem Überblick über existierende Ansätze zur Erstellung von Wärmepotenzialkarten in Österreich und behandelt dann zentrale Themen wie den Wärmebedarf und Netzverluste, sowie Erkenntnisse aus Großbritannien. Am Ende des Kapitels wird ein Fazit gezogen, das die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Forschungsstand zusammenfasst. Der Forschungsstand zu den unterschiedlichen Methoden folgt im späteren Verlauf der Arbeit im vierten Kapitel "Interpolationsmethoden - Stand der Forschung".

Das dritte Kapitel "Erstellung einer Wärmepotenzialkarte" ist der methodischen Vorgehensweise der Erstellung der Wärmepotenzialkarte gewidmet. Zunächst wird die Datengrundlage beschrieben, wobei zwischen Wärmepotenzialdaten und Daten von Nutzungs- und Restriktionsgebieten unterschieden wird. In diesem Kapitel wird zudem auf offene Fragen eingegangen und der Innovationsgehalt sowie die Relevanz der Arbeit herausgestellt.

Im vierten Kapitel "Interpolationsmethoden - Stand der Forschung" wird der Stand der Forschung zu Interpolationsmethoden diskutiert. Verschiedene Ansätze zur Interpolation, wie die Lineare Regression und das Kriging, werden analysiert und bewertet. Dabei wird insbesondere auf die Anforderungen und Vorteile der einzelnen Methoden eingegangen.

Das fünfte Kapitel "Erstellung einer Temperaturdatenkarte von Fließgewässern" widmet sich der Erstellung einer Temperaturdatenkarte von Fließgewässern. Hier werden die einzelnen Schritte der Datenaufbereitung beschrieben, von der Verarbeitung von Temperaturdaten mit Python bis hin zur Erstellung einer Karte mit QGIS. Auch die Interpolation der Temperaturdaten und deren kartografische Visualisierung werden in diesem Kapitel thematisiert.

Im sechsten Kapitel "Wärmepotenzialkarte erstellen" erfolgt schließlich die Erstellung der Wärmepotenzialkarte. Hierbei werden die Grundlagen zur Berechnung der Wärmekapazität, der Durchflussraten und der Verknüpfung von Durchfluss und Temperatur beschrieben. Der gesamte Prozess von der Berechnung bis zur Visualisierung des Wärmepotenzials wird detailliert dargestellt, um die Methodik nachvollziehbar zu machen.

Das siebte Kapitel "Datenauswertung" befasst sich mit der Auswertung der Daten. Hier wird ein Vergleich der erhobenen Temperaturdaten vorgenommen, und das Wärmepotenzial in Relation zu Standorten mit hohem Wärmebedarf und Restriktionsgebieten gesetzt. Zudem werden Netzverluste sowie Versorgungsschwankungen und Verteilkapazitäten erläutert.

Abgeschlossen wird die Arbeit im achten Kapitel "Résumé" mit einer ausführlichen Conclusio, in dem die Ergebnisse der Methodenwahl, des Workflows und der Analyse des Wärmepotenzials zusammengefasst werden.

Zuguterletzt wird im neunten Kapitel "Zukunftsaublick" eine Perspektive auf mögliche Weiterentwicklungen und Anwendungsoptionen der Forschung gegeben.

Im zehnten Kapitel "Referenzen, Datenquellen und Anhang" werden die Referenzen aus der Literatur, sowie die Datenquellen und der Anhang bereitgestellt. Im Anhang werden die alle Karten in Originalgröße angehängt, um eine vollständige und detaillierte Einsicht in die Ergebnisse zu ermöglichen.

## 2 Flusswassergespeiste Wärmepumpen - Stand der Forschung

Aufgrund der weltweiten Bedeutung von Oberflächengewässern als erneuerbare Energiequelle gibt es bereits einige wissenschaftliche Arbeiten und Erkenntnisse. In diesem Kapitel werden alle für diese Arbeit relevanten Themen mittels umfassender Literaturanalyse beschrieben. Dazu gehören Wärmepotenzial- und Wärmebedarfskarten, welche die geographische Verteilung und das Potenzial zur Wärmenutzung, sowie den Bedarf aufzeigen. Zudem wird das Prinzip der Nutzung von Oberflächengewässern zur Wärmeerzeugung durch flusswassergespeiste Wärmepumpen analysiert, wobei auch als internationale Beispiel Erkenntnisse aus Großbritannien berücksichtigt werden. Ein weiterer Fokus liegt auf der Identifikation von Restriktionsgebieten, die potenzielle Nutzungsmöglichkeiten einschränken könnten. Dieser Teil der Literaturanalyse bietet eine fundierte Grundlage für die Bearbeitung der Forschungsfrage. Im zweiten Abschnitt der Literaturanalyse, der sich mit der Methodenauswahl zur Standortidentifizierung befasst, werden die verschiedenen GIS-gestützten Methoden detailliert beschrieben. Dieser Teil der Literaturanalyse ist im Kapitel Interpolationsmethoden - Stand der Forschung zu finden, wo die spezifischen Techniken und Werkzeuge, die zur Durchführung der Standortanalysen verwendet werden, eingehend erläutert werden. Für die Standortanalysen ist es entscheidend die unterschiedlichen Daten zu Wärmepotenzial, Wärmebedarf, hydrologischen Gegebenheiten und Restriktionsgebieten zu verknüpfen, geographisch zu verorten und zu visualisieren.

### 2.1 Ansätze für eine österreichische Wärmepotenzialkarte

Generell gibt es bisher keine Umsetzung, lediglich Ansätze für eine Wärmepotenzialkarte der Oberflächengewässer auf Länderebene. Die Forschungsinitiative für nachhaltige Energielösungen "Green Energy Lab" hat jedoch angefangen an einem Ansatz zur Ermittlung und Darstellung des Wärmeenergiepotentials der Oberflächengewässer zu arbeiten. Das Wärmeenergie-Potenzial soll zur Wärmeversorgung durch Einspeisung mittels Wärmepumpen in lokale Netze und nicht direkt zu Einzelgebäuden genutzt werden, um zur Energieversorgung großer Gebiete beizutragen. Die wichtigsten physikalischen Größen um das Wärmepotenzial zu berechnen sind die Durchflussrate und die Wassertemperatur. Die durch Messstellen erhobenen Werte unterliegen durch unterschiedliche Zeitintervalle und vielzählige Umwelteinflüsse

großen Schwankungen, die die Aussagekraft der Daten beeinträchtigen. Um eine bessere Vergleichbarkeit herzustellen, wird eine Berechnung eines monatlichen Medianwertes der Messpunkte empfohlen. Die Messwerte sind räumlich durch die Aufnahme mit einem Punkt verortet, sollten aber einem ganzen Flussabschnitt zwischen Messstationen zugewiesen werden. (Green Energy Lab, 2015)

## 2.2 Wärmebedarf und Netzverluste

Die Nutzbarkeit von Wärmepotenzialen aus fließenden Oberflächengewässern hängt stark von der Entfernung zu einer geeigneten Wärmesenke oder dem Vorliegen eines entsprechenden Wärmebedarfs ab. Denn Gebiete, die weit von potenziellen Verbrauchern entfernt liegen, sind aufgrund der langen Transportwege für die Wärme nicht sinnvoll nutzbar. Der Transport von elektrischer Energie durch das Netz wird durch die Spannung ermöglicht, die von Energieerzeugungsanlagen mit Generatoren erzeugt wird. Allerdings treten in realen Systemen immer Verluste auf, die im Gesamtsystem berücksichtigt und bei der Erzeugung eingeplant werden müssen. Das Beispiel von Offshore-Windparks und deren Netzanbindung zeigt als Vergleich mit seinen großen Entfernungen durch das Meer, dass auch aufwändige Energieübertragungen wegen großer Distanzen generell möglich sind. Der Aufwand hängt hier von der Entfernung zur Küste und der installierten Leistung des Windparks ab. In Deutschland beträgt die durchschnittliche Entfernung der Offshore-Windparks zur Küste etwa 45 km. Solche Entfernungen erfordern eine komplexe Netzinfrastuktur, doch sie sind möglich. (Kaltschmitt et al., 2020)

Stromtransport ist nicht gleich Wärmetransport und Energieverbrauch ist nicht gleich Wärmebedarf, jedoch zeigt dieses Beispiel, dass Herausforderungen von Netzverlusten generell durch große Entfernungen gemeistert werden können. Somit können sicher auch flusswassergespeiste Wärmepumpen, trotz der potenziellen Verluste durch den Transport der Energie, durch entsprechende Infrastruktur und Planung effektiv eingesetzt werden. Um dafür die tatsächlich realisierbaren Wärmepotenziale aus Oberflächengewässern zu ermitteln, ist es wichtig, den räumlich aufgelösten Wärmebedarf zu kennen und dessen örtliche Verteilung mit der des technischen Wärmepotenzials direkt anhand der jeweils entstandenen Karten zu vergleichen. (Julian, 2023)

Räumlich gesehen zeigt sich, dass der Energieverbrauch in Städten höher ist als in ländlichen Gebieten. Der Energieverbrauch in urbanen Gebieten ist aufgrund der höheren Bevölkerungsdichte und der damit verbundenen Prozesse deutlich höher. Urbanisierte Bereiche haben mehr Gebäude, für die es Energie für Kühlung und Beheizung benötigt, was den Gesamtenergiever-

brauch in diesen Gebieten im Vergleich zu weniger dicht besiedelten Gebieten erhöht. (Julian, 2023)

### **2.3 Erkenntnisse der Wärmenutzung von Oberflächengewässern in Großbritannien**

Das britische "Department of Energy and Climate Change" hat mit der 'National Heat Map: Water source heat map layer' eine nationale Karte mit einem Layer für Oberflächengewässerswärmeressourcen erstellt. Die Karte gibt einen Überblick über das Potenzial von Wärmepumpen in Seen, Flüssen und den Küstengebieten des Atlantischen Ozeans. Für die Studie wurden bereits bestehende Datensätze und Methoden verwendet, um herauszufinden, welche Umweltfaktoren die Installation und Nutzung von Wärmepumpen erschweren und welche Standorte das größte Potenzial für den Einsatz von Wärmepumpen aufweisen. (Department of Energy & Climate Change, 2015)

Aus dem Projekt konnten sieben wichtige Erkenntnisse zur Wärmeengewinnung aus Oberflächengewässern gezogen werden:

1. Die Gesamtwärmekapazität von Fließgewässern ist stark proportional zur Durchflussmenge des jeweiligen Gewässers. Da die meisten Ballungsräume in der Nähe großer Flüsse liegen, eignen sich viele Großstädte für den Anschluss an ein dort potenzielles Fernwärmenetz.
2. Ein Vergleich mit den Ergebnissen der Vorgängerstudie zeigt deutliche Unterschiede. Im Ansatz dieser Studie wurden kleine und große Städte gleich gewichtet, so dass es mehr Kleinstädte an großen Flüssen gibt.
3. Die gesamte Wärmekapazität der Flüsse in Großbritannien wird auf ca. 6 GW geschätzt.
4. Die Studie zeigt, dass Städte mit einem Wärmebedarf von weniger als 500 GWh pro Jahr ihren gesamten Wärmebedarf durch die thermische Energie eines nahe gelegenen Flusses decken können, sofern dieser in geeigneter geographischer Entfernung liegt.
5. Sowohl die Strömung als auch die niedrigen Temperaturen in Kanälen begrenzen die Wärmekapazität im Vergleich zu Flüssen. Dennoch gibt es Orte, an denen das Kanalnetz im Vergleich zu den lokalen Flüssen der größere Wasserkörper ist und daher potenziell die lokal effizientere Wärmequelle sein kann.



6. Die gesamte Wärmekapazität von Kanälen in Großbritannien wird auf ca. 84MW geschätzt.
7. Mündungs- und Küstengebiete eignen sich ebenfalls gut für die Gewinnung von Wärmeenergie. Aufgrund des salzhaltigen Wassers findet die Eiskristallbildung erst bei niedrigeren Wassertemperaturen statt, wodurch ein größeres Zeitfenster für die Wärmegewinnung zur Verfügung steht.

(Department of Energy & Climate Change, 2015)

Doch auch limitierende Faktoren der Wärmegewinnung von Oberflächengewässern wurden erörtert:

1. Auch wenn verschiedene limitierende Faktoren in der Studie berücksichtigt wurden, sollte vor der tatsächlichen Umsetzung einer Wärmepumpenanlage eine weitere Machbarkeitsstudie für den Standort durchgeführt werden.
2. Da die Entnahme und Wiedereinleitung von Wasser in offenen Kreislaufsystemen in der Regel nicht verbrauchsabhängig ist, sollte die Belastung der Wasserressourcen durch den Einsatz von installierten Wärmepumpen in der Regel nicht beeinflusst werden. Sollten allerdings große Durchflussmengen zur Entnahme und Wiedereinleitung genutzt werden, sollten auch hier lokale Faktoren berücksichtigt werden.
3. Die Haupteinschränkung bei der Wärmegewinnung aus Gewässern ist die Temperaturgrenze und der Wärmeübertragung. In dieser Studie lagen die mittleren Wintertemperaturen zwischen 4°C und 8°C. Bei einem solch geringen Temperaturen ist die Effizienz der Wärmepumpe begrenzt.
4. Aufgrund der im Winter um den Mittelwert schwankenden Wassertemperaturen bestehen Unsicherheiten bezüglich der Zuverlässigkeit der Anwendung. Lokale Temperaturmessungen und entsprechende Analysen sollten durchgeführt werden, um diese Schwankungen nachvollziehen zu können.
5. Die Studie basiert auf Schätzungen des natürlichen Winterabflusses, aber viele Gewässer können zusätzlich durch unnatürliche Entnahmen

und Einleitungen beeinflusst werden, die sowohl den Abfluss als auch die Temperatur potenziell verändern können.

(Department of Energy & Climate Change, 2015)

Die Literatur zum Beispiel Großbritanniens erweist sich als äußerst aufschlussreich und bietet wertvolle Einblicke, die auch in Österreich vielversprechende Ergebnisse erwarten lassen. Obwohl nicht alle Aspekte direkt vergleichbar sind - wie beispielsweise das Wärmepotenzial von Küstengebieten, da Österreich keine Küstenlinie besitzt – werden dennoch relevante Hinweise gegeben, wie beispielsweise die Problematik der Vereisung in Wärmepumpen, die in Küstenregionen Großbritanniens durch den Salzgehalt verhindert wird. Solche Erkenntnisse können theoretisch auf ähnliche Herausforderungen in Österreich angewendet werden, um innovative und effiziente Lösungen zu entwickeln. Insgesamt zeigt die Analyse Großbritanniens, dass es zahlreiche übertragbare Ansätze und Techniken gibt, die zur Optimierung der Wärmenutzung in österreichischen Fließgewässern beitragen könnten.

## **2.4 Flusswassergespeiste Wärmepumpen in Österreich**

Die "Techno-ökonomische Analyse der Integration von flusswassergespeisten Großwärmepumpen in FW-Netzten" gibt einen Überblick, inwiefern Wärmeenergie von Flüssen mit Hilfe von Großwärmepumpen in Fernwärmenetze eingespeist werden können. Bei Bezugnahme zu den Rahmenbedingungen wird auf die jahreszeitlichen Veränderungen, Kondensationstemperaturen und Teilstrom, eingegangen. Durch Vereisungen am Verdampfer war bei den Testanalysen im Winter technisch leider kein Betrieb möglich. Generell sind jedoch auch Flüsse in alpinen Regionen als Wärmequelle für Wärmepumpen nutzbar. Das Vereisungspotenzial von Verdampfern erfordert jedoch innovative Lösungen. Für solche Ausfallszenarien wurde ein Vergleich von Backup-Systemen von Gaskesseln und Elektrodenkesseln aufgestellt. Auch die Umweltaspekte der Technik wurden untersucht. Alle Szenarien der Analyse haben ergeben, dass mit der Methode CO<sub>2</sub> Emissionen eingespart werden können. Der Einsatz von Wärmepumpen könnte einen signifikanten Beitrag zur CO<sub>2</sub> Reduktion leisten. Auch der Faktor der Wirtschaftlichkeit des Systems wurde aufgeführt. Kosteneinsparungen wurden in ihrer zeitlichen Entwicklung mit Blick auf Investitionskosten und Betriebskosten untersucht. Ob Wärmepumpen wirtschaftlich sinnvoll sind oder nicht, ist vor allem von der Entwicklung der Strom- und Gaspreise abhängig. Generell ist die Kosteneffizienz von Wärmepumpen jedoch spätestens nach 4 Jahren bereits besser, als

die von Elektrodenkesseln. (Fleckl et al., 2015)

## 2.5 Restriktionsgebiete

Abgesehen von den physikalischen Größen für die technische Umsetzbarkeit für Energiegewinnung aus Fließgewässern, spielen auch andere Faktoren für den Einsatz von Wärmepumpen in Oberflächengewässern eine Rolle, nämlich Restriktionsgebiete wie beispielsweise Umweltschutzgebiete, Gefahrenzonen oder Fischereikataster. Es bedarf hierhingehend einer genaueren Analyse für die unterschiedlichen Faktoren. Darausfolgend sollte ein zusätzlichen Layer für das Endprodukt dieser Arbeit, die Wärmepotenzialkarte, erstellt werden, der die Restriktionsgebiete darstellt. Dieser Layer könnte durch Zuweisungen wie "keine Auswirkung", "Nutzung eingeschränkt" und "Ausschluss" kategorisiert werden. (Green Energy Lab, 2015)

## 2.6 Fazit aus dem Forschungsstand

Die vorhandene Literatur zeigt, dass die Nutzung von Oberflächengewässern für Wärmepumpen für Österreich vielversprechende Möglichkeiten bietet. Während es bisher keine umfassende Wärmepotenzialkarte für österreichische Oberflächengewässer gibt, existieren bereits erste methodische Ansätze, die weiterentwickelt werden können. (Department of Energy & Climate Change, 2015)

Das internationale Beispiel Großbritanniens liefert wertvolle Erkenntnisse zur Berechnung und Nutzung von Wärmepotenzialen aus Oberflächengewässern. Die analysierte Studie zeigt, dass die Gesamtwärmekapazität von Fließgewässern stark proportional zur Durchflussmenge des jeweiligen Gewässers ist. Viele Ballungsräume, die in der Nähe großer Flüsse liegen, eignen sich daher gut für den Anschluss an potenzielle Fernwärmenetze. Herausforderungen wie Temperaturschwankungen und Vereisungsrisiken müssen jedoch berücksichtigt werden. (Department of Energy & Climate Change, 2015)

Studien in Österreich haben gezeigt, dass auch alpine Flüsse als Wärmequelle für Wärmepumpen genutzt werden können. Allerdings erfordert das Vereisungspotenzial der Verdampfer innovative Lösungen, um einen zuverlässigen Betrieb im Winter sicherzustellen. Dabei wurden verschiedene Backup-Systeme wie Gaskessel und Elektrodenkessel verglichen, um die Versorgungssicherheit zu erhöhen. Die Analyse ergab, dass Wärmepumpen einen erheblichen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion leisten können und nach spätestens vier Jahren kosteneffizienter sind als Elektrodenkessel. (Fleckl et al., 2015)

Die Berechnung von Wärmepotenzialen hängt maßgeblich von der Durchflussrate und der Wassertemperatur ab. Zudem ist die Integration von Wär-

mebedarfskarten essenziell, um Gebiete mit hohem Wärmebedarf und hohem Wärmepotenzial zu identifizieren und effizient zu nutzen. (Department of Energy & Climate Change, 2015)

Netzverluste durch lange Transportwege müssen durch eine gut geplante Infrastruktur minimiert werden. Das Beispiel der Offshore-Windparks zeigt, dass auch aufwändige Energieübertragungen über große Entfernungen möglich sind, was für flusswassergespeiste Wärmepumpen in Österreich ähnliche Implikationen hat. (Kaltschmitt et al., 2020)

Ein weiterer wichtiger Aspekt sind Restriktionsgebiete wie Umwelt- und Naturschutzgebiete, Gefahrenzonen sowie Fischereikarten. Diese müssen in die Planungen einbezogen werden, um potenzielle Nutzungskonflikte zu vermeiden und die Nachhaltigkeit zu gewährleisten. Ein zusätzlicher Layer in der Wärmepotenzialkarte, der diese Restriktionsgebiete darstellt, ist daher notwendig. (Green Energy Lab, 2015)

Die vorhandene Literatur zum Wärmepotenzial von Oberflächengewässern weist auf ein großes Potenzial für den wirtschaftlichen Einsatz von Wärmepumpen hin. Die vorliegende Masterarbeit soll aufzeigen, wie dieses Potenzial durch die Anwendung von GIS-Methoden spezifisch für Österreich berechnet und dargestellt werden kann. Die Ergebnisse der Arbeit sollen als Grundlage für politische Entscheidungen und Investitionen in die Energieinfrastruktur dienen. Die Umsetzung der Wärmepotenzialkarte könnte einen signifikanten Beitrag zur nachhaltigen Energieversorgung und zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen in Österreich leisten, um die Energiewende mit regionalen, ressourcenschonenden, umweltfreundlichen und risikoarmen Methoden voranzutreiben.

## 3 Erstellung einer Wärmepotenzialkarte

In diesem Kapitel wird zunächst die Vorgehensweise zur Erstellung der Wärmepotenzialkarte anhand eines strukturierten Plans vorerst grob beschrieben. Im zweiten Abschnitt wird dann die verfügbare Datengrundlage vorgestellt, die es für die Umsetzung braucht und die die Basis für alle Analysen und Karten bildet und somit die wissenschaftliche Fundierung des Projekts sicherstellt. Die Daten umfassen hydrologische Messungen, Temperaturaufzeichnungen und Umweltinformationen. Die Qualität und Genauigkeit dieser Daten sind entscheidend für das daraus entstehende Ergebnis dieser Arbeit.

### 3.1 Vorgehensweise

Um die Erstellung der Wärmepotenzialkarte strukturiert anzugehen, wird eine aufeinander aufbauende Vorgehensweise angewendet. Diese umfasst sowohl technische als auch analytische Schritte, die alle auf die effiziente Nutzung der Wasserwärme abzielen.

1. Grundkarte erstellen: Zunächst werden die Bundesländer und das Fließgewässernetz in QGIS geladen. Diese Grundkarte bildet die Basis für die weiteren Analysen.
2. Recherche für Punktinterpolation: Der nächste Schritt beinhaltet die Aufbereitung der Daten. Doch vorher bedarf es einer umfassenden Literaturrecherche, um eine geeignete Methode für die Interpolation der Temperaturmesspunktdaten zu finden. Diese Daten müssen in Liniendaten des bereits erstellten Fließgewässernetzes umgewandelt werden. Dies stellt eine der größten technischen Herausforderungen dar und wird durch den Vergleich unterschiedlicher geostatistischer Verfahren gelöst.
3. Anwendung des evaluierten geostatistischen Verfahrens: Nachdem verschiedene geostatistische Verfahren verglichen wurden, wird das am besten geeignete Verfahren ausgewählt und angewendet. Die Temperaturmessdaten werden dafür in ein geeignetes Format gebracht, um sie mit dem Fließgewässernetz zu verknüpfen.
4. Interpolierte Daten in GIS öffnen: Die interpolierten Daten werden in einem GIS geöffnet und der Grundkarte hinzugefügt. Für jeden Monat wird ein separater Layer erstellt, um saisonale Schwankungen der Wassertemperaturen abbilden zu können.

5. Durchflussdaten der Karte hinzufügen: Anschließend werden Durchflussdaten zur Karte hinzugefügt. Diese Daten sind entscheidend für die Berechnung des Wärmepotenzials.
6. Erstellung der Wärmepotenzialkarten: Mit Hilfe des Field Calculators im GIS werden die monatlichen Wärmepotenzialkarten erstellt. Dies erfolgt durch die Anwendung der Wärmeformel unter Berücksichtigung der Durchflussdaten.
7. Monatliche Wärmepotenzialkarten filtern: Für die fertige Wärmekarte werden die einzelnen Wärmepotenzial-Layer monatlich gefiltert. Das Ergebnis sind zwölf detaillierte Karten, die das Wärmepotenzial für jeden Monat des Jahres darstellen.
8. Wärmebedarfslayer erstellen: Parallel dazu wird ein Wärmebedarfs-layer durch die Bevölkerungsdichte erstellt, um die Gebiete mit dem höchsten Wärmebedarf zu identifizieren und somit die Eignungszonen für die Installation von Wärmepumpen zu ermitteln.
9. Ermittlung von Ausschlusszonen: Restriktionslayer werden erstellt, um Ausschlusszonen wie Umweltschutzgebiete oder andere Restriktionsgebiete zu identifizieren. Diese Zonen müssen bei der Planung der Wärmepumpen-standorte berücksichtigt werden.
10. Darstellung der Ergebnisse in einer Karte: Abschließend werden alle Ergebnisse in einem GIS visualisiert. Dies ermöglicht eine umfassende Darstellung der Wärmepotenzialkarten, Wärmebedarfslayer und Restriktionslayer, um die geeignetsten Standorte für Oberflächenwasser-Wärmepumpen in österreichischen Fließgewässern zu identifizieren und darzustellen.

Für die Arbeit wird ein geostatistisches Verfahren gesucht, um Temperaturmessdaten entlang des österreichischen Fließgewässernetzes zu verknüpfen. Die verfügbaren Temperaturdaten sind punkthaft verortet und auf Monatsbasis vorhanden. Die Vorgehensweise gliedert sich in mehrere Schritte.

Zu Beginn werden unterschiedliche Methoden recherchiert und miteinander verglichen. Im Anschluss wird das Verfahren, welches am besten im Methodenvergleich abschneidet, gewählt und angewendet.

Dafür werden zunächst die vorhandenen Temperaturdaten mit den entsprechenden Durchflussdaten kombiniert, um die Wärmeenergie entlang des Fließgewässernetzes zu berechnen. Es ist wichtig, die Monatsbasis beizubehalten, um saisonale Veränderungen zu erörtern.

Schließlich werden Eignungszonen definiert und dabei der jeweils vorliegende Wärmebedarf berücksichtigt. So sollen Gebiete identifiziert werden, in denen die Nutzung der Wärmeenergie aus den Fließgewässern besonders vielversprechend wäre.

Anschließend werden technisch realisierbare Potenziale mittels Wärmepumpe untersucht. Mithilfe einer geeigneten Formel soll berechnet werden, wie viel Wärmeenergie und Leistung rein technisch aus den Gewässern mittels Wärmepumpe entzogen werden könnte.

Durch die Erarbeitung eines GIS-Workflows soll eine Anleitung zur Wärmepotenzialberechnung von Oberflächengewässern geschaffen werden. Der Workflow umfasst die Datengrundlagen, Datenverarbeitung und die entsprechende Analyse, bei der verschiedene GIS-Methoden angewendet werden, um das Wärmepotenzial der Oberflächengewässer zu berechnen. Um die gewonnenen Erkenntnisse der Analysen zu veranschaulichen, steht am Schluss des Workflows die Erstellung von Karten, die die Ergebnisse visualisieren.

## 3.2 Datengrundlage

In diesem Kapitel wird zunächst die Datengrundlage für das Wärmepotenzials beschrieben. Dazu gehören das Flussnetz, die Durchflussraten und Temperaturmesspunkte, die notwendig sind, um das Wärmepotenzial der österreichischen Fließgewässer zu bestimmen und deren regionale Nutzbarkeit zu überprüfen. Im zweiten Teil wird die Datengrundlage für die Nutzungsgebiete vorgestellt. Hier werden Daten zum Wärmebedarf in verschiedenen Regionen sowie Informationen zu Naturschutzgebieten und anderen Restriktionszonen zusammengestellt. Diese Daten sind entscheidend, um geeignete Standorte für Wärmepumpen zu identifizieren und die praktische Umsetzbarkeit sowie Umweltverträglichkeit zu überprüfen.

Generell werden für diese Arbeit Daten aus dem Jahr 2020 verwendet, da sie eine konsistente und aktuelle Datenbasis bieten, die für wissenschaftliche Analysen unerlässlich ist. Die Auswahl eines einheitlichen Datensatzes aus einem einzigen Jahr gewährleistet, dass alle Datenpunkte unter ähnlichen Bedingungen erhoben wurden, was die Vergleichbarkeit und Validität der Ergebnisse erhöht. Zudem sind die Daten aus dem Jahr 2020 hinreichend aktuell, um relevante und zeitgemäße Rückschlüsse ziehen zu können, während gleichzeitig ausreichend Zeit zur Datenaufbereitung und -validierung vergangen ist.

Da sich die Arbeit primär auf die Methodenwahl zur Analyse und Verarbeitung der Daten konzentriert, ist das spezifische Jahr an sich nicht von zentraler Bedeutung. Vielmehr steht die Wahl und Anwendung der methodischen Ansätze im Vordergrund. Ein Vergleich mehrerer Jahre wäre sicherlich in-

Datenverantwortliche Stelle	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML)
Veröffentlichende Stelle	Umweltbundesamt GmbH
Lizenz	Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)
Lizenztitel	Datenquelle: Umweltbundesamt GmbH
Attributbeschreibung	KURZRID: Kurzbezeichnung Route (numerisch), NAME: Name Route (gebildet aus den Namen der Gewässern, getrennt durch Komma), GEW_KAT: Größenkategorie WRRL - Routen, LAENGE_KM: Länge Route in km (berechnet aus GIS-Längen), BUNDESL: Betroffene Bundesländer (Kurzbezeichnungen, durch Komma getrennt), FGE: Name Flussgebietseinheit, RICHTL: Klassifikation Richtlinie, AUSL_ANT: Kennzeichnung grenzüberschreitender Routen bzw. Routen im Ausland,
	GRENZUEBER (bis v16): Kennzeichnung grenzüberschreitender Routen, HAUPTNEBEN: Kennzeichnung Haupt- und Nebenstrang, VERSION: Versionsbezeichnung GGN
Geographische Abdeckung/Lage	Österreich
Geographische Ausdehnung	WGS84: POLYGON (17.16639 49.01875 9.53357 46.40749)
Zeitliche Ausdehnung (Anfang)	31. Januar 2020, 01:00 (UTC+01:00)
Aktualisierungszyklus	jährlich
Datenqualität/Herkunft	Hersteller: Umweltbundesamt GmbH im Auftrag des BML, Sektion I, Abteilung 2; Produktionsablauf: Übernahme aus Länderdaten; Zusammenführung und Vervollständigung der Attributierung
Bezeichnung der Metadatenstruktur	OGD Austria Metadata 2.4
Sprache des Metadatensatzes	ger
Character Set Code des Metadatensatzes	utf8
Eindeutiger Identifikator	c2287ccb-f44c-48cd-bf7c-ac107b771246
Menschenlesbare URL	<a href="https://www.data.gv.at/katalog/de/dataset/gesamtwassernetzfließgewässerrouten">https://www.data.gv.at/katalog/de/dataset/gesamtwassernetzfließgewässerrouten</a>

Abbildung 2: Tabelle, Datenquelle Gesamtwässernetz - Fließgewässer (Routen) , Umweltbundesamt GmbH 2024

terressnt, jedoch in diesem Kontext weniger zielführend, da es primär darum geht, die Effektivität und Anwendbarkeit der gewählten Methoden anhand eines konsistenten Datensatzes zu demonstrieren.

### 3.2.1 Wärmepotenzialdaten

Gewässernetz:

Die Daten der Fließgewässer "Routen" des Gesamtwässernetzes bilden die Datengrundlage für das Fließgewässernetz. Die Datenverantwortung liegt beim Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML). Die Veröffentlichung der Daten erfolgte durch die Umweltbundesamt GmbH. Die Daten umfassen mehrere spezifische Attribute. KURZRID ist die Kurzbezeichnung der Route (numerisch), NAME bezeichnet den Namen der Route, der aus den Namen der Gewässer gebildet wird und durch Kommas getrennt ist. GEW\_KAT gibt die Größenkategorie gemäß der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) an, LAENGE\_KM bezeichnet die Länge der Route in Kilometern, berechnet aus GIS-Längen. BUNDESL listet die betroffenen Bundesländer in Kurzbezeichnungen, getrennt durch Kommas, auf. FGE steht für den Namen der Flussgebietseinheit, RICHTL ist die Klassifikation nach Richtlinie, AUSL\_ANT kennzeichnet grenzüberschreitende Routen bzw. Routen im Ausland. HAUPTNEBEN unterscheidet zwischen Haupt- und Nebenstrang, und VERSION gibt die Versionsbezeichnung



Datenverantwortliche Stelle	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML)
Veröffentlichende Stelle	Umweltbundesamt GmbH
Lizenz	Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)
Lizenztitel	Datenquelle Umweltbundesamt GmbH
Attributbeschreibung	HYDROID, HZBCODE, ABSCHNITT, FLAECHEKM2, GEWAESSER, FGE, HZBFG, VERSION
Geographische Abdeckung/Lage	Österreich
Geographische Ausdehnung	WGS84: POLYGON (17.16639 49.01875 9.53357 46.40749)
Zeitliche Ausdehnung (Anfang)	31. Januar 2020, 01:00 (UTC+01:00)
Aktualisierungszyklus	jährlich
Datenqualität/Herkunft	Umweltbundesamt GmbH im Auftrag des BML
Bezeichnung der Metadatenstruktur	OGD Austria Metadata 2.4
Sprache des Metadatensatzes	deutsch
Character Set Code des Metadatensatzes	utf8
Eindeutiger Identifikator	13671fcf-a8ed-4f4b-91f1-74a7a01cca22
Menschenlesbare URL	<a href="https://www.data.gv.at/katalog/de/dataset/gesamtgewassernetzbasisbezugsgebiete">https://www.data.gv.at/katalog/de/dataset/gesamtgewassernetzbasisbezugsgebiete</a>

Abbildung 3: Tabelle, Datenquelle Gesamtgewässernetz - Basisbezugsgebiete, Umweltbundesamt GmbH 2024

des Gesamtgewässernetzes an. Geographisch decken die Daten das Gebiet von ganz Österreich ab. Die zeitliche Abdeckung der Daten beginnt am 31. Januar 2020 und die Daten werden jährlich aktualisiert. (Bundesministerium Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft, 2020)

Basisbezugsgebiete:

Für unterschiedliche Funktionen im Gesamtprojekt dieser Masterarbeit wurden die Gesamtgewässernetz-Basisbezugsgebiete zur Datengrundlage hinzugezogen. Die Datenverantwortung liegt beim Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML). Die Veröffentlichung der Daten erfolgte durch die Umweltbundesamt GmbH. Die Daten umfassen mehrere spezifische Attribute. HYDROID ist die eindeutige ID des jeweiligen Basisbezugsgebiets, HZBCODE steht für die Kodierung des Einzugsgebiets, ABSCHNITT bezeichnet den Namen des Gewässerabschnitts (HZB), FLAECHEKM2 gibt die Fläche des Basisbezugsgebiets in Quadratkilometern an, GEWAESSER nennt den Namen des Hauptgewässers (HZB), FGE steht für den Namen der Flussgebietseinheit, HZBFG ist der Name des HZB-Flussgebiets und VERSION bezeichnet die Versionsbezeichnung des Gesamtgewässernetzes/Basisbezugsgebiets. Geographisch decken die Daten das Gebiet von ganz Österreich ab. Die zeitliche Abdeckung der Daten beginnt am 31. Januar 2020 und die Daten werden jährlich aktualisiert. (Bundesministerium Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft, 2020)

Gewässertemperaturmesspunkte: Der Hydrographische Dienst Österreichs be-

treibt ein umfassendes Netz zur Beobachtung wichtiger Wasserkreislaufkomponenten, um nachhaltige wasserwirtschaftliche Planungen zu unterstützen. Messdaten werden über lange Zeiträume gesammelt, um Veränderungen und Zustände zu analysieren, insbesondere im Hinblick auf den Klimawandel. Die Abteilung IV/4 im BMLFUW sammelt diese Daten und veröffentlicht sie in Berichten und online. Seit 2007 bietet die eHYD-Plattform Zugang zu hydrographischen Informationen. Auch Temperaturdaten von 210 Messstellen der Oberflächengewässer sind hier frei verfügbar. In dem zum Download verfügbaren Ordner befinden sich die Monatsmittelwerte der Wassertemperatur im CSV-Format, allerdings in 322 einzelnen Dateien. Zur weiteren Verwendung müssen die Daten deshalb erst zu einer übersichtlicheren und kompakteren Form in eine einzelne Datei verknüpft, gefiltert und aufbereitet werden. (Bundesministerium Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft, 2024)

Durchfluss:

Im Gegensatz zu den Gewässertemperaturdaten, liegen die mittleren Jahresabflüsse bereits interpoliert als Shape-File vor. Zur Berechnung des technisch-wirtschaftlichen Potenzials für Wasserkraft, abzüglich besonders schutzwürdiger Strecken, wurde die Methode der Pöyry-Studie von 2018 verwendet. Der Ansatz der Studie beinhaltete die Abziehung des aktuellen Kraftwerksbestands und des Abflusslinienpotenzials der schutzwürdigen Strecken vom gesamten Abflusslinienpotenzial. Das Ergebnis wurde mit den technisch-wirtschaftlichen Faktoren der Teileinzugsgebiete multipliziert, um das Restpotenzial zu berechnen. Für die wirtschaftliche Berechnung wurden vom modellierten Abflusslinienpotenzial die Potenziale der schutzwürdigen Strecken und die Potenziale bestehender Anlagen abgezogen. In Fällen, in denen die Summe der Potenziale die Abflusslinienpotenziale der Teileinzugsgebiete überstieg, wurde das Restpotenzial auf null gesetzt, um negative Werte zu vermeiden. (Parajka et al., 2015)

### **3.2.2 Daten von Nutzungs- und Restriktionsgebieten**

Gliederung Österreichs in Gemeinden:

Die Gliederung Österreichs in Gemeinden ist ein Shape-File, das in diesem Projekt verwendet werden wird, um die Bevölkerungszahlen kartografisch zu visualisieren, welche separat als CSV-Datei zur Verfügung stehen. Außerdem werden mit diesen Daten auch die Hauptstädte der Bundesländer in den entstehenden Karten visualisiert werden, um Orientierung zu geben und zusätzlich zur Bevölkerungsdichte auf Gebiete mit hoher Wärmenachfrage hinzu-

Datenverantwortliche Stelle	Statistik Austria, Guglgasse 13, 1110 Wien, Austria
Veröffentlichende Stelle	Statistik Austria
Lizenz	cc-by
Lizenztitel	Datenquelle: Statistik Austria - data.statistik.gv.at
Attributbeschreibung	ID:Gemeindecode;NAME:Gemeindenname
Zeitliche Ausdehnung (Anfang)	1. Januar 2019, 09:00 (UTC+01:00)
Aktualisierungszyklus	nach Bedarf
Bezeichnung der Metadatenstruktur	OGD Austria Metadata 2.3
Sprache des Metadatensatzes	ger
Character Set Code des Metadatensatzes	utf8
Titel und Beschreibung Englisch	Municipalities
Eindeutiger Identifikator	566c99be-b436-365e-af4f-27be6c536358
Menschenlesbare URL	<a href="https://www.data.gv.at/katalog/de/dataset/stat_gliederung-osterreichs-in-gemeinden14f53">https://www.data.gv.at/katalog/de/dataset/stat_gliederung-osterreichs-in-gemeinden14f53</a>

Abbildung 4: Tabelle, Datenquelle Gliederung Österreichs in Gemeinden , Statistik Austria 2024

Datenverantwortliche Stelle	Umweltbundesamt GmbH, BM für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT)
Veröffentlichende Stelle	Umweltbundesamt GmbH
Lizenz	Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)
Lizenztitel	Datenquelle: Umweltbundesamt GmbH
Attributbeschreibung	GIS_NR: eindeutige Nummerierung nach Umweltbundesamt BL: Abkürzung für das Bundesland KAT: Schutzgebietskategorie SG_Name: Name des Schutzgebietes IUCN: Kategorisierung nach IUCN area_ha: Fläche in Hektar name_licen: Zitierung der Datenquelle
Geographische Abdeckung/Lage	Österreich
Geographische Ausdehnung	WGS84: POLYGON (17.16639 49.01875 9.53357 46.40749)
Zeitliche Ausdehnung (Anfang)	1. Januar 2012, 01:00 (UTC+01:00)
Aktualisierungszyklus	jährlich
Datenqualität/Herkunft	Übernahme der Daten der Länder-GIS Systeme (dort meist Abgrenzung absierend auf Orthofotos und DKM)
Bezeichnung der Metadatenstruktur	OGD Austria Metadata 2.4
Sprache des Metadatensatzes	ger
Character Set Code des Metadatensatzes	utf8
Titel und Beschreibung Englisch	National Parks 2012
Eindeutiger Identifikator	0f99b440-5a44-4bea-9a6f-51c9a4f6724e
Menschenlesbare URL	<a href="https://www.data.gv.at/katalog/de/dataset/nationalparks">https://www.data.gv.at/katalog/de/dataset/nationalparks</a>

Abbildung 5: Tabelle, Datenquelle Nationalparks, Umweltbundesamt GmbH 2024

weisen. Das Shape-File liegt in der Projektion MGI Lambert (EPSG:31287) vor. Die Daten werden von Statistik Austria bereitgestellt und sind im STA-Tatlas unter Statistik Austria Atlas verfügbar. Diese Daten enthalten den Gemeindecode und den Namen jeder Gemeinde und werden nach Bedarf aktualisiert. (Statistik Austria, 2019)

Naturschutzgebiete:

Die Nationalparks Österreichs mit Stand vom 1. Januar 2012 wurden von verschiedenen Landesregierungen und dem Umweltbundesamt erstellt. Die Daten liegen als Shapefile vor und umfassen GIS-Informationen wie die Schutzgebietskategorie, Fläche in Hektar und IUCN-Kategorisierung. Die geographische Abdeckung erstreckt sich über ganz Österreich. Die Daten werden jährlich aktualisiert. (Umweltbundesamt GmbH, BM für Landwirtschaft, Regio-

Datenverantwortliche Stelle	Statistik Austria, Guglgasse 13, 1110 Wien, Austria
Veröffentlichende Stelle	Statistik Austria
Lizenz	cc-by
Lizenztitel	Datenquelle: Statistik Austria - data.statistik.gv.at
Attributbeschreibung	ID:Siedlungseinheit Kennziffer;NAME:Name der Seidlungseinheit
Zeitliche Ausdehnung (Anfang)	1. Januar 2016, 09:00 (UTC+01:00)
Aktualisierungszyklus	nach Bedarf
Bezeichnung der Metadatenstruktur	OGD Austria Metadata 2.3
Sprache des Metadatensatzes	ger
Character Set Code des Metadatensatzes	utf8
Titel und Beschreibung Englisch	Locality
Eindeutiger Identifikator	7e0d1134-ccfb-3255-a539-e086d1d7aa29
Menschenlesbare URL	<a href="https://www.data.gv.at/katalog/de/dataset/stat_siedlungseinheiten2cb76">https://www.data.gv.at/katalog/de/dataset/stat_siedlungseinheiten2cb76</a>

Abbildung 6: Tabelle, Datenquelle Siedlungseinheiten, Statistik Austria 2024

nen und Tourismus, 2023)

Siedlungseinheiten:

Siedlungseinheiten sind definiert als zusammenhängend bebaute Gebiete mit mindestens 500 Einwohnern, unabhängig von Gemeindegrenzen oder anderen administrativen Einteilungen. Diese Abgrenzung wurde zum Stichtag 1.1.2010 vorgenommen. Grundlage für die Definition sind Gebäudekoordinaten aus dem Gebäude- und Wohnungsregister (GWR) und Einwohnerzahlen aus der Bevölkerungsstatistik. In Österreich wurden insgesamt 1.629 Siedlungseinheiten mit mehr als 500 Einwohnern ermittelt. (Katzlberger, 2020) Die Siedlungseinheiten sind die kleinste geografische Einheit, die weltweit vergleichbar ist und von der Statistischen Kommission der Vereinten Nationen eingeführt wurde. Die Daten liegen in der Projektion MGI Lambert (EPSG:31287) vor und wurden anhand von Registerzählungen (Datenstand 31.10.2011 und 31.10.2021) erstellt und ist frei als Shapefile verfügbar. (Statistik Austria, 2016)

### 3.3 Offene Fragen, Innovationsgehalt und Relevanz der Arbeit

Der aktuelle Stand der Forschung zeigt, dass die Herausforderung darin besteht, durch Interpolation von Wassertemperaturdaten aus Punktmessungen eine räumlich kontinuierliche Darstellung der Wassertemperatur zu erhalten, da es bisher nur Punktdaten einiger Messstellen gibt. Dies ist von entscheidender Bedeutung, um eine präzise und verlässliche Grundlage für die Nutzung von Oberflächengewässern als Wärmequelle zu schaffen.

Hinsichtlich der Auswahl und anschließender Anwendbarkeit der Methode auf der Ebene des gesamten Gewässernetzes sind jedoch noch einige Fragen

offen. Umweltfaktoren wie die geographische Lage, die Fließgeschwindigkeit und die saisonalen Temperaturveränderungen spielen eine wesentliche Rolle und müssen mitbedacht werden, um eine realistische Abbildung der Wärmepotenziale zu gewährleisten.

Der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit besteht in der Entwicklung einer bisher nicht existierenden Wärmepotenzialkarte für fließende Oberflächengewässer. Diese Karte geht über die reine Darstellung des theoretischen Wärmepotenzials hinaus, indem zusätzlich der lokale Wärmebedarf sowie Restriktionsflächen visualisiert werden. Der lokale Wärmebedarf wird durch die Analyse von Bevölkerungsdichte ermittelt, um die Gebiete mit dem höchsten Potenzial für die Nutzung der Wasserwärme zu identifizieren.

Darüber hinaus werden Restriktionsflächen berücksichtigt, um sensible Bereiche zu identifizieren, in denen die Nutzung von Wasserwärme möglicherweise eingeschränkt oder unzulässig ist. Diese Restriktionsflächen werden kartografisch dargestellt und in die Wärmepotenzialkarte integriert, um eine umfassende und realistische Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten zu ermöglichen. Damit leistet die Arbeit einen innovativen Beitrag zur präzisen Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von fließenden Oberflächengewässern für die Wärmeversorgung in Österreich. Die Integration von Wärmebedarf und Restriktionsflächen in die Wärmepotenzialkarte ermöglicht eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Planung und Implementierung von Wärmepumpensystemen, die auf die spezifischen Bedingungen und Bedürfnisse der einzelnen Regionen abgestimmt sind.

Zusammengefasst trägt diese Arbeit dazu bei, die technischen und ökologischen Rahmenbedingungen für die Nutzung von Oberflächengewässern als nachhaltige Wärmequelle zu definieren und zu optimieren. Die daraus resultierenden Wärmepotenzialkarten dienen als wertvolles Instrument für Planer, Entscheidungsträger und Investoren, die auf der Suche nach effizienten und umweltfreundlichen Lösungen für die Wärmeversorgung sind.

## 4 Interpolationsmethoden - Stand der Forschung

Der aktuelle Stand der Forschung zeigt, dass eine der zentralen Herausforderungen darin besteht, Wassertemperaturdaten von punktuellen Messungen so zu interpolieren, dass eine räumlich kontinuierliche Darstellung der Wassertemperatur entsteht. Bisher stehen nur Punktdaten von einigen wenigen Messstellen zur Verfügung. Diese Interpolation ist entscheidend, um eine präzise und verlässliche Grundlage für die Nutzung von Oberflächengewässern als Wärmequelle zu schaffen. In diesem Kapitel werden die bestehenden Interpolationsmethoden untersucht und bewertet, um deren Anwendung und Effektivität für diese Zwecke zu analysieren.

Zur Vorhersage von Flächen oder Volumina, wie auch einem Gewässernetz, können unterschiedliche geostatistische Methoden herangezogen werden. Die Herausforderung bei den Berechnungen besteht meist in der Unregelmäßigkeit der vorhandenen Datenquellen, da Datensätze oft divergierend in Zeit und/ oder Raum sind.

Im folgenden Kapitel wird der Forschungsstand bestehender geostatistischer Methoden zur Interpolation von Liniendaten des Gewässernetzes eingehend untersucht und verglichen. Dabei liegt der Fokus auf verschiedenen Ansätzen, die in der Literatur vorgestellt und angewendet wurden, um die räumliche Verteilung und Variation von Gewässermerkmalen zu erfassen. Es werden sowohl traditionelle geostatistische Methoden wie Kriging als auch neuere Entwicklungen wie Top-Kriging und andere topologische Ansätze betrachtet. Die Analyse konzentriert sich darauf, welche Methoden die besten Ergebnisse liefern und wie praktikabel die jeweilige Anwendung ist. Durch diesen Vergleich sollen Erkenntnisse gewonnen werden, die als Grundlage für die Auswahl der geeignetsten Methode für diese Arbeit dienen sollen. Es werden die Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren erläutert, anhand dessen werden die einzelnen Methoden dann bewertet und miteinander verglichen.

### 4.1 Interpolationsmethoden Ansprüche

Für viele Anwendungen ist es notwendig, Prozesse auch an Orten vorherzusagen, an denen keine Beobachtungen vorliegen. So wie beispielsweise bei den für diese Arbeit vorliegenden Gewässertemperaturdaten die lediglich an manchen Messpunkten aufgenommen wurden und deshalb nun auf das gesamte Gewässernetz interpoliert werden sollen. Für solche Vorhersagen werden geostatistische Methoden verwendet. Diese basieren auf einem Modell der räumlichen Korrelation zwischen Zufallsvariablen, die an Beobachtungs-

und Vorhersageorten definiert sind. (Skøien et al., 2014)

Eine Karte für die potenziellen Gebiete der Wärmenutzbarkeit von Oberflächengewässern in den Bundesländern Österreichs gibt es bisher nicht. Die wichtigsten physikalischen Größen zur Berechnung dieses Wärmepotenzials sind die Durchflussrate und die Wassertemperatur. Die durch Messstellen erhobenen Werte unterliegen infolge unterschiedlicher Zeitintervalle und vielfältiger Umwelteinflüsse großen Schwankungen, die die Aussagekraft der Daten beeinträchtigen. Um eine bessere Vergleichbarkeit herzustellen, wird eine Berechnung des monatlichen Medianwerts der Messpunkte empfohlen. Die Messwerte sind räumlich durch die Aufnahme an einem Punkt verortet, sollen aber einem ganzen Flussabschnitt zwischen Messstationen zugewiesen werden. (Green Energy Lab, 2015)

Für die räumliche Interpolation der Liniendaten des Gewässernetzes und der Punktdaten der Temperaturmessungen ist ein geeignetes geostatistisches Verfahren erforderlich. Das Verfahren sollte für monatliche Zeitschritte geeignet sein. Mindestens in jährlicher, besser in monatlicher Auflösung sollten die Daten mit Hilfe eines geostatistischen Verfahrens ermittelt bzw. interpoliert werden. Eine noch feinere zeitliche Auflösung, z.B. in Wochen oder Tagen, würde zwar genauere Ergebnisse liefern, aber einen wesentlich höheren Rechenaufwand erfordern. Für eine erste Evaluierung von geeigneten Standorten für Oberflächengewässer-Wärmepumpen in Österreichs Fließgewässern ist eine monatliche Auflösung ausreichend, für eine genauere Analyse können in weiteren Schritten noch spezifischere Datenanalysen durchgeführt werden. Kriging ist hier ein mögliches, zielführendes Verfahren. Es gibt aber auch andere Optionen, wie z.B. lineare Regression von Fließgewässertemperaturen in Abhängigkeit von der Seehöhe. (Fleckl et al., 2015)

## **4.2 Lineare Regression von Fließgewässertemperaturen in Abhängigkeit von der Seehöhe**

Die lineare Regression ist eine statistische Methode zur Analyse der Beziehungen zwischen verschiedenen Variablen. Viele Systeme, die von Geographen untersucht werden, enthalten Variablen, die numerisch gemessen werden können, von Verkehrsdaten bis zur Entwicklung von Gletscherflüssen. Der Vergleich von Karten oder Zeitreihendiagrammen zeigt oft, dass Unterschiede in einer Variablen räumlich oder zeitlich mit Unterschieden in anderen Variablen zusammenhängen. Zum Beispiel können sowohl Verkehrsdaten als auch proglaziale Abflüsse mit der Temperatur variieren. Manchmal ist der offensichtliche Zusammenhang rein zufällig, in anderen Fällen können zwei Variablen als alternative Definitionen derselben Sache betrachtet

werden. Häufig wird jedoch eine Ursache-Wirkungs-Beziehung vermutet. Im Zusammenhang mit Fließgewässern und deren Temperatur ist z.B. die Abhängigkeit der Variablen von der Seehöhe des jeweiligen Einzugsgebietes von Interesse. (vgl. Ferguson 1977) Die Methode der regionalisierten multiplen linearen Regression wurde im Rahmen eines ECSN/HRT-GAR Projektes für die räumliche Interpolation der Lufttemperatur weiterentwickelt und verbessert. Multiple lineare Regressionen der Temperatur in Abhängigkeit von geographischer Länge, Breite, Höhe und Küstenentfernung wurden in mehreren horizontalen Subregionen und drei vertikalen Schichten durchgeführt, um makroklimatische Abhängigkeiten darzustellen. (Auer et al., 2001)

### 4.3 Kriging

Kriging ist eine Methode zur Schätzung fehlender Werte einer räumlichen Variable, die in der Geostatistik häufig verwendet wird. Diese Schätzung wird als gewichteter Mittelwert der umliegenden Beobachtungen berechnet. Die Gewichte werden basierend auf der Annahme zugewiesen, dass die Varianz des zugrunde liegenden Prozesses nur von der Entfernung zwischen den Beobachtungspunkten abhängt. Zur Berechnung der genauen Gewichte dienen spezielle Gleichungen, die als Kriging-Gleichungen bekannt sind. Diese Gleichungen berücksichtigen die räumliche Autokorrelation der Daten, was zu präzisen und zuverlässigen Vorhersagen führt. Durch diese Methode können auch in Gebieten mit spärlichen Daten Schätzungen gemacht werden, was Kriging zu einem wertvollen Werkzeug in der räumlichen Datenanalyse macht. (Skøien et al., 2014)

Kriging ist eine fortschrittliche Interpolationsmethode, bei der der Wert einer räumlichen Variable an unbeobachteten Orten durch einen gewichteten Mittelwert der Beobachtungen an umliegenden Standorten vorhergesagt wird. Diese Methode basiert auf der Annahme, dass die erwartete Varianz des Prozesses an verschiedenen Orten nur von der Entfernung abhängt. Unter dieser Annahme können die spezifischen Gewichtungsfaktoren durch das Lösen eines Systems von Kriging-Gleichungen ermittelt werden. Diese Gleichungen berücksichtigen die räumliche Autokorrelation der Daten, wodurch präzise und verlässliche Vorhersagen ermöglicht werden. Die Gewichtung erfolgt so, dass die Schätzfehler minimiert werden, was Kriging zu einem besonders genauen Verfahren in der räumlichen Statistik macht. (Skøien et al., 2014)

Bei der Anwendung von Krigingmethoden sollte die erwartete Verzerrung gleich Null sein, was bedeutet, dass die Methode unvoreingenommene Schätzungen liefert. Zusätzlich wird der erwartete Interpolationsfehler minimiert, wodurch die Genauigkeit der Schätzungen maximiert wird. Ein großer Vorteil der Krigingmethoden besteht darin, dass sie nicht nur Vorhersagen er-



möglichen, sondern auch eine Schätzung der Unsicherheit dieser Vorhersagen bieten. Diese Eigenschaft ist besonders wertvoll, da sie eine quantitative Bewertung der Zuverlässigkeit der Vorhersagen ermöglicht und somit fundierte Entscheidungen unterstützt. (Skøien et al., 2014)

Mit Kriging wird der Wert einer räumlichen Variablen an einer unbeobachteten Position ( $x_0$ ) geschätzt. Die Methode funktioniert, indem sie die beobachteten Werte ( $z(x_i)$ ) an umliegenden Standorten ( $x_i$ ) heranzieht und diese mit gewichteten Faktoren mittelt. Die Gewichtung der einzelnen Beobachtungen basiert auf der Annahme, dass die Variabilität des zugrundeliegenden Prozesses mit der Entfernung abnimmt. Orte, die näher beieinander liegen, ähneln sich also tendenziell mehr als Orte, die weiter voneinander entfernt sind. (Skøien et al., 2014)

Das Kriging-System:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma_{ij} + \mu &= \gamma_{0i} \quad ; \quad i = 1, \dots, n \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i &= 1 \end{aligned}$$

(Skøien et al., 2014)

Die Vorhersage  $\hat{z}(x_0)$  wird als Summe gewichteter Messwerte  $\lambda_i * z(x_i)$  berechnet, wobei  $\lambda_i$  die Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Beobachtungen  $z(x_i)$  an den Positionen  $x_i$  sind. Die Gewichtungsfaktoren  $\lambda_i$  werden durch Lösen des Kriging-Systems in Gleichung (2) bestimmt. (Skøien et al., 2014)

$\gamma_{ij}$  ist die erwartete halbe Varianz zwischen Messungen  $i$  und  $j$ , die durch ein theoretisches Modell (Variogramm) beschrieben wird.  $\mu$  ist der Lagrange-Parameter für die Unverzerrtheit der Vorhersage ( $\hat{z}(x_0) = z(x_0)$ ). (Skøien et al., 2014)

#### 4.3.1 Berücksichtigung der Fläche beim Kriging

Bei dieser Kriging-Variante wird die räumliche Ausdehnung der betrachteten Fläche berücksichtigt. Die Halbvarianzen zwischen Messpunkten werden über die Flächen integriert, um die räumliche Abhängigkeit der Variablen abzubilden. Die räumliche Variable  $Z(A)$  wird als repräsentativ für eine Fläche mit einer räumlichen Ausdehnung  $A$  betrachtet. Diese Fläche wird durch ein Integral über den Wert  $z(x)$  an jedem Punkt  $x$  innerhalb der Fläche  $A$  beschrieben:

$Z(A) = (1 / A) * \int_A z(x) dx$  Dabei bezeichnet  $A$  die Größe der Fläche und  $z(x)$  den Wert an der Position (Skøien et al., 2014)

Konstante Mittelwert Annahme:

Es wird, wie bereits erwähnt, ein konstanter Mittelwert angenommen. Das bedeutet, dass die erwartete Differenz zwischen den Mittelwerten von  $Z$  in zwei Flächen  $A_i$  und  $A_j$  gleich null ist. (Skøien et al., 2014)

Kriging mit Flächen:

Wird eine Fläche mit räumlicher Ausdehnung berücksichtigt, bleibt das Kriging-System an sich gleich. Allerdings müssen die Halbvarianzen zwischen den Messungen über die jeweiligen Flächen integriert werden. (Skøien et al., 2014)

Punkt-Variogramm:

Es wird die Existenz eines Punkt-Variogramms  $\gamma_p$  vorausgesetzt, welches an jedem Punkt  $x$  innerhalb der Fläche gültig ist. Dieses Punkt-Variogramm beschreibt die räumliche Abhängigkeit der Variabilität. (Skøien et al., 2014) Das

Kriging berücksichtigt die Größe der betrachteten Flächen. Um die räumliche Abhängigkeit der Variabilität abzubilden, wird die Halbe Varianz zwischen Messpunkten nicht direkt berechnet, sondern durch Integration des Punkt-Variogramms über die jeweiligen Flächen und unter Berücksichtigung ihrer Überlappung ermittelt. Es wird mit einem Punkt-Variogramm  $\gamma_p$  gearbeitet. Dieses Punkt-Variogramm beschreibt die Skalierung der Variabilität zwischen Flächen in Abhängigkeit ihrer räumlichen Ausdehnung (Support).. Die Halbe Varianz zwischen zwei Messungen mit den Flächen  $A_i$  und  $A_j$  lässt sich dann durch Regularisierung des Variogramms bestimmen. (Skøien et al., 2006)

Die Gleichung zur Berechnung der Halbvarianz berücksichtigt die Flächengrößen und die Überlappung der Messbereiche. Der Nugget-Effekt wird für Flächenmessungen regularisiert, um die größenabhängige Skalierung der Variabilität abzubilden. Die Gültigkeit der Gleichung liegt dabei nicht auf der Punktskala, sondern auf der Ebene der Beobachtungsflächen. (Skøien et al., 2014)

Einsetzen in das Kriging-System:

Die berechneten Halbvarianzen werden in die Kriging-Matrix (Gleichung (2)) eingesetzt. Anschließend kann das Kriging-System wie gewohnt gelöst werden, um die Gewichtungsfaktoren  $\_i$  für die Gleichung (1) zu berechnen. (Skøien et al., 2014)

Nugget-Effekt bei Flächen:

Besondere Aufmerksamkeit erfordert der Nugget-Effekt bei der Arbeit mit Messwerten, die einen Flächenbezug haben. Traditionell beschreibt der Nugget-Effekt den Sprung im Variogramm bei kleinstem Abstand, der durch Messfehler und kleinräumige Variabilität verursacht wird. (Skøien et al., 2014)

Regularisierung des Nugget-Effekts:

Beim Flächenkriging in rtop wird der Nugget-Effekt wie folgt regularisiert: Wenn die kleinräumige Variabilität eine Nugget-Varianz von  $C0\_p$  für eine Flächeneinheit ergibt, beträgt die Nugget-Varianz einer größeren Fläche  $C0\_p * (A / A0)$ , wobei A die Größe der größeren Fläche und A0 die Größe der Flächeneinheit ist. (Skøien et al., 2006)

Nugget-Effekt für zwei Flächen:

Für zwei Flächen unterschiedlicher Größe,  $A_i$  und  $A_j$ , ist die Nugget-Varianz dann der Durchschnitt der Nugget-Varianzen dieser beiden Flächen, wenn sie sich nicht überlappen. Bei Überlappung muss zusätzlich der gemeinsame Anteil der Nugget-Varianzen abgezogen werden, da die kleinräumige Variabilität im überlappenden Bereich identisch ist. Die kombinierte Nugget-Varianz für zwei Flächen ( $A_i; A_j$ ) unterschiedlicher Größe kann dann generalisiert werden. Dabei bezeichnet  $Meas(A_i \cap A_j)$  die Fläche, die von den beiden Flächen  $A_i$  und  $A_j$  gemeinsam genutzt wird. (Skøien et al., 2014)

Vereinfachung für Regulation:

Beim Flächenkriging ist die Berechnung und Integration der Halbvarianzen für alle möglichen Abstandsdistanzen zwischen den Flächen rechenintensiv. Insbesondere bei der Anpassung eines Variogrammmodells an eine Variogrammwolke oder an gemittelte Variogramme durch iterative Optimierungsverfahren müssen die Halbvarianzen zwischen Punkten innerhalb der Flächen in jedem Iterationsschritt neu berechnet werden. Die Vereinfachung der Regularisierung durch Mittelung der Abstände reduziert den Rechenaufwand

beim Flächenkriging erheblich. Die Genauigkeit der Näherung ist für verschiedene Variogrammtypen ausreichend, wobei besonders lineare Verläufe gute Ergebnisse liefern.

Vereinfachte Berechnung:

Gottschalk (1993) und Gottschalk et al. (2011) schlugen eine Vereinfachung dieser Berechnung für die Regularisierung von Kovarianzen vor. Anstatt die Kovarianzfunktion für alle Abstände zwischen den Flächen zu integrieren, wird das Kovarianzmodell auf den gemittelten Abstand ( $d_n$ ) zwischen den Flächen angewendet. (Skøien et al., 2014)

Anwendung auf Halbvarianzen:

Diese Vereinfachung lässt sich auch auf Halbvarianzen anwenden. Die regularisierte Halbvarianz zwischen zwei Flächen ( $\gamma_n(ij)$ ) berechnet sich dann nach einer entsprechenden Gleichung. Dabei bezeichnet  $d_n(ii)$  den mittleren Abstand innerhalb der Fläche  $A_i$  (Ghosh-Distanz). (Skøien et al., 2014)

Vorteile der Vereinfachung:

Die Mittelung der Abstände ist mathematisch einfacher und rechnerisch schneller als die Berechnung der Halbvarianzen für alle Abstände zwischen zwei Flächen. Sie muss nur einmal durchgeführt werden, während die traditionelle Regularisierung eine Neuberechnung für alle Kandidaten-Variogrammodelle erfordert. (Skøien et al., 2014)

Genauigkeit der Vereinfachung:

Die Genauigkeit der Näherung hängt vom Variogramm und der Anordnung der Flächen ab. Gottschalk et al. (2011) weisen jedoch darauf hin, dass die Näherung in der Regel für verschiedene Arten von Variogrammen ein gutes Ergebnis liefert, wobei die besten Ergebnisse für annähernd lineare Variogramme, insbesondere in der Nähe des Ursprungs, erwartet werden können. (Skøien et al., 2014)

## 4.4 Top Kriging

Top-Kriging, oder auch topologisches Kriging, ist eine geostatistische Methode zur Abschätzung von abflussrelevanten Variablen in nicht vermessenen

Einzugsgebieten. Sowohl der Standort selbst, als auch die verzweigten Flussläufe werden bei der Anwendung der Top-Kriging Methode zur Abschätzung herangezogen. Der Hauptvorteil dieser Methode besteht darin, dass sie ein "best linear unbiased estimator" ist, der ohne zusätzliche Annahmen Fließgewässernetze verknüpft. Der Ansatz basiert auf der Arbeit von Sauquet et al. aus dem Jahr 2000 und erweitert diese in mehrfacher Hinsicht. Testungen haben ergeben, dass die Top-Kriging Methode plausiblere und genauere Schätzungen als "Ordinary Kriging" Methode. Top-Kriging liefert auch Schätzungen bezüglich der Abweichungswahrscheinlichkeit der unterschiedlichen Variablen. Im Hauptstrom der Flüsse sind die Abweichungen am geringsten, in Richtung der Quelle nehmen die Abweichungen sukzessive zu. Die Top-Kriging Methode ist in der Lage, die wenigen Informationen der vorhandenen Aufzeichnungen durch die Einberechnung von Abweichungen aller Messungen, umfänglich zu nutzen. Top-Kriging wird für die räumliche Interpolation von abflussbezogenen Variablen wie mittlerer jährlicher Abfluss, Hochwassermerkmale, Niedrigwassermerkmale, Konzentrationen, Trübung und Wassertemperatur empfohlen. Grundlage für die Top-Kriging Methode ist lineare Regression. Eine komplexer konstruierte Top-Kriging Methode mit räumlich-zeitlicher Aggregation ist von den Autoren bereits in der Entstehung. (Skøien et al., 2014)

Lahaa et al. veröffentlichte ebenfalls Erkenntnisse zur Top-Kriging Methode. Die Top-Kriging Methode gewichtet hier hydrologisch verbundene und unverbundene Standorte des Fließgewässernetzes entsprechend der jeweiligen Datengrundlage. Nahe beieinander liegende Standorte eines Flusssystems werden generell höher gewichtet, wenn jedoch der nächste hydrologisch verbundene Standort weit weg ist, wird dem nähergelegenen, jedoch nicht verbundenen, sondern nur angrenzenden Standort stärker gewichtet. Weiters wird die Abweichung durch exponentielle Regression mit der Einzugsgebietshöhe modelliert. Anschließend wird das Top-Kriging dann auf die Regressionsresiduen angewendet. Um die deterministischen Muster der räumlichen Variablen zu verbessern, wurde der Top-Kriging Methode noch eine externe Abweichungsfunktion hinzugefügt. Im Zuge eines umfassenden Tests, wurde dann die Methode mit einem Temperaturdatensatz getestet. Eine anschließende Kreuzvalidierungsanalyse zeigt, dass das Modell eine gute Leistung erbringt. Für Regionen, in denen die Temperaturen des untersuchten Flusses vom Erwartungswert des Driftmodells abweichen, werden die Werte durch Top-Kriging regional korrigiert. Top-Kriging ermöglicht damit die lokale Anpassung des Driftmodells für den Hauptfluss und dessen Zuflüsse durch die Nutzung der topologischen Informationen des Gewässernetzes. Die Leistung der Methode steigt mit zunehmender Dichte des Messnetzes. (Laaha et al., 2013)

## 4.5 Interpolation mit R

R ist ein Open-Source Ökosystem, welches häufig für Endbenutzerprogrammierung von Analysen, Visualisierungen und Datensätzen genutzt wird. (German et al., 2013)

Die R-Umgebung enthält eine große Auswahl an Werkzeugen mit denen bestehende Systeme mit neuen Methoden in einem Paketsystem zu erweitern, so auch das Package rtop. Dieses Paket rtop bietet geostatistische Methoden für die Analyse und Interpolation von Daten mit Unregelmäßigkeiten. (Skøien et al., 2024)

Es gibt mehrere andere R-Packages, die ähnliche Operationen ausführen können. Das SSN-Paket ist in der Lage, Interpolationen entlang von Strömungsnetzen durchzuführen. Es basiert aber auf einer Theorie, die die Oberflächenvariable nicht berücksichtigt. Außerdem erfordert es Vorverarbeitung des Gewässernetzes mit dem STARS Geoprocessing Toolset unter ArcGIS. (German et al., 2013)

Folgende Annahmen zeichnen Top Kriging aus:

1. Kontinuierlicher Prozess: Die beobachtete Variable wird als Ergebnis eines kontinuierlichen Prozesses in Raum und/oder Zeit betrachtet. Dieser Prozess ist nicht lokal begrenzt, sondern erstreckt sich über eine größere räumliche oder zeitliche Skala. Beispiele dafür sind der abflusserzeugende Prozess in der Hydrologie, die Wahrscheinlichkeit einer Krankheit in der Gesundheitsstatistik oder die Analyse von Waldparzellen. Die beobachteten Werte können als Durchschnitt oder Aggregat lokaler Realisierungen des Prozesses interpretiert werden. (Skøien et al., 2014)
2. Stationarität: Die zweite Annahme ist die allgemeine Stationaritätsannahme für geostatistische Methoden. Sie besagt, dass die erwartete Varianz zwischen Beobachtungen nur von der Entfernung zwischen ihnen abhängt. Die Implementierung der Methode berücksichtigt keine Nicht-Stationarität des Mittelwerts, die üblicherweise durch universelles Kriging behoben wird. Es ist jedoch möglich, einen externen Drift zu integrieren. (Skøien et al., 2014)

Man geht davon aus, dass der Abfluss aus Einzugsgebieten als Durchschnitt des in den Teileinzugsgebieten erzeugten Abflusses betrachtet werden kann. Allerdings ist der Zusammenhang zwischen Abflusserzeugung und Abfluss

bei kleineren Maßstäben komplizierter und intermittierend. (Skøien et al., 2014)

Top Kriging in der Praxis:

- Dateneingabe: Beobachtungswerte und Vorhersageorte werden in einem rtop-Objekt zusammengefasst.
- Diskretisierung: Die Untersuchungsfläche wird in Punkte unterteilt, wobei ein adaptives Gitter mit regelmäßiger Auflösung verwendet wird.
- Regularisierung: Der Nugget-Effekt wird regularisiert, um die größenabhängige Skalierung der Variabilität abzubilden.
- Berechnung der Halbvarianz: Die Halbvarianz zwischen zwei Flächen wird unter Berücksichtigung der Flächengrößen und Überlappung berechnet.
- Vereinfachung: Die Mittelung der Abstände zwischen den Flächen kann die Rechenzeit reduzieren.
- Parameter: Verschiedene Parameter können vom Benutzer angepasst werden.

(Skøien et al., 2014)

Objekterstellung für die Interpolation:

Das Erstellen eines rtop-Objekts ist der erste Schritt, um die Interpolationsfunktionen des rtop-Pakets nutzen zu können. Das Objekt vereint Beobachtungsdaten, Vorhersageorte und Parameter und vereinfacht so die Anwendung der verfügbaren Methoden. Das Objekt wird mit der Funktion `createRtopObject` erstellt. Verschiedene Funktionen in rtop verwenden dieses Objekt als Eingabe und fügen ihre Ergebnisse als neue Elemente hinzu. Um ein rtop-Objekt zu erstellen, ist ein `SpatialPolygonsDataFrame` mit den Beobachtungswerten (geteilt durch die Flächengrößen) und den zugehörigen Flächen der Beobachtungen notwendig. Häufig wird zusätzlich ein `SpatialPolygons`-Objekt mit den Vorhersageorten hinzugefügt. Verschiedene Funktionen in rtop verwenden dieses Objekt als Eingabe und fügen ihre Ergebnisse als neue Elemente hinzu. Um ein rtop-Objekt zu erstellen, ist ein `SpatialPolygonsDataFrame` mit den Beobachtungswerten (geteilt durch die Flächengrößen) und den zugehörigen Flächen der Beobachtungen notwendig.

Häufig wird zusätzlich ein `SpatialPolygons`-Objekt mit den Vorhersageorten hinzugefügt. (Skøien et al., 2014)

Daten laden:

Shapefiles oder andere gängige Polygon-Formate können mit Werkzeugen aus dem Paket `rgdal` oder anderen Paketen importiert werden. Alternativ ist die Verwendung von Dateien mit den Koordinaten der Polygone möglich. (Skøien et al., 2014)

Variogrammodellierung und Interpolation:

Das `rtop`-Paket bietet die Funktion `rtopVariogram` zur Berechnung eines Stichproben-Variogramms basierend auf den Beobachtungen. Dabei werden zwei Arten von Variogrammen unterstützt:

1. Variogrammwolke:

Diese ähnelt stark der Variogrammwolke aus dem `gstat`-Paket, jedoch werden Spalten für die Flächengrößen der Beobachtungen hinzugefügt. (Skøien et al., 2014)

2. Binned Variogram:

Im Gegensatz zum traditionellen Variogramm, das nur die Entfernung berücksichtigt, bezieht dieses Variogramm auch die Flächengrößen der Messbereiche mit ein. Es handelt sich folglich um eine Funktion dreier unabhängiger Variablen: Entfernung, kleinste Fläche und größte Fläche. Alternativ kann man es sich als eine Reihe von distanzbasierten Variogrammen für verschiedene Kombinationen von Flächengrößen vorstellen. Für die Berechnung werden die Abstände und Flächengrößen logarithmisch transformiert und anschließend in gleichgroße Intervalle ("bins") unterteilt. Der Abstand zwischen den Schwerpunkten der beiden Flächen wird für die Entfernungsachse verwendet. Dieses Vorgehen ermöglicht die Berücksichtigung der Flächengröße bei der Modellierung der räumlichen Variabilität der Daten. (Skøien et al., 2014)

`fitVariogram`: Diese Funktion passt ein Punkt-Variogrammmodell an das Stichproben-Variogramm an. Dabei werden die regularisierten Halbvarianzwerte des Punkt-Variogramms optimiert, um die bestmögliche Übereinstim-



mung mit dem Stichproben-Variogramm zu erzielen. (Skøien et al., 2014)

**rtopKrige:** Die Interpolationsfunktion (`rtopKrige`) löst das Kriging-System auf Basis der regularisierten Semivarianzen. Diese werden in einer separaten Regularisierungsfunktion berechnet und im `rtop`-Objekt gespeichert. Wenn es notwendig ist, Teile der Analyse zu wiederholen, kann auf diese Daten zurückgegriffen werden. Die Interpolation ist der rechenintensive Teil. Das Kriging-Ergebnis wird dem `rtop`-Objekt als `SpatialPolygonsDataFrame` mit dem Namen `'predictions'` hinzugefügt. `'predictions'` enthält die Vorhersagen und Vorhersagefehler für eine einzelne Interpolationsvariable aus `gstat` und ist dasselbe wie `'predictionLocations'`. (Skøien et al., 2014)

Anbindung an das INTAMAP-Paket:

Das `rtop`-Paket wurde so entwickelt, dass es über das `intamap`-Paket verwendet werden kann. Das `intamap`-Paket ist ein R-Paket für automatische Interpolation. Es wurde so entwickelt, dass es als rechnergestütztes Back-End eines Webdienstes genutzt werden kann. Die Integration mit diesem Paket macht es daher einfacher auf `rtop` über einen Web Service zuzugreifen. Um die beiden Pakete `rtop` und `intamap` zusammen verwenden zu können, muss die Funktion `üseRtopWithIntamap` aufgerufen werden. Beide Pakete verwenden ein Objekt zur Datenübertragung und haben ähnliche Elementnamen wie `observations`, `predictionLocations` und `params`. Die resultierenden Vorhersagen haben ein ähnliches Format wie das `gstat`-Paket. Die Parameter werden ebenfalls ähnlich verwendet und können leicht zwischen den beiden Paketen erweitert werden. Das `rtop`-Paket enthält neue Methoden für zwei wichtige Funktionen in `intamap`, nämlich `estimateParameters.rtop` und `spatialPredict`. Diese sind Wrapper um die Funktionen `rtopFitVariogram` und `rtopKrige`. (Skøien et al., 2014)

#### 4.5.1 Anwendung von `rtop` Package

Das `"rtop"` Package ist ein Tool mit welchem die Top-Kriging-Methode mit R umgesetzt werden kann. Mit `"rtop"` sollen beispielsweise mittleren jährlichen Abflüsse in verschiedenen Teilen Österreichs vorhergesagt werden, ohne dass an allen Stellen Messungen vorliegen. Um mit der Methode zu arbeiten, sollten alle notwendigen Daten – wie Beobachtungswerte, Orte für Vorhersagen und spezifische Parameter – in einem einzigen Objekt, dem sogenannten „`rtop-object`“, gespeichert werden. Das `"rtop-object"` kann mit Hilfe der Funk-

tion `createRtopObject` erstellt werden. (Skøien et al., 2024)

Im Fall dieser Arbeit, sind die Daten für das "rtop-object" in der aufbereiteten CSV-Tabelle.

Nach der Erstellung von diesem Objekt können Änderungen an den Standardparametern vorgenommen werden, um die Methode besser an die spezifischen Bedürfnisse der Vorhersage anzupassen. Das Paket enthält eine Vielzahl von Funktionen, die dieses „rtop-object“ als Eingabe verwenden und die Vorhersageergebnisse als neue Elemente innerhalb desselben Objekts speichern. Dies vereinfacht den Workflow erheblich, da alle relevanten Daten und Ergebnisse zentral verwaltet werden.

In einem Beispiel für die Anwendung wurden Daten verwendet, die als Shape-Dateien im „extdata“-Verzeichnis des Pakets gespeichert lagen. Ziel war es Vorhersagen für 863 Einzugsgebiete in Oberösterreich zu machen, für die lediglich die mittleren Sommerabflussdaten von 138 Einzugsgebieten dieser Region vorlagen. Die Daten für Beobachtungen und Vorhersageorte werden in Form von räumlichen Polygonen (`SpatialPolygonsDataFrame`) oder als SF-Polygone (`SimpleFeature`) gespeichert und verarbeitet werden. (Skøien et al., 2024)

Code des Beispiels:

```
rpath = system.file("extdata", package="
  rtop")
library(sf)
observations = st_read(rpath, "
  observations")
predictionLocations = st_read(rpath, "
  predictionLocations")
# Create a column with the specific
  runoff:
observations$obs =
  observations$QSUMMER_OB /
observations$AREASQKM
params = list(gDist = TRUE, cloud = TRUE)
rtopObj = createRtopObject(observations,
  predictionLocations,
  params = params)
(Skøien et al., 2024)
```

Für den Fall, dass die benötigten Daten nicht als Shape-Dateien vorliegen oder wenn Beobachtungen nicht in den Shape-Dateien enthalten sind, bietet das Paket Hilfsmethoden an. Diese sind unter den Funktionen `readAreaInfo` und `readAreas` zu finden. Diese Funktionen erleichtern es, Informationen über die Gebiete und die Beobachtungsdaten in das Arbeitsobjekt einzulesen, auch wenn sie nicht im Standardformat vorliegen.

Wenn es darum geht, das Variogramm – ein Schlüsselement in der räumlichen Statistik, das die räumliche Korrelation beschreibt – zu erstellen und anzupassen, bietet das Paket ebenfalls spezielle Funktionen: Ein Aufruf von `rtopVariogram` fügt dem Arbeitsobjekt ein Beispielvariogramm hinzu, basierend auf den vorhandenen Daten. Anschließend ermöglicht `rtopFitVariogram` das Anpassen eines Variogrammodells an die Daten. Diese Funktion nutzt `rtopVariogram`, falls im `rtopObj` noch kein Probenvariogramm vorhanden ist, um sicherzustellen, dass ein passendes Variogrammodell für die Analyse und Vorhersage verwendet wird. Das Paket stellt somit ein umfassendes Werkzeugset bereit, auch ohne direkt verfügbare oder standardkonforme Daten die Top-Kriging-Methode umzusetzen. (Skøien et al., 2024)

Code des Beispiels:

```
rtopObj = rtopVariogram(rtopObj) rtopObj = rtopFitVariogram(rtopObj,
maxn = 2000)
```

Die Funktion `checkVario` hilft, die Genauigkeit eines Variogrammodells durch "diagnostic plots" zu überprüfen. Diese Plots zeigen, wie gut das Modell die Beziehungen zwischen den räumlichen Daten erfasst. Es ist ein wesentliches Werkzeug, um die Zuverlässigkeit von den Standortbasierten Datenanalysen zu gewährleisten, welches visuell darstellt, ob das Modell mit den realen Daten übereinstimmt. (Skøien et al., 2024)

Code des Beispiels:

```
checkVario(rtopObj)
```

Die Funktion `rtopKrige` wird für die Interpolation verwendet und nutzt die berechneten regulierten Semivarianzen, um das Kriging-System zu lösen. Die notwendigen Kovarianzmatrizen werden durch eine eigene Funktion, `varMat`, erstellt und im `rtop`-Objekt gespeichert. Dies erleichtert spätere Zugriffe, vor allem weil das Erstellen der Kovarianzmatrizen viel Rechenleistung benötigt – es ist der aufwendigste Teil der Interpolation. Wenn man die Analyse überprüfen möchte, kann man die Kreuzvalidierung mit dem Argument `cv=TRUE` nutzen, entweder direkt in den Einstellungen (`params`) oder beim Aufrufen von `rtopKrige`. (Skøien et al., 2024)

Code des Beispiels:

```
rtopObj = rtopKrige(rtopObj)
if (is(rtopObj$predictions, "Spatial")) {
  spplot(rtopObj$predictions, col.regions = bpy.colors(),
    c("var1.pred"))
} else {
# the plotting order to get small polygons on top is
  not automatic with sf,
# but here is a method that works without modifying the
  predictions
  library(dplyr)
# Arrange according to areas attribute in descending
  order
  rtopObj$predictions |> arrange(desc(AREASQKM)) |>
# Make ggplot and set fill color to var1.pred
  ggplot(aes(fill = var1.pred)) + geom_sf()
}
rtopObj = rtopKrige(rtopObj, cv = TRUE)
if (is(rtopObj$predictions, "Spatial")) {
  spplot(rtopObj$predictions, col.regions = bpy.colors(),
    c("var1.pred", "var1.var"))
} else {
# Here is an alternative method for plotting small
  polygons on top of the larger ones,
  4 checkVario
# modifying the predictions
  rtopObj$predictions = rtopObj$predictions[order(
    rtopObj$predictions$AREASQ, decreasing = TRUE), ]
# It is also possible to change the order of the
  polygons
  ggplot(rtopObj$predictions) + aes(fill = var1.pred) +
    geom_sf() + scale_fill_distiller(palette = "
    YlOrRd")
}
```

Die Funktion `getRtopParams` definiert eine Reihe von Parametern für das `Intamap`-Paket für das `rtop`-Paket. Um einen Satz von Parametern zu er-

stellen oder zu aktualisieren, wird diese Funktion vor allem mit "createRtopObject" aufgerufen, kann aber auch direkt genutzt werden. (Skøien et al., 2024)

Die Funktion `readAreaInfo` ist besonders nützlich, wenn Daten nicht als Shape-Dateien verfügbar sind oder wenn die Beobachtungen nicht Teil der Shape-Dateien sind. Mit der Funktion werden räumliche Informationen aus Textdateien ausgelesen. Mit der Funktion `readAreas` lässt sich dann ein `SSpatialPolygonsDataFrame` aus den durch `readAreaInfos` gewonnenen Vorhersagedaten mit Standort, basierend auf IDs, erstellen. (Skøien et al., 2024)

`rtopDisc` wird verwendet, um ein Gebiet für die Regularisierung oder für die Berechnung der Ghosh-Distanz zu diskretisieren. Bei der Diskretisierung von Objekten im `rtop`-Paket kann zwischen zufälliger und regelmäßiger Stichprobenentnahme gewählt werden, wobei regelmäßig die Standardmethode ist. `rtop` ermöglicht eine spezielle Stichprobenmethode, die für überlappende Bereiche dieselben Diskretisierungspunkte nutzt. Beginnend mit einem groben Gitter, das verfeinert wird, bis genügend Punkte eine Unterstützungsfläche abdecken, stellt diese Methode sicher, dass in der größten Fläche die Anzahl der Punkte etwa viermal so hoch ist wie die Mindestanzahl der angeforderten Punkte. Zudem werden Punkte bei der Diskretisierung großer Flächen für kleinere, darin liegende Flächen wiederverwendet. (Skøien et al., 2024)

Die Funktion `rtopKrige` ist das Werkzeug, um Daten mit Raumbezug zu interpolieren. Wenn die Funktion mit einem `SpatialPolygonsDataFrame` aufgerufen wird, gibt sie einen `SpatialPolygonsDataFrame` mit Vorhersagen zurück. Diese Vorhersagen basieren entweder auf den in `predictionLocations` definierten Standorten oder, wenn `cv = TRUE` gesetzt ist, als Leave-one-out-Kreuzvalidierungsvorhersagen an denselben Standorten wie im Objekt. Wird die Funktion mit einem `rtop`-Objekt aufgerufen, gibt sie dasselbe Objekt zurück, jedoch mit den hinzugefügten Vorhersagen zum Objekt. (Skøien et al., 2024)

Diese Interpolationsfunktion des `rtop`-Pakets verwendet ein `rtop`-Objekt mit einem angepassten Variogrammmodell und notwendigen Daten für die Interpolation. Falls nötig, werden Kovarianzmatrizen durch die Funktion `varMat` erstellt, um Rechenzeit zu sparen, da sie wiederverwendet werden können. Die Interpolation basiert auf Semivarianzmatrizen, die auch für Daten genutzt werden können, die auf anderen Distanzen basieren, etwa entlang eines Flusses. Die Funktion kann Gewichte statt Vorhersagen zurückgeben (`wret = TRUE`), was bei der Verarbeitung von Zeitreihen hilfreich ist. `rtop` kann zudem mehrere CPUs (Central Processing Unit = Zentrale Steuereinheit) nutzen, indem mit `nclus` ein Cluster von Arbeitern gestartet wird, sofern das parallel-Paket installiert ist. (Skøien et al., 2024)

Die Funktion `rtopSim` ermöglicht Simulationen für Flächen. Am einfachsten

wird sie mit einem `rtop`-Objekt aufgerufen, das das angepasste Variogrammodell und alle anderen benötigten Daten enthält. `rtopSim` ist die einzige Funktion im `rtop`-Paket, die keine Beobachtungsdaten benötigt, allerdings ist ein Variogrammodell für die Durchführung von Simulationen erforderlich. Die Funktion befindet sich noch in einem experimentellen Stadium und könnte sich in Zukunft verändern, da es einige Probleme mit der aktuellen Implementierung gibt: In einigen Fällen können numerische Probleme negative Schätzvarianzen erzeugen, was zu einer ungültigen Verteilung für die Simulation führt und in simulierten NA-Werten für diese Standorte resultiert. Zudem kann die Variabilität simulierter Werte für kleine Flächen, wie kleine Oberlauf-Einzugsgebiete, aufgrund statistischer Unsicherheiten relativ hoch sein, was im Vergleich zur möglichen Unsicherheit basierend auf Niederschlagsdaten überschätzt werden könnte. Um das `rtop`-Paket mit dem `intamap`-Paket zu verknüpfen wird `useRtopWithIntamap` genutzt. (Skøien et al., 2024)

## 4.6 Methodenvergleich und Bewertung

Die verschiedenen Interpolationsmethoden bieten unterschiedliche Ansätze und Möglichkeiten. Die lineare Regression ist aufgrund ihrer Einfachheit und Schnelligkeit der Berechnung vorteilhaft, eignet sich jedoch hauptsächlich für Daten mit klaren linearen Trends. Sie ist ungeeignet für komplexe oder nicht-lineare Datenmuster und kann bei unregelmäßigen Daten große Abweichungen aufweisen. (Auer et al., 2001)

Kriging bietet Flexibilität und Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Datenstrukturen und berücksichtigt die räumliche Autokorrelation. Diese Methode liefert nicht nur Schätzungen, sondern auch die Unsicherheiten der Vorhersagen. Allerdings ist Kriging rechenintensiv, besonders bei großen Datensätzen, und erfordert gute Kenntnisse der geostatistischen Theorie. (Skøien et al., 2014)

Top Kriging ist speziell für Flussnetzwerke gut, da es die hydrologische Struktur berücksichtigt, was zu einer besseren Genauigkeit bei der Modellierung von Daten entlang von Fließgewässern führt. Die Methode ist jedoch komplex und erfordert einen hohen Rechenaufwand sowie spezifische Software und Kenntnisse. (Laaha et al., 2013)

Das `rtop` Package in R kombiniert die Vorteile der Top Kriging Methode mit der einfachen Implementierung in R, einer weit verbreiteten statistischen Software. Es bietet eine große Community-Unterstützung und zahlreiche verfügbare Ressourcen online. Obwohl es eine Einarbeitungszeit in das R-Package und die spezifischen Funktionen erfordert und bei sehr großen Datensätzen rechenintensiv sein kann, ist es eine leistungsfähige Methode für

die Modellierung von Flussnetzwerkdaten. (Skøien et al., 2024)

Für die vorliegende Arbeit wurde deshalb das `rtop` Package in R ausgewählt. Diese Entscheidung basiert auf mehreren Faktoren: Erstens erfüllt es die spezifischen Anforderungen an die Modellierung von Daten entlang von Flussnetzwerken durch die Implementierung der Top Kriging Methode. Zweitens hat sich gezeigt, dass das `rtop` Package nicht nur präzise Ergebnisse liefert, sondern auch eine relativ einfache Handhabung in R ermöglicht. Die große und aktive R-Community bietet zusätzlich zahlreiche Ressourcen und Unterstützung, was die Einarbeitung und die Anwendung erleichtert. Insgesamt bietet das `rtop` Package eine ideale Kombination aus Genauigkeit und praktischer Anwendbarkeit, die für diese Arbeit notwendig ist. (Skøien et al., 2024)

## 5 Erstellung einer Temperaturdatenkarte von Fließgewässern

In diesem Kapitel wird der vorher entwickelte Plan der Vorgehensweise zur Entwicklung einer Wärmepotenzialkarte praktisch umgesetzt. Nachdem in den vorangegangenen Kapiteln der Stand der Forschung umfassend dargestellt, die angewandten Methoden detailliert beschrieben und alle notwendigen Grundlagen evaluiert wurden, erfolgt nun die konkrete Anwendung der erarbeiteten Konzepte. Die zuvor beschriebenen Datengrundlagen werden genutzt, um das Wärmepotenzial der Fließgewässer Österreichs durch präzise Berechnungen und praktische Szenarien zu ermitteln. Eine der größten Herausforderungen bei der praktischen Umsetzung wird voraussichtlich die Temperaturinterpolation darstellen. Da die Temperaturdaten über verschiedene Messstellen hinweg interpoliert werden müssen, um ein konsistentes und genaues Bild der thermischen Verhältnisse im gesamten Flussnetz zu erhalten. Im Rahmen der Umsetzung wird parallel ein Workflow entwickelt, der die einzelnen Schritte der Erstellung und Anwendung der Wärmepotenzialkarte systematisch darstellt. Dieser Workflow dient nicht nur der aktuellen Anwendung, sondern erleichtert auch die Nachahmung des Prozesses, falls zukünftig neue Datengrundlagen verfügbar werden oder das Prinzip auf andere Standorte übertragen werden soll. Durch die strukturierte Dokumentation und visuelle Aufbereitung der Arbeitsschritte wird sichergestellt, dass die Vorgehensweise transparent und einfach verständlich replizierbar bleibt, was die Anwendung und Anpassung des Modells in verschiedenen Kontexten unterstützt. Der Workflow umfasst die Datengrundlagen, Datenverarbeitung und die entsprechende Analyse, bei der verschiedene GIS-Methoden angewendet werden, um das Wärmepotenzial der Oberflächengewässer zu berechnen.

### 5.1 Temperaturdatenaufbereitung mit Python

Die Datengrundlage für die Temperaturen ist zwar vorhanden, liegt jedoch in über 300 einzelnen CSV-Dateien vor. Da die Daten jedoch in einer einzigen Datei benötigt werden, werden die Dateien mithilfe von Python zusammengefügt und gefiltert. Dabei werden die Monatsmittelwerte des Jahres 2020 von allen Messstellen extrahiert und in eine neue Datei zusammengefügt. Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass nur die Daten für das Testjahr 2020 für den Kartenerstellungsprozess verwendet wird und der Arbeitsprozess nicht durch die Datenlast zusätzlicher Jahre beeinträchtigt wird. Der Einsatz von Python ermöglicht eine effiziente und präzise Datenzusammenführung und -filterung. Python Code zur Datenaufbereitung Teil 1:



```

def create_table(source, year):
    # Use a breakpoint in the code line below to debug
    your script.
    # Erstellen eines leeren DataFrame mit den Spalten
    columns = ['HZB_Nummer', 'Messstelle', 'Gewaesser',
               'Rechtswert_y', 'Hochwert_x', "Jahr", 'Jan', '
               Feb', 'Mar',
               'Apr', 'Mai', 'Jun', 'Jul', 'Aug', 'Sep
               ', 'Okt', 'Nov', 'Dez']
    df = pd.DataFrame(columns=columns)
    directory = os.path.join(os.path.dirname(__file__),
                              source)
    Fehler = 0
    Gesamt = 0
    for file in os.listdir(directory):
        filename = os.fsdecode(file)
        if filename.endswith(".csv"):
            try:
                df_temp = read_file(os.path.join(
                    directory, filename), year)
                Gesamt += 1
            except:
                #print("Fehler in Datei! Datei: " +
                    filename)
                Fehler = Fehler+1
                df = pd.concat([df, df_temp], ignore_index=
                    True)
                continue
            else:
                continue
    print("Jahr " + year)
    print("Erfolg: " + str(Gesamt))
    print("Fehler: " + str(Fehler))
    print("Total: " + str(Gesamt+Fehler))
    print("-----")
    print(" ")
    # DataFrame speichern als CSV-Datei
    df.to_csv('tabelle_'+str(year)+'.csv', index=False)
(Frochte, 2019)

```

Um die heruntergeladenen Temperaturdaten aufzubereiten, wurde ein Python-Skript entwickelt, mit welchem die Temperaturdaten der Fließgewässer systematisch zu verarbeitet werden können. Die zentrale Funktion des Skripts, `create_table(source, year)`, dient der Erstellung und Zusammenführung der unterschiedlichen Datensatzkomponenten. Die Verarbeitung der Daten erfolgt durch eine Funktion namens `create_table(source, year)`, die zwei Parameter akzeptiert: `source`, das das Verzeichnis der Quelldateien angibt und `year`, das das Jahr der zu verarbeitenden Daten spezifiziert. (Frochte, 2019) Zu Beginn der Funktion wird ein leerer DataFrame mit spezifischen Spalten erstellt. Diese Spalten umfassen neben Identifikationsmerkmalen der Messstellen und geografischen Koordinaten auch die Monatsmittelwerte der Temperatur. Der DataFrame wird mit den Spaltennamen

```
[ 'HZB_Nummer', 'Messstelle', 'Gewaesser', 'Rechtswert_y',
  'Hochwert_x', 'Jahr', 'Jan', 'Feb', 'Mar', 'Apr',
  'Mai', 'Jun', 'Jul', 'Aug', 'Sep', 'Okt', 'Nov', 'Dez' ]
```

aufgebaut. Der DataFrame wird durch die Funktion `pd.DataFrame(columns=columns)` erstellt. Anschließend wird das Verzeichnis der Quelldateien durch `os.path.join(os.path.dirname(file), source)` festgelegt, wobei der Pfad relativ zum aktuellen Skriptverzeichnis bestimmt wird. Zwei Zählvariablen, Fehler und Gesamt, werden mit `Fehler = 0` und `Gesamt = 0` gesetzt, um die Anzahl der fehlerhaften und erfolgreichen Verarbeitungen zu verfolgen. (Frochte, 2019)

Die Funktion durchläuft dann alle Dateien im angegebenen Verzeichnis mit `for file in os.listdir(directory)`. Es wird überprüft, ob die Datei die Endung `".csv"` besitzt, indem `if filename.endswith(".csv")` verwendet wird. Nur diese Dateien werden weiterverarbeitet. (Frochte, 2019)

Für jede Datei, die die Endung `".csv"` besitzt, wird versucht, die Datei mit der Funktion `read_file(os.path.join(directory, filename), year)` einzulesen. Die Funktion `read_file` extrahiert die spezifischen Daten für das angegebene Jahr und lädt sie in einen temporären DataFrame (`df_temp`). Erfolgreiche Lesevorgänge werden durch `Gesamt += 1` gezählt, während fehlerhafte Vorgänge durch `Fehler = Fehler + 1` zur Erhöhung der Fehlerzähler-Variable führen. Die erfolgreich eingelesenen Daten werden dann durch `df = pd.concat([df, df_temp], ignore_index=True)` an den ursprünglichen DataFrame (`df`) angehängt. (Frochte, 2019)

Nach der Verarbeitung aller Dateien werden die Gesamtanzahl der erfolgreichen und fehlerhaften Verarbeitungen sowie die Summe beider durch mehrere `print`-Anweisungen ausgegeben:

```

print("Jahr " + year)
    print("Erfolg: " + str(Gesamt))
    print("Fehler: " + str(Fehler))
    print("Total: " + str(Gesamt+Fehler))

```

(Frochte, 2019)

Diese Ausgabe dient der Überprüfung und Dokumentation des Verarbeitungsprozesses.

Nach der Verarbeitung aller Dateien werden die Gesamtanzahl der erfolgreichen und fehlerhaften Verarbeitungen sowie die Summe beider ausgegeben. Diese Ausgabe dient der Überprüfung und Dokumentation des Verarbeitungsprozesses. Schließlich wird der zusammengeführte DataFrame als CSV-Datei gespeichert, wobei der Dateiname das spezifizierte Jahr beinhaltet, beispielsweise 'tabelle\_2020.csv'. (Frochte, 2019)

Python Code zur Datenaufbereitung Teil 2:

```

def read_file(file_name, year):
    edited_file = pd.read_csv(file_name, encoding='ISO
        -8859-1', sep= ";", header=None)
    messsstelle = edited_file.iloc[0][1]
    hzb = edited_file.iloc[1][1]
    gewaesser = edited_file.iloc[4][1]
    koordinaten_index = edited_file[edited_file[0].str.
        contains("Exportzeitreihe")].index[0] - 1
    koordinaten_text = edited_file.iloc[
        koordinaten_index, 1].split(" - ")
    rechtswert = float(str(koordinaten_text[0]).replace
        (" ,", "."))
    hochwert = float(str(koordinaten_text[1]).replace
        (" ,", "."))
    WT01 = float(str(edited_file[edited_file[0].str.
        contains("01."+year)].values[0][1]).replace
        (" ,", "."))
    WT02 = float(str(edited_file[edited_file[0].str.
        contains("02."+year)].values[0][1]).replace
        (" ,", "."))
    WT03 = float(str(edited_file[edited_file[0].str.
        contains("03."+year)].values[0][1]).replace
        (" ,", "."))

```

```

WT04 = float(str(edited_file[edited_file[0].str.
    contains("04."+year)].values[0][1]).replace
    ("","."))
WT05 = float(str(edited_file[edited_file[0].str.
    contains("05."+year)].values[0][1]).replace
    ("","."))
WT06 = float(str(edited_file[edited_file[0].str.
    contains("06."+year)].values[0][1]).replace
    ("","."))
WT07 = float(str(edited_file[edited_file[0].str.
    contains("07."+year)].values[0][1]).replace
    ("","."))
WT08 = float(str(edited_file[edited_file[0].str.
    contains("08."+year)].values[0][1]).replace
    ("","."))
WT09 = float(str(edited_file[edited_file[0].str.
    contains("09."+year)].values[0][1]).replace
    ("","."))
WT10 = float(str(edited_file[edited_file[0].str.
    contains("10."+year)].values[0][1]).replace
    ("","."))
WT11 = float(str(edited_file[edited_file[0].str.
    contains("11."+year)].values[0][1]).replace
    ("","."))
WT12 = float(str(edited_file[edited_file[0].str.
    contains("12."+year)].values[0][1]).replace
    ("","."))
columns = ['HZB_Nummer', 'Messstelle', 'Gewaesser', '
    Rechtswert_y', 'Hochwert_x', "Jahr", 'Jan', 'Feb', '
    Mar', 'Apr', 'Mai', 'Jun', 'Jul', 'Aug', 'Sep', 'Okt', '
    Nov', 'Dez']
df = pd.DataFrame(columns=columns)
df.at[0, "HZB\_Nummer"] = hzb
df.at[0, "Messstelle"] = messstelle
df.at[0, "Gewaesser"] = gewaesser
df.at[0, "Rechtswert\_y"] = rechtswert
df.at[0, "Hochwert\_x"] = hochwert
df.at[0, "Jahr"] = year
df.at[0, "Jan"] = WT01
df.at[0, "Feb"] = WT02
df.at[0, "Mar"] = WT03

```

```
df.at[0, "Apr"] = WT04
df.at[0, "Mai"] = WT05
df.at[0, "Jun"] = WT06
df.at[0, "Jul"] = WT07
df.at[0, "Aug"] = WT08
df.at[0, "Sep"] = WT09
df.at[0, "Okt"] = WT10
df.at[0, "Nov"] = WT11
df.at[0, "Dez"] = WT12
```

```
return df
```

```
# Press the green button in the gutter to run the
  script.
```

(Frochte, 2019)

Die Funktion `read_file(file_name, year)` extrahiert die benötigten Daten aus den CSV-Dateien und bereitet sie zur weiteren Verarbeitung vor. Begonnen wird mit dem Einlesen der CSV-Datei mittels `pd.read_csv(file_name, encoding='ISO-8859-1', sep=";", header=None)`. Dabei werden die Daten ohne Header und mit dem angegebenen Zeichensatz eingelesen. Anschließend werden verschiedene Informationen aus der Datei extrahiert:

1. Extraktion der Messstelleninformationen: Die Messstelleninformationen werden aus den entsprechenden Zeilen extrahiert.

```
messstelle = edited\_file.iloc[0][1], hzb = edited\_
\_file.iloc[1][1]

gewaesser = edited\_file.iloc[4][1]
```

(Frochte, 2019)

2. Extraktion der Koordinaten: Der Index der Zeile, die die Koordinaten enthält, wird ermittelt. Die Koordinaten selbst werden aufgeteilt und anschließend in die entsprechenden numerischen Werte umgewandelt.

```

koordinaten\_text = edited\_file.iloc[koordinaten\_
_index, 1].split(" - ")

rechtswert = float(str(koordinaten\_text[0]).replace
(", ", "."))

hochwert = float(str(koordinaten\_text[1]).replace(", ",
"."))
(Frochte, 2019)

```

3. Extraktion der monatlichen Wassertemperaturen: Die Monatsmittelwerte der Wassertemperatur für das angegebene Jahr werden aus den Zeilen extrahiert, die das Datum im Format "TT.MM.JJJJ" enthalten. Dies geschieht durch die folgenden Zeilen, die die Werte in numerische Formate umwandeln.

```

WT01 = float(str(edited\_file[edited\_file[0].str.
contains("01."+year)].values[0][1]).replace(", ", ".")
)
WT02 = float(str(edited\_file[edited\_file[0].str.
contains("02."+year)].values[0][1]).replace(", ", ".")
)
...
(Frochte, 2019)

```

4. Erstellung eines DataFrames: Es wird ein DataFrame mit den zuvor definierten Spalten columns erstellt.

```

columns = ['HZB_Nummer', 'Messstelle', 'Gewaesser', '
Rechtswert_y', 'Hochwert_x', "Jahr", 'Jan', 'Feb', 'Mar',
', 'Apr', 'Mai', 'Jun', 'Jul', 'Aug', 'Sep', 'Okt', 'Nov', '
Dez']
df = pd.DataFrame(columns=columns)
(Frochte, 2019)

```

Anschließend werden die extrahierten Informationen in die entsprechenden Zellen des DataFrames eingefügt.

```

df.at[0, "HZB_Nummer"] = hzb
df.at[0, "Messstelle"] = messstelle
df.at[0, "Gewaesser"] = gewaesser
df.at[0, "Rechtswert_y"] = rechtswert
df.at[0, "Hochwert_x"] = hochwert
df.at[0, "Jahr"] = year
df.at[0, "Jan"] = WT01
df.at[0, "Feb"] = WT02
...

```

(Frochte, 2019)

5. Rückgabe des DataFrames: Der vollständig befüllte DataFrame wird schließlich durch `return df` zurückgegeben. Diese Rückgabe ist ein wesentlicher Bestandteil der Funktion, da sie es ermöglicht, die strukturierten und bereinigten Daten für die weitere Verarbeitung oder Analyse zugänglich zu machen. Der DataFrame enthält alle extrahierten Informationen, die in einer konsistenten und leicht zugänglichen Form gespeichert sind. Dies erleichtert es, die Daten in nachfolgenden Schritten zu verwenden, insbesondere beim Zusammenführen der Daten aus mehreren Dateien und beim Speichern der endgültigen Ergebnisse. (Frochte, 2019)

Das Skript extrahiert die relevanten Daten aus den CSV-Dateien und bereitet sie zur weiteren Verarbeitung in QGIS vor, indem die Daten in einen strukturierten DataFrame überführt werden. Damit wird eine strukturierte und fehlerresistente Verarbeitung der Temperaturdaten gewährleistet. (Frochte, 2019)

## 5.2 Temperaturdatenaufbereitung: Von CSV-Tabelle zur Karte mit QGIS

Zur weiteren Verarbeitung der Temperaturdaten, wird das CSV-File in QGIS importiert. Durch die vorhandene Geoinformation durch den jeweiligen Rechts- und Hochwert der Daten, ist es möglich aus der Tabelle eine Karte zu erstellen. Dies ermöglicht die visuelle Darstellung der Temperaturmessstellen und deren geographische Positionierung im gesamten Raum Österreichs. Es wird ein Layer mit den Temperaturdaten erstellt, der dann als Shape File exportiert wird.

Nachdem das CSV-File mit den Temperaturmessstellen aus dem Jahr 2020 mit Python erstellt wurde, beginnt der Importprozess in QGIS. Die CSV-Datei enthält alle relevanten Daten, einschließlich der X- und Y-Koordinaten,



Abbildung 7: CSV in QGis importieren, Stier 2024





Abbildung 8: Messstellen Punktlayer, Stier 2024

die für die geographische Verortung notwendig sind. Um das CSV-File in QGIS zu importieren, sind mehrere Schritte notwendig. Zunächst öffnet man QGIS und wählt im Menü „Layer“ die Option „Layer hinzufügen“ und dann „Getrennte Textdatei als Layer hinzufügen“. Anschließend navigiert man zu der erstellten CSV-Datei und wählt diese als Importdatei aus.

Nach dem Auswählen der Datei öffnet sich ein Dialogfenster, in dem die Datei spezifiziert werden muss. Hier stellt man sicher, dass die X-Koordinaten (Rechtswert) und Y-Koordinaten (Hochwert) korrekt den entsprechenden Spalten in der CSV-Datei zugeordnet sind. Im selben Fenster wählt man die richtige Projektion für die Koordinaten aus. In Österreich wird häufig das Koordinatensystem EPSG:31287 (MGI / Austria GK M34) verwendet. Diese Projektion stellt sicher, dass die Punkte korrekt auf der Karte angezeigt werden. Nach der Festlegung der Geoinformationen und der Projektion klickt man auf „Hinzufügen“. QGIS erstellt daraufhin einen neuen Punktlayer, der die Temperaturmessstellen als Punkte auf der Karte darstellt.

Nach dem erfolgreichen Import und der Erstellung des Punktlayers sind die Temperaturmessstellen auf der Karte visualisiert worden. Die Punkte sind entsprechend ihrer geographischen Koordinaten verteilt und bilden das Fließgewässernetz Österreichs ab. Jeder Punkt repräsentiert eine Messstelle, an der Temperaturdaten erhoben wurden. Diese Punktdarstellung ermöglicht es, die räumliche Verteilung der Messstellen intuitiv zu erfassen. Um die Karte weiter anzupassen, können verschiedene Einstellungen vorgenommen werden. Durch Klicken auf den Layer und Auswahl der „Eigenschaften“ können die

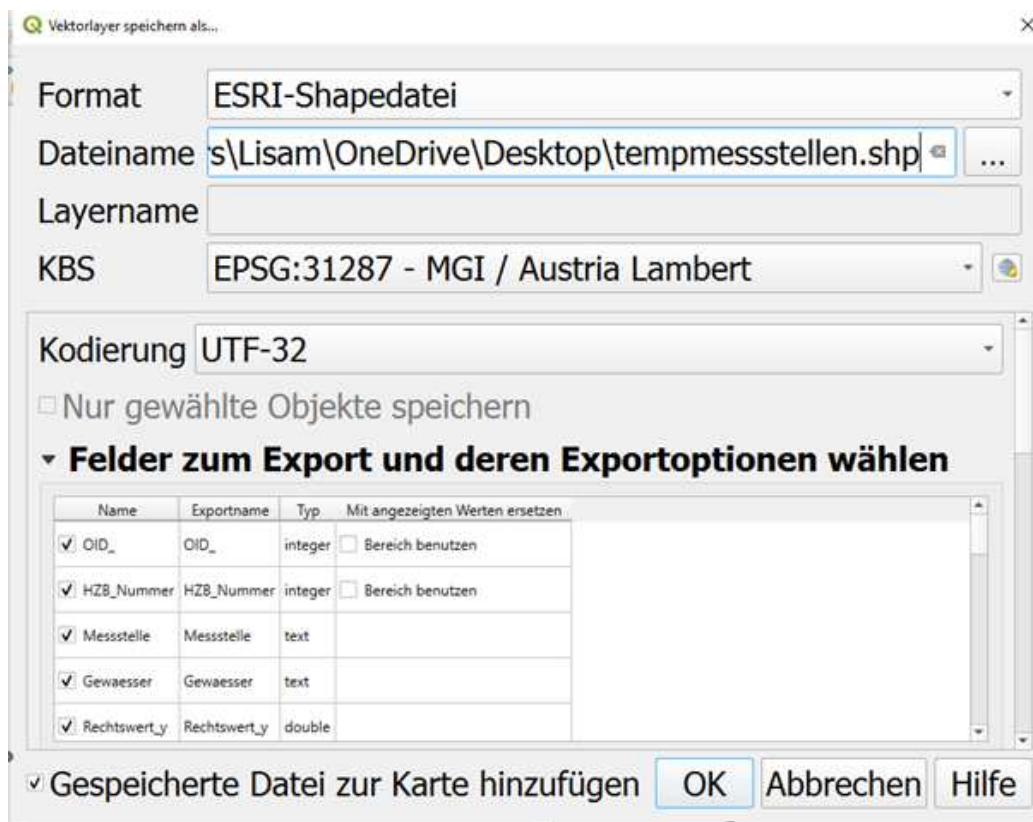


Abbildung 9: QGis Anwendung Vektorlayer speichern, Stier 2024

Symbole der Punkte geändert werden. Man kann beispielsweise die Farbe oder Größe der Punkte anpassen, um die Daten besser hervorzuheben. Es ist auch möglich, die Punkte mit den Temperaturwerten oder anderen relevanten Informationen zu beschriften. Dies geschieht ebenfalls in den „Eigenschaften“ des Layers unter dem Reiter „Beschriftung“. Mithilfe dieser Tools kann ein erster Einblick über die Datenlage verschafft werden.

Nachdem der Punktlayer erstellt und angepasst wurde, kann er als Shape-File exportiert werden. Dies ist zur weiteren Verarbeitung wichtig, da der jetzige Punktlayer nur temporär ist. Der Export des Layers geschieht, indem mit der rechten Maustaste auf den Layer geklickt wird und erst „Export“ und dann „Objekte speichern als“ ausgewählt wird. Im folgenden Dialogfenster kann das gewünschte Format, in diesem Fall ein Shape-File, sowie der Speicherort festgelegt werden.

Als nächstes werden die Basiseinzugsgebiete, die in Form eines Shape-Files vorliegen, per Drag-and-Drop in QGis hinzugefügt. Das Shape-File zeigt durch sein Format die Geometrie der Daten und beinhaltet zusätzliche At-

tribute. Durch das Hinzufügen der Basiseinzugsgebiete in QGIS wird es ermöglicht, der bereits vorhandene Karte der Temperaturmessstellen wichtige Informationen hinzuzufügen. Um die Informationen, also Attribute, des Shape- und des Punktlayers zu verknüpfen, müssen die beiden Dateien selbst verknüpft werden. Dies ist möglich, da sie die selbe räumliche Information teilen und über diese Eigenschaft verknüpft werden können.

Um das Shape-File der Basiseinzugsgebiete in QGIS zu laden, wird im Dateimanager und dort im Verzeichnis, in dem sich das Shape-File der Basiseinzugsgebiete befindet navigiert. Ein Shape-File besteht typischerweise aus mehreren Dateien mit den Endungen .shp, .shx, .dbf. Diese Dateien sollten zusammen im selben Verzeichnis liegen. Sobald die Dateien lokalisiert sind, zieht man die Hauptdatei mit der Endung .shp einfach per Drag-and-Drop in das QGIS-Fenster. QGIS erkennt das Shape-File automatisch und lädt es als neuen Layer in das aktuelle Projekt. Dieser neue Layer erscheint im Layer-Fenster auf der linken Seite von QGIS und wird direkt auf der Karte dargestellt. Die Basiseinzugsgebiete sind als Polygone visualisiert, die die verschiedenen Einzugsgebiete räumlich abgrenzen. Um zu sehen, welche Messstelle sich in welchem Einzugsgebiet befindet, wird der Punktlayer der Messstellen über den Layer der Einzugsgebiete per Drag-and-Drop gelegt.

Als nächstes wird nun eine räumliche Verknüpfung zwischen den Basiseinzugsgebieten und den Messstellen vorgenommen. Um die Basiseinzugsgebiete mit den Messstellen nach ihrer Position zu verknüpfen, wird in QGIS das Werkzeug "Verknüpfen nach Position" verwendet. Im Menü "Vektor" wählt man den Punkt "Datenmanagement-Werkzeuge" und dann "Attribute verknüpfen nach Position". Im daraufhin erscheinenden Dialogfeld werden die relevanten Parameter festgelegt. Der Layer mit den Basiseinzugsgebieten wird als Ziel-Vektorlayer ausgewählt, da dieser die Basis für die Verknüpfung darstellt. Der Layer mit den Basiseinzugsgebieten wird als Join-Vektorlayer ausgewählt. Es wird bei der Abfrage des Ortes der Objekte die Option "schneidet" gewählt, um sicherzustellen, dass jede Messstelle dem Einzugsgebiet zugeordnet wird, in dem sie liegt.

Optional können zusätzliche Einstellungen vorgenommen werden, um festzulegen, welche Attribute in den neuen Layer übernommen werden sollen. Hier ist besonders die ID, also der HZB-Code, für spätere Schritte relevant. Nachdem alle Einstellungen vorgenommen wurden, wird auf "Start" geklickt, um die Verknüpfung durchzuführen. QGIS erstellt daraufhin einen neuen Layer, in dem die Attribute der Basiseinzugsgebiete zu den jeweiligen Temperaturmessstellen hinzugefügt wurden.

Nach erfolgreichem Abschluss der Verknüpfung enthält der neue Layer der Basiseinzugsgebiete zusätzlich die Attribute der Temperaturmessstellen. Diese zusätzliche Information ermöglicht es, die in weiteren Schritten die In-

terpolation der Messtellenpunkte auf das Gewässernetz durchzuführen. Der neue Layer wird entsprechend exportiert um dann weiterverwendet werden zu können.

### 5.3 Datenverarbeitung: Interpolation der Temperaturdaten mit Top Kriging

```
#benötigte libraries laden
library(sf)
library(rtop)
library(dplyr)
library(ggplot2)
library(terra)

#Messdaten (observations) mit monatlichen Werten laden
(shp); zuvor in QGIS erstellt
#Pfad C:/Users/Lisam/AppData/Local/R/win-library/4.3/
rtop/extdata/Messstellen\_BEZG\_Monate
#gelbe Flächen in QGIS Projekt
observations = st\_read("C://Users//Lisam//AppData//
Local//R//win-library//4.3//rtop//extdata//
Messstellen\_BEZG\_Monate")

#Prediction Locations, somit alle Einzugsgebiete der
Oberflächengewässer laden
#Pfad C:\Users\Lisam\AppData\Local\R\win-library\4.3\
rtop\extdata\Einzugsgebiete
predictionLocs = st\_read("C://Users//Lisam//AppData//
Local//R//win-library//4.3//rtop//extdata//
Einzugsgebiete")

#rtopObj erstellen, für den Monat August
##An object of class rtop with observations, prediction
locations, parameters
##parameters to modify the default parameters of the
rtop-package
##formulaString = formula that defines the dependent
variable as a linear model of independent variables
```

```

####je nach berechneten Monat den formulaString ändern
params=list(gDist=TRUE,cloud=TRUE)
rtopObj = createRtopObject(observations, predictionLocs
, params = params, formulaString = Aug~1)

#A call to rtopVariogram adds the sample variogram to
the object
#rtopVariogram will create a cloud variogram of data
with an areal support
#hier werden die vorhandenen Messdaten in ein Variogram
gebracht
rtopObj = rtopVariogram(rtopObj)

#rtopFitVariogram will fit a variogram model to the
estimated cloud variogram of data with an areal
support
#mit dieser Funktion wird ein Variogram Model an das
zuvor errechnete Variogram der vorhandenen Messdaten
angepasst
rtopObj = rtopFitVariogram(rtopObj)
plot(rtopObj$variogramCloud)

#The interpolation function (rtopKrige) solves the
kriging system based on the computed regularized
semivariances.
#Hiermit werden die Messswerte (obsercations) aus alle
Basiseinzugsgebiete (predictionLocs) interpoliert
rtopObj = rtopKrige(rtopObj)

#csv mit predictions für alle Einzugsgebiete
exportieren
#je nach Monat das Export-csv umbenennen
write.csv(rtopObj, "C://Users//Lisam//AppData//Local//R
//win-library//4.3//rtop//extdata//predictions\_csv
//pred\_August.csv")

```

Das R-Skript wurde entwickelt, um die Messdaten der Fließgewässern zu verarbeiten und Vorhersagen für verschiedene Einzugsgebiete zu erstellen. Das Skript verwendet mehrere R-Pakete und durchläuft unterschiedliche Schritte,

um die Daten zu laden, zu verarbeiten und zu analysieren. Im Fokus steht dabei die Temperaturdaten von Messpunkten auf das gesamte Fließgewässernetz mit dem Paket `rtop` zu interpolieren. Dieser Schritt muss für jede Zeitspanne einzeln, in unserem Projekt also pro Monat separat durchgeführt werden. In diesem Beispiel interpolieren wir die Temperaturdaten von August 2020.

Zunächst werden die benötigten Bibliotheken geladen: `sf` für die Arbeit mit räumlichen Daten, `rtop` für die räumliche Interpolation und Analyse, `dplyr` für die Datenmanipulation, `ggplot2` für die Datenvisualisierung und `terra` für die Arbeit mit Rasterdaten.

Nachdem die Pakete geladen sind, werden die Messdaten, die zuvor in QGIS erstellt wurden, in R importiert. Diese Messdaten umfassen monatliche Temperaturwerte der Messstellen, die Polygonen der entsprechenden Einzugsgebiete zugeordnet sind und in einem Shape-File gespeichert sind. Der Pfad zu diesen Daten muss entsprechend angepasst werden, damit R das Shape-File korrekt laden kann. Die Messdaten (Observations) werden dafür mit der Funktion `st_read` aus der Shapefile-Datei geladen.

Im nächsten Schritt werden die Einzugsgebiete der Oberflächengewässer, die als Prediction Locations dienen, ebenfalls als Shape-File in R geladen. Diese Daten sind wieder die Basis-einzugsgebiete, auf die die Temperaturdaten interpoliert werden sollen. Auch hier muss der Pfad zu diesen Daten entsprechend angepasst werden. Es wird ebenfalls mit `st_read` die Shapefile-Datei der Basis-einzugsgebiete über den entsprechenden Datei-Pfad geladen.

Als nächstes wird ein `rtop`-Objekt erstellt, das sowohl die Temperaturmessdaten als auch die Basis-einzugsgebiete sowie spezifische Parameter enthält. Für die Interpolation des Monats August wird ein entsprechender formula-String definiert, der die abhängige Variable als lineares Modell unabhängiger Variablen beschreibt. `Aug 1` gibt dabei an, dass die Vorhersage für den Monat August berechnet wird. Die Parameter `gDist` und `cloud` werden auf `TRUE` gesetzt, um die geografische Distanz und die Wolkenvariogramme zu berücksichtigen. Diese Einstellungen sind entscheidend, um die räumliche Struktur der Temperaturdaten angemessen zu modellieren.

Um die vorhandenen Messdaten in ein Variogramm zu überführen, wird die Funktion `rtopVariogram` aufgerufen. Diese Funktion erstellt ein Cloud-Variogramm der Daten mit flächenbezogener Unterstützung, was bedeutet, dass die räumliche Variation der Temperaturmessungen innerhalb der Einzugsgebiete analysiert wird. Anschließend wird mit der Funktion `rtopFitVariogram` ein Variogramm-Modell an das geschätzte Cloud-Variogramm der vorhandenen Messdaten angepasst. Das Variogramm zeigt die räumliche Abhängigkeit der Temperaturmessungen. Mit der Funktion `rtopFitVariogram` wird das Variogramm-Modell an das geschätzte Cloud-Variogramm der vor-

handenen Messdaten angepasst. Dieses Modell beschreibt, wie die Temperaturmessungen räumlich korreliert sind, und ist eine wesentliche Komponente für die spätere Interpolation. Das angepasste Modell wird grafisch dargestellt, um die Anpassung des Variogramms zu überprüfen.

Die Interpolation erfolgt schließlich mit der Funktion `rtopKrige`, die das Kriging-System auf Basis der berechneten regulären Semivarianzen löst. Dabei werden die Temperaturmessungen auf alle Basiseinzugsgebiete übertragen, um für jedes Einzugsgebiet eine geschätzte Temperatur zu erhalten. Diese Methode nutzt die räumliche Korrelation der Daten, um möglichst genaue Vorhersagen zu treffen.

Zum Abschluss wird das Ergebnis in eine CSV-Datei exportiert, wobei die Datei entsprechend dem analysierten Monat benannt wird. Diese CSV-Datei enthält die interpolierten Temperaturwerte für alle Basiseinzugsgebiete, benannt als "prediction" und kann dann in einem GIS weiterverwendet werden. Der Export erfolgt mit der Funktion `write.csv`, wobei der Dateiname `pred_August.csv` gewählt wurde, um anzugeben, dass es sich um die Vorhersagen für den Monat August handelt.

Dieses R Skript führt eine vollständige Interpolation der Fließgewässertemperaturmessungen durch, beginnend mit dem Laden der Daten, der Erstellung eines räumlichen Objekts, der Anpassung eines Variogrammodells, der Interpolation der Daten und schließlich dem Export der Ergebnisse in Form der CSV-Datei. Jeder Schritt im Skript ist darauf ausgelegt, die Daten konsistent und genau zu verarbeiten, um zuverlässige Vorhersagen für die Einzugsgebiete der Oberflächengewässer zu erstellen. Durch diesen detaillierten Prozess der Interpolation werden die Temperaturmessstellen-Daten präzise auf die Flächen der Basiseinzugsgebiete übertragen, was eine fundierte Basis für weiterführende hydrologische Analysen und Anwendungen bietet.

## 5.4 Datenverarbeitung: Interpolation kartografisch visualisieren

Nachdem die Interpolation der Temperaturmessstellen-Daten auf die Basiseinzugsgebiete abgeschlossen und das resultierende CSV-File „pred\_August.csv“ exportiert wurde, erfolgt der Import dieses CSV-Files in QGIS durch Drag-and-Drop. Dieser Schritt ermöglicht die Visualisierung und weitere Analyse der interpolierten Temperaturwerte in QGIS. Das CSV-File „pred\_August.csv“ wird im Dateimanager lokalisiert und per Drag-and-Drop in das QGIS-Fenster gezogen. Das CSV kann aber auch mit dem Tool "Getrennte Textdatei als Layer hinzufügen".

Wichtig ist hier, dass die Vorhersage-Layer keine Standortdaten in ihren At-





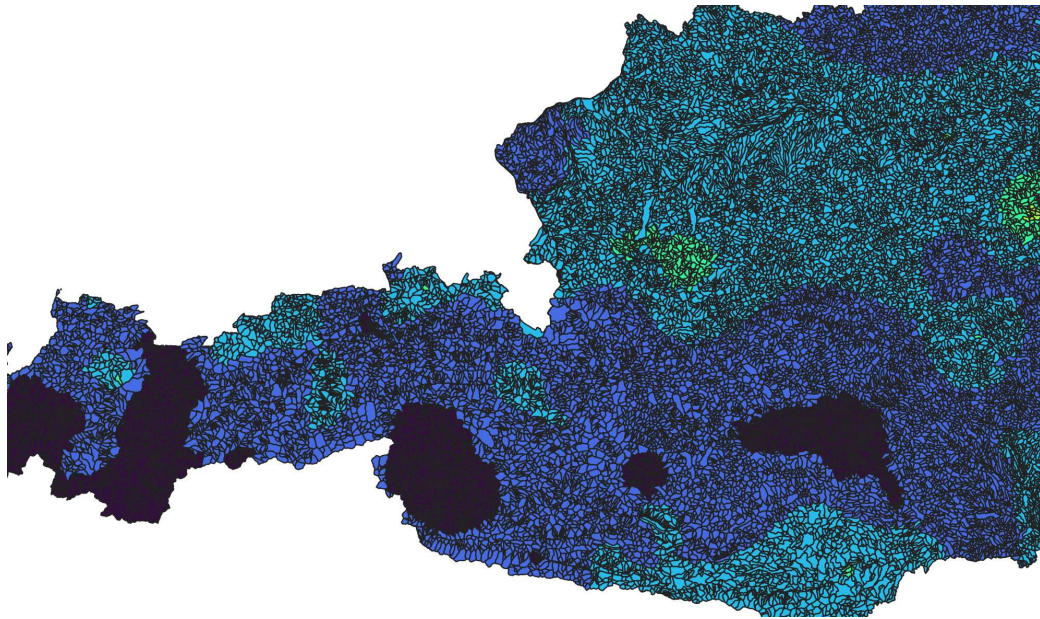


Abbildung 11: Ausschnitt der Basiseinzugsgebiete mit Temperatur Interpolation von Dezember 2020, Stier 2024

SStarte", wird die Verknüpfung von QGIS automatisch ausgeführt. Der neu entstandene Layer, sollte dann wieder entsprechend exportiert werden, über "Rechtsklick Export", Objekte speichern als und dann in einen erstellten Ordner für alle Interpolationsdateien als Shape-File. Der erstellte Layer zeigt die interpolierten Temperaturdaten von August 2020. Allerdings auf alle Flächenpolygone der Basiseinzugsgebiete und nicht nur auf den Fließgewässern. Grund dafür ist, dass rtop nur mit Polygonen, nicht aber Linienformaten arbeiten kann.

Im folgenden Schritt wird deshalb gezeigt, wie aus dem "prediction\_BEZG\_August", einem Polygon-File der Vorhersagedaten von August auf das Basiseinzugsgebiet darstellt, ein Linien-Layer, entsprechend dem Fließgewässernetz erstellt werden kann.

Um die interpolierten Temperaturdaten den Flussabschnitten zuzuordnen, die sich innerhalb der Basiseinzugsgebiete befinden, wird das Linien-Shape-File des Fließgewässernetzes mit dem Polygon-Shape-File der Basiseinzugsgebiete verknüpft. Dieser Schritt ist notwendig, um die Flusslinien an den Grenzen der Basiseinzugsgebiete zu zerschneiden. Durch das Zerschneiden der Flusslinien entlang der Polygongrenzen entstehen neue Flussabschnitte, die vollständig innerhalb eines Basiseinzugsgebietes liegen. Dies ermöglicht eine präzise Zuordnung der interpolierten Temperaturwerte zu den entspre-

chenden Flussabschnitten innerhalb der einzelnen Basiseinzugsgebiete.

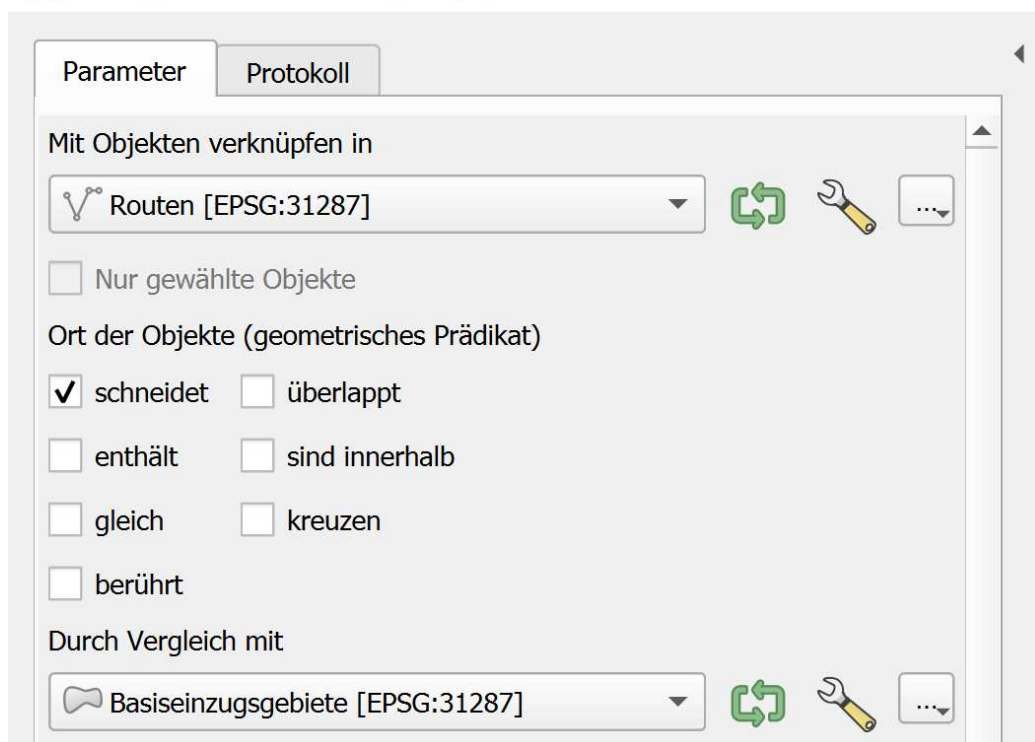
Um die Routen an die Basiseinzugsgebiete anzuknüpfen, wird das Werkzeug „Attribute nach Position verknüpfen“ verwendet. Die Shape-Datei "Routen", die die Linien des Fließgewässernetzes darstellt, wird per Drag-and-Drop in das GIS zu der bereits im Layerverzeichnis liegenden Shape-Datei der Basiseinzugsgebiete hinzugefügt. Dann werden die beiden mit dem Werkzeug „Attribute nach Position verknüpfen“ verknüpft, indem die Linien-Shape-Datei der Flussrouten als Eingabelayer und die Shape-Datei der Basiseinzugsgebiete als Verknüpfungslayer ausgewählt wird. Unter „Ort der Objekte“ wird die Option „schneidet“ gewählt, um sicherzustellen, dass die Linien der Routen entsprechend den Basiseinzugsgebieten zerschnitten werden. Durch Klicken auf „Starte“ wird die Verknüpfung und das Zerschneiden der Flusslinien entsprechend den Basiseinzugsgebieten durchgeführt. Dieser Prozess, der sicherstellt, dass die Linien der Flussläufe entsprechend der Basiseinzugsgebiete verknüpft und an den Polygongrenzen zerschnitten werden, ermöglicht in den weiteren Schritten die präzise Zuordnung der Vorhersagewerte zu den jeweiligen Flussabschnitten, was eine realitätsnahe Darstellung und Analyse der Flussdaten im weiteren Vorgehen ermöglicht.

Die Symbologie der Routen ist an dieser Stelle noch irrelevant, da ihnen die Temperaturwerte erst in den folgenden Schritten zugewiesen werden. Aktuell geht es primär darum, die Flusslinien an den Grenzen der Basiseinzugsgebiete zu zerschneiden, um so neue Flussabschnitte zu erzeugen, die vollständig innerhalb eines Basiseinzugsgebietes liegen. Die Darstellung und Farbgebung der Routen spielt dabei zunächst keine Rolle, da die visuelle Unterscheidung erst nach der Zuordnung der interpolierten Temperaturwerte relevant wird. Nachdem die Routen an die Basiseinzugsgebiete angepasst wurden, erfolgt nun die Zuweisung der Temperaturvorhersagen zu den erstellten Flussabschnitten. Um die Temperaturvorhersagen, wie zum Beispiel „pred\_August“, den „routen\_verschnitten“ zuzuweisen, wird mit dem Werkzeug „Attribute nach Position verknüpfen“ gearbeitet. Im sich öffnenden Dialogfeld des Tools werden die „routen\_verschnitten“ als Eingabe-Layer und die Shape-Datei "pred\_BEzG\_Aug" als Verknüpfungslayer ausgewählt. Dieser Prozess stellt sicher, dass die interpolierten Temperaturdaten präzise den entsprechenden Flussabschnitten zugeordnet werden.

Durch Klicken auf „Starte“ wurde die Verknüpfung der Temperaturvorhersagen mit den Flussabschnitten durchgeführt. Nach Abschluss des Prozesses wurde ein neuer Layer erstellt, der die Flussrouten mit den zugewiesenen Temperaturvorhersagen enthält.

Dieser Vorgang wurde für jeden Monat einzeln durchgeführt, wobei für jeden Monat eine separate Shape-Datei mit den entsprechenden Temperaturvorhersagen erstellt wurde. Die resultierenden Shape-Dateien mit den Tempera-

## Attribute nach Position verknüpfen



Parameter Protokoll

Mit Objekten verknüpfen in

 Routen [EPSG:31287]

☐ Nur gewählte Objekte

Ort der Objekte (geometrisches Prädikat)

☒ schneidet ☐ überlappt

☐ enthält ☐ sind innerhalb

☐ gleich ☐ kreuzen

☐ berührt

Durch Vergleich mit


 Basiseinzugsgebiete [EPSG:31287]

Abbildung 12: QGis: Routen nach Basiseinzugsgebieten verschneiden, Stier 2024

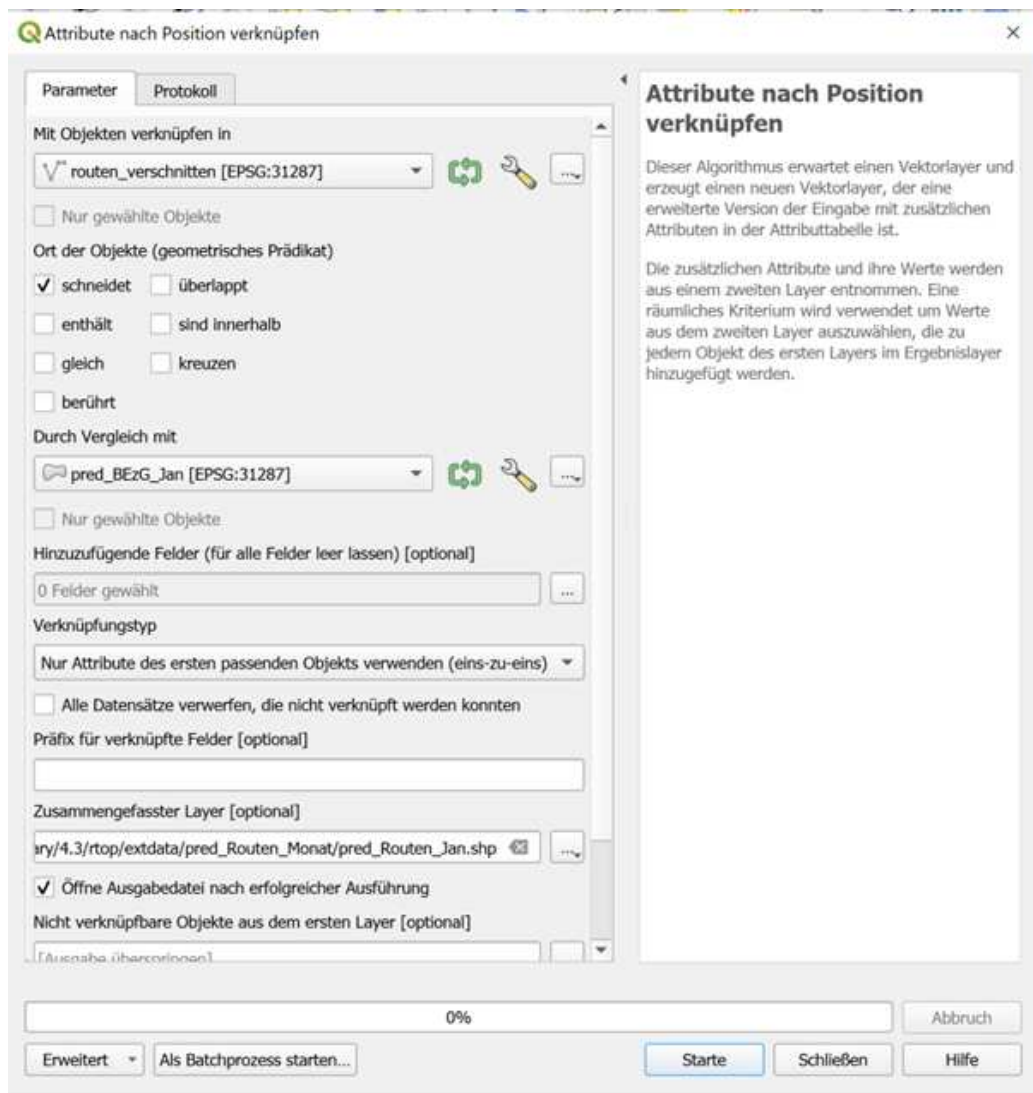


Abbildung 13: QGIS: Interpolationslayer mit Routen verknüpfen, Stier 2024

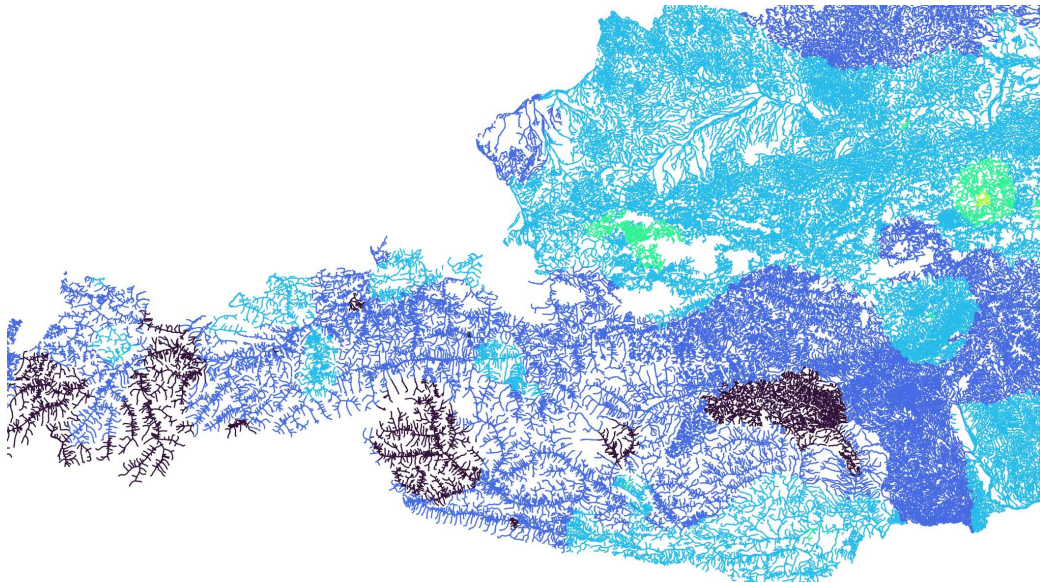


Abbildung 14: Ausschnitt der interpolierten Temperaturen von Dezember 2022 auf den Gewässerrouten, Stier 2024

turrouten wurden in einem eigens dafür angelegten Ordner gespeichert. Dies gewährleistet eine übersichtliche und systematische Verwaltung der Daten, die für weiterführende Analysen und Untersuchungen genutzt werden können.

Die Farbskala für die Temperatur wurde so gewählt, dass sie einen Verlauf von blau (kalt) über grün bis rot (warm) darstellt, wie in der Legende zu sehen ist. Diese Farbskala ermöglicht eine intuitive visuelle Interpretation der Temperaturdaten, wobei kältere Temperaturen in Blau und wärmere Temperaturen in Rot dargestellt werden.

In der Karte werden die Linien verwendet, um die interpolierten Temperaturdaten darzustellen, während die Punktdaten die ursprünglichen Messpunkte anzeigen. Eine visuelle Herausforderung bestand darin, beide Datentypen in derselben Karte darzustellen, dabei aber den Unterschied hervorzuheben. Der Zweck der Karte besteht darin, zu überprüfen, ob die Interpolation erfolgreich durchgeführt wurde. Die ursprünglichen Daten der Messstellen werden daher mit Labels die den Durchschnittswert als Dezimalzahl und farblich als Punktsymbol in derselben Farbe wie die interpolierten Linien dargestellt. Diese Darstellung soll veranschaulichen, ob die berechneten Linienwerte nahe an den ursprünglichen Messpunkten liegen, was anzeigen würde, dass die Interpolation mit dem r-top-Paket gut funktioniert hat. Um die Punkte visuell von den Linien zu unterscheiden, werden die Punkte mit einem pinken Rand



## Legende

Interpolierte Temperatur in °C	Messstellentemperatur in °C
— 0 - 3,1	✦ 0.0 -3.0
— 3,1 - 6,1	✦ 3.1 - 6.0
— 6,1 - 9,1	✦ 6.1 - 9.0
— 9,1 - 12,1	✦ 9.1 - 12.0
— 12,1 - 15,1	✦ 12.1 - 15.0
— 15,1 - 18,1	✦ 15.1 - 18.0
— 18,1 - 21,1	✦ 18.1 - 21.0
— 21,1 - 24,1	✦ 21.1 - 24.0
— 24,1 - 27	✦ 24.1 - 27.0

Abbildung 15: Legende der Messpunktdaten und der interpolierten Temperaturlinien, Stier 2024

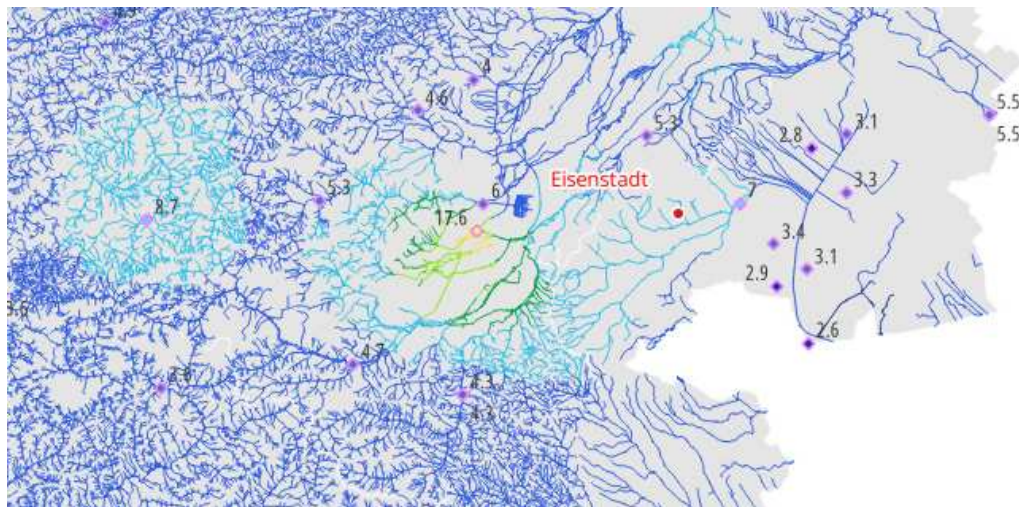


Abbildung 16: Ausschnitt der interpolierten Temperaturen zur visualisierung der Farbgebungsproblematik 1, Stier 2024

versehen. Pink wurde gewählt, weil diese Farbe nicht in der Temperatur-Farbskala vorkommt und sich somit von den anderen Farben abhebt.

Die Farbwahl stellt eine besondere Herausforderung dar, da die Wintermonate wie in 16 fast ausschließlich Blautöne aufweisen, während die Sommermonate, wie beispielsweise in 17 dargestellt, eine bunte Mischung aus unterschiedlichen Farben zeigen. Diese saisonalen Unterschiede in der Farbverteilung erfordern eine sorgfältige Abstimmung der Farbskala, um eine konsistente und klare Darstellung der Temperaturdaten über das ganze Jahr hinweg zu gewährleisten.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Darstellung der Temperaturdaten ist die Einteilung in Temperaturstufen. Sowohl die Punkte als auch die Linien sind, wie in der Legende zu sehen ist, in denselben Temperaturstufen dargestellt, um den Vergleich zu erleichtern. Die Temperaturdaten sind in 3-Grad-Stufen unterteilt, was eine detaillierte und differenzierte Visualisierung der Temperaturverläufe ermöglicht. Diese Einteilung hilft dabei, kleine Unterschiede in den Temperaturwerten sichtbar zu machen und somit eine präzisere Analyse der Daten zu gewährleisten. Die gleiche Unterteilung bei Punkten und Linien stellt sicher, dass die interpolierten Werte direkt mit den ursprünglichen Messdaten verglichen werden können, was die Überprüfung der Interpolationsergebnisse erleichtert. Durch die einheitliche Darstellung in 3-Grad-Stufen wird eine klare und verständliche Visualisierung erreicht, die die Analyse und Interpretation der Temperaturdaten unterstützt. Diese durch Farb- und Intervallgebung geprägte Darstellung ermöglicht eine klare

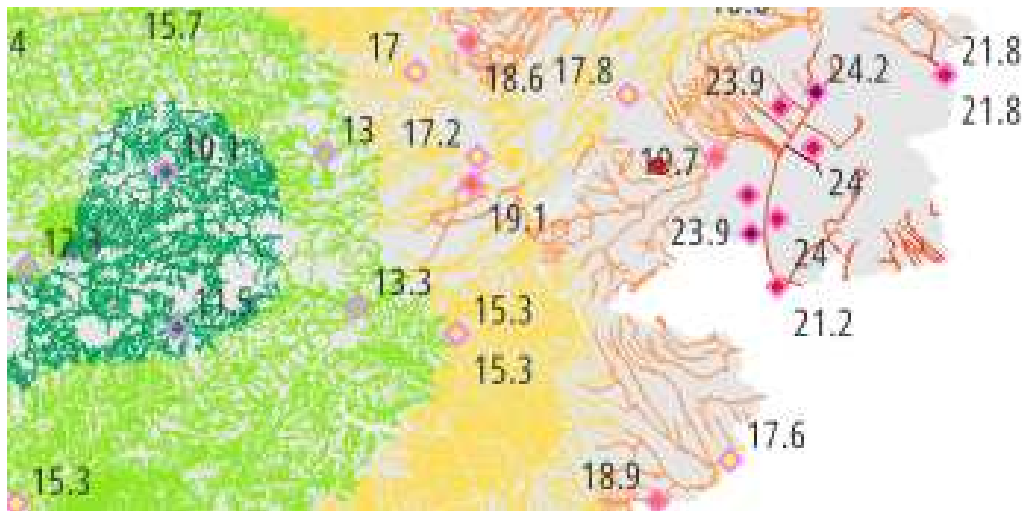


Abbildung 17: Ausschnitt der interpolierten Temperaturen zur visualisierung der Farbgebungsproblematik 2, Stier 2024

und präzise Visualisierung der Daten, erleichtert die Überprüfung der Interpolationsergebnisse und trägt zur Validierung der angewandten Methoden bei.

## 5.5 Datenauswertung der Fließgewässertemperatur

In diesem Abschnitt werden die Karten der interpolierten Temperaturdaten beschrieben. Für jeden Monat des Jahres 2020 wurde eine separate Karte erstellt, welche die Temperaturverteilungen darstellt. Diese Karten zeigen sowohl die interpolierten Daten als auch die ursprünglichen Messpunkte. Durch die einheitliche Farbgebung und die Aufteilung in Temperaturstufen kann überprüft werden, ob die Interpolationsergebnisse sinnvoll erscheinen. Die Analyse der Karten ermöglicht es, die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Interpolation zu bewerten und sicherzustellen, dass die berechneten Temperaturwerte mit den ursprünglichen Messdaten übereinstimmen.

Januar 2020 Im Januar dominieren auf der Karte hauptsächlich blaue Farbtöne, die kältere Temperaturen repräsentieren. Die Messpunkte sind in der gleichen Farbskala dargestellt und zeigen einen guten visuellen Abgleich mit den interpolierten Linien. Die Mehrheit der Fließgewässer weist Temperaturen zwischen 0 und 6 Grad Celsius auf, was durch die blaue Farbpalette deutlich wird. Durch die Übereinstimmung der Punkt- und Linienfarben wird ersichtlich, dass die Interpolation mit den tatsächlichen Messwerten gut korreliert.



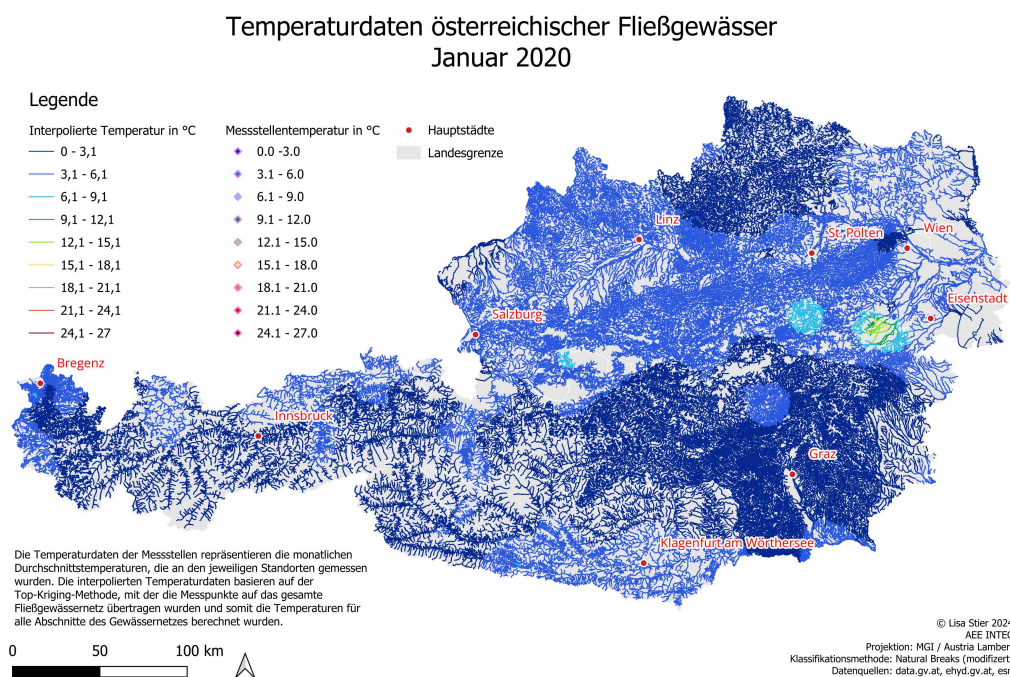


Abbildung 18: Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Januar 2020, Stier 2024

## Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Februar 2020

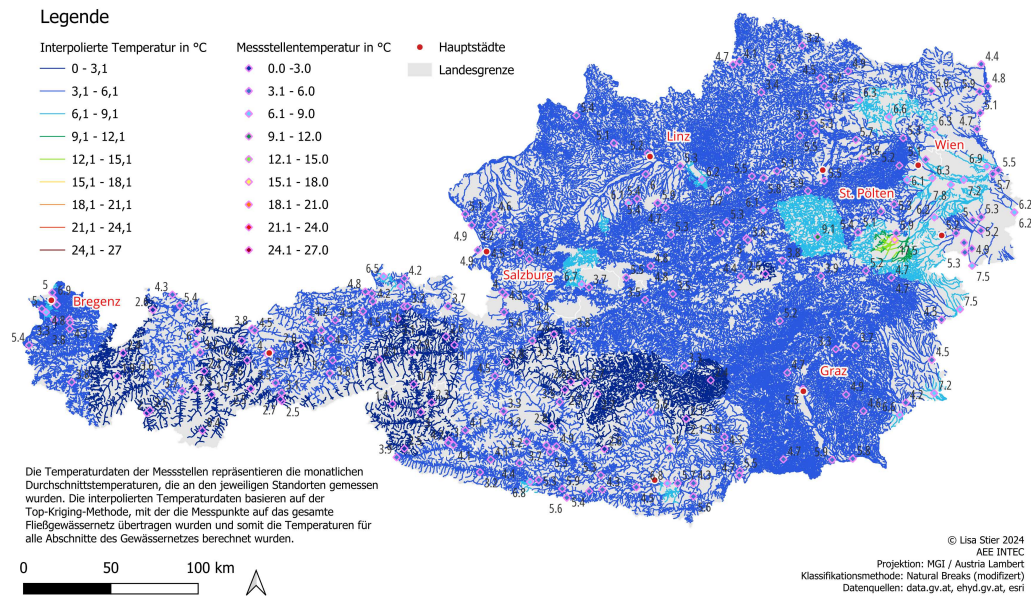


Abbildung 19: Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Februar 2020, Stier 2024

**Februar 2020** Auch im Februar zeigt die Karte vorwiegend blaue Farbtöne, was auf weiterhin niedrige Temperaturen hinweist. Die Übereinstimmung zwischen den Messpunkten und den interpolierten Linien ist gut sichtbar. Temperaturen zwischen 0 und 6 Grad Celsius dominieren, ähnlich wie im Januar. Die klare Farbtrennung und die pinken Ränder der Messpunkte erleichtern die visuelle Überprüfung der Interpolationsgenauigkeit.

**März 2020** Im März beginnt eine leichte Erwärmung, die durch die zunehmende Vielfalt an Blautönen sichtbar wird. Die interpolierten Temperaturen und die Messpunkte zeigen eine gute Übereinstimmung, insbesondere im Bereich von 3 bis 9 Grad Celsius. Die Verteilung der Temperaturen ist konsistent und zeigt, dass die Interpolation die räumlichen Temperaturvariationen gut erfasst hat.

**April 2020** In der Darstellung von April ist eine deutliche Erwärmung erkennbar, was sich in einer breiteren Farbpalette zeigt, die von Blau über Grün bis hin zu Gelb reicht. Die Temperaturen liegen hauptsächlich zwischen 6 und 12 Grad Celsius. Die Messpunkte stimmen gut mit den interpolierten Linien überein, was darauf hinweist, dass die Interpolation die tatsächlichen Tem-

## Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer März 2020

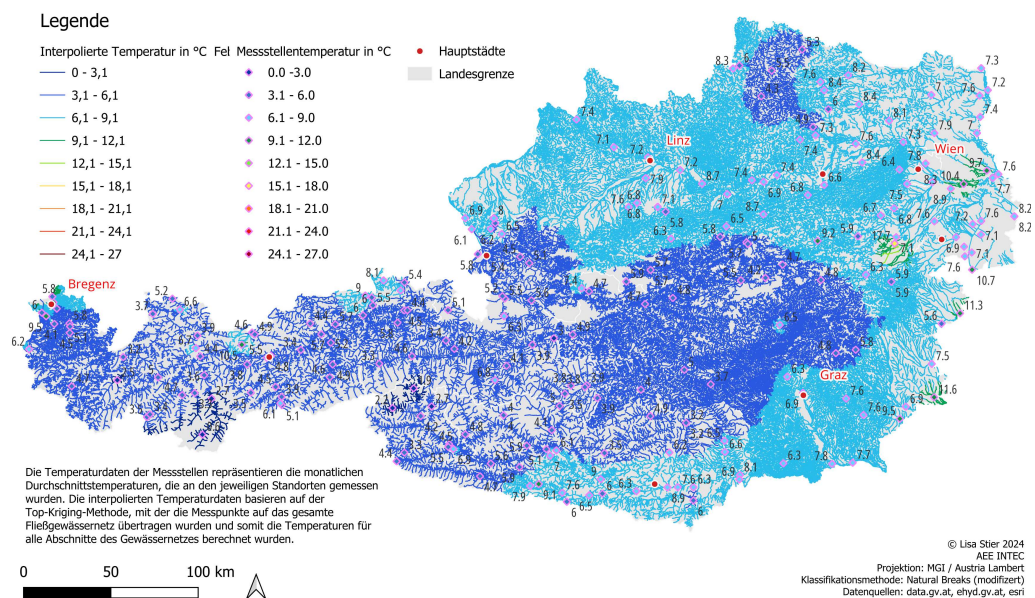


Abbildung 20: Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer März 2020, Stier 2024

## Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer April 2020

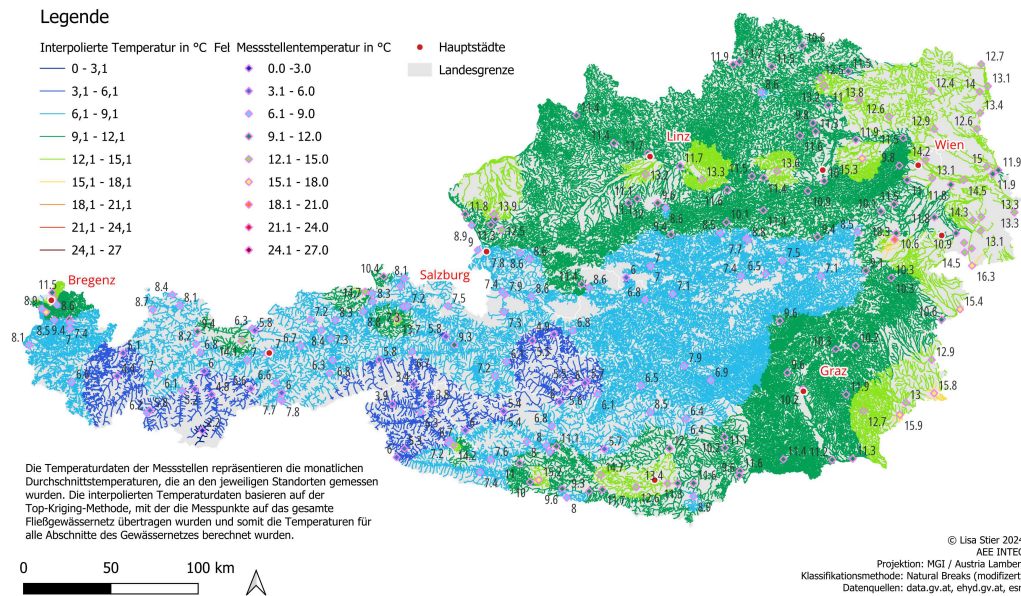


Abbildung 21: Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer April 2020, Stier 2024

peraturverteilungen gut wiedergibt.

**Mai 2020** Im Mai zeigt die Karte eine noch größere Vielfalt an Farben, was auf weiter steigende Temperaturen hinweist. Die Temperaturen variieren zwischen 4 und 18 Grad Celsius. Die Messpunkte und die interpolierten Linien zeigen eine hohe Übereinstimmung, insbesondere in den Bereichen mit höheren Temperaturen. Die verwendete Farbskala erleichtert die visuelle Überprüfung der Interpolationsergebnisse.

**Juni 2020** Im Juni sind die Temperaturen weiter gestiegen, was sich in der dominierenden Präsenz von Grün- und Gelbtönen zeigt. Die Temperaturen liegen größtenteils zwischen 9 und 18 Grad Celsius. Die Übereinstimmung der Messpunkte mit den interpolierten Linien ist weiterhin gut, was die Zuverlässigkeit der Interpolation unterstreicht.

**Juli 2020** Der Juli zeigt gemeinsam mit dem August die höchsten Temperaturen des Jahres, dargestellt durch eine Vielzahl von Gelb-, Orange- und Rottönen. Die Temperaturen reichen im Juli bis über 24 Grad Celsius. Die Messpunkte passen gut zu den interpolierten Linien, insbesondere in den wärmeren Bereichen. Dies zeigt, dass die Interpolation auch bei höheren Tempe-



## Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Mai 2020

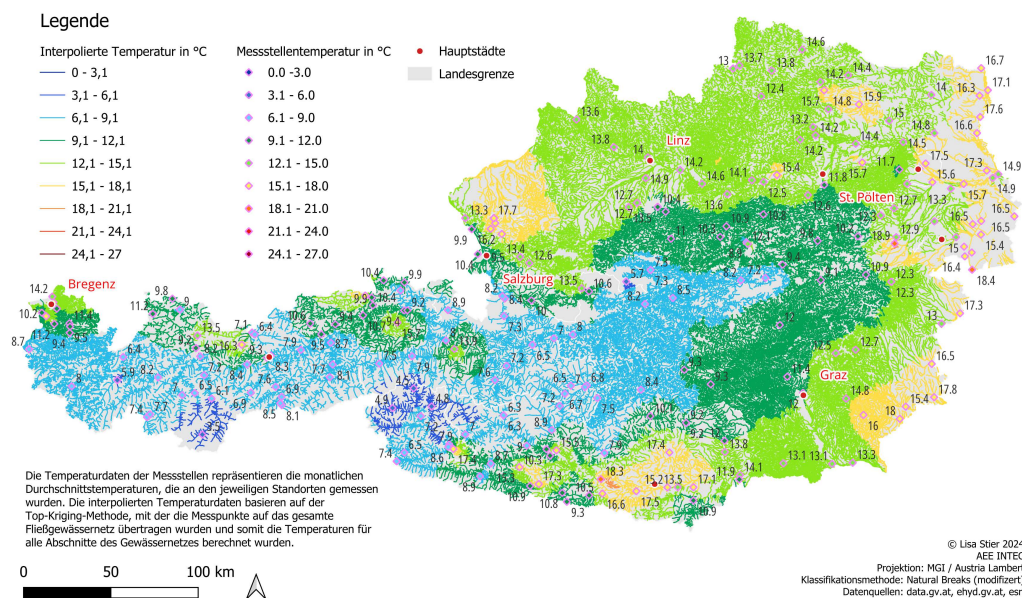


Abbildung 22: Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Mai 2020, Stier 2024

## Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Juni 2020

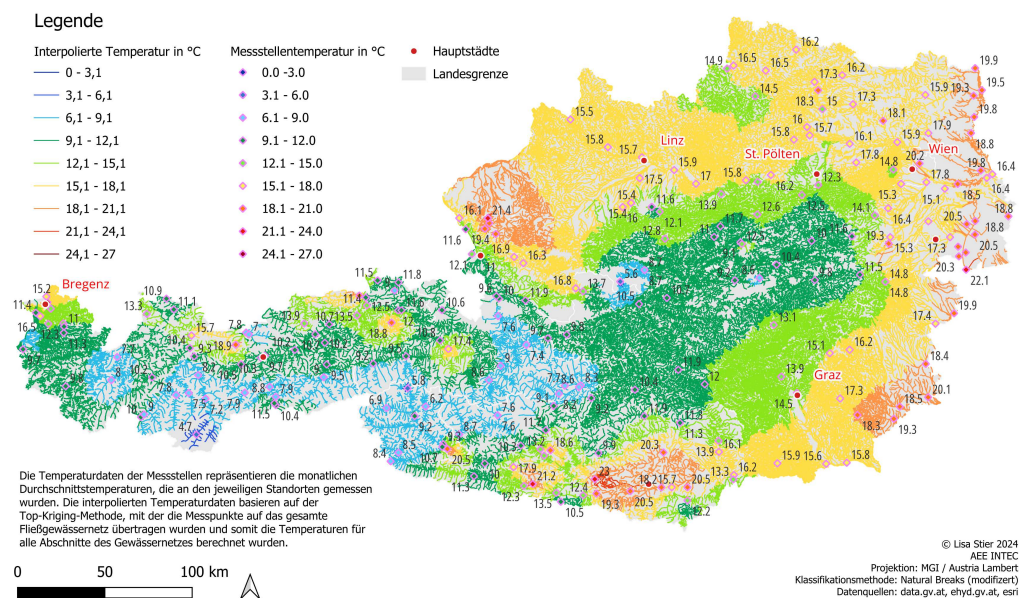


Abbildung 23: Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Juni 2020, Stier 2024

## Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Juli 2020

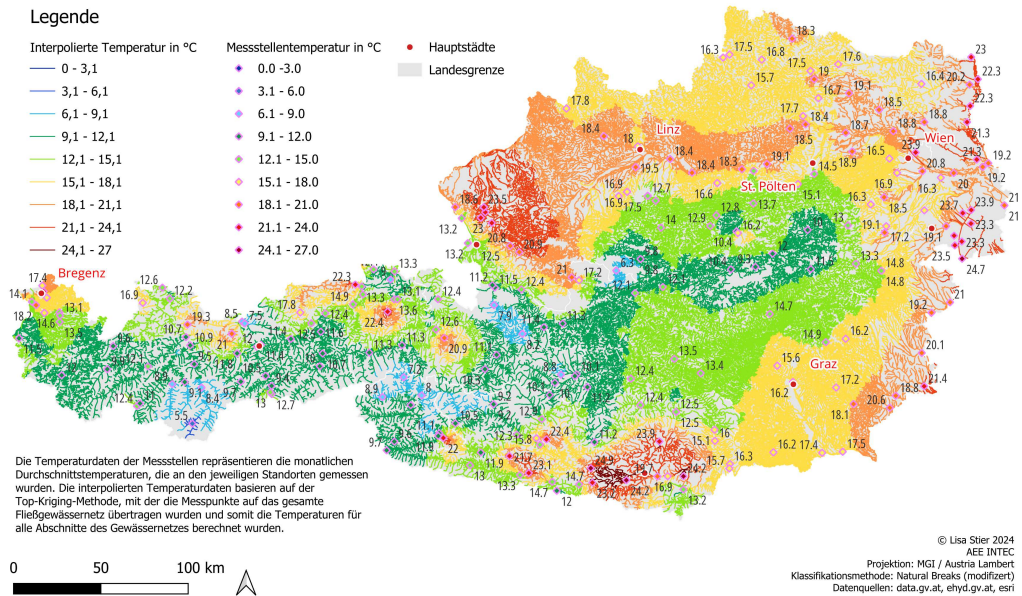


Abbildung 24: Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Juli 2020, Stier 2024

raturen genau ist.

**August 2020** Im August bleiben die Temperaturen hoch, was durch die intensive Farbpalette deutlich wird. Temperaturen variieren zwischen 5 und 25 Grad Celsius. Die Messpunkte und die interpolierten Linien zeigen eine enge Übereinstimmung in allen Temperaturstufen, was die Genauigkeit der Interpolation bestätigt. Die Karte visualisiert die vielfältigen Sommertemperaturen der Alpenregion Österreich effektiv.

**September 2020** Die Karte von September leitet die jährliche Abkühlung ein. Sichtbar ist dies durch die generelle Mischung von Gelb-, Grün- und Blautönen und besonders die Abnahme Orange- und Rottöne. Die Messpunkte und interpolierten Linien stimmen weiterhin gut überein. Dies zeigt, dass die Interpolation auch während der Übergangsmonate verlässlich ist.

**Oktober 2020** Im Oktober sind die Temperaturen weiter gesunken, was durch die verstärkte Präsenz von Blau- und Grüntönen und nicht mehr vorhandenen Orange- und Rottönen sichtbar ist. Lediglich eine kleine gelbe Wärmeinsel im Osten Österreichs ist zu sehen. Die Übereinstimmung zwischen den Messpunkten und den interpolierten Linien bleibt hoch, was die Interpolati-

## Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer August 2020

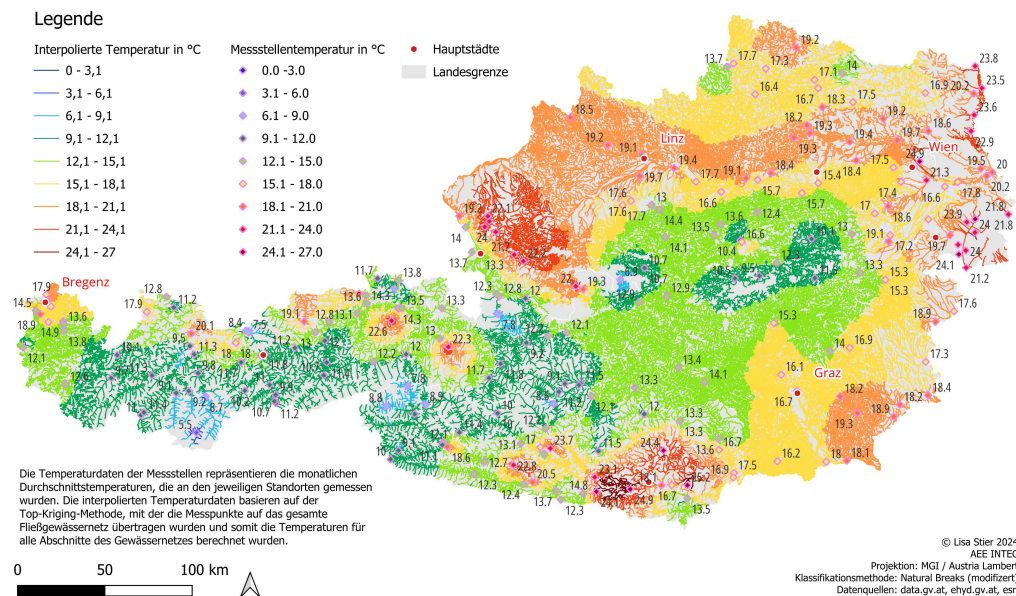


Abbildung 25: Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer August 2020, Stier 2024



## Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer September 2020

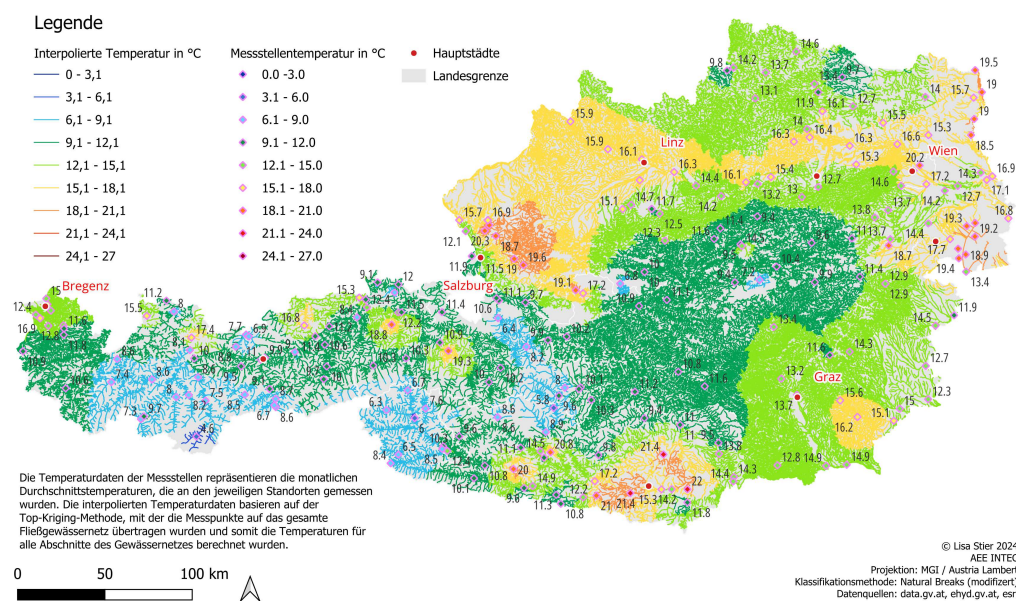


Abbildung 26: Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer September 2020, Stier 2024

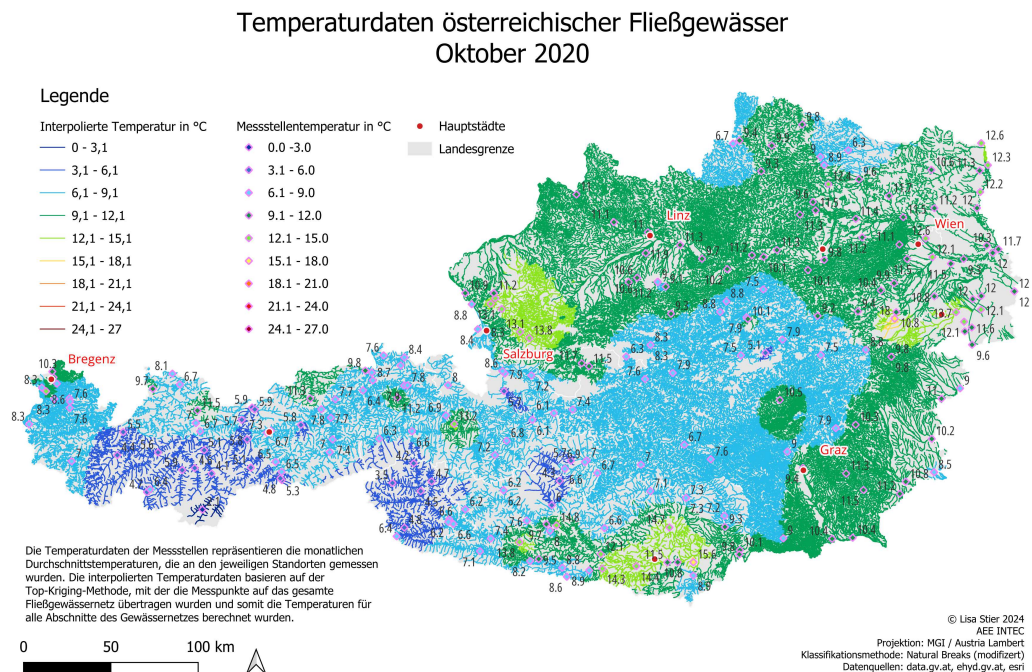


Abbildung 27: Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Oktober 2020, Stier 2024

onsmethode als robust und verlässlich bestätigt.

November 2020 Im November dominieren wieder kältere Temperaturen, dargestellt durch klar überwiegend blaue Töne. Die Temperaturen liegen hauptsächlich zwischen 2 und 8 Grad Celsius. Die Messpunkte stimmen gut mit den interpolierten Linien überein, was die Genauigkeit der Interpolation unter kälteren Bedingungen bestätigt.

Dezember 2020 Im Dezember zeigt die Karte erneut vorwiegend blaue Farbtöne. Die bereits erwähnte Wärmeinsel entspricht sowohl im November als auch im Dezember nur noch der grünen Farbskala. Die Messpunkte und die interpolierten Linien passen stets gut zusammen, was zeigt, dass die Interpolation auch bei tiefen Wintertemperaturen zuverlässig ist.

Die monatlichen Karten zeigen eine konsistente und verlässliche Übereinstimmung zwischen den interpolierten Temperaturdaten und den ursprünglichen Messpunkten. Die Farbskala, die Temperaturen in 3-Grad-Stufen darstellt, ermöglicht eine klare und detaillierte Visualisierung der Temperaturverläufe. Durch die einheitliche Darstellung der Punkte und Linien in derselben Farbpalette wurde die visuelle Überprüfung der Interpolation erleichtert. Die

## Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer November 2020

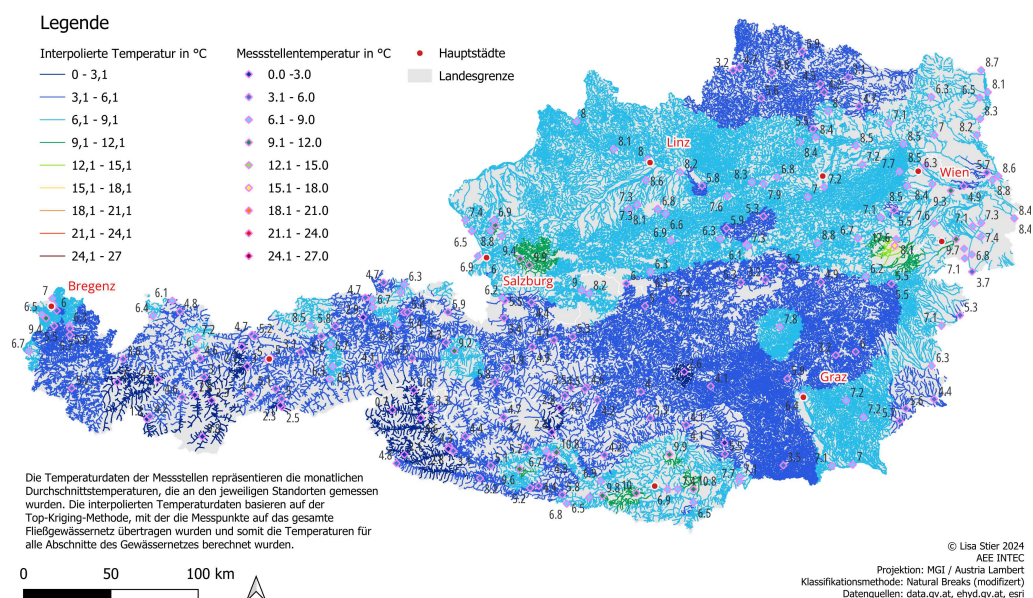


Abbildung 28: Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer November 2020, Stier 2024

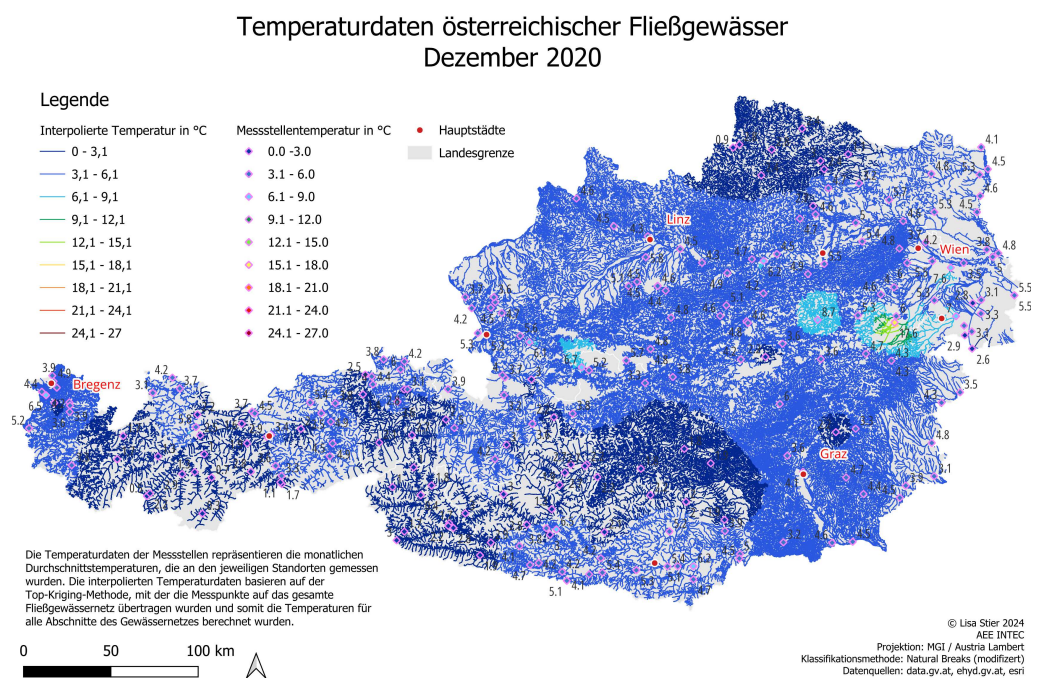


Abbildung 29: Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Dezember 2020, Stier 2024

sorgfältig gewählte Farbskala, die von Blau (kalt) über Grün bis Rot (warm) reicht, unterstützt die intuitive Interpretation der Daten über alle Jahreszeiten hinweg. Insgesamt bestätigen die Karten die Genauigkeit der Interpolation und bieten eine solide Grundlage für weiterführende Analysen und Anwendungen im Bereich der hydrologischen Studien und der Nutzung von Wärmepumpen in Fließgewässern.

## 6 Wärmepotenzialkarte erstellen

In diesem Kapitel wird die Erstellung einer Wärmepotenzialkarte beschrieben. Zunächst wird die grundlegende Wärmekapazität von Gewässern erläutert, um ein Verständnis für die physikalischen Eigenschaften und deren Bedeutung im Kontext der Temperaturverteilung in Fließgewässern zu schaffen. Anschließend wird detailliert auf die Berechnung der Wärmekapazität in unserem spezifischen Fall eingegangen. Dabei werden die bereits erläuterten Datenquellen genutzt, um die Wärmepotenzialkarte der Fließgewässer umzusetzen. Ziel ist es, mit der selben Datengrundlagen des Flussnetztes und den Basiseinzugsgebieten zu arbeiten, um die Ergebnisse der Wärmekapazität im Anschluss mit denen der Temperaturinterpolationen verknüpfen zu können.

### 6.1 Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität ( $c$ ) beschreibt die Menge an Wärme ( $Q$ ), die erforderlich ist, um die Temperatur einer bestimmten Masse ( $m$ ) eines Materials um eine bestimmte Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zu ändern. An der Formel

$$c = (1/m) * (Q/\Delta T)$$

ist zu sehen, dass die spezifische Wärmekapazität direkt proportional zur benötigten Wärme und umgekehrt proportional zur Masse und Temperaturänderung ist. Um die Wärmemenge ( $Q$ ) zu berechnen, die nötig ist, um die Temperatur eines Flusses zu ändern, formen wir die Gleichung um:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

Das isolierte  $Q$  wird erhalten, wenn beide Seiten mit

$$m * \Delta T$$

multipliziert werden. (Lüders, 2023)

$$Q = m * c * \Delta T$$

Die Bedeutung der physikalischen Größen ist dabei in unserem Beispiel wie folgt:  $Q$  repräsentiert die Wärmemenge in Joule (J), die erforderlich ist, um die Temperatur zu ändern,  $m$  steht für die Masse des Flusswassers in Kilogramm (kg),  $c$  ist die spezifische Wärmekapazität des Wassers, die 4,18 J/(g°C) oder 4180 J/(kg°C) beträgt.  $\Delta T$  bezeichnet die Temperaturänderung in Grad Celsius (°C), die mit Hilfe der Wärmepumpe umgesetzt werden soll.



(Lüders, 2023)

Um die Wärmekapazität eines Flusses zu ermitteln, braucht es die Werte des Flusswassers ( $m$ ), die spezifische Wärmekapazität des Wassers ( $c$ ) und die gewünschte Temperaturänderung  $\Delta T$ . Mit diesen Werten kann dann die erforderliche Wärmemenge ( $Q$ ) berechnet werden.

Beispielsweise, wenn wir die Masse des Flusswassers auf 10.000 kg schätzen, die spezifische Wärmekapazität von Wasser bei 4,18 J/g°C (oder 4180 J/kg°C) liegt und wir eine Temperaturänderung von 5°C anstreben, berechnet sich die benötigte Wärmemenge wie folgt:

$$Q = 10,000 \text{ kg} \times 4180 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \times 5 ^\circ\text{C} \quad (1)$$

$$Q = 209,000,000 \text{ J} \quad (2)$$

(Lüders, 2023)

Diese Berechnung zeigt, dass 209 Millionen Joule Wärmeenergie produziert werden können, wenn man dem Flusswasser 5°C Wärme entzieht.

Die Datengrundlage für die Berechnung der Wärmemenge, die einem Fluss zur Energiegewinnung durch eine Wärmepumpe entzogen wird, basiert auf den interpolierten mittleren Jahresabflüssen, die als Shape-File vorliegen. Der Durchfluss wird in Kubikmetern ( $\text{m}^3$ ) angegeben, wobei die spezifische Wärmekapazität von Wasser  $c$  4,18 kJ pro ( $\text{kg}^\circ\text{C}$ ) beträgt. (Lüders, 2023)

Um die Masse  $m$  in Kilogramm (kg) zu berechnen, wird das Volumen  $V$  in Kubikmetern mit der Dichte von Wasser ( $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ ) multipliziert:

$$m = V \text{m}^3 \times 1000 \text{ kg}/\text{m}^3 \quad (\text{Lüders, 2023})$$

Wenn der Durchfluss beispielsweise  $10 \text{ m}^3$  beträgt und wir dem Fluss 5°C entziehen wollen, ergibt sich:

$$m = 10 \text{ m}^3 \times 1000 \text{ kg}/\text{m}^3 = 10.000 \text{ kg}$$

Die Wärmemenge  $Q$  wird dann berechnet als:

$$Q = 10.000 \text{ kg} \times 4,18 \text{ kJ}/\text{kg}^\circ\text{C} \times (5^\circ\text{C}) \quad Q = 209.000 \text{ kJ}$$

(Lüders, 2023)

Dies bedeutet, dass in diesem Beispiel 209.000 Kilojoule Wärmeenergie dem Flusswasser entzogen werden, um es um 5°C abzukühlen. Die Ergebnisse können auch in andere Einheiten wie beispielsweise Kilo- oder Megawatt umgerechnet werden, beziehungsweise werden direkt in einer anderen Einheit erhalten, je nach dem in welchen Einheiten der Dateninput gegeben ist. (Lüders, 2023)

Wie die Erläuterungen zur Berechnung der Wärmekapazität gezeigt haben, werden die interpolierten Temperaturen für die direkte Berechnung der Wärmekapazität eines Flussabschnittes nicht benötigt, da die Wärmekapazität aus der Masse des Flusswassers, der spezifischen Wärmekapazität des Wassers und der gewünschten Temperaturänderung berechnet wird. Allerdings spielen die interpolierten Temperaturdaten eine entscheidende Rolle im späteren Verlauf der Analyse. Das Ziel besteht demnach darin, anhand der mit den Durchflussraten berechneten Wärmekapazitäten herauszufiltern, in welchen Gebieten die Gewässertemperaturen hoch genug ist, um Wärme mit einer Wärmepumpe abzuleiten. Dies wird ermöglicht, indem die interpolierten Temperaturen mit den berechneten Wärmekapazitäten verknüpft werden, um Standorte zu identifizieren, die sich für den Einsatz von Wärmepumpen eignen. Diese Vorgehensweise wird im späteren Verlauf der Arbeit detailliert erklärt und durchgeführt. Es wird gezeigt, wie die beiden Karten – eine mit den interpolierten Temperaturdaten und eine mit den berechneten Wärmekapazitäten – technisch verknüpft werden, um eine umfassende Wärmepotenzialanalyse zu ermöglichen.

(Lüders, 2023)

## 6.2 Datenaufbereitung der Durchflussraten in QGIS

Um die bereits fertigen Durchflussdaten, die als Linien-Shape File vorliegen aufzubereiten, werden sie zunächst per Drag-and-Drop in QGIS geladen. Anschließend wird der Layer mit dem Verschneidungstool mit dem Polygon Shape File der Basiseinzugsgebiete verschnitten. Dies geschieht durch den Aufruf des Verschneidungs-Tools aus dem Geoverarbeitungs-menü, wobei der Durchfluss (Q) als Eingabelayer gesetzt wird. Durch diese Verschneidung werden die Durchflusslinienelemente an den Grenzen der Polygone der Basiseinzugsgebiete geschnitten, sodass jede resultierende Linie innerhalb der Grenzen eines Einzugsgebiets liegt - genau wie die der interpolierten Temperatur. Das heißt, es wird im späteren Prozess möglich sein die Daten miteinander zu verknüpfen.

Aus dieser Verschneidung wird ein neues Shape File erstellt, in dem die



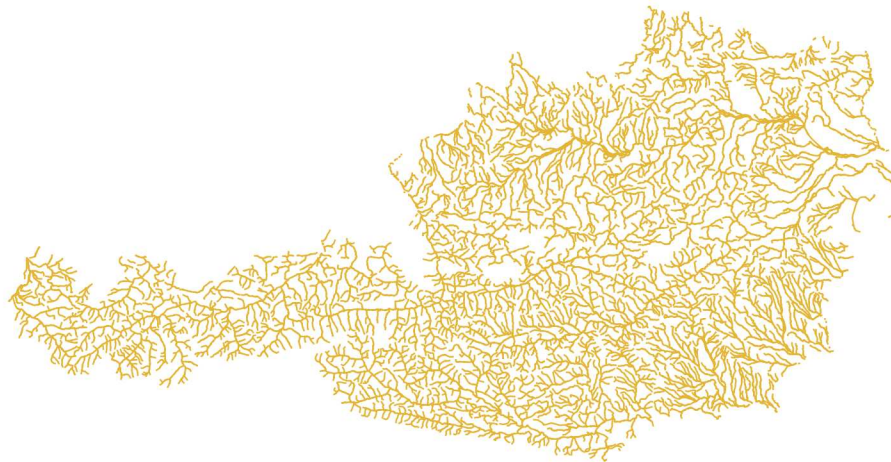


Abbildung 30: QGis: Durchflusslayer, Stier 2024

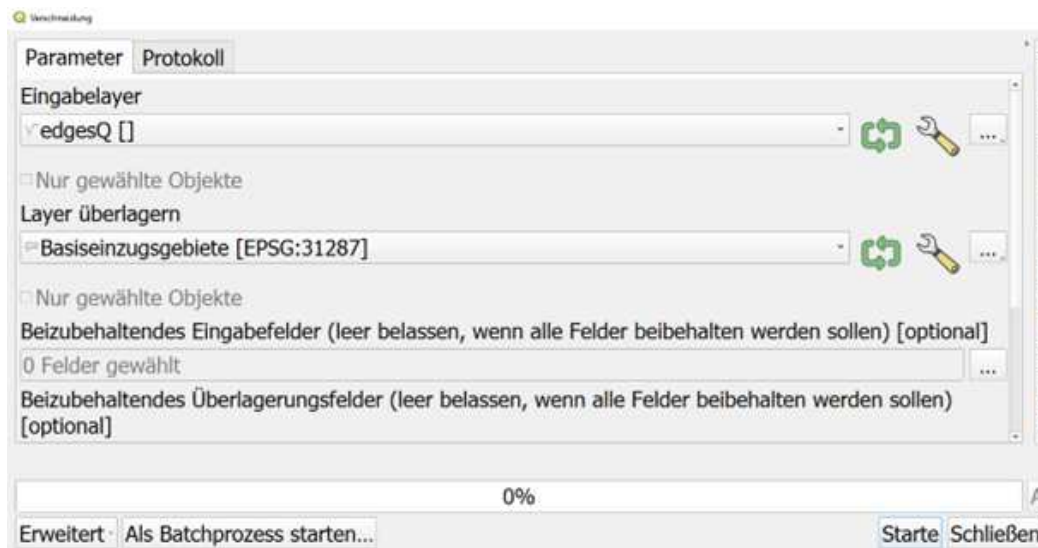


Abbildung 31: QGis: Durchflusslayer Verknüpfung mit Basiseinzugsgebieten, Stier 2024

entsprechenden Linienabschnitte den jeweiligen Einzugsgebieten zugeordnet sind. Im nächsten Schritt werden diese geschnittenen Linien mit dem Shape File der Basiseinzugsgebiete verknüpft, indem das Tool "Verknüpfen nach Position" verwendet wird. Dabei werden die Attribute der Basiseinzugsgebiete auf die entsprechenden, geschnittenen Linienabschnitte übertragen. Dies ermöglicht es, zusätzliche Informationen der Einzugsgebiete, wie beispielsweise Name und ID, den entsprechenden Durchflusslinien zuzuweisen, was für den späteren Prozess gebraucht wird.

Das Ergebnis dieser Verknüpfung wird als neuer Layer "durchfluss\_bezg" gespeichert, indem der erstellte Layer in der Layerliste ausgewählt und mit der Option "Exportieren" dann mit der Funktion "Vektordaten speichern" in den entsprechenden Ordner abgelegt. Der entstandene Datensatz bildet nun die Grundlage für die weiterführende Aufbereitung der Wärme Gleichung.

### 6.3 Verknüpfung von Durchfluss und Temperatur

Nachdem die Durchflussdaten nun erfolgreich aufbereitet wurden, indem sie per Drag-and-Drop in QGIS geladen und anschließend mit dem Polygon-Shape-File der Basiseinzugsgebiete verschnitten wurden, liegen sie jetzt im benötigten Format vor. Diese neuen, an den Grenzen der Einzugsgebiete geschnittenen Flussabschnitte sind nun nach der Aufbereitung bereit für die Verarbeitung. Das Ziel ist es, diese aufbereiteten Durchflussdaten mit den interpolierten Temperaturdaten zu verknüpfen. Diese Verknüpfung wird es ermöglichen, das Wärmepotenzial der unterschiedlichen Flussabschnitte zu analysieren und damit die geeigneten Gebiete für die Nutzung von Wärmepumpen zu identifizieren.

Der im vorherigen Schritt erstellte Layer "durchfluss\_bezg" wird im nächsten Schritt mit den interpolierten Temperaturdaten von Dezember, die im Layer "pred\_dez\_bezg" vorliegen, verknüpft. Dazu wird das Tool "Verknüpfen nach Feldwert" verwendet.

Zunächst wird der Layer "durchfluss\_bezg" ausgewählt und als Ziel-Layer festgelegt. Anschließend wird der Layer "pred\_dez\_bezg" als Join-Layer ausgewählt. In den Einstellungen des Tools wird festgelegt, dass die Verknüpfung anhand des gemeinsamen Attributs HZB-Code erfolgt, was durch die vorherige Verknüpfung der Durchflussdaten mit dem Basiseinzugsgebiet nun in beiden Layern vorhanden ist. Damit werden die vorhergesagten Temperaturdaten des Monats Dezember den entsprechenden Durchflusslinien zugeordnet.

Nachdem die Verknüpfung durchgeführt wurde, entsteht ein neuer Layer, der die für die Wärme Gleichung relevanten Informationen, nämlich den Durch-

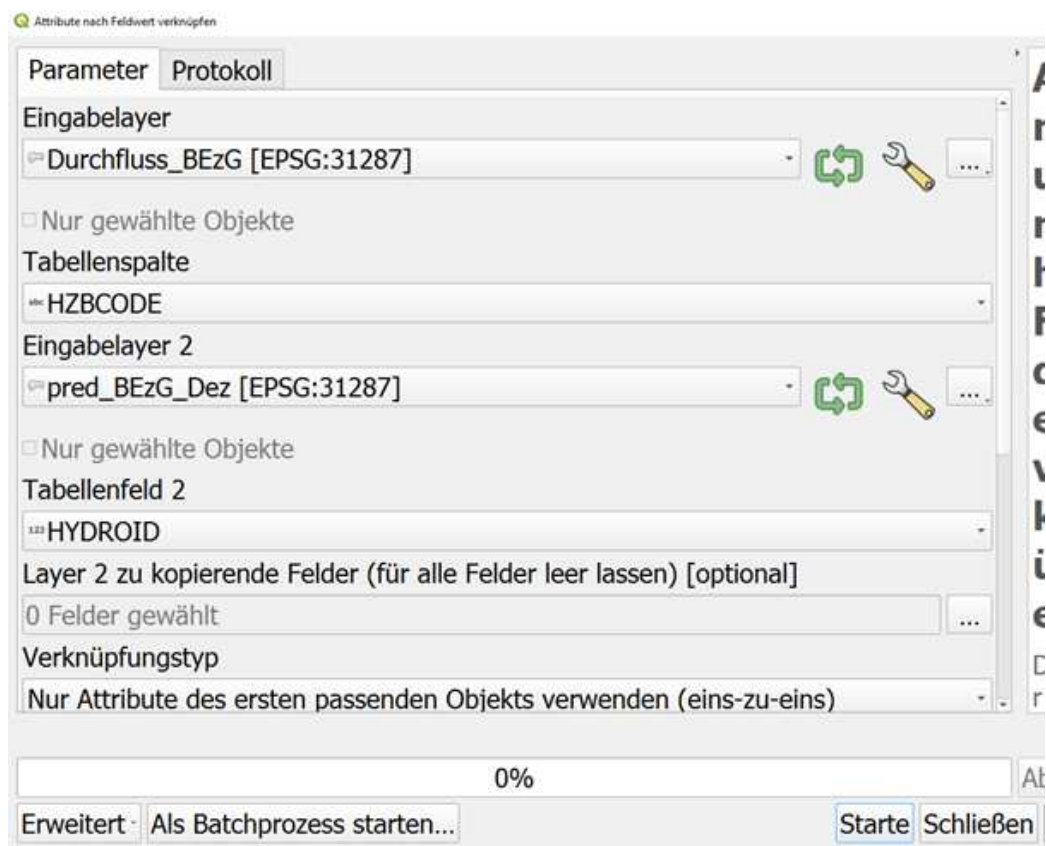


Abbildung 32: QGis Anwendung nach Feldwert verknüpfen, Stier 2024

flussdaten und die vorhergesagten Temperaturdaten, kombiniert. Dieser Layer wird als "durchfluss\_temp\_dez" gespeichert, da es sich hier um die Temperaturdaten von Dezember handelt. Der neue Layer wird dann ausgewählt und mit der Option "Exportieren" und "Objekte speichern" als im entsprechenden Ordner abgelegt. Dieser Schritt ist entscheidend, um eine integrierte Datengrundlage zu schaffen, die sowohl die räumliche Verteilung der Durchflussmengen als auch die Temperaturverhältnisse im Dezember widerspiegelt und somit für weiterführende Analysen bereitsteht.

## 6.4 Q Effektiv - Teilstromberechnung

Die Datenquelle für die Masse  $m$  bezieht sich auf den gesamten Durchfluss des Flusses über seine gesamte Breite. In der Praxis lässt eine Wärmepumpe jedoch nur einen Teil des Durchflusses durch die Pumpe strömen. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit bei der Berechnung der entnommenen Wärmemenge  $Q$  nur 10 % des gesamten Durchflusses berücksichtigt. Wenn die gesamte berechnete Wärmemenge  $Q$  209.000 kJ beträgt, wird demnach für die tatsächliche Anwendung wie folgt berechnet:

$$Q_{\text{effektiv}} = 0,10 \cdot 209.000 \text{ kJ} = 20.900 \text{ kJ}$$

Dies bedeutet, dass in der Praxis nur 20.900 Kilojoule Wärmeenergie dem Flusswasser entzogen werden. Dass nur 10% des Flusswassers durch eine Wärmepumpe geleitet wird, ist eine Annahme, da dies von der spezifischen Auslegung und den technischen Spezifikationen der jeweiligen Wärmepumpe und dem Fluss abhängt. In der Praxis wird häufig nur ein Teil des gesamten Durchflusses verwendet, um die Effizienz der Pumpe zu optimieren und den Eingriff in das natürliche Flusssystem zu minimieren. Diese Annahme basiert auf allgemeinen technischen und umweltbezogenen Überlegungen bei der Nutzung von Flusswasser für Wärmepumpensysteme.

Der erstellte Layer "durchfluss\_temp\_dez" enthält eine Spalte mit den Durchflussdaten, deren Spaltenname "v3" ist. Um die Daten weiter zu verarbeiten, öffnet man die Attributtabelle des Layers und wählt die Option "Field-calculator" aus. In diesem Feldrechner wird ein neues Feld durch eine Berechnung angelegt. Die Werte des neuen Feldes mit dem Namen "Durchfl\_10P" bestehen aus den Durchflusswerten der Spalte "v3", die jedoch mit 0,1 multipliziert werden. Dieser Schritt ist notwendig, weil nur ein Teil des tatsächlichen Durchflusses auch tatsächlich durch die Wärmepumpe geleitet wird. Basierend auf Literaturangaben wurde festgelegt, dass dieser Anteil für das vorliegende Projekt mit 10 Prozent berechnet wird. Daher wird die Multiplikation mit 0,1 vorgenommen, um den realistisch nutzbaren Durchfluss für die Wärmepumpen zu berechnen. Im Feldrechner wird dafür wie aufgeführt eine neue Spalte erstellt, in der die berechneten Werte zur weiteren Nutzung

gespeichert werden. Nachdem diese Berechnung abgeschlossen ist und die neuen Werte gespeichert wurden, verfügt der Layer nun über eine Spalte, die den angepassten Durchfluss darstellt. Diese angepasste Datengrundlage ist entscheidend für die weitere Analyse und Bewertung der Standorte für die Wärmepumpen, da sie die realistisch nutzbaren Durchflussmengen berücksichtigt.

## 6.5 Wärmepotenzial in QGis berechnen

Nun steht der finale und entscheidende Schritt der Analyse an: Die Anwendung der Wärmekapazitätsformel direkt auf die zuvor aufbereiteten Daten in QGis. In diesem Abschnitt wird erläutert, wie die spezifische Wärmekapazität des Wassers unter Berücksichtigung der Masse des Flusswassers und der gewünschten Temperaturänderung berechnet wird. Die hierfür erforderlichen Berechnungen werden direkt in QGis mithilfe des Werkzeugs "Feldrechner" durchgeführt. Diese Methode ermöglicht es, die theoretischen Grundlagen der Wärmekapazität praktisch anzuwenden und eine umfassende Wärmepotenzialanalyse auf Basis der geographischen und hydrologischen Daten durchzuführen. Durch die Integration der berechneten Wärmekapazität in die bestehende räumliche Datenstruktur wird es möglich, präzise Aussagen über das Wärmepotenzial in den verschiedenen Einzugsgebieten zu treffen und somit eine fundierte Grundlage für die Nutzung von Wärmepumpen im Fließgewässernetz zu schaffen.

In diesem Schritt wird der Layer "Routen\_Dez\_Waerme" geöffnet. Um die notwendigen Berechnungen durchzuführen, öffnet man die Attributtabelle dieses Layers und wählt den "Feldrechner" aus. Im Feldrechner wird eine neue Spalte angelegt, die entsprechend benannt wird, beispielsweise "waermepot\_2020". Im vorliegenden Beispiel trägt die neue Spalte den Namen "Waerme\_neu".

In dieser neuen Spalte wird dann das Wärmepotenzial berechnet. Die Berechnung erfolgt aus der zuvor erstellten Spalte "Durchfl\_10P", die den angepassten Durchfluss enthält, die dann mit dem Faktor 4,19 multipliziert wird und dann ein weiteres mal mit dem Faktor 3 multipliziert wird. Diese Faktoren stammen aus der spezifischen Wärmekapazität von Wasser und der Menge der entzogenen Wärme. Die Formel für die Wärmepotenzial-Berechnung lautet somit:

Durchfluss (Durchfl\_10%) multipliziert mit der spezifischen Wärmekapazität (4,19) multipliziert mit der entzogenen Wärme (3°C).

Dieser Berechnungsansatz basiert auf den Literaturangaben zur Wärme Gleichung, die das Wärmepotenzial in Bezug auf den Durchfluss und die spezifische Wärmekapazität eines flüssigen Mediums beschreibt. Im Feldrechner

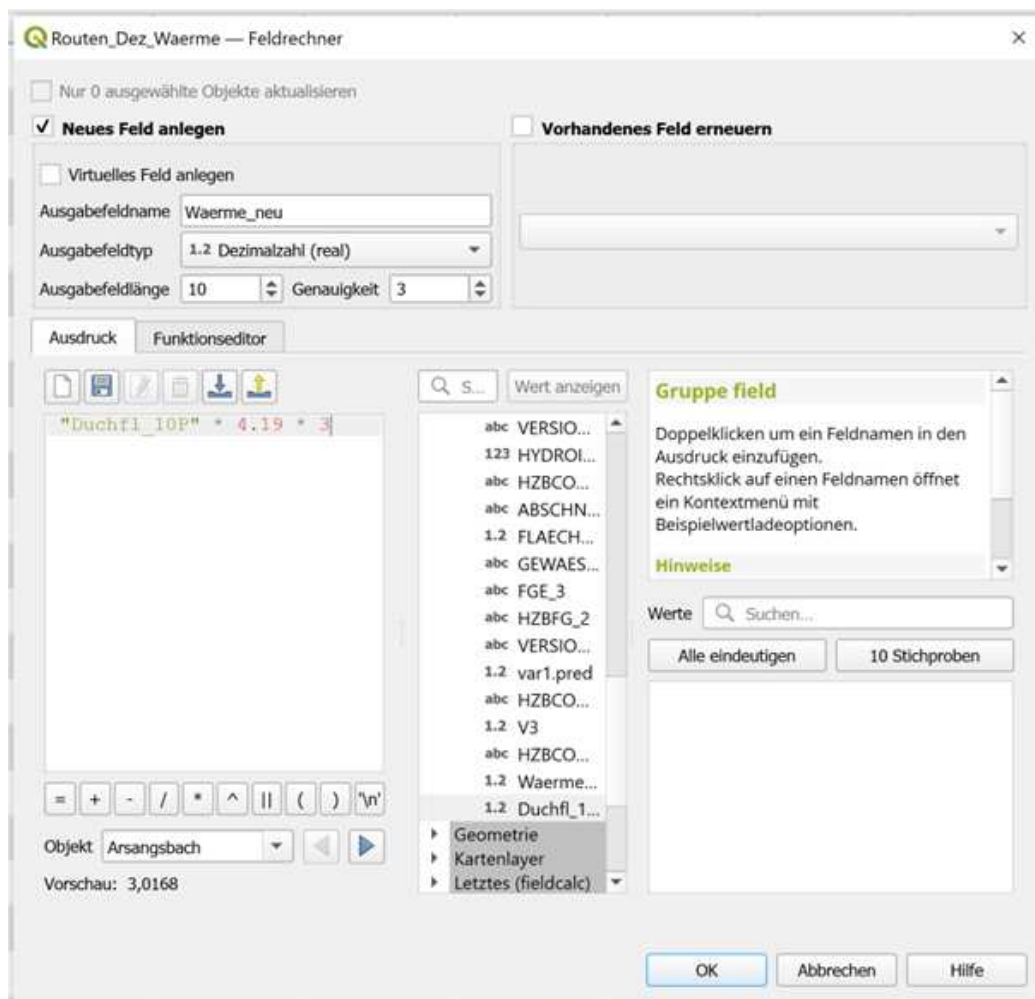


Abbildung 33: QGis Anwendung Feldrechner, Stier 2024

wird somit die neue Spalte "Waerme\_neu" erstellt, indem die Formel "Durchfl\_10P" multipliziert mit 4,19 multipliziert mit 3 eingegeben wird.

Nachdem die Berechnung abgeschlossen ist und die neuen Werte gespeichert wurden, enthält der Layer nun eine Spalte, die das berechnete Wärmepotenzial darstellt. Diese angepassten Wärmewerte sind entscheidend für die weitere Analyse und Bewertung der Standorte für die Wärmepumpen, da sie das realistisch nutzbare Wärmepotenzial unter Berücksichtigung der spezifischen Wärmekapazität und der Menge der entzogenen Wärme widerspiegeln. Der erstellte Layer wird mit einem entsprechenden Titel exportiert, im vorliegenden Beispiel wurde er "Routen\_Dez\_Waerme" genannt, da mit den Daten von Dezember gearbeitet wurde. Der Layer dient als Basis, um die Wärmepotenzial-Berechnung mit Temperaturdaten auf anderen Monaten zu verknüpfen, beispielsweise März oder August. Diese Verknüpfung erfolgt stets über das Tool "Attribute nach Feldwert verknüpfen", wobei der Eingabelayer der gewünschte Monat ist, zum Beispiel März, und der zweite Layer der Basislayer Dezember. Die Verknüpfung wird über das gemeinsame Attribut in der Tabellenspalte "hzbcode" durchgeführt, das in beiden Layern vorhanden ist.

Dieser Prozess wird dann für alle gewünschten Zeitfenster durchgeführt, im vorliegenden Projekt also für alle zwölf Monate des Jahres 2020. Für jeden Monat wird ein entsprechender Ordner erstellt und die Daten werden als "Routen\_Monat\_Waerme.shp" abgespeichert, wobei "Monat" durch die jeweilige Monatsabkürzung ersetzt wird. Auf diese Weise entsteht für jeden Monat eine eigene Wärmepotenzialkarte, die auf den entsprechenden Temperaturdaten des jeweiligen Monats und den generellen Durchflussmengen basiert. Dies ermöglicht eine detaillierte und monatlich angepasste Analyse des Wärmepotenzials und bietet damit eine solide Grundlage für die Planung und Bewertung der Nutzungsmöglichkeiten von Wärmepumpen in den unterschiedlichen Jahreszeiten Österreichs.

## 6.6 Berechnetes Wärmepotenzial visualisieren

In diesem Unterkapitel wird erläutert, wie der erstellte Layer der generellen Flussroutenwärmekapazität genutzt wird, um das tatsächlich für den Einsatz von Wärmepumpen nutzbare Wärmepotenzial zu visualisieren. Dabei wird zunächst beschrieben, wie die Daten gefiltert werden, um eine Verknüpfung zur Temperatur darzustellen und nur die relevanten Werte anzuzeigen. Anschließend wird erklärt, wie diese gefilterten Daten symbolisiert werden, um eine aussagekräftige Karte zu erstellen.

Nachdem der Layer „routen\_dez\_waerme“ erstellt wurde, steht nun der nächste entscheidende Schritt an, nämlich die Visualisierung der Verknüp-

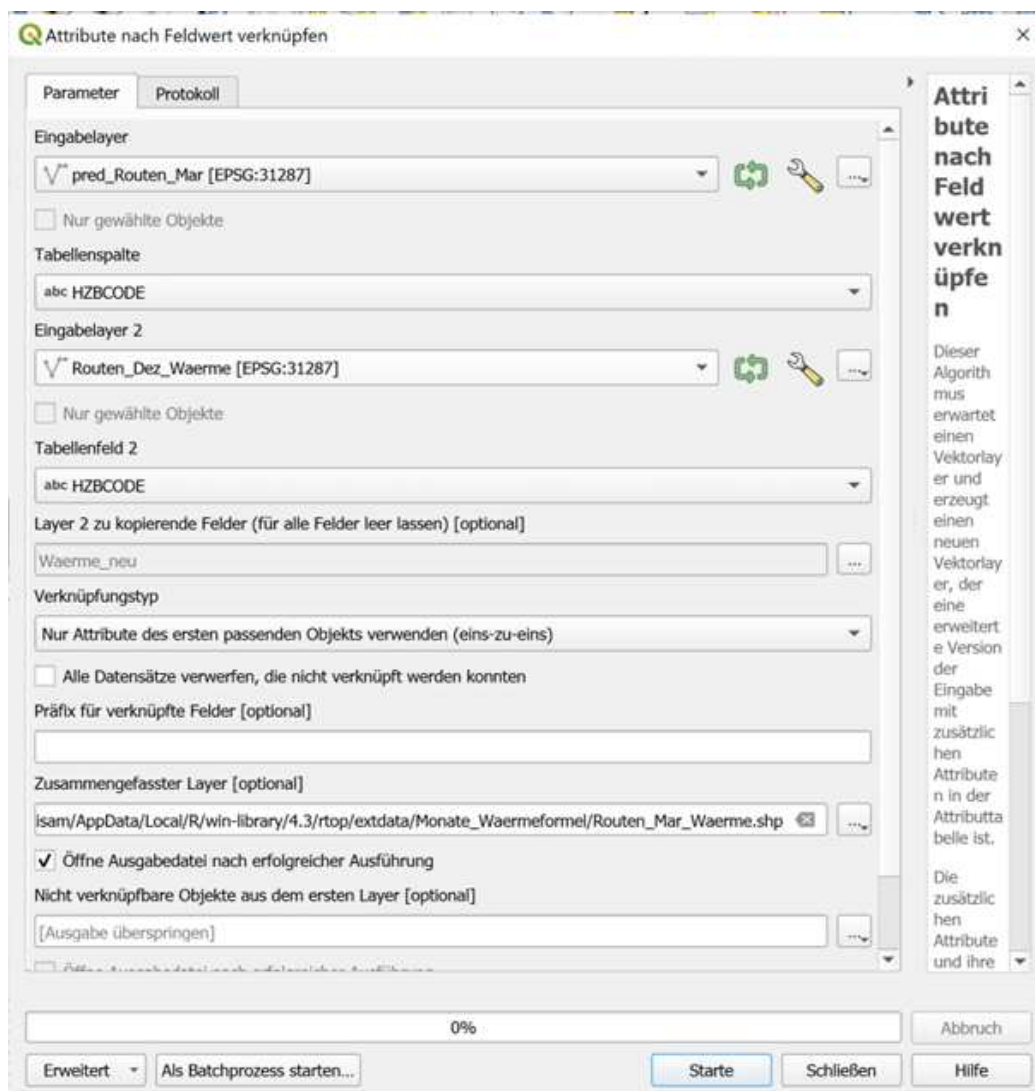


Abbildung 34: QGis: Interpolierte Temperaturlinien mit Wärmelayer verknüpfen, Stier 2024



fung der Wärmekapazität und der Gewässertemperatur. Um dies zu erreichen, müssen die Daten zunächst gefiltert werden, um eine Verknüpfung zur Temperatur darzustellen und nur die relevanten Werte anzuzeigen. Dieser Prozess ist für jedes Zeitfenster, in diesem Projekt monatlich, durchzuführen, da die Ausgangsdaten sich in einzelnen Dateien befinden.

Zunächst wird die Attributtabelle des Layers „routen\_dez\_waerme“ geöffnet. In dieser Tabelle sind die unterschiedlichen Attribute übersichtlich einzusehen. Auch die Spalte „var.pred1“, welches die interpolierten Temperaturwerte der Fließgewässerabschnitte enthält. Um sicherzustellen, dass nur die Flussabschnitte mit einer Temperatur von über 8 Grad Celsius angezeigt werden, wird ein Filter auf diese Spalte angewendet.

Der Filter von 8 Grad Celsius wird gewählt, da er als Mindesttemperatur für den effizienten Einsatz der Wärmepumpen gilt. Laut dem Wärmepumpenhersteller Vaillant ist die Wasser-Wasser-Wärmepumpe ein modernes und umweltfreundliches Heizungssystem, das Grundwasser als Energiequelle nutzt. Dieses System benötigt nur etwa ein Viertel der Energie in Form von Strom für den Pumpenbetrieb, der je nach Stromtarif und -quelle CO<sub>2</sub>-neutral und in Kombination mit einer Photovoltaikanlage energieautark sein kann. Die Funktionsweise der Wasser-Wasser-Wärmepumpe ist im Vergleich zu anderen Wärmepumpen sehr effektiv und zeichnet sich durch die höchsten Jahresarbeitszahlen aus. Bei dieser Art der Wärmepumpe wird die thermische Energie des Grundwassers zum Heizen und für die Warmwasserbereitung genutzt. Hierzulande liegt die Grundwassertemperatur zwischen acht und zwölf Grad Celsius, was bedeutet, dass die Wasser-Wasser-Wärmepumpe auf einem höheren Temperaturniveau startet als andere Wärmepumpen. (Vaillant, 2024) Sole/Wasser-Wärmepumpe, auch als Erdwärmepumpe bekannt, beziehen ihre Energie aus dem Erdboden. Der Vorteil des Erdreichs als Wärmequelle liegt in seiner konstanten Temperatur von etwa 8–10 Grad Celsius, die sowohl im Sommer als auch im Winter gegeben ist. Diese konstante Temperatur macht das Erdreich zu einer verlässlichen Energiequelle für Heizen und Warmwasserbereitung. Die Erdwärme wird mittels Erdsonden oder Erdkollektoren erschlossen und an die Wärmepumpe, die oberhalb der Erdoberfläche installiert ist, weitergeleitet. Ein Kältemittel zirkuliert in der Wärmepumpe, nimmt die Wärme aus dem Erdreich auf und gibt sie nach Verdichtung und weiterer Erwärmung an das Heizsystem ab. Diese Art von Wärmepumpen nutzt die konstante Erdwärme, um Gebäude umweltfreundlich zu heizen, zu kühlen und mit Warmwasser zu versorgen. (AIT-Austria GmbH, 2024)

Die beiden verschiedenen Quellen, sowohl die von Vaillant Wasser-Wasser-Wärmepumpe, als auch die zur Sole/Wasser-Wärmepumpe, weisen darauf hin, dass eine Mindesttemperatur von 8 Grad Celsius für den effizienten Betrieb von Wärmepumpen wichtig ist. Beide Systeme nutzen stabile und

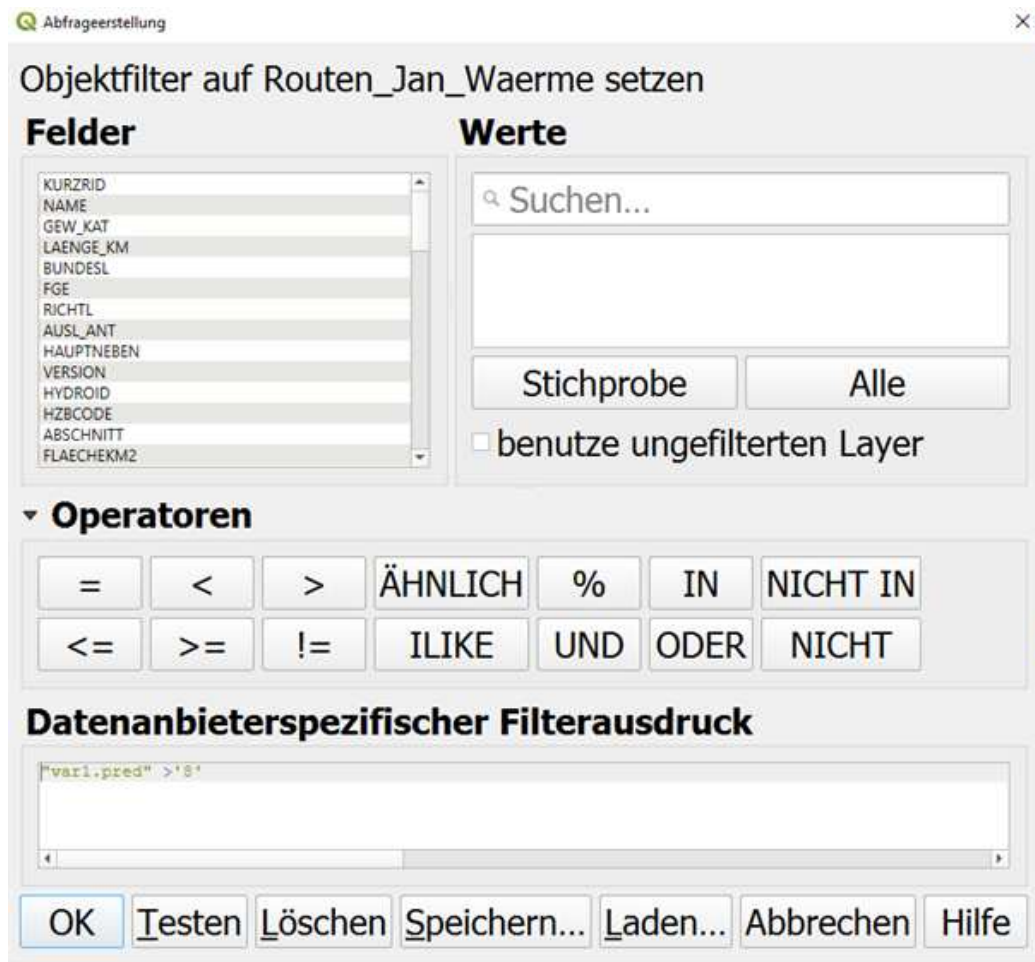


Abbildung 35: QGis Anwendung: Abfrageerstellung, Stier 2024

relativ hohe Ausgangstemperaturen, um optimale Betriebsbedingungen zu gewährleisten. Demnach ist anzunehmen, dass die Temperaturgrenze von 8 Grad Celsius somit auch für die Nutzbarkeit von flusswassergespeisten Wärmepumpen geeignet ist. Sie stellt sicher, dass nicht nur technisch genügend thermische Energie, sondern eine tatsächlich sinnvoll nutzbare Mindestwärme zur Verfügung steht, um den Betrieb der Wärmepumpen effizient und nachhaltig zu gestalten.

Der Schritt des Einkalkulierens einer Mindesttemperatur von 8 Grad Celsius ist notwendig, da so im weiteren Verlauf dann die Wärmekapazität symbolisiert werden kann und dabei nur die Werte mit entsprechend erwünschter Temperaturvorraussetzung angezeigt werden.

Die Anwendung des Filters in QGis kann irreführend erscheinen, da es viele

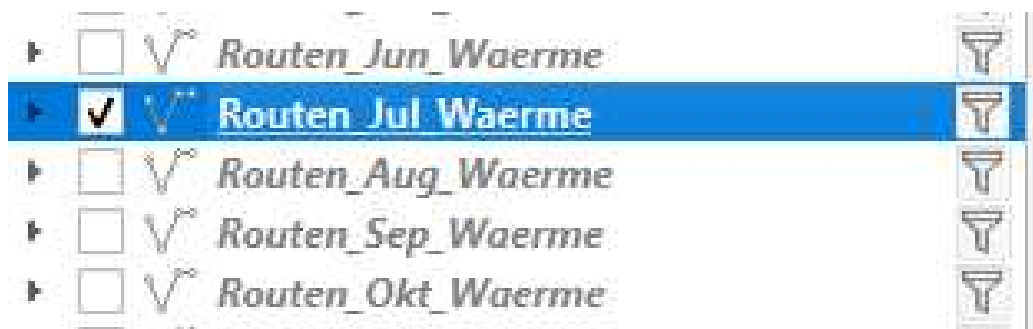


Abbildung 36: QGis Anwendung Filterfunktion, Stier 2024

Filtersymbole gibt, mit denen der Prozess allerdings beim vorliegenden Projekt nicht funktioniert hat. Der Filter kann angewendet werden, indem auf den Layer mit der rechten Maustaste geklickt wird und im aufpoppenden Menü der Reiter mit dem Titel "Filter" gewählt wird. Es öffnet sich dann ein Fenster, welches die Filterfunktionen anzeigt. Hier wird im Feld "Datenanbieterspezifischer Feldausdruck" der entsprechende Ausdruck für den Filter angegeben. In diesem Fall wird die Bedingung „`var.pred1 > 8`“ eingegeben, damit die Spalte "var.pred1" nach Werten größer als 8 gefiltert wird. Nach dem Anwenden des Filters werden demnach nur noch die Datensätze angezeigt, die die angegebene Bedingung erfüllen, also einen Temperaturwert von über 8 Grad Celsius aufweisen. Alle Flussabschnitte mit einer Temperatur von acht oder weniger als acht Grad Celsius werden somit in der Karte ausgeblendet, solange der Filter angewendet wird, ist der Filter aktiviert, wird es durch ein Filtersymbol neben dem Layer angezeigt.

Nach der erfolgreichen Filterung der Attributtabelle wird die Symbolisierung des Layers angepasst, um das Wärmepotenzial darzustellen. Hierzu wird die Spalte des Wärmepotenzials verwendet, die zuvor berechnet wurde. Die Anpassung der Symbolisierung erfolgt, indem man auf den Layer „routen\_dez\_waerme“ rechtsklickt und die Option „Eigenschaften“ auswählt. Im Reiter „Symbolisierung“ wird die Spalte des Wärmepotenzials beim Drop-Down-Menü von "Wertäusgewählt", damit dieses Attribut in der Karte zur Visualisierung festgelegt wird. In den Optionen kann dann eine passende Visualisierung gestaltet werden, zum Beispiel durch eine geeignete Farbkodierung und Strichstärke, um das Wärmepotenzial klar und verständlich darzustellen.

Insgesamt ermöglicht die Kombination der gefilterten Temperaturdaten mit der Wärmepotenzial-Symbolisierung eine präzise und aussagekräftige Darstellung der Fließgewässer, die für die Nutzung durch Wärmepumpen geeignet sind. Diese methodische Vorgehensweise stellt sicher, dass nur die re-

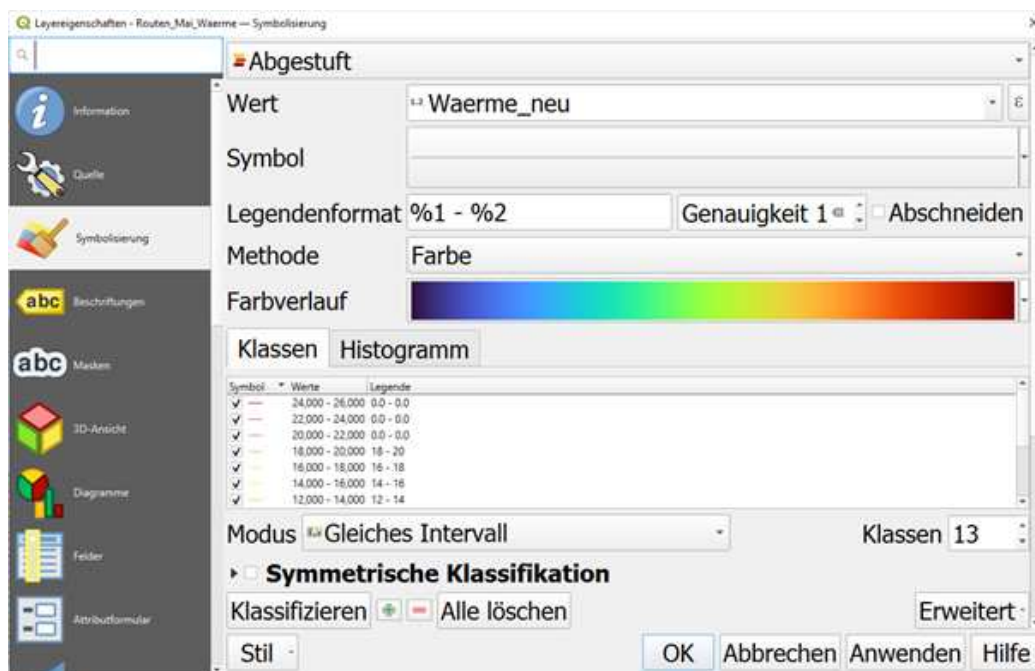


Abbildung 37: QGis Wärmesymbolisierung, Stier 2024

levanten Daten berücksichtigt werden und bietet eine solide Grundlage für weitere Analysen und strategische Entscheidungen.

## 6.7 Kartengestaltung für Wärmepotenzial

In diesem Unterkapitel wird beschrieben, wie die Wärmepotenzialkarte in kartographisch wichtige Informationen, wie zum Beispiel Maßstab und Nordpfeil eingebettet wird. Diese Elemente sind nicht nur entscheidend für die visuelle Ansprechbarkeit der Karte, sondern auch für die Funktionalität und die wissenschaftliche Genauigkeit. Ein korrekter Maßstab sorgt für präzise räumliche Darstellung der Ausdehnung der Daten und der Nordpfeil gibt Orientierung für die Himmelsrichtung. Diese Details der Gestaltung ist für die folgenden Analysen und die Korrekten Interpretationen von großer Bedeutung. Außerdem ist die Angabe der Urheberrechtsquellen notwendig, um rechtliche Vorgaben einzuhalten und die eigenen Ressourcen zu schützen.

Bevor jedoch Inhalte um die Inhalte des Kartenlayouts geht, wird den Wärmepotenzialkarten noch ein weiterer Layer hinzugefügt. Es wird ein Layer mit den Namen der Hauptstädte aller Bundesländer erstellt. Dies soll der Orientierung dienen und gleichzeitig auf Gebiete mit hoher Wärmenachfrage hindeuten. Ziel ist es die Städtenamen geschrieben und mit einem Punkt

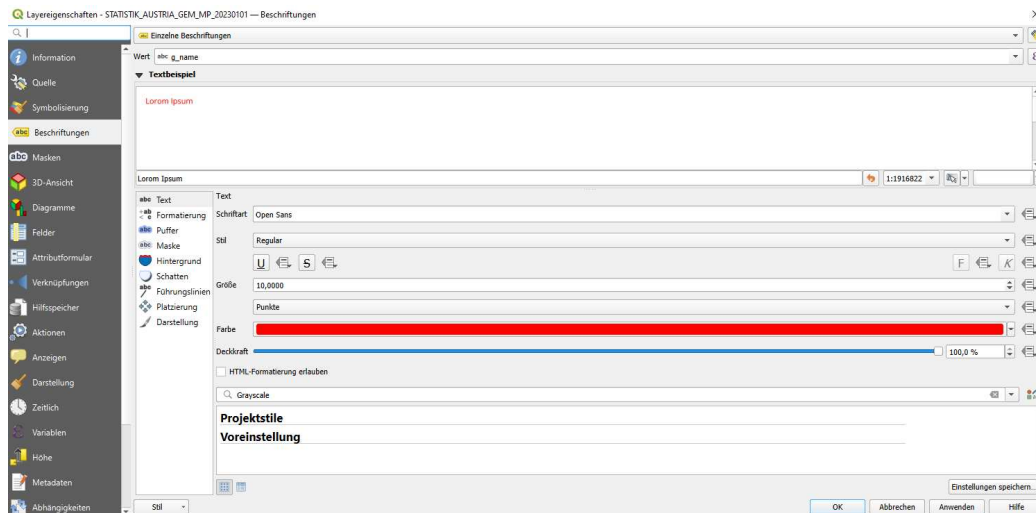


Abbildung 38: QGIS Anwendung Beschriftung, Stier 2024

am Standort darzustellen. Hierfür wurde der Gemeindelayer als Shape-File in QGIS geladen. In der Attributtabelle ist die Spalte "g\_name" zu finden, die die Namen der Gemeinden enthält. Diese wurde als Punktlayer dargestellt, um die einzelnen Gemeinden als Punkte auf der Karte sichtbar zu machen. Um jedoch nicht alle Gemeinden, sondern eine gezielte Visualisierung der ausgewählten Hauptstadtgemeinden zu erreichen, wurde erneut die Filterfunktion verwendet. Hierfür wird der Layer im Layer-Panel mit einem Rechtsklick ausgewählt und die Option "Filter..." ausgewählt. Im sich öffnenden Fenster kann der Filter definiert werden. Mit dem Befehl `g_name IN ('Wien', 'Eisenstadt', 'St. Pölten', 'Linz', 'Klagenfurt am Wörthersee', 'Salzburg', 'Bregenz', 'Innsbruck', 'Graz')` wird die Spalte der Gemeindenamen gefiltert. Diese Bedingung sorgt demnach dafür, dass nur die Punkte, die den genannten Städten entsprechen, auf der Karte dargestellt werden. Nach Eingabe der Filterbedingung wurde der Filter mit einem Klick auf "OK" bestätigt. Die Karte wurde automatisch aktualisiert, sodass nur noch die Punkte der ausgewählten Städte sichtbar waren.

#### Layout

Ansicht, Dekorationen: Norpfeil, Maßstab, Urheberrechtshinweis, Titelbeschriftung

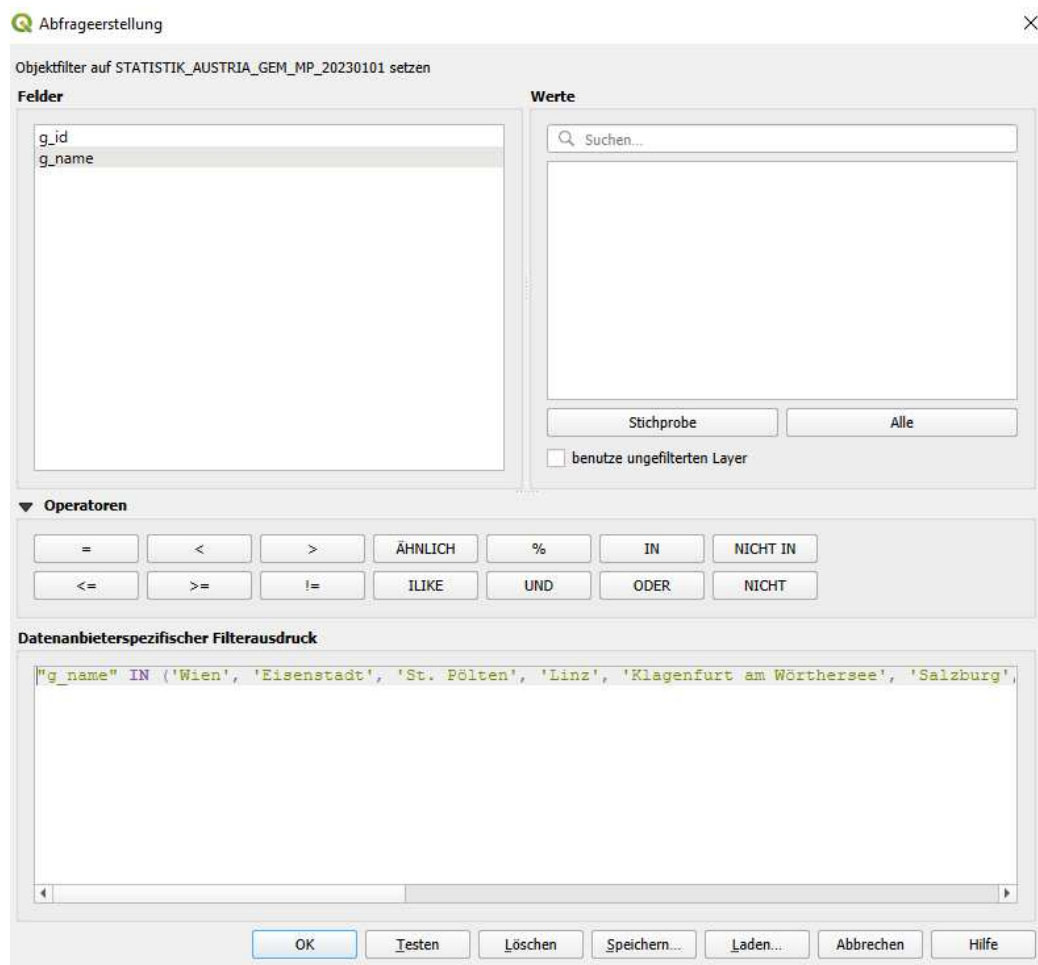


Abbildung 39: QGis Anwendung Abfrageerstellung, Stier 2024

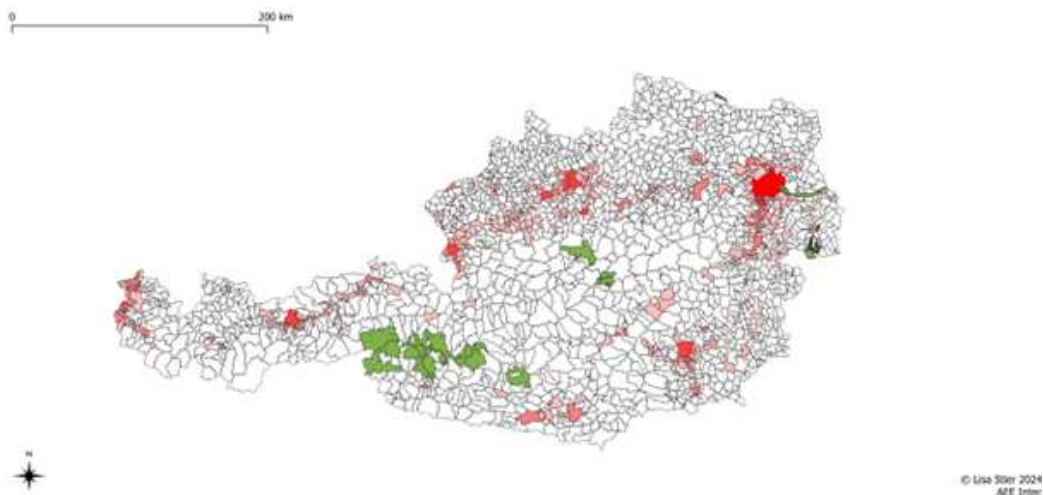


Abbildung 40: QGis Kartengestaltung, Stier 2024

## 7 Datenauswertung

Die Fließgewässer in Österreich haben eine Gesamtlänge von etwa 100.000 km. Der Großteil dieser Bäche und Flüsse (96 %) gehört zum Einzugsgebiet der Donau, einige wenige gehören zu Rhein und Elbe. Der Verlauf dieser Gewässer wird hauptsächlich durch die Orographie der Alpen beeinflusst. (Kaltschmitt et al., 2020)

Die vorliegende Karte, basierend auf der Arbeit von Hobiger, G. et al. (2005), zeigt die Verteilung von Thermal- und Mineralwässern in Österreich. Diese Karte ist von besonderem Interesse für die Untersuchung, ob es Überschneidungen zwischen Thermalquellen und Gebieten mit nutzbarem Wärmepotenzial in den angrenzenden Gewässerabschnitten gibt. Die Karte stellt verschiedene Arten von Thermal- und Mineralwässern in Österreich dar, wobei sie in unterschiedliche Kategorien unterteilt sind. Für unsere Untersuchung sind besonders die Thermalquellen relevant, die auf der Karte als blaue Quadrate dargestellt sind. Diese Quellen weisen Temperaturen von über 20°C auf und sind daher potenziell interessante Wärmequellen für verschiedene Anwendungen, einschließlich der Nutzung in Wärmepumpensystemen. (GeoSphere Austria, 2024)

Die Karte zeigt eine breite Verteilung von Thermalquellen über ganz Österreich, wobei auffällt, dass viele dieser Quellen in den östlichen und südöstlichen Teilen des Landes konzentriert sind. Diese Gebiete könnten potenziell mit den zuvor identifizierten Regionen mit hohem nutzbarem Wärmepotenzial in Gewässerabschnitten übereinstimmen, was eine interessante Grundlage für weiterführende Untersuchungen darstellt. (GeoSphere Austria, 2024)







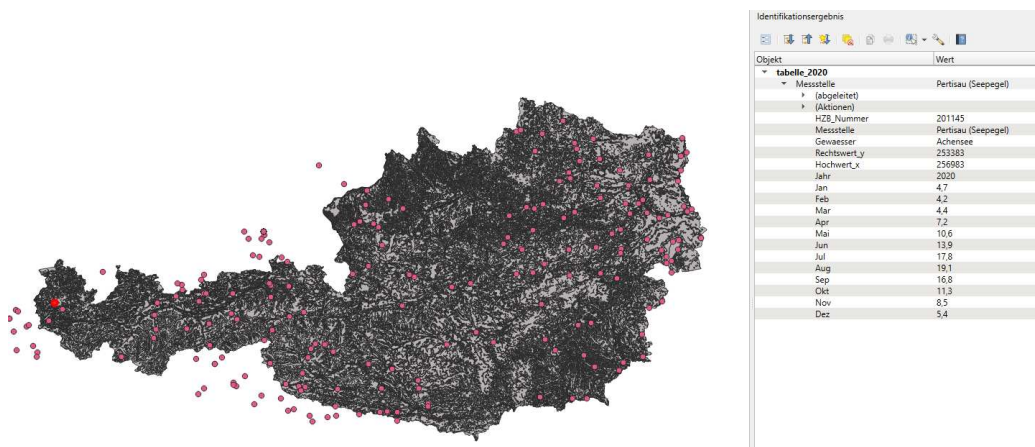


Abbildung 42: Temperaturdatenauswertung Vorarlberg, Stier 2024

## 7.1 Temperaturvergleich der original Messtellen

In diesem Teil der Datenauswertung wird eine Untersuchung der Temperaturverläufe im Jahresverlauf einiger Messtellen vorgenommen. Dabei wird analysiert, ob es signifikante Ausreißer gibt oder ob die Temperaturen von Winter zu Sommer kontinuierlich ansteigen und anschließend wieder kontinuierlich abfallen. Für jedes Bundesland wurde dafür eine repräsentative Messstelle ausgewählt. Zusätzlich wurden die höchsten und niedrigsten Temperaturen betrachtet, um ein Bild der saisonalen Schwankungen zu erhalten. Diese Analyse dient dazu, die selbst aufbereiteten Daten im späteren Verlauf zu vergleichen, zu evaluieren und um deren Genauigkeit und Aussagekraft zu überprüfen. Die Betrachtung der Höchst- und Tiefsttemperaturen ermöglicht es, die Validität der eigenen Ergebnisse zu bestätigen und sicherzustellen, dass sie sinnvoll und verlässlich scheinen.

Die Darstellung der Temperaturauswertung zeigt die monatlichen Durchschnittswerte der Flusswassertemperaturen der Messstelle in Pertisau, Vorarlberg. Zu sehen ist der Standort der Messstelle auf der Österreichkarte sowie eine Tabelle mit den monatlichen Messwerten. Die Höchsttemperatur wurde im August mit 19,1 Grad Celsius gemessen, während der niedrigste Wert im Februar bei 4,2 Grad Celsius lag. Es wurden keine Ausreißer festgestellt, und der Temperaturverlauf zeigt eine klare und kontinuierliche Entwicklung über das Jahr hinweg.

Die Abbildung zeigt die monatlichen Durchschnittswerte der Flusswassertemperaturen der Messstelle in Kitzbühel, Tirol. Die Höchsttemperatur wurde im August mit 22,6 Grad Celsius gemessen, während der niedrigste Wert im Februar bei 3,1 Grad Celsius lag. Es wurden keine Ausreißer festgestellt, und

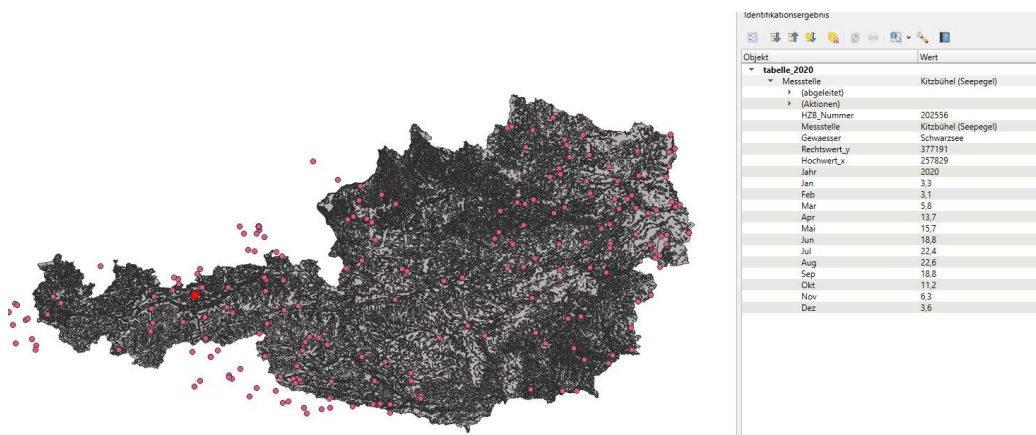


Abbildung 43: Temperaturdatenauswertung Tirol, Stier 2024

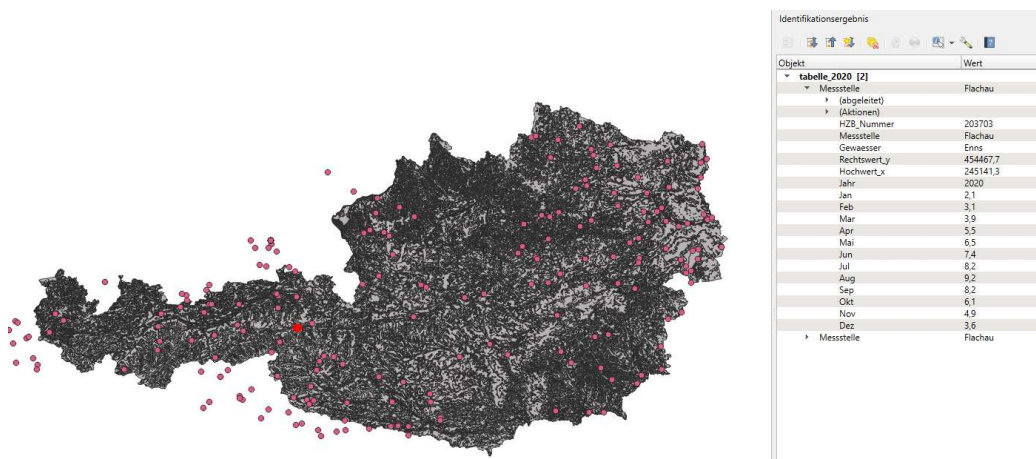


Abbildung 44: Temperaturdatenauswertung Salzburg, Stier 2024

der Temperaturverlauf zeigt eine kontinuierliche Entwicklung über das Jahr hinweg.

Die Darstellung illustriert die monatlichen Durchschnittstemperaturen der Flusswassertemperaturen an der Messstelle in Flachau, Salzburg. Der Höchstwert wurde im August mit 9,2 Grad Celsius verzeichnet, während der Tiefstwert im Januar bei 2,1 Grad Celsius lag, abweichend von den bisher verglichenen Messstellen, die im Februar die niedrigsten Temperaturen aufweisen. Es sind keine Ausreißer zu erkennen, und der Temperaturverlauf bleibt das ganze Jahr über stetig steigend, beziehungsweise abfallend.

Messstelle St. Georgen-See Kärnten Höchstwert 24,4 kältester 3,5 JAN

Die Abbildung zeigt die monatlichen Durchschnittswerte der Flusswassertemperaturen an der Messstelle in St. Georgen-See, Kärnten. Die höchste

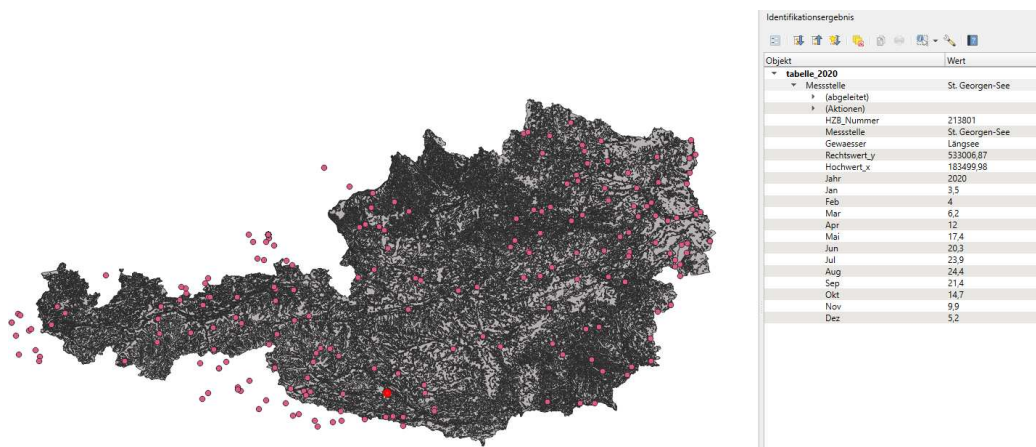


Abbildung 45: Temperaturdatenauswertung Kärnten, Stier 2024

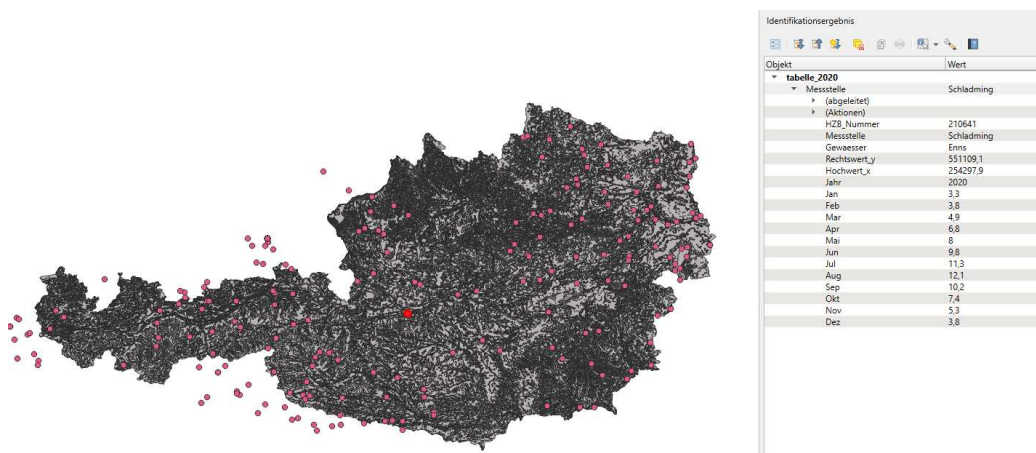


Abbildung 46: Temperaturdatenauswertung Steiermark, Stier 2024

Temperatur wurde im August mit 24,4 Grad Celsius gemessen, während der kälteste Wert im Januar bei 3,5 Grad Celsius lag. Der Temperaturverlauf ist durchgängig kontinuierlich und weist keine Ausreißer auf.

Die Darstellung zeigt die monatlichen Durchschnittstemperaturen der Flusswassertemperaturen an der Messstelle in Schladming, Steiermark. Hier wurde der höchste Wert im August mit 12,1 Grad Celsius gemessen. Der niedrigste Temperaturwert wurde im Januar mit 3,3 Grad Celsius verzeichnet, was leicht von den typischen Tiefstwerten im Februar abweicht. Der Temperaturverlauf zeigt durchweg keine Ausreißer und bleibt das gesamte Jahr über konstant.

Die Abbildung zeigt die monatlichen Durchschnittswerte der Flusswassertemperaturen an der Messstelle in Kremsmünster, Oberösterreich. Hier wurde

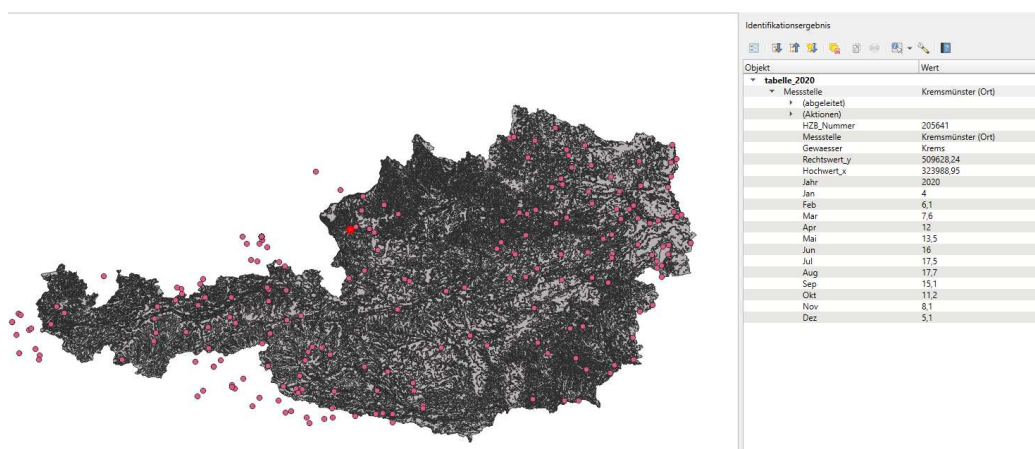


Abbildung 47: Temperaturdatenauswertung Oberösterreich, Stier 2024

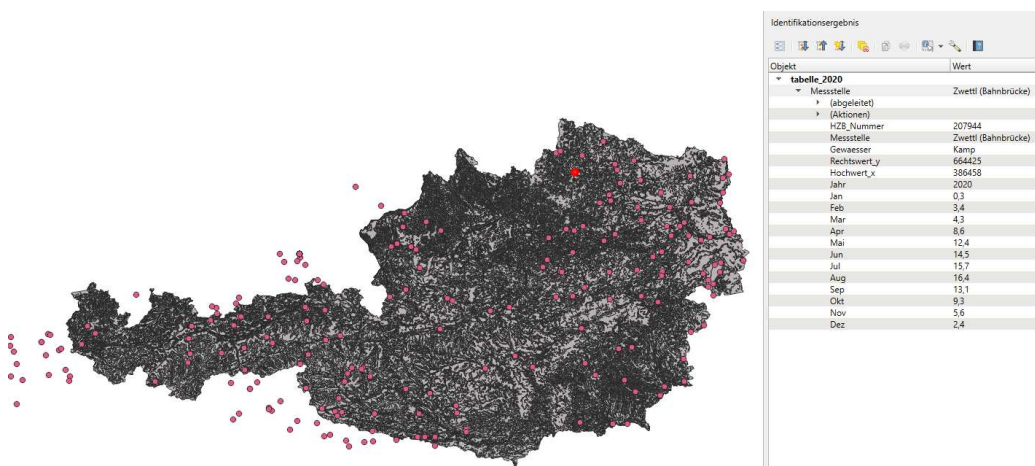


Abbildung 48: Temperaturdatenauswertung Niederösterreich, Stier 2024

die höchste Temperatur im August mit 17,7 Grad Celsius gemessen, während der kälteste Wert im Januar bei 4,0 Grad Celsius lag. Dies zeigt, dass der Tiefpunkt in diesem Fall nicht wie oft im Februar, sondern wie auch bei anderen Messstellen bereits im Januar erreicht wird. Der Temperaturverlauf ist kontinuierlich und weist keine Ausreißer auf.

Die monatlichen Durchschnittswerte der Flusswassertemperaturen an der Messstelle in Zwettl, Niederösterreich, werden in der Abbildung "Temperaturdatenauswertung Niederösterreich" gezeigt. Der Höchstwert wurde im August mit 16,4 Grad Celsius gemessen, während der niedrigste Wert im Januar bei 0,3 Grad Celsius lag. Hier zeigt sich ebenfalls, dass der Tiefpunkt im Januar und nicht im Februar erreicht wird. Der Temperaturverlauf bleibt



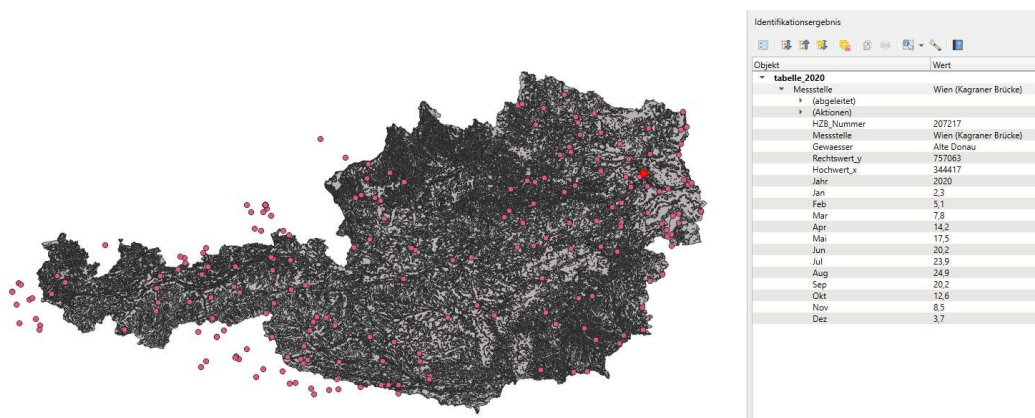


Abbildung 49: Temperaturdatenauswertung Wien, Stier 2024

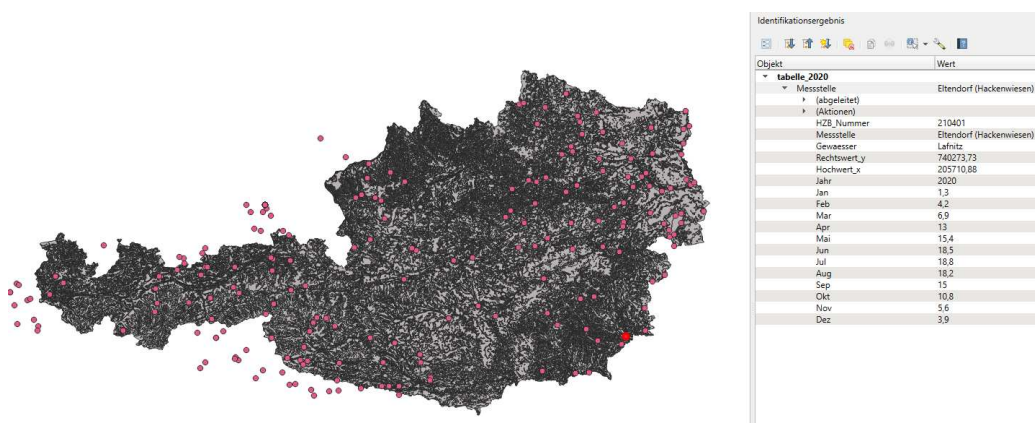


Abbildung 50: Temperaturdatenauswertung Burgenland, Stier 2024

konstant und es sind keine Ausreißer festzustellen.

Die Abbildung zeigt die monatlichen Durchschnittswerte der Flusswassertemperaturen an der Messstelle Kagraner Brücke in Wien, der Hauptstadt Österreichs. Aufgrund der hohen Bevölkerungsdichte und des damit verbundenen Energiebedarfs hat die Wärmepotenzialanalyse in Wien eine besondere Bedeutung. Die höchste Temperatur wurde im August mit 24,9 Grad Celsius verzeichnet, während der niedrigste Wert im Januar bei 2,3 Grad Celsius lag. Der Temperaturverlauf ist kontinuierlich und zeigt keine Ausreißer.

Die monatlichen Durchschnittswerte der Flusswassertemperaturen an der Messstelle in Eltendorf, Burgenland, werden in Abbildung gezeigt. Der höchste Wert wurde nicht wie bei bisher allen anderen Messstellen im August, sondern bereits im Juli mit 18,8 Grad Celsius gemessen. Dies ist eine bemerkenswerte Abweichung, die auf regionale Besonderheiten hinweisen könnte.

Der niedrigste Wert wurde im Januar bei 1,3 Grad Celsius verzeichnet. Der Verlauf der Temperaturen zeigt keine Ausreißer und bleibt über das Jahr hinweg kontinuierlich.

In der Analyse der monatlichen Durchschnittstemperaturen der Flusswassertemperaturen aus den verschiedenen Bundesländern Österreichs ergeben sich interessante Unterschiede, jedoch vorwiegend sich wiederholende Muster. Der höchste gemessene Temperaturwert wurde bei der Messstelle St. Georgen-See in Kärnten mit 24,4 Grad Celsius im August verzeichnet. Der niedrigste Wert wurde bei der Messstelle Zwettl in Niederösterreich mit 0,3 Grad Celsius im Januar gemessen.

Bezüglich der tiefsten Temperaturen zeigen die meisten Messstellen ihren Tiefpunkt im Januar. Dies gilt für die Messstellen in Flachau (Salzburg), St. Georgen-See (Kärnten), Schladming (Steiermark), Kremsmünster (Oberösterreich), Zwettl (Niederösterreich), Wien (Kagraner Brücke) und Eltendorf (Burgenland). Nur die Messstellen in Pertisau (Vorarlberg) und Kitzbühel (Tirol) hatten ihren Tiefpunkt im Februar.

Dieser Vergleich zeigt, dass es regionale Unterschiede in den Temperaturverläufen gibt, wobei die meisten Flüsse ihren niedrigsten Temperaturwert im Januar erreichen, was auf konsistente saisonale Muster hinweist. Die höchsten Temperaturen treten überwiegend im August auf, mit Ausnahme von Eltendorf, wo der Höchstwert bereits im Juli erreicht wurde. Insgesamt zeigen die Daten eine sehr konsistente jahreszeitliche Entwicklung. Keine der Messstellen zeigt Ausreißer, was auf stabile und vorhersehbare Temperaturverläufe hinweist.

Da für die Nutzung der Wärmepumpe eine Mindesttemperatur von 8 Grad Celsius erforderlich ist, ist das Ergebnis dieser stichprobenartigen Datenanalyse nicht vielversprechend. Mehrere Messstellen weisen über mehrere Monate hinweg, deren Durchschnittswerte unter dieser 8 Grad Celsius Schwelle liegen. Beispielsweise hat die Messstelle in Flachau (Salzburg) in fast allen Monaten außer dem August Durchschnittswerte unter 8 Grad Celsius. Ähnliche Muster zeigen sich an den Messstellen in Schladming (Steiermark) und Zwettl (Niederösterreich). Dies bedeutet, dass die Wärmepumpe an diesen Standorten nur während der wärmeren Monate effektiv genutzt werden kann. Die Daten zeigen, dass in mindestens fünf bis sechs Monaten des Jahres die Durchschnittstemperaturen an vielen Messstellen unter der 8-Grad Celsius-Marke liegen, was die potenzielle Einsatzzeit der Wärmepumpe erheblich einschränkt.

Es ist jedoch zu beachten, dass für diese Überblicksanalyse nur extrem wenige Messstellen verglichen wurden. Und auch der Vergleich aller Messpunkte der Ursprungsdaten würde nur einen geringen Einblick über das tatsächliche Potenzial geben. Deshalb war es wichtig, die Gewässerdaten zu interpolie-

ren, um einen umfassenden Einblick über das gesamte Flussnetz zu erhalten. In den folgenden Analyseabschnitten der vorliegenden Arbeit wird sich zeigen, ob der Einsatz von Oberflächengewässerwärmepumpen in den Flüssen Österreichs vielversprechender aussieht, wenn man das gesamte Flussnetz berücksichtigt. Diese weiterführenden Analysen werden eine detailliertere Bewertung der potenziellen Anwendbarkeit und Effektivität der Wärmepumpentechnologie im Hinblick auf ganz Österreich ermöglichen.

## 7.2 Darstellung des Wärmepotenzials

Die finalen Karten zeigen das Wärmepotenzial der österreichischen Fließgewässer in Megawatt (MW). Dieses Wärmepotenzial wurde anhand der Formel  $Q = mc\Delta T$  berechnet, wobei  $Q$  für die Wärmemenge,  $m$  für die Masse des Flusswassers,  $c$  für die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $\Delta T$  für die Temperaturänderung in Grad Celsius steht. In diesem Fall wurde eine Temperaturänderung von  $3^\circ\text{C}$  angenommen, da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpe entzogen wird. Um eine realistische Nutzungsabschätzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewässertemperaturen von mindestens  $8^\circ\text{C}$  gefiltert. Diese Filterung erfolgte anhand der zuvor erstellten Temperaturkarten, die zeigten, dass insbesondere die Wintermonate visuell sehr blau und somit von kalten Temperaturdaten geprägt waren, meist auch unter der  $8^\circ\text{C}$ -Grenze. Zudem wurde bei den Daten eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt. Dies bedeutet, dass nur 10% des gesamten Flusswassers für die Wärmerückgewinnung berücksichtigt wurden, da beim Einsatz von Wärmepumpen ökologische Auswirkungen minimiert werden sollen und die praktische Umsetzung gewährleistet werden muss.

Januar 2020 Die Karte für Januar 2020 zeigt, dass das Wärmepotenzial der Fließgewässer in Österreich zu dieser Jahreszeit sehr niedrig ist. Aufgrund der kalten Wintertemperaturen erreichen viele Flüsse die Mindesttemperatur von  $8^\circ\text{C}$  nicht. In dieser Karte ist nur eine kleine Wärmeinsel in der Nähe von Eisenstadt farblich hervorgehoben, sodass die Werte von Durchfluss und Temperatur für eine Nutzung von Wärmepumpen ausreicht.

Februar 2020 Im Februar bleibt das Wärmepotenzial ähnlich niedrig wie im Januar. Mit bloßen Auge ist zwischen den Karten von Januar und Februar kein Unterschied zu sehen. Die Karte zeigt, dass der absolute Großteil der Flüsse immer noch unter der Mindesttemperatur von  $8^\circ\text{C}$  liegen. Die Gebiete, die jedoch über der Mindesttemperatur liegen sind im Januar und Februar in ihrem geringen Vorkommen größtenteils in gelb oder hellblau dargestellt, zeigen demnach ein Wärmepotenzial im Bereich von 0 bis 5 MW, das zwar gering ist, jedoch für eine Nutzung durch Wärmepumpen ausreicht.

## Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Januar 2020

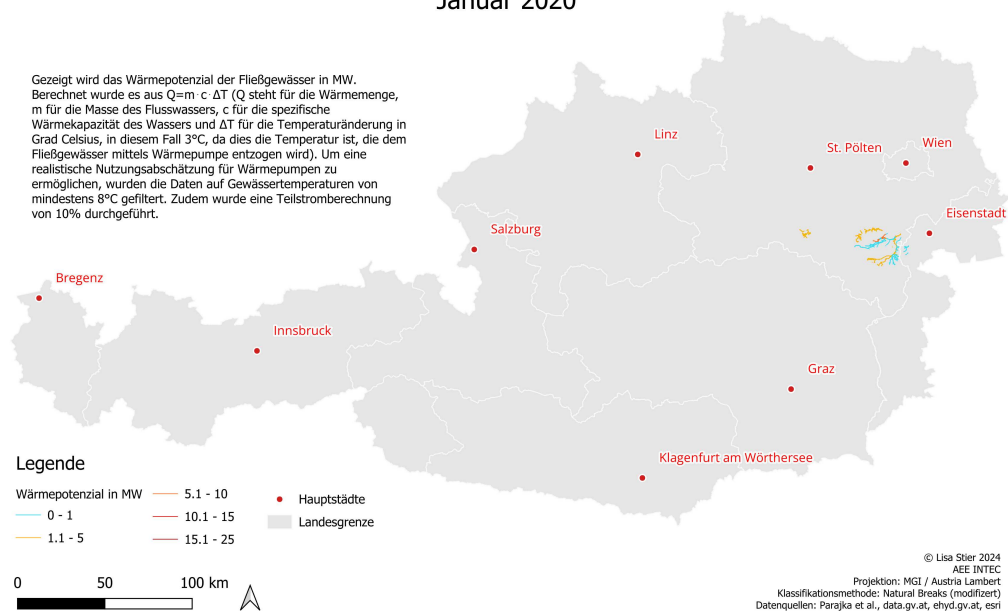


Abbildung 51: Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Januar 2020, Stier 2024



## Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Februar 2020

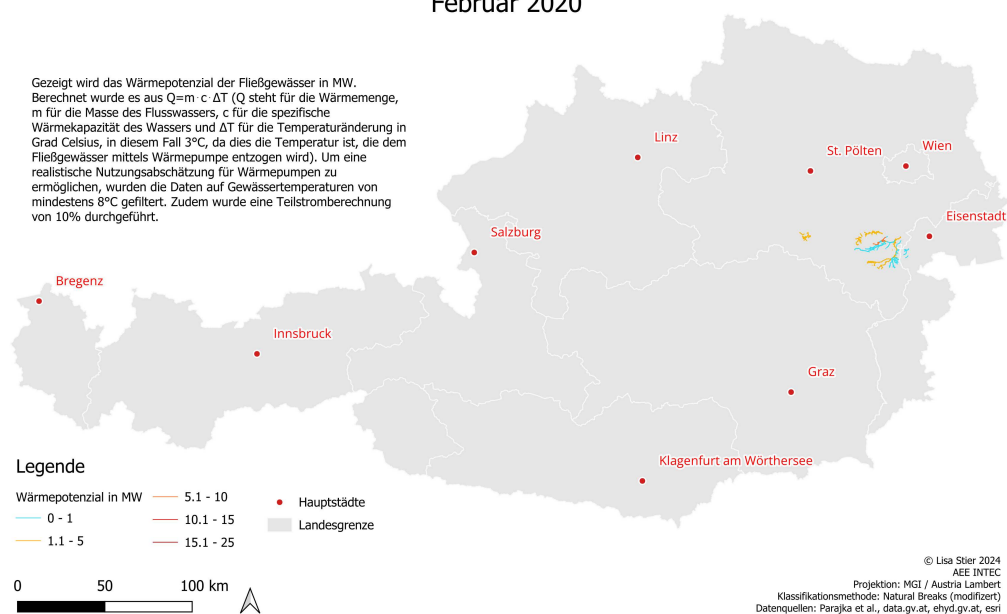


Abbildung 52: Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Februar 2020, Stier 2024

## Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer März 2020

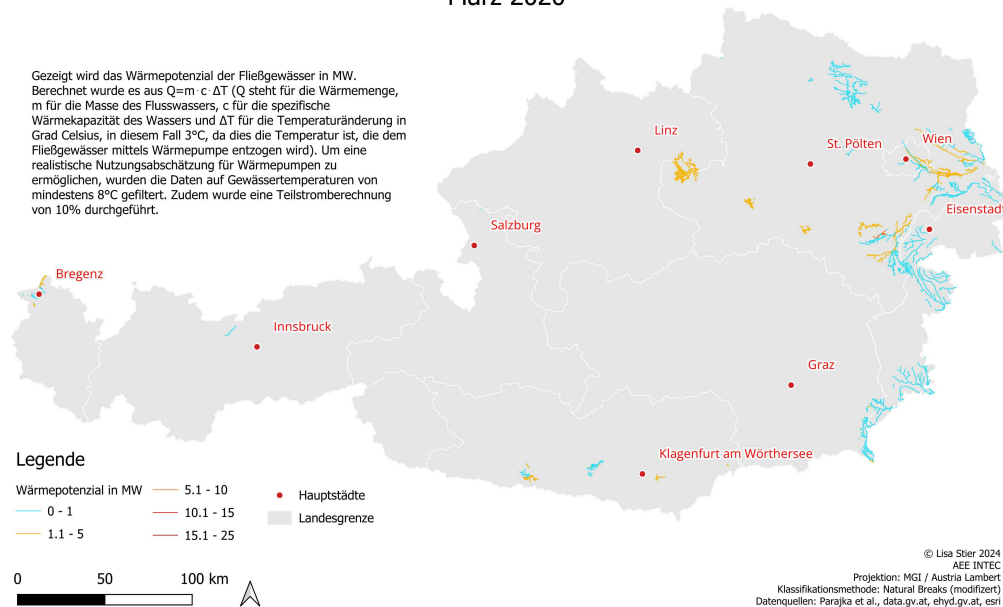


Abbildung 53: Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer März 2020, Stier 2024

**März 2020** Im März beginnt das Wärmepotenzial der Fließgewässer leicht, jedoch sichtlich zu steigen. Die Karte zeigt vor allem niedrige bis mittlere Wärmepotenziale in einigen tiefer gelegenen Regionen. Diese Gebiete sind hauptsächlich in blau, teils auch in gelb dargestellt und markieren den Übergang zu wärmeren Monaten, mit einem Wärmepotenzial im Bereich von 0 bis 10 MW. Trotz der moderaten Zunahme bleibt das Potenzial für eine großflächige Wärmerückgewinnung noch begrenzt.

**April 2020** Die Karte für April zeigt eine weitere Zunahme des Wärmepotenzials der Fließgewässer. Mit dem Anstieg der Temperaturen im Frühling beginnen mehr Flüsse, die Mindesttemperatur von 8°C zu erreichen. Dies führt zu einer Erhöhung des Wärmepotenzials, insbesondere in den östlichen Regionen Österreichs. Die blau und gelb gefärbten Gewässerabschnitte nehmen stark zu. Auch erste Orangefarbene und rote Abschnitte sind zu sehen. Es gibt ab April demnach also bereits Gebiete mit einem Wärmepotenzial bis zu 25 MW. Diese Gebiete mit sehr hohem Wärmepotenzial befinden sich in der Nähe von Salzburg.

**Mai 2020** Im Mai steigt das Wärmepotenzial der Fließgewässer weiter an. Die

## Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer April 2020

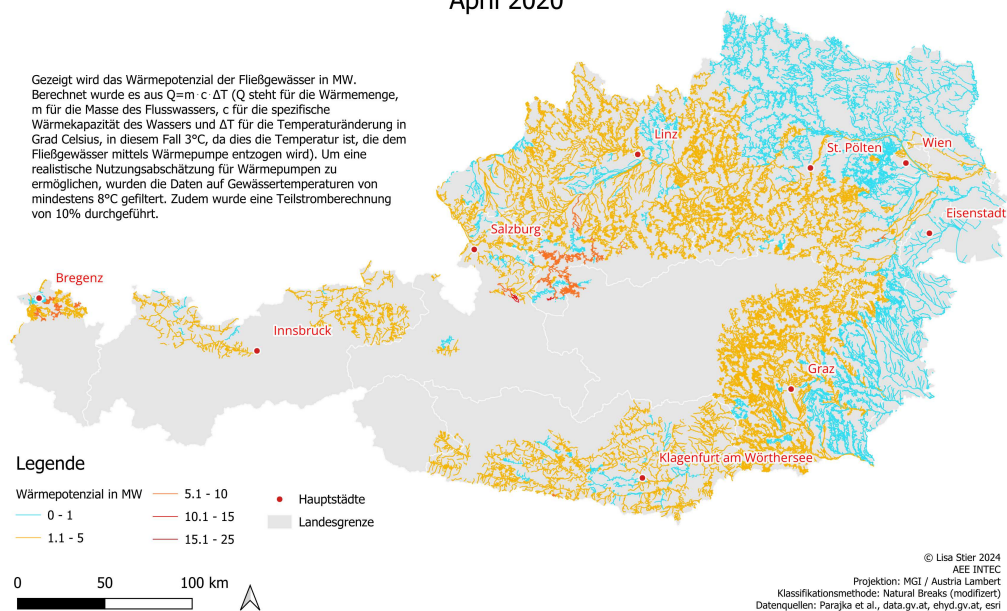


Abbildung 54: Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer April 2020, Stier 2024

## Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Mai 2020

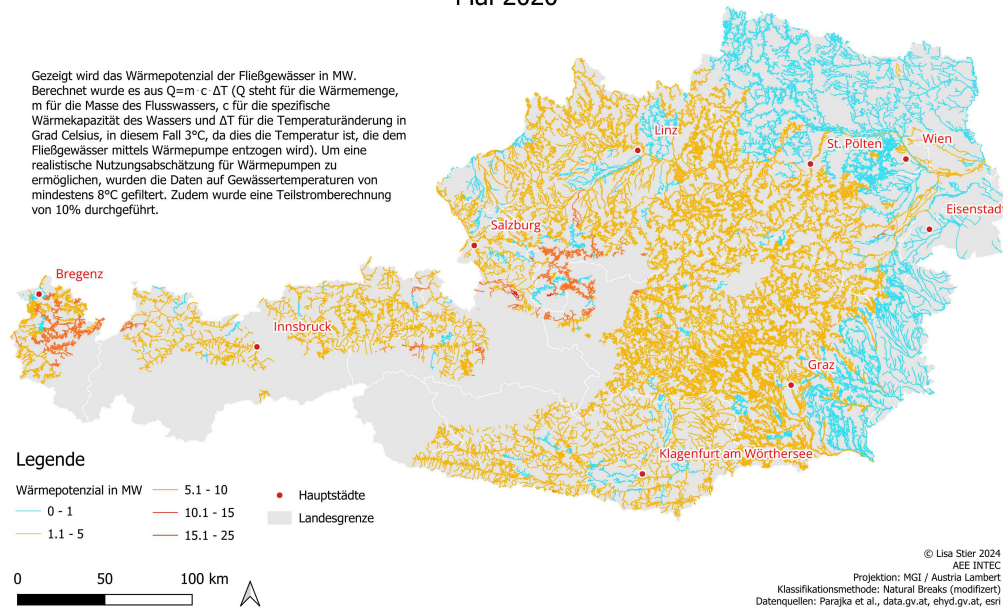


Abbildung 55: Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Mai 2020, Stier 2024

Karte zeigt eine nun auch zunehmende Anzahl an Flussabschnitten, die ein mittleres bis hohes Wärmepotenzial aufweisen im Westen Österreichs. Die Zunahme an gelben und orangen Bereichen in der Karte verdeutlichen, dass diese Abschnitte nun optimal für die Nutzung von Wärmepumpen geeignet sind.

**Juni 2020** Die Karte für Juni zeigt ein signifikant erhöhtes Wärmepotenzial, was auf die hohen Wassertemperaturen im Frühsommer zurückzuführen ist. Es ist die erste Darstellung die fast flächendeckend nutzbare Flussabschnitte oberhalb der Mindesttemperatur zeigt. Besonders hervorzuheben sind die westlichen und südlichen Regionen, wo die Fließgewässer ein Potenzial von bis zu 15 MW aufweisen. Rote Flussabschnitte die 15.1 - 25 MW Wärme liefern können, sind jedoch weiterhin nur im Raum Salzburg sichtbar.

**Juli 2020** Im Juli bleibt das hohe Wärmepotenzial erhalten und breitet sich noch etwas weiter aus. Viele Gewässer zeigen ein Potenzial von 5,1 bis 10 MW. Einige Gebiete im Westen und in der Umgebung von Salzburg weisen Werte von 10,1 bis 15 MW auf und einzelne Flussabschnitte bei Salzburg weisen auch ein Potenzial von 15.1 bis 25 MW vor. Die Verteilung verhält

## Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Juni 2020

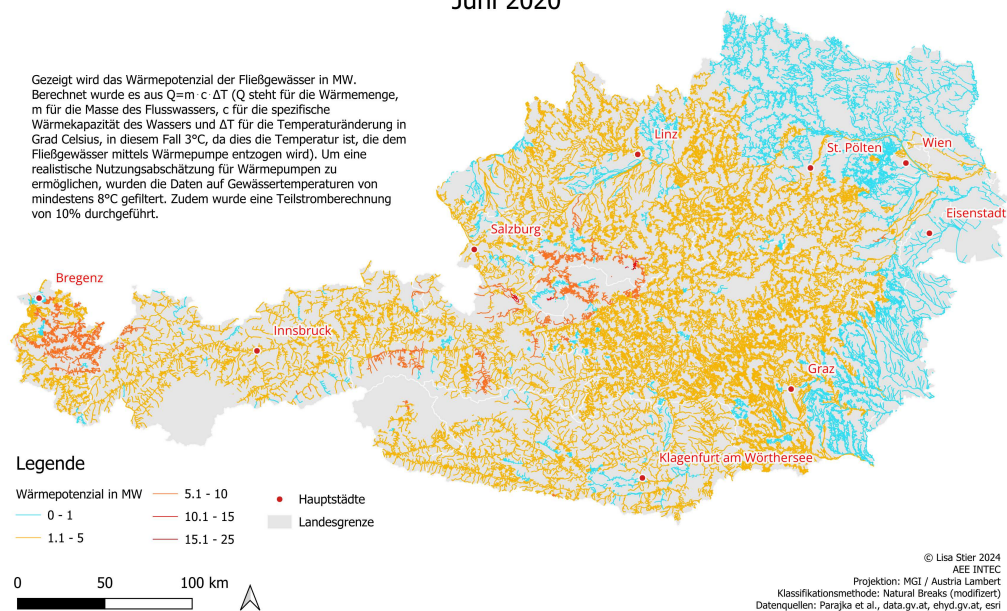


Abbildung 56: Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Juni 2020, Stier 2024



## Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Juli 2020

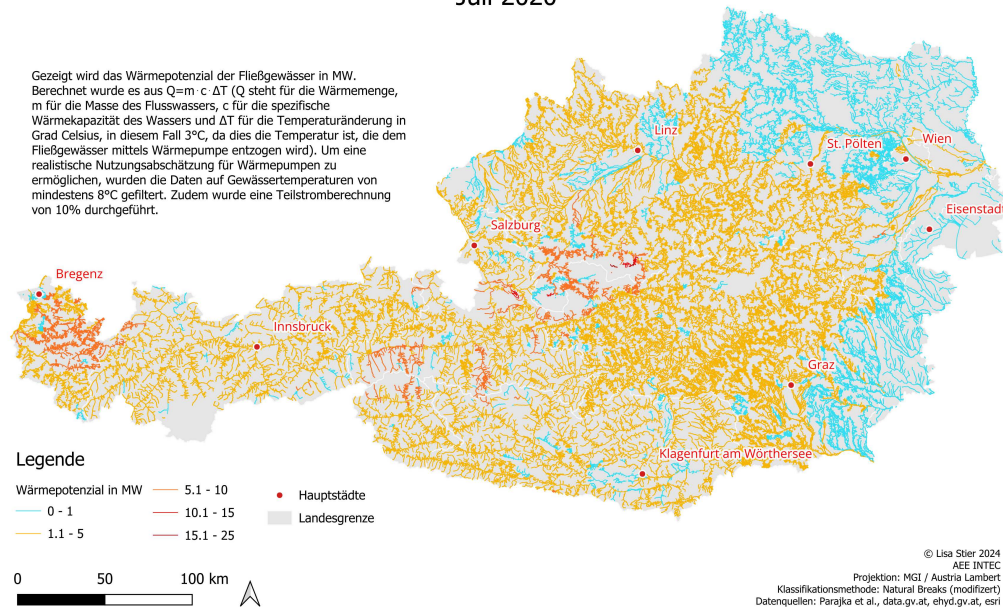


Abbildung 57: Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Juli 2020, Stier 2024

sich dabei ähnlich wie im Juni.

**August 2020** Auch im August bleibt das Wärmepotenzial der Fließgewässer hoch. Die Karte zeigt, dass die meisten Flüsse weiterhin die erforderliche Temperatur aufweisen, um eine effiziente Wärmeengewinnung zu ermöglichen. Die westlichen und südlichen Regionen bieten weiterhin die höchsten Potentiale, wobei in diesem Monat auch einige Flussabschnitte mehr das Potenzial von bis zu 25 MW aufweisen. Besonders in Vorarlberg ist eine hohe Dichte an gut nutzbaren Flussabschnitten.

**September 2020** Im September zeigt die Karte ein leicht abnehmendes Wärmepotenzial, da die Temperaturen allmählich sinken. Dennoch bieten viele Flüsse in den westlichen und südlichen Regionen weiterhin ein hohes Potenzial für die Wärmeengewinnung. Die orangefarbenen und roten Abschnitte in der Karte zeigen, dass diese Regionen immer noch geeignet sind, um effizient Wärmeenergie zu gewinnen, mit einem Wärmepotenzial im Bereich von 1 bis 25 MW.

**Oktober 2020** Die Karte für Oktober zeigt ein deutlich abnehmendes Wärmepotenzial, da die Temperaturen weiter sinken. Die meisten Flüsse bieten

## Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer August 2020

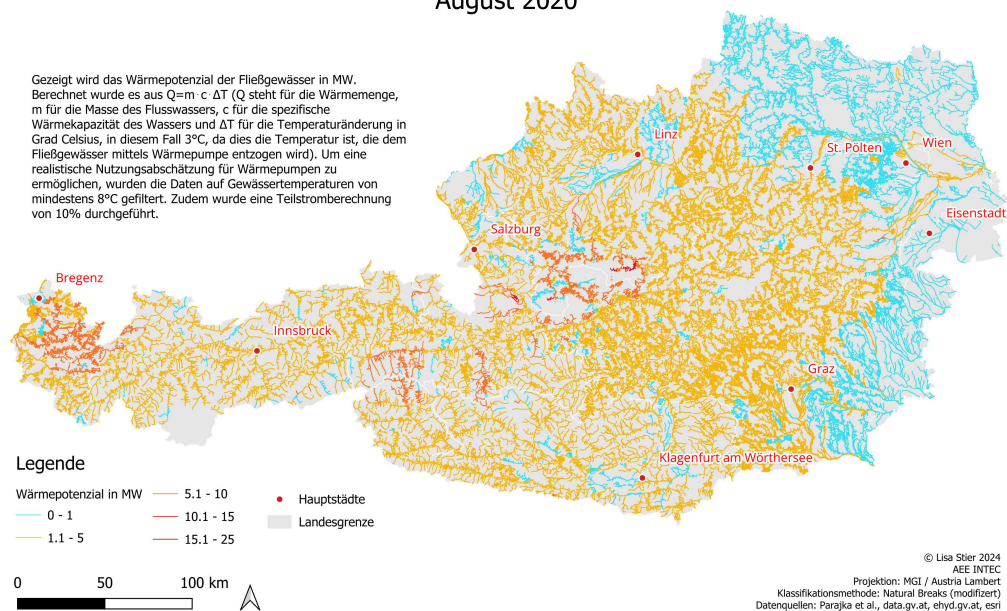


Abbildung 58: Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer August 2020, Stier 2024

## Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer September 2020

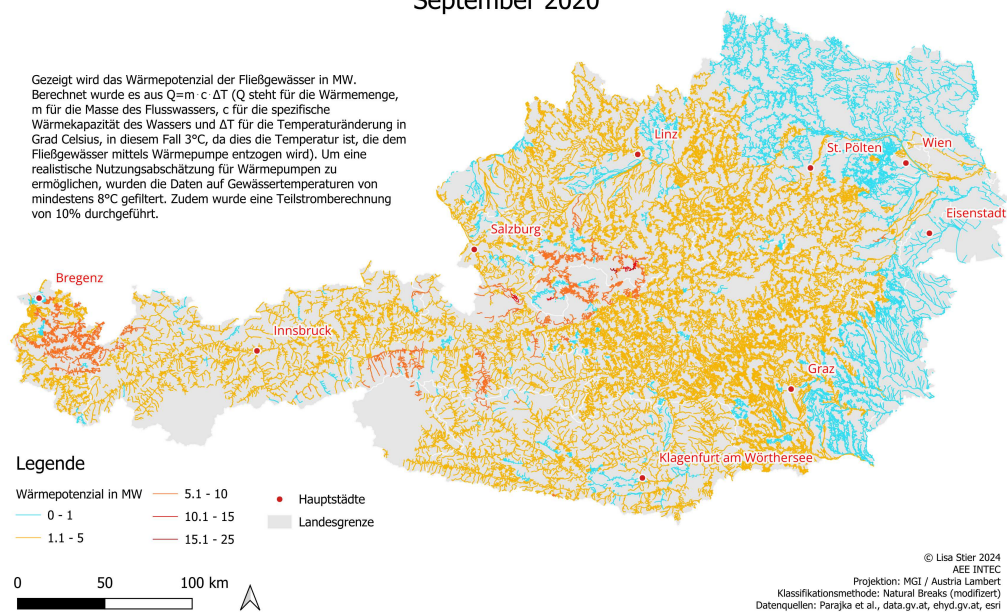


Abbildung 59: Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer September 2020, Stier 2024



## Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Oktober 2020

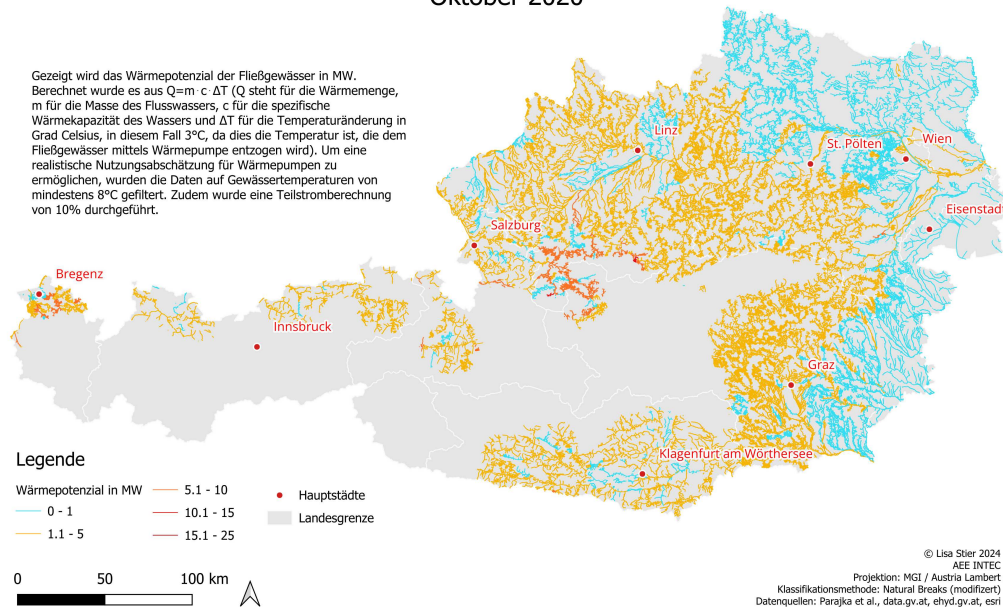


Abbildung 60: Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Oktober 2020, Stier 2024

nur noch ein moderates Potenzial. Die Karte zeigt, dass die Bedingungen für die Wärmerückgewinnung weniger günstig sind als in den Sommermonaten, aber immer noch ausreichend, um in einigen Gebieten effizient genutzt zu werden.

**November 2020** Im November zeigt die Karte ein sehr stark abnehmendes Wärmepotenzial. Die meisten Flüsse in Österreich erreichen nicht mehr die Mindesttemperatur von 8°C, was die Möglichkeiten für die Wärmerückgewinnung stark einschränkt. Nur wenige Gebiete bieten noch ein geringes bis moderates Potenzial. Diese Karte unterstreicht die Saisionalität der Wärme-gewinnung durch Flusswassergespeistewärmepumpen und die Notwendigkeit, alternative Wärmequellen in den kälteren Monaten zu berücksichtigen.

**Dezember 2020** Die Karte für Dezember zeigt ein sehr geringes Wärmepoten-zial. Die Flussabschnitte die die Mindesttemperatur überschreiten sind fast genauso viel vorhanden wie auch im Januar und Februar, verteilen sich je-doch etwas anders in der Umgebung der stets bestehenden Wärmeinsel nahe Eisenstadt. Diese Karte zeigt deutlich, dass die Nutzung von Fließgewässern zur Wärmerückgewinnung im Winter stark eingeschränkt ist.

## Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer November 2020

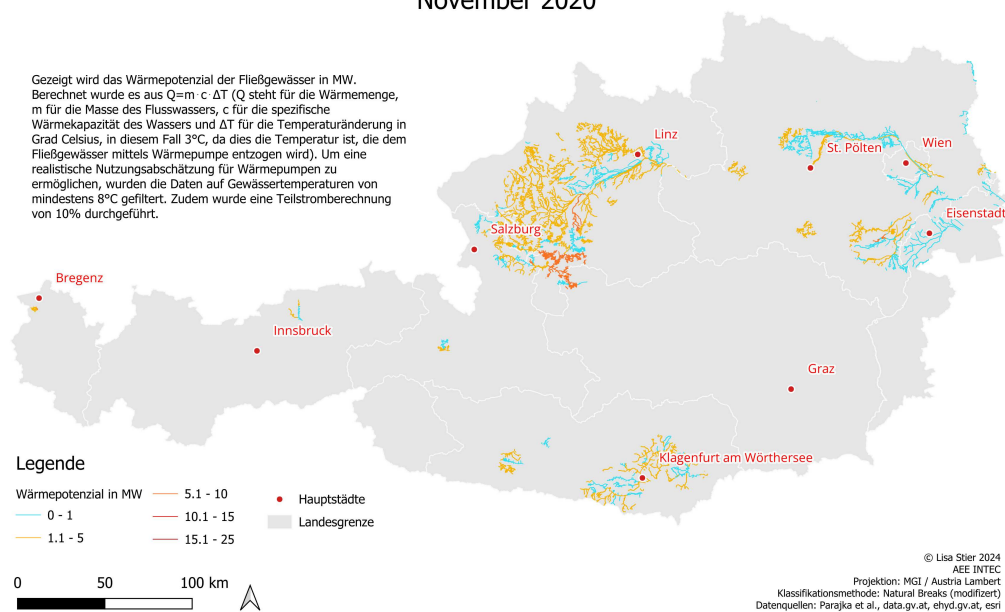


Abbildung 61: Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer November 2020, Stier 2024

## Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Dezember 2020

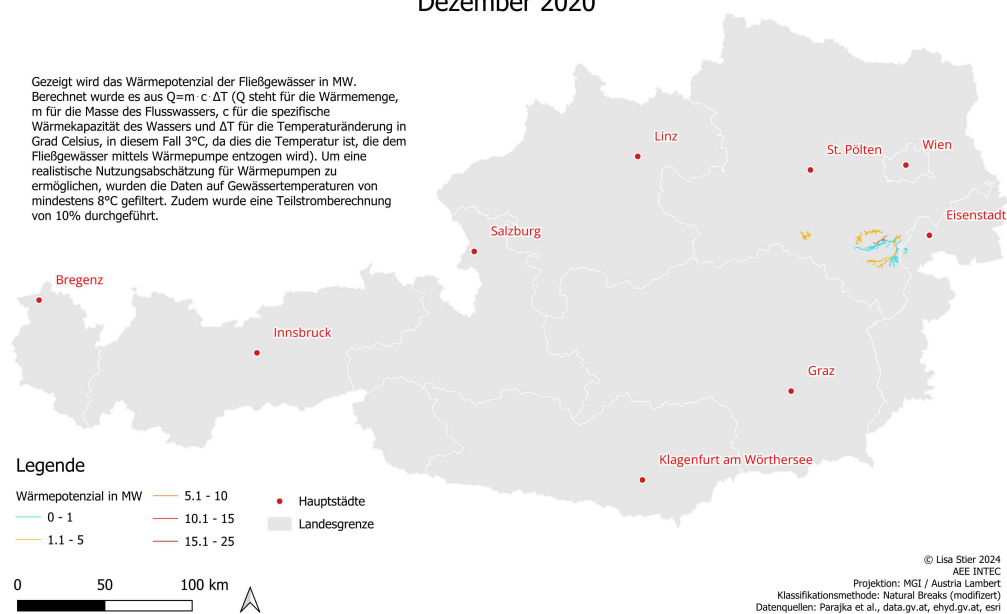


Abbildung 62: Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Dezember 2020, Stier 2024

### Bevölkerungsdichte Österreich 2020

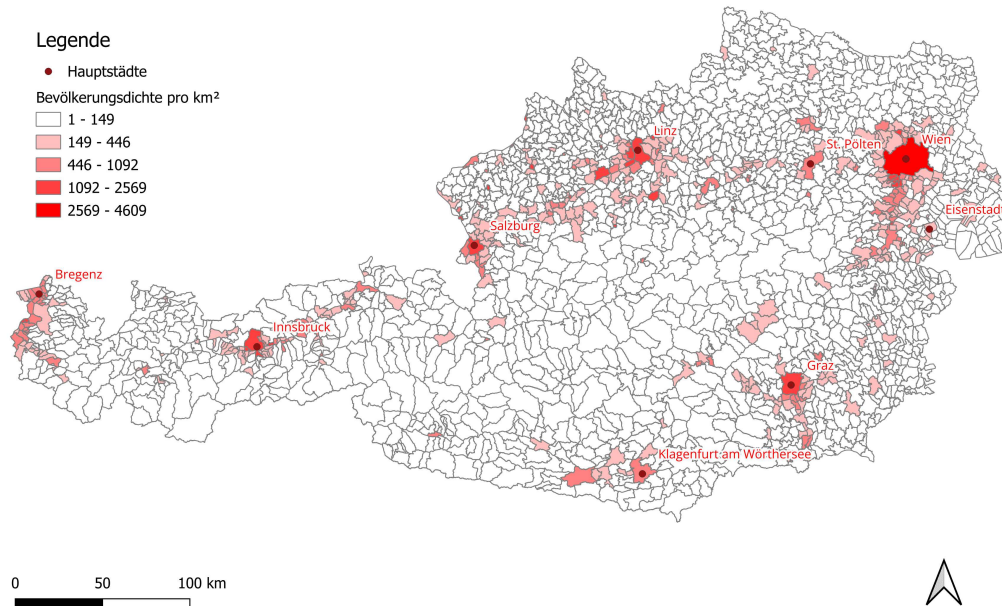


Abbildung 63: Bevölkerungsdichte Österreich 2020, Stier 2024

Die Karten zum Wärmepotenzial der österreichischen Fließgewässer zeigen deutlich die saisonalen Schwankungen und die regionalen Unterschiede im Potenzial für die Wärmerückgewinnung. Während die Sommermonate höhere Potenziale aufweisen, sind die Wintermonate durch niedrige Temperaturen und geringere Wärmemengen gekennzeichnet. Die Filterung der Daten auf eine Mindestwassertemperatur von 8°C und die Teilstromberechnung von 10% sorgen für eine realistische und nachhaltige Einschätzung der Nutzungsmöglichkeiten. Diese Karten sind daher ein wertvolles Instrument für die Planung und Implementierung von Wärmepumpensystemen in Österreich.

### 7.3 Standorte mit hohem Wärmebedarf

Die Karte mit dem Titel "Bevölkerungsdichte Österreich 2020" zeigt die Verteilung der Bevölkerungsdichte in Österreich und wurde erstellt, um Gebiete mit hoher Energienachfrage zu identifizieren. Sie verwendet unterschiedliche Rottöne, um verschiedene Dichtebereiche darzustellen, und hebt so Regionen mit besonders hoher Bevölkerungsdichte hervor.

Die Karte zeigt Österreich in administrativen Grenzen, wobei die Bevölke-

rungsdichte pro Quadratkilometer in fünf Kategorien unterteilt ist: 1 bis 149 Personen pro km<sup>2</sup>, dargestellt in sehr hellem Rosa, deckt die am wenigsten dicht besiedelten Gebiete ab. Die nächste Kategorie, 149 bis 446 Personen pro km<sup>2</sup>, ist in etwas dunklerem Rosa dargestellt und zeigt Gebiete mit mäßiger Bevölkerungsdichte. Regionen mit einer Bevölkerungsdichte von 446 bis 1092 Personen pro km<sup>2</sup> sind in intensiverem Rosa markiert und repräsentieren eine mittlere Bevölkerungsdichte. Dunkles Rosa bis Rot zeigt Gebiete mit 1092 bis 2569 Personen pro km<sup>2</sup> an, die dicht besiedelt sind. Schließlich zeigt tiefes Rot die am dichtesten besiedelten Regionen mit 2569 bis 4609 Personen pro km<sup>2</sup>.

Die Hauptstädte der Bundesländer sind mit roten Punkten markiert und namentlich gekennzeichnet, darunter Wien, Linz, St. Pölten, Salzburg, Innsbruck, Klagenfurt am Wörthersee, Graz, Eisenstadt und Bregenz. Diese Städte sind häufig von den höchsten Bevölkerungsdichten umgeben.

Die Karte verdeutlicht, dass die höchste Bevölkerungsdichte in und um die größeren Städte zu finden ist, was auf eine hohe Energienachfrage in diesen Regionen hinweist. Wien ist besonders hervorstechend, da es nicht nur die größte Stadt Österreichs ist, sondern auch die höchste Bevölkerungsdichte aufweist, was durch die tiefrote Farbe angezeigt wird. Weitere Städte mit hoher Bevölkerungsdichte sind Linz, Graz, Salzburg und Innsbruck, die alle wichtige wirtschaftliche und kulturelle Zentren sind und daher eine entsprechend hohe Energienachfrage haben.

Die Darstellung der Bevölkerungsdichte ist ein wichtiger Layer, um Regionen mit hohem Energiebedarf zu identifizieren und die Planung der Energieversorgung effizient zu gestalten. Besonders in den dunkelrot markierten Gebieten ist die Nachfrage nach Energie besonders hoch, was auf die Notwendigkeit hinweist, hier besonders effiziente und zuverlässige Energiequellen zu entwickeln und zu implementieren.

Diese Karte ist ein wertvolles Werkzeug zur Analyse der Bevölkerungsverteilung und hilft bei der strategischen Planung von Energieinfrastrukturprojekten, um den Energiebedarf in den am dichtesten besiedelten Gebieten Österreichs zu decken. Indem sie zeigt, wo die Bevölkerung am dichtesten konzentriert ist, unterstützt sie Entscheidungsträger dabei, Ressourcen optimal zu verteilen und den Zugang zu Energie in den wichtigsten Ballungsräumen sicherzustellen.

Die Austrian Heat Map des Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft verdeutlicht, dass der Wärmebedarf in den Hauptstädten der österreichischen Bundesländer am höchsten ist. Diese Karte unterstützt die Annahme, dass in Regionen mit hoher Bevölkerungsdichte auch ein entsprechend hoher Wärmebedarf besteht. Diese Erkenntnisse sind besonders relevant für die Planung und Optimierung von Wärmepumpensystemen, da

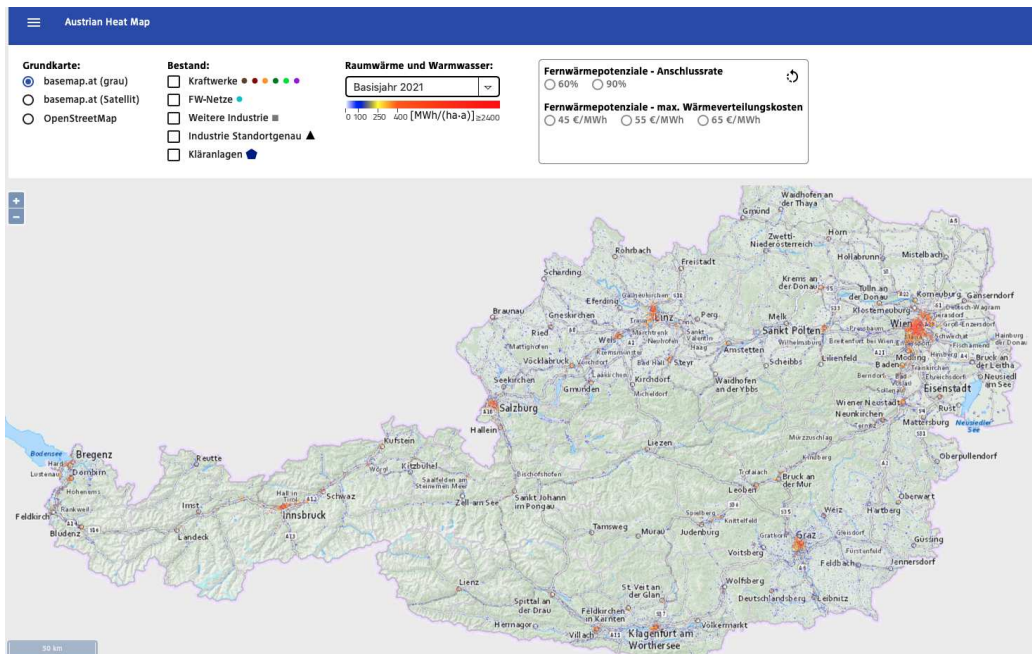


Abbildung 64: Austrian Heat Map 2021, Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

sie aufzeigen, wo der Einsatz solcher Technologien am effizientesten und wirtschaftlich sinnvollsten wäre.

## 7.4 Restriktionsgebiete

Der Karte "Bevölkerungsdichte Österreich 2020" wurde ein weiterer Layer mit Nationalparks hinzugefügt, die in grüner Farbe dargestellt sind. Diese Ergänzung zeigt die räumliche Ausdehnung der Nationalparks in Relation zur Bevölkerungsdichte und den städtischen Ballungsräumen.

Die Nationalparks sind in verschiedenen Teilen Österreichs verteilt und decken unterschiedliche geografische Regionen ab. Besonders große Nationalparks befinden sich im westlichen und südlichen Teil des Landes, wie der Nationalpark Hohe Tauern, der sich über die Bundesländer Tirol, Salzburg und Kärnten erstreckt. Weitere bedeutende Nationalparks sind der Nationalpark Gesäuse in der Steiermark, der Nationalpark Kalkalpen in Oberösterreich, und der Nationalpark Neusiedler See im Burgenland.

Diese Nationalparks weisen große Flächen auf, die weitgehend unbesiedelt sind und daher eine niedrigere Bevölkerungsdichte aufweisen. Dies steht im starken Kontrast zu den dicht besiedelten städtischen Gebieten, die auf der Karte in verschiedenen Rottönen dargestellt sind, um die Bevölkerungsdichte

zu verdeutlichen. Die Hauptstädte der Bundesländer, wie Wien, Linz, Salzburg, Graz, und Innsbruck, sind weiterhin deutlich markiert und zeigen die höchsten Bevölkerungsdichten.

Der Hauptgrund für die Integration der Nationalparks in die Karte ist die Notwendigkeit, die potenziellen Einschränkungen bei der Installation von Wärmepumpen aufgrund von Naturschutzauflagen zu verdeutlichen. Nationalparks sind streng geschützte Gebiete, in denen bestimmte Aktivitäten, einschließlich der Installation von technischen Anlagen wie Wärmepumpen, strengen Regulierungen unterliegen. Es ist nicht nur notwendig, die Parks selbst zu berücksichtigen, sondern auch potenzielle Mindestabstände zu den Parkgrenzen zu beachten, um den Schutz der natürlichen Umwelt zu gewährleisten.

Diese Auflagen müssen sorgfältig überprüft werden, da sie die Planungs- und Installationsmöglichkeiten von Wärmepumpensystemen in diesen Gebieten erheblich beeinflussen können. In manchen Fällen könnten auch angrenzende Gebiete betroffen sein, und es wäre notwendig, die rechtlichen Anforderungen und möglichen Einschränkungen im Detail zu prüfen.

Die Integration der Nationalparks zeigt deutlich, dass die meisten dieser geschützten Gebiete weit entfernt von den dicht besiedelten städtischen Zentren liegen, wo die Wärmenachfrage am höchsten ist. Dies ist ein positiver Aspekt, da die Einschränkungen durch den Naturschutz in diesen Fällen weniger Einfluss auf die potenzielle Installation von Wärmepumpen in den urbanen Regionen haben werden.

Eine Ausnahme bildet jedoch die Region um Wien, die eine hohe Bevölkerungsdichte und eine hohe Energienachfrage aufweist und gleichzeitig nahe geschützter Gebiete liegt. Hier ist besondere Vorsicht geboten, um sicherzustellen, dass alle Naturschutzauflagen erfüllt werden und mögliche Mindestabstände eingehalten werden, um den ökologischen Wert der umliegenden Nationalparks zu schützen.

Insgesamt zeigt die Karte, dass es möglich ist, die hohe Energienachfrage in den dicht besiedelten Gebiete Österreichs zu decken, ohne die Naturschutzauflagen in den Nationalparks zu verletzen. Dies erfordert jedoch eine sorgfältige Planung und Rücksichtnahme auf die ökologischen und gesetzlichen Rahmenbedingungen, insbesondere in Regionen wie Wien, wo urbane und naturschutzrechtliche Interessen eng beieinander liegen.

## 7.5 Netzverluste

Zahlen aus Deutschland zeigen, dass die technischen Endenergiepotenziale, auch Nachfragepotenziale genannt, anhand der technischen Erzeugungspotenziale unter Berücksichtigung von Nachfragebeschränkungen und geschätz-



## Bevölkerungsdichte Österreich 2020

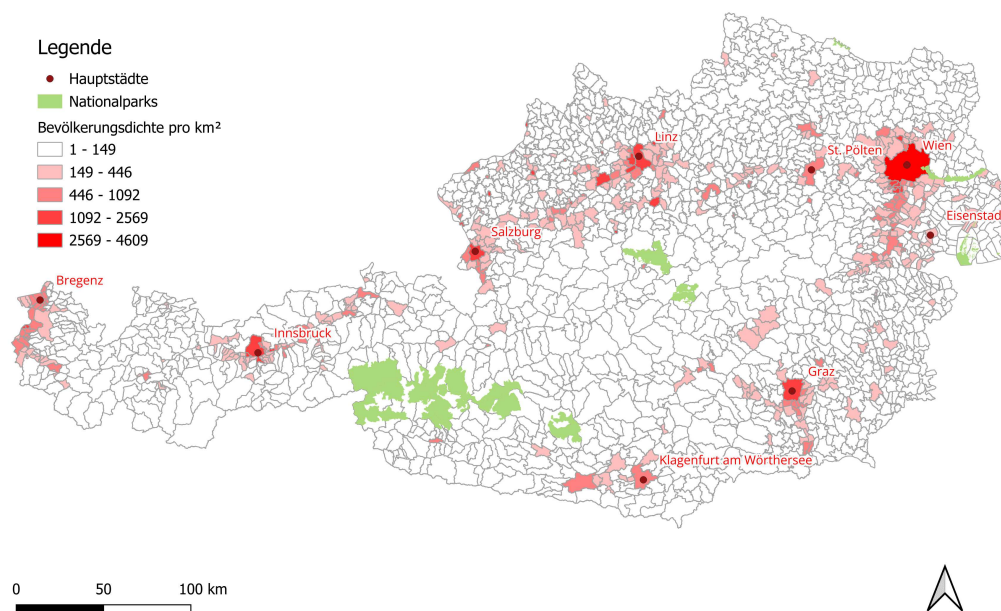


Abbildung 65: Nationalparks und Bevölkerungsdichte 2020, Stier 2024



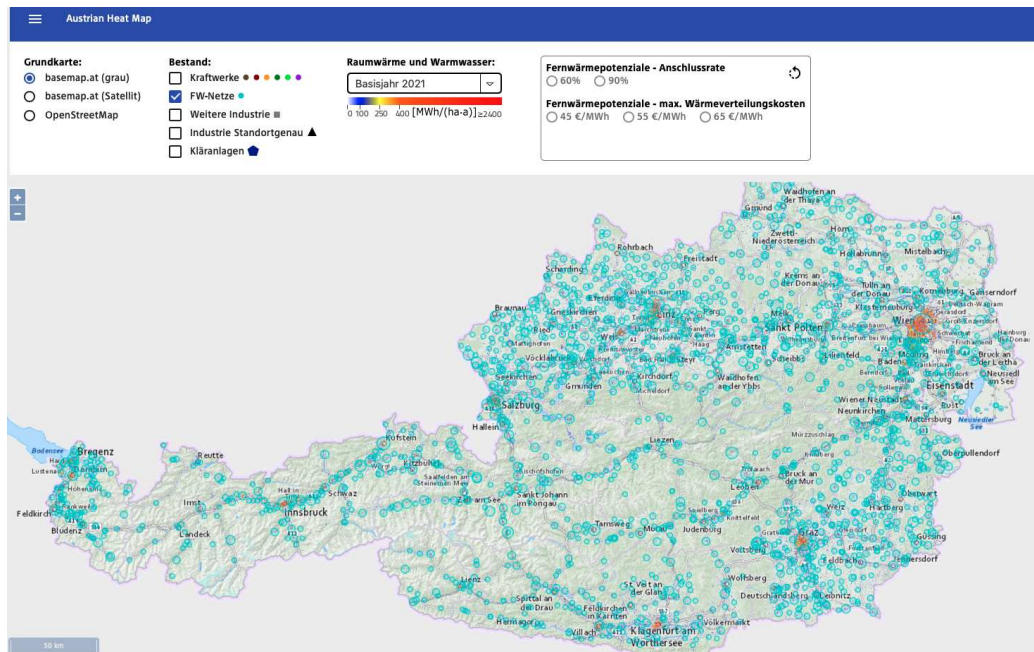


Abbildung 66: Fernwärmenetze in Österreich 2021, Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

ten Netzverlusten von etwa 5% abgeschätzt werden können. Im öffentlichen Versorgungsnetz kann nur ein begrenzter Anteil fluktuierender, angebotsabhängig erzeugter elektrischer Energie ausgeglichen werden, um die Frequenz- und Spannungsstabilität zu gewährleisten. (Kaltschmitt et al., 2020)

Die Austrian Heat Map, herausgegeben vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, bietet neben der Darstellung des Wärmebedarfs auch einen Layer, der das österreichweite Fernwärmenetz zeigt. Auf dieser Karte ist die weite Ausbreitung des Fernwärmenetzes besonders nahe der größeren Städte deutlich zu erkennen. Diese Gebiete sind aufgrund ihrer dichten Infrastruktur besonders gut für die Einspeisung durch potenzielle flusswassergespeiste Wärmepumpen geeignet. Die Kombination aus hohem Wärmebedarf und bestehendem Fernwärmenetz bietet ideale Voraussetzungen, um die Effizienz und Effektivität solcher Systeme zu maximieren und eine nachhaltige Energieversorgung zu gewährleisten.

## 7.6 Versorgungsschwankungen und Verteilkapazitäten

Welche Restriktionen bei der Strombereitstellung aus erneuerbaren Energien in Österreich maßgeblich sind, hängt unter anderem vom Verhältnis des erneuerbaren Erzeugungspotenzials zum gesamten Energiebedarf, den meteo-

## Minimal nutzbares Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer November 2020

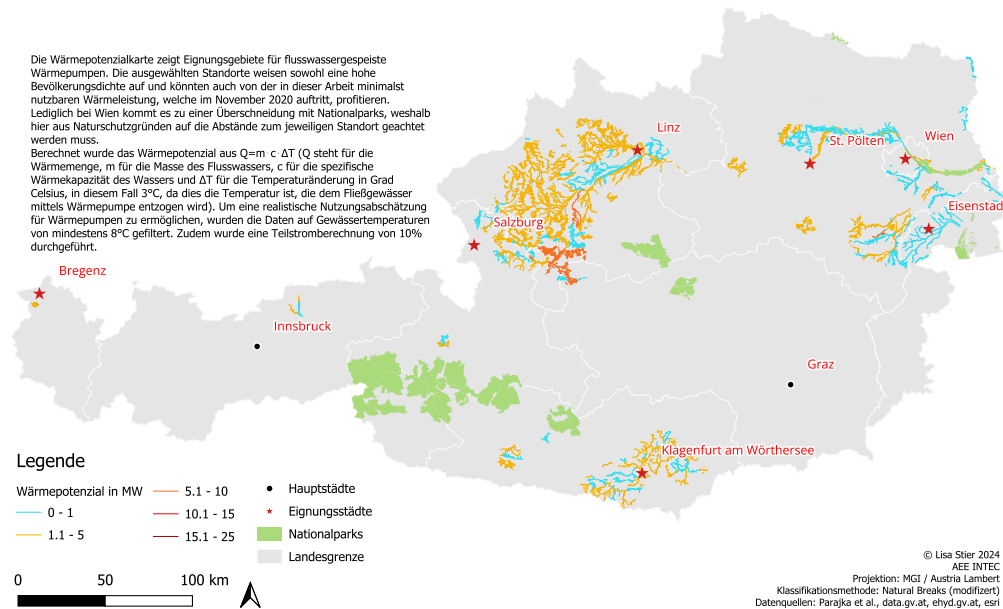


Abbildung 67: Wärmepotenzialkarte mit Eignungsstädten, Stier 2024

rologischen Schwankungen des Energieangebots, der Synchronität von Erzeugung und Nachfrage, der regionalen und überregionalen Verteilinfrastruktur sowie den bestehenden Speichermöglichkeiten (wie Pumpspeicherkraftwerke) ab. Zusätzlich spielen die Ausgleichsmöglichkeiten durch konventionelle Kraftwerke und die internationalen Verteilkapazitäten eine Rolle. Überschüssige Energie kann auf den europäischen Märkten verkauft oder in bestehenden Pumpspeicherkraftwerken wie es sie in Österreich bereits gibt gespeichert werden. (Kaltschmitt et al., 2020)

Geothermische Stromerzeugung kann, aufgrund ihrer Unabhängigkeit von tages- und jahreszeitlichen Schwankungen, sowohl Grundlast-, Mittellast- als auch Spitzenlaststrom bereitstellen. (Kaltschmitt et al., 2020)

## 7.7 Wärmepotenzialkarte mit Standortempfehlung

Die Karte mit dem Titel "Minimal nutzbares Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer November 2020" zeigt Eignungsgebiete für flusswassergepeiste Wärmepumpen. Die ausgewählten Standorte, die mit einem roten Sternsymbol markiert sind, weisen eine hohe Bevölkerungsdichte auf und

könnten von der minimalst nutzbaren Wärmeleistung, die im November 2020 auftritt, profitieren. Diese Städte sind Wien, Linz, St. Pölten, Salzburg, Innsbruck, Klagenfurt am Wörthersee, Eisenstadt und Bregenz. Durch die Einblendung von Nationalparks wird auch ein Einblick zu Restriktionsgebieten gegeben. Lediglich bei Wien kommt es zu einer Überschneidung mit Nationalparks, weshalb hier aus Naturschutzgründen auf die Abstände zum jeweiligen Standort geachtet werden muss.

Die Legende der Karte zeigt die Wärmepotenziale in Megawatt (MW) in verschiedenen Farbkodierungen, die Bereiche von 0 bis 25 MW darstellen. Das Wärmepotenzial wurde anhand der Formel  $Q = m * c * T$  berechnet, wobei  $Q$  die Wärmemenge,  $m$  die Masse des Flusswassers,  $c$  die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $T$  die Temperaturänderung in Grad Celsius ist (hier  $3^{\circ}\text{C}$ , da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpe entzogen wird). Um eine realistische Abschätzung der Nutzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewässertemperaturen von mindestens  $8^{\circ}\text{C}$  gefiltert. Zudem wurde eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt.

Diese Karte verdeutlicht, dass es in Österreich mehrere Gebiete gibt, die über nutzbares Wärmepotenzial in Fließgewässern verfügen, insbesondere in Regionen mit hoher Bevölkerungsdichte. Die hervorgehobenen Städte wie Wien, Linz, Salzburg und St. Pölten bieten aufgrund ihrer großen Einwohnerzahl und der positiven Wassertemperaturwerte zwischen April und November ein großes Potenzial für die Nutzung von flusswassergespeisten Wärmepumpen. Überraschenderweise zeigt die Karte, dass Graz und Innsbruck als einzige der großen Städte nicht durchgehend nutzbares Wärmepotenzial aufweisen. Dies bedeutet, dass die Gewässer in und um Graz und Innsbruck nicht die Mindestwassertemperatur von  $8^{\circ}\text{C}$  während des gesamten betrachteten Zeitraums erreichen, was die Nutzung von Fließgewässern als Wärmequelle dort einschränkt.

Die Identifikation dieser Gebiete ist entscheidend für die Planung und Implementierung von Wärmepumpensystemen, da sie die Möglichkeit bieten, erneuerbare Energiequellen effizient zu nutzen und gleichzeitig die Versorgungssicherheit in städtischen Gebieten zu gewährleisten. Die Karte zeigt auch, dass die Nutzung von Fließgewässern als Wärmequelle in bestimmten Regionen, wie Wien, mit Naturschutzauflagen kollidieren kann, was bei der Planung berücksichtigt werden muss. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Karte eine wertvolle Ressource darstellt, um das potenzielle Wärmepotenzial von Fließgewässern in Österreich zu identifizieren und zu nutzen. Dies trägt nicht nur zur Reduktion von  $\text{CO}_2$ -Emissionen bei, sondern unterstützt auch die Entwicklung nachhaltiger Energielösungen in dicht besiedelten Gebieten.

## 7.8 Vergleich der Wärmepotenzialkarte mit den Thermalquellen Österreichs

Der Vergleich der Karte zu den Thermal- und Mineralwässern in Österreich mit der Karte des nutzbaren Wärmepotenzials österreichischer Fließgewässer von April bis November 2020 zeigt interessante Überschneidungen und bietet wertvolle Einblicke in die potenzielle Nutzung von natürlichen Wärmequellen. Bei der Gegenüberstellung mit der Karte der Thermalquellen wird deutlich, dass es in einigen dieser Gebiete Überschneidungen gibt. Insbesondere im südöstlichen Teil Österreichs, in der Nähe von Graz und entlang der Grenze zu Slowenien, befinden sich mehrere Thermalquellen, die eine Temperatur von über 20°C aufweisen. Diese Quellen könnten potenziell in die Nutzung von Wärmepumpensystemen integriert werden, um die Effizienz und Nachhaltigkeit der Energieversorgung weiter zu erhöhen.

Ein besonderes Augenmerk muss auf die Region Wien gelegt werden, die sowohl eine hohe Bevölkerungsdichte als auch mehrere geschützte Gebiete aufweist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Überschneidung von Gebieten mit hohem nutzbarem Wärmepotenzial und Thermalquellen auf sinnvolle Ergebnisse dieser Arbeit schließen lässt.

## 8 Résumé

### 8.1 Fazit Methodenwahl

Die Wahl der Methodik in dieser Arbeit hat sich als grundsätzlich effektiv und geeignet erwiesen, insbesondere im Hinblick auf die Verwendung des rtop-Pakets in R. Das rtop-Paket zeichnet sich durch seine einfache Handhabung und die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten bei der räumlichen Interpolation und Analyse geostatistischer Daten aus. Allerdings müssen die Ergebnisse kritisch hinterfragt werden, da einige methodische Aspekte, insbesondere die Interpolationsrichtung.

Anwendung des rtop-Pakets:

Das rtop-Paket wurde in dieser Arbeit genutzt, um die Temperaturdaten der Fließgewässer zu interpolieren und zu analysieren. Diese Methodik wurde bereits in anderen Studien erfolgreich für die Analyse von Durchflussdaten eingesetzt, deren Output auch hier verwendet wurde. Die Flexibilität und Leistungsfähigkeit des rtop-Pakets bei der Verarbeitung komplexer räumlicher Datenmodelle sind klar erkennbar. Allerdings ist etwas unklar, ob die Interpolation in beide Richtungen vom Messpunkt aus, oder nur in Gewässerfließrichtung erfolgt ist, da diesbezüglich keine erkennbaren Angaben vorhanden waren und das Ergebnis stark beeinflusst. Diese methodische Unklarheit kann zu Verzerrungen der Ergebnisse geführt haben, da die natürlichen hydrologischen Bedingungen eventuell nicht vollständig berücksichtigt wurden. Eine einseitige Interpolation, die nur in Fließrichtung erfolgt, wäre bei der Betrachtung von Flüssen angemessen, um den Einfluss des Fließverhaltens auf die Wassertemperatur korrekt zu modellieren. In zukünftigen Anwendungen sollte dies unbedingt berücksichtigt und die Interpolationsrichtung untersucht werden, um präzisere Ergebnisse zu erzielen.

Vergleich mit anderen Methoden: Im Vergleich zu anderen Interpolationsmethoden bietet das rtop-Paket eine benutzerfreundliche und robuste Lösung, insbesondere bei Daten mit räumlicher Autokorrelation und ungleichmäßigen Verteilungen. Dennoch ist zu überlegen, ob Methoden, die die Fließrichtung explizit berücksichtigen, in zukünftigen Analysen besser geeignet wären. Die Anwendung des rtop-Pakets in dieser Arbeit hat gezeigt, dass Interpolationen der Temperaturdaten möglich sind, jedoch könnten alternative Methoden oder eine Weiterentwicklung des Tools eine bessere Anpassung an die spezifischen Anforderungen der Fließgewässeranalyse bieten.

Die generell jedoch erfolgreiche Anwendung des rtop-Pakets auf Temperaturdaten eröffnet neue Möglichkeiten für zukünftige Studien und Anwendun-

gen. So könnte überprüft werden ob auch auf andere Umweltparameter wie Wasserqualität oder Schadstoffbelastung ähnlich angewendet werden können. Darüber hinaus könnte die Methodik weiter verfeinert werden, um noch genauere und detailliertere Analysen zu ermöglichen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Wahl des rtop-Pakets für diese Studie eine zielführende Entscheidung war. Es ermöglichte eine zeiteffiziente Interpolation der Temperaturdaten. Die Einfachheit der Anwendung und die robuste Methodik machen das rtop-Paket zu einem wertvollen Werkzeug für die geostatistische Analyse und die Umweltforschung.

## 8.2 Fazit Workflow

Der Prozess zur Bestimmung des Wärmepotenzials von österreichischen Fließgewässern ist komplex und besteht aus mehreren aufeinanderfolgenden Schritten. Um die Übersichtlichkeit zu verbessern und den Ablauf auf einen Blick zu veranschaulichen, wurden mehrere Workflows entwickelt und visualisiert. Diese Visualisierungen können nicht nur zur internen Analyse und Optimierung genutzt werden, sondern dienen auch der Wissenschaftskommunikation nach außen.

Wärmepotenzialfaktoren:

Die Bestimmung des Wärmepotenzials basiert auf mehreren entscheidenden Faktoren, die in einer einfachen Visualisierung dargestellt werden. Diese Faktoren umfassen die Durchflussmenge, die Menge an Wasser, die durch das Fließgewässer strömt, die Wärme Gleichung zur Berechnung der entziehbaren Wärmeenergie basierend auf spezifischen Parametern, die Temperatur des Wassers, die mittels Temperaturmessungen und interpolierten Daten ermittelt wird, sowie den Zeitfaktor, der den Zeitraum beschreibt, über den die Wärmemenge ermittelt wird. Diese Faktoren sind essenziell für die Berechnung des Wärmepotenzials und müssen sorgfältig erfasst und analysiert werden.

Layer Übersicht:

Um eine umfassende Analyse zu ermöglichen, werden verschiedene Layer in das GIS-System integriert, in der Übersicht sind alle unterschiedlichen Datentypen aufgezeigt. Diese Layer umfassen die Grundkarte zur geografischen Orientierung, die Darstellung der Flussverläufe, die Visualisierung der Messpunkte für die Temperaturdaten, Daten zu den Durchflussmengen der Fließgewässer, Nationalparks, die aufgrund von Schutzgebieten besondere Beach-

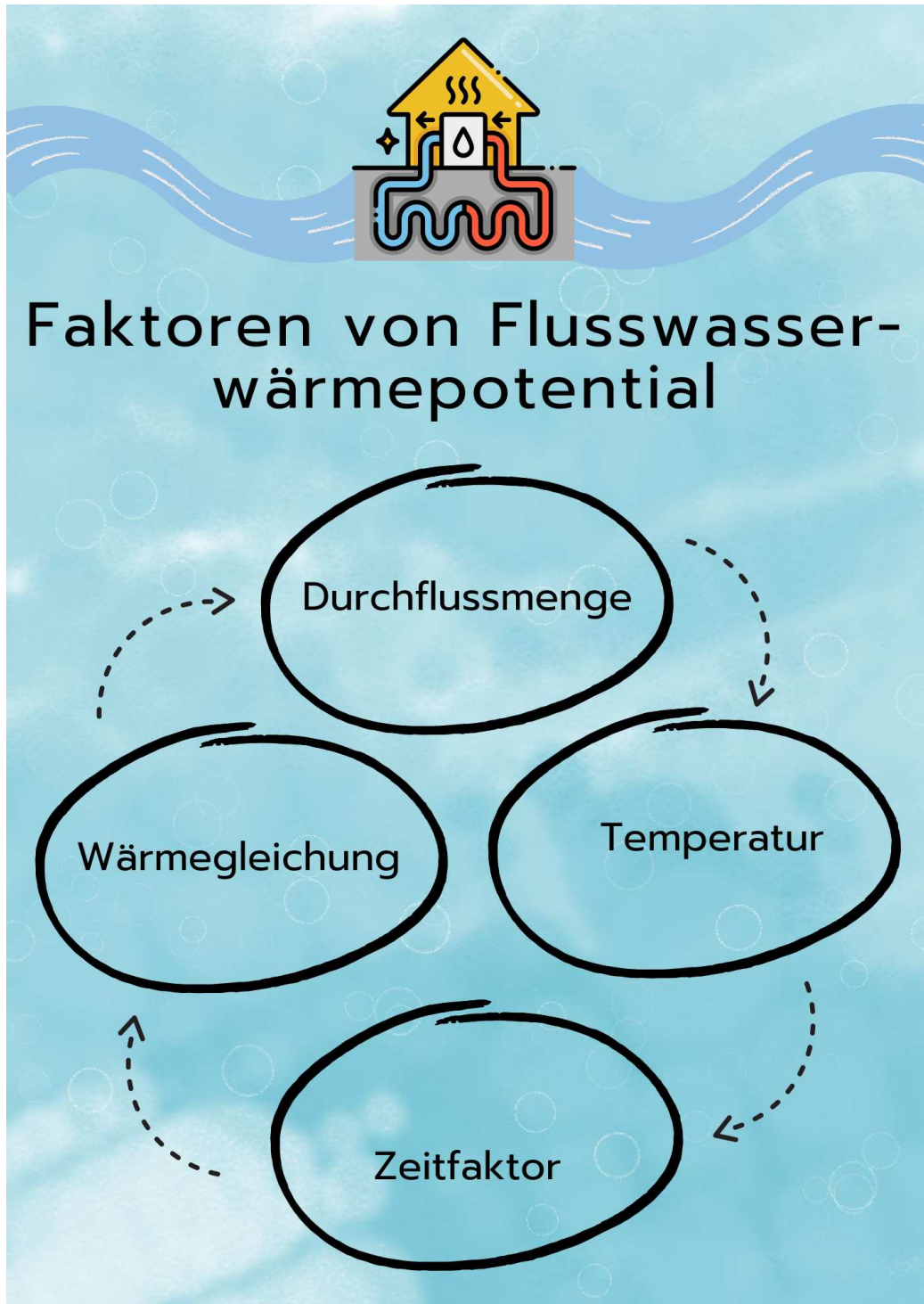


Abbildung 68: Faktoren von Flusswasserwaermepotenzial, Stier 2024

tung erfordern, Siedlungsgebiete mit hoher Bevölkerungsdichte, die potenziell einen höheren Wärmebedarf haben, sowie das Wärmepotenzial als Ergebnis der Berechnungen. Diese Layer bieten eine umfassende Grundlage für die Analyse und Visualisierung der relevanten Daten.

#### Workflow Temperaturdaten:

Die Temperaturdaten spielen eine zentrale Rolle in der Analyse des Wärmepotenzials. Der Workflow zur Verarbeitung der Temperaturdaten umfasst mehrere Schritte, die ebenfalls in einer Abbildung veranschaulicht werden. Diese Schritte beinhalten die Sammlung der Temperaturmessdaten an verschiedenen Punkten, die Überprüfung und Umstrukturierung der Daten, um Lücken zu identifizieren und eine einheitliche Datenstruktur zu gewährleisten, sowie den Import der Temperaturdaten in ein GIS-System zur weiteren Analyse und Visualisierung.

#### Workflowschritte:

Der detaillierte Workflow zur Berechnung des Wärmepotenzials umfasst unterschiedliche Schritte, die in einer weiteren Abbildung gezeigt werden. Diese Schritte beinhalten den Import der Temperaturdaten, die Verknüpfung der interpolierten Temperaturen mit den Basis-Einzugsgebieten, die Integration der Fließgewässerlinien in das GIS-System, die Verknüpfung der interpolierten Flächen mit den Flussrouten, die Einbringung der Durchflussmengen als Shape-File, die Kombination der Durchfluss- und Temperaturdaten, die Berechnung der Wärmemenge mit der Wärme Gleichung und das Hinzufügen dieser Informationen in die Attributtabelle sowie die Festlegung der Mindesttemperatur des Wärmelayers mit einem Filterwerkzeug. Durch diese Visualisierungen und die detaillierte Beschreibung des Workflows wird der komplexe Prozess der Datenanalyse und Berechnung des Wärmepotenzials klar und nachvollziehbar dargestellt. Die Abbildungen in der Arbeit bieten einen strukturierten Überblick über die verschiedenen Schritte und Faktoren, die bei der Bestimmung des Wärmepotenzials von Fließgewässern eine Rolle spielen. Diese Darstellungen sind nicht nur für die aktuelle Analyse relevant, sondern können auch als Grundlage für zukünftige Untersuchungen und zur Kommunikation der Ergebnisse an unterschiedliche Interessensgruppen verwendet werden.



# LAYER ÜBERSICHT



Abbildung 69: Layer Übersicht, Stier 2024

# WORKFLOW TEMPERATURDATEN

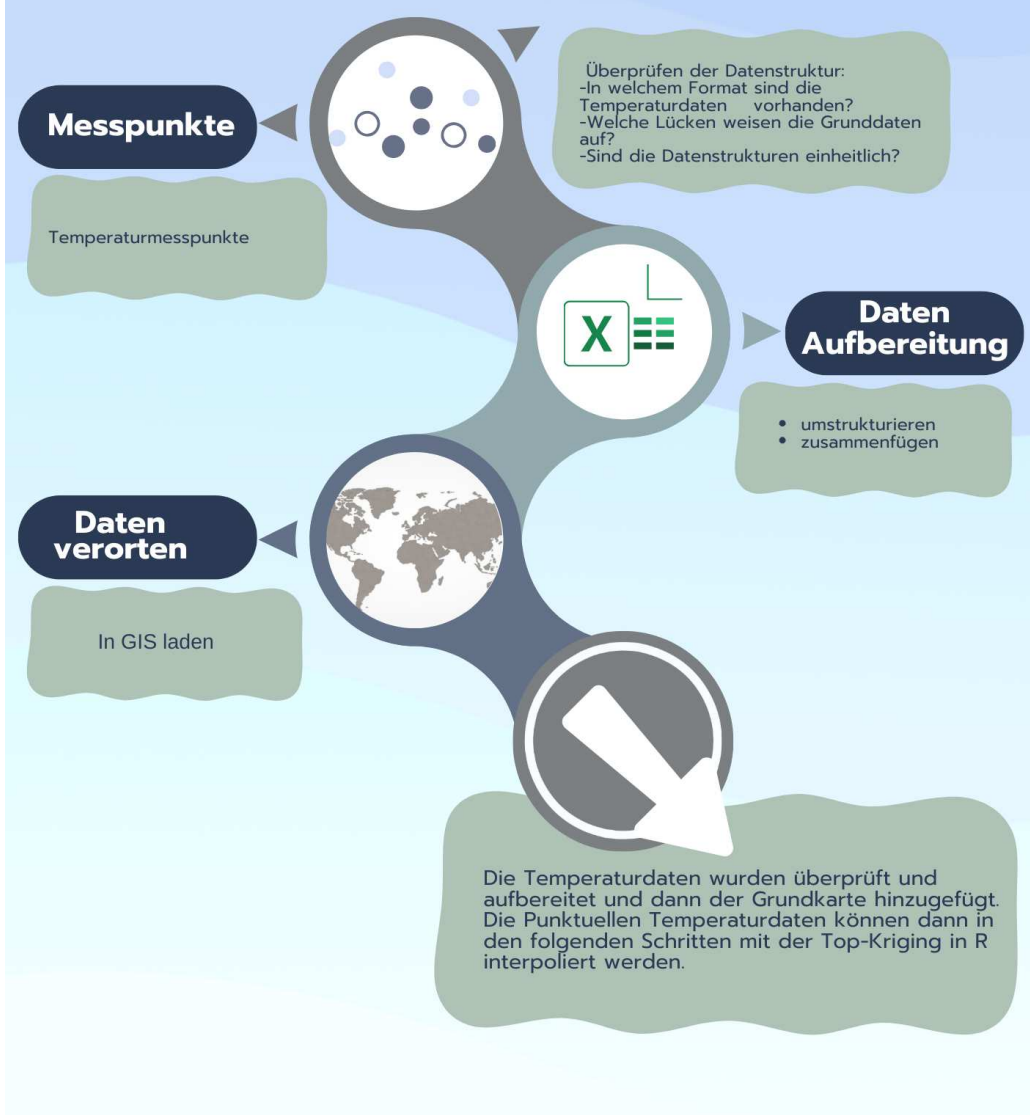


Abbildung 70: Workflow Temperaturdatena, Stier 2024

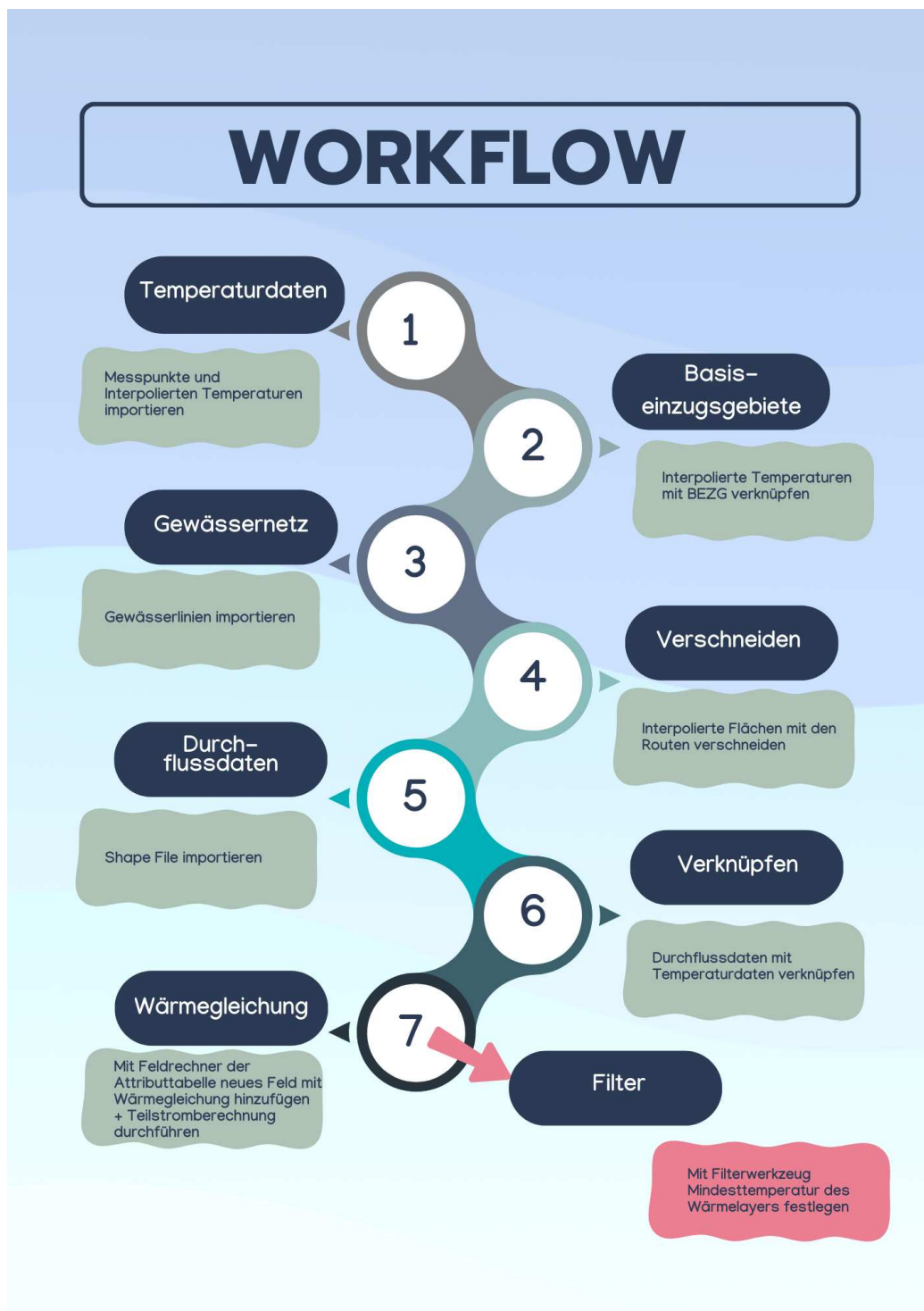


Abbildung 71: Workflow Schritte, Stier 2024

### 8.3 Analyse des Wärmepotenzials

Die Analyse des Wärmepotenzials der österreichischen Fließgewässer anhand der erstellten Karten zeigt deutliche saisonale Schwankungen im Wärmeangebot. In den Wintermonaten, insbesondere Januar und Februar, ist das Wärmepotenzial sehr niedrig. Die niedrigen Lufttemperaturen und die geringe Sonneneinstrahlung führen dazu, dass die Fließgewässer nicht ausreichend erwärmt werden, um die Mindesttemperatur von 8°C zu erreichen, die für den Betrieb von Wärmepumpen erforderlich ist. Dies schränkt die Nutzungsmöglichkeiten erheblich ein. Die Wärmepotenzialkarte für Januar zeigt, dass die meisten Flüsse in Österreich in diesem Monat keine nennenswerte Wärmeenergie liefern können.

Mit dem Übergang in die Frühlingsmonate März und April beginnt das Wärmepotenzial allmählich zu steigen. Diese Monate sind durch einen Anstieg der Außentemperaturen und eine längere Sonnenscheindauer gekennzeichnet, was die Erwärmung der Fließgewässer unterstützt. Die Wärmepotenzialkarte für März zeigt, dass insbesondere die tiefer gelegenen Gebiete und große Flüsse wie die Donau beginnen, ausreichend Wärmeenergie zu liefern. Der April verzeichnet einen weiteren Anstieg, was die Nutzung von Wärmepumpen zunehmend effizienter macht.

Die Sommermonate, insbesondere Juli und August, weisen das höchste Wärmepotenzial auf. In diesen Monaten sind die Außentemperaturen am höchsten und die Tage am längsten, was zu einer maximalen Erwärmung der Fließgewässer führt. Die Wärmepotenzialkarten für Juni und Juli zeigen, dass nahezu alle Flüsse in Österreich genügend Wärmeenergie liefern, um effizient mit Wärmepumpen genutzt zu werden. In diesen Monaten erreichen viele Flüsse ein Wärmepotenzial von über 10 MW, was die höchste Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpensysteme ermöglicht.

Im Herbst, insbesondere in den Monaten September und Oktober, bleibt das Wärmepotenzial noch relativ hoch, beginnt jedoch allmählich zu sinken. Die Wärmepotenzialkarte für den September zeigt weiterhin beträchtliche Wärmepotenziale, insbesondere in den großen Flüssen und tiefer gelegenen Gebieten. Im November und Dezember nehmen die Wärmepotenziale wieder deutlich ab, da die Temperaturen fallen und die Sonnenscheindauer abnimmt. Dies schränkt die Nutzung von Fließgewässern zur Wärmerückgewinnung in diesen Monaten erneut ein.

Diese saisonalen Schwankungen des Wärmepotenzials haben direkte Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpensysteme. In den Monaten mit hohem Wärmepotenzial, insbesondere von Mai bis September, können die Wärmepumpen effizient betrieben werden und bieten eine hohe Energieausbeute. In den Monaten mit niedrigem Wärmepotenzial, insbeson-

dere von November bis Februar, ist der Betrieb der Wärmepumpen weniger effizient und möglicherweise unwirtschaftlich.

Eine wichtige Überlegung ist, ob sich der Betrieb von Wärmepumpen lohnt, wenn sie nur während der Monate mit hohem Wärmepotenzial effektiv laufen. Es muss geprüft werden, ob die Investitions- und Betriebskosten der Wärmepumpen durch die Energieeinsparungen und -gewinne während der Nutzungsmonate gedeckt werden können. Dies erfordert eine detaillierte wirtschaftliche Analyse, die die Kosten für die Installation und den Betrieb der Wärmepumpen, die potenziellen Energieeinsparungen und die Einnahmen aus der Nutzung der Wärmeenergie berücksichtigt.

Ein weiterer Aspekt ist die Möglichkeit, die Wärmepumpen in Kombination mit anderen Heizsystemen zu betreiben, um die saisonalen Schwankungen auszugleichen. In den Monaten mit niedrigem Wärmepotenzial könnten alternative Wärmequellen oder ergänzende Heizsysteme eingesetzt werden, um eine kontinuierliche Wärmeversorgung zu gewährleisten. Dies könnte die Wirtschaftlichkeit der Wärmepumpensysteme verbessern und gleichzeitig die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen reduzieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die saisonalen Schwankungen des Wärmepotenzials eine sorgfältige Planung und wirtschaftliche Analyse erfordern, um die optimale Nutzung von Wärmepumpensystemen sicherzustellen. Die hohe Effizienz und Wirtschaftlichkeit in den Sommermonaten bieten ein großes Potenzial, während die Nutzung in den Wintermonaten durch alternative Systeme ergänzt werden könnte.

Generell bestand bei der Erstellung der Wärmepotenzialkarte eine Herausforderung in der begrenzten Anzahl an Messpunkten der Wassertemperatur. Obwohl die vorhandenen Messdaten eine grundlegende Analyse ermöglicht haben, wäre eine dichtere Verteilung der Messpunkte wünschenswert gewesen, um eine noch genauere und verlässlichere Interpolation zu gewährleisten. Allerdings spiegelt die aktuelle Wärmepotenzialkarte die bestmögliche Nutzung der verfügbaren Daten wider, und die daraus gewonnenen Ergebnisse bieten dennoch wertvolle Erkenntnisse für die Standortanalyse. Für den Anwendungstest der gewählten Methode ist die Datengrundlage ausreichend. Bei der tatsächlichen Anwendung und Umsetzung der hier evaluierten Methode müssen darüber hinaus Parameter wie beispielsweise der Standort der einzelnen Messpunkte einer sorgfältigen Überprüfung unterzogen werden. Es ist entscheidend, sicherzustellen, dass die Messpunkte den spezifischen Datenanforderungen entsprechen und keine Messungen von stehenden Gewässern, wie Seen, im Datensatz enthalten sind, auch wenn der Datensatz laut Beschreibung ausschließlich Fließgewässer umfassen sollte, schließlich können leider auch in verfügbaren Daten Fehler vorkommen. Eine solche Prüfung ist notwendig, um die Genauigkeit und Verlässlichkeit der erstellten Wärmepo-

tenzialkarte zu gewährleisten und mögliche Verzerrungen oder Ungenauigkeiten zu vermeiden.

## 8.4 Wärmenutzungsanalyse

Der Layer zur Bevölkerungsdichte zeigt, dass die dicht besiedelten Gebiete Österreichs vor allem in urbanen Ballungszentren liegen. Städte wie Wien, Graz, Linz und Salzburg weisen die höchsten Bevölkerungsdichten auf. Diese Gebiete haben entsprechend auch den höchsten Wärmebedarf, was sie zu potenziellen Hotspots für die Nutzung von Wärmepumpen macht. In den urbanen Gebieten gibt es zahlreiche Gebäude und Einrichtungen, die eine kontinuierliche Wärmezufuhr benötigen, was den Gesamtenergieverbrauch erhöht und somit das Potenzial für die Nutzung von Flusswärmepumpen steigert.

Wien, die Hauptstadt Österreichs, ist das bevölkerungsreichste Gebiet und hat eine hohe Nachfrage nach Wärmeenergie, die durch Flusswärmepumpen gedeckt werden könnte. Die Donau, die durch Wien fließt, bietet ein erhebliches Wärmepotenzial, das durch die Flusswärmepumpen effizient genutzt werden kann. Ähnlich verhält es sich in Graz und Linz, wo große Flüsse wie die Mur und die Donau ebenfalls bedeutende Quellen für Wärmeenergie darstellen.

In ländlichen Gebieten, insbesondere in den Alpenregionen, ist die Bevölkerungsdichte deutlich geringer. Diese Regionen haben einen niedrigeren Wärmebedarf, was die wirtschaftliche Nutzung von Wärmepumpen dort weniger attraktiv macht. Allerdings können hier lokale Gegebenheiten, wie Tourismusgebiete mit hohem saisonalem Wärmebedarf, eine Rolle spielen. Beispielsweise könnten Hotels und Ferienanlagen in diesen Regionen von der Nutzung von Flusswärmepumpen profitieren, insbesondere in den wärmeren Monaten, in denen der Tourismus durchaus hoch sein kann.

Die Alpenregionen stellen aufgrund ihrer geografischen und klimatischen Bedingungen besondere Herausforderungen dar. Die geringere Bevölkerungsdichte und der damit verbundene niedrigere Wärmebedarf machen die Nutzung von Flusswärmepumpen in diesen Gebieten weniger wirtschaftlich. Jedoch könnten spezifische Anwendungen, wie die Beheizung von Tourismusinfrastrukturen, dennoch sinnvoll sein.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bevölkerungsdichte ein entscheidender Faktor für die Wirtschaftlichkeit und Effizienz von Flusswärmepumpen ist. Urbane Ballungszentren bieten aufgrund ihrer hohen Bevölkerungsdichte und des hohen Wärmebedarfs das größte Potenzial für die Nutzung dieser Technologie. In ländlichen und alpinen Regionen ist eine sorgfältige Abwägung erforderlich, um die wirtschaftliche Machbarkeit sicherzustellen.

## 8.5 Analyse zu Nutzungsrestriktionen

Nationalparks wurden als Restriktionsgebiet als separater Layer hinzugefügt, um die Standorte zu kennzeichnen, an denen die Nutzung von Flusswärmepumpen eingeschränkt oder nicht möglich ist. Der Layer wurde also erstellt, um die Bereiche zu identifizieren, die unter besonderen Schutz stehen und für den Bau von Wärmepumpen nicht in Frage kommen. Diese Gebiete sind weitgehend von der Nutzung ausgeschlossen, um die ökologischen und naturschutzrechtlichen Anforderungen zu erfüllen. Ein Großteil der Nationalparks in Österreich, wie der Nationalpark Hohe Tauern oder der Nationalpark Gesäuse, befindet sich in alpinen Regionen. Diese liegen weit entfernt von den dicht besiedelten Gebieten mit hohem Wärmebedarf. Daher stellen die Nationalparks keine wesentlichen Einschränkungen für den Bau von flusswassergespeisten Wärmepumpen dar.

Die Nationalparks und Schutzgebiete sind von hoher ökologischer Bedeutung und unterliegen strengen Schutzbestimmungen. Die Nutzung von Flusswärmepumpen in diesen Gebieten könnte potenziell negative Auswirkungen auf die lokale Flora und Fauna haben. Daher ist es wichtig, diese Gebiete bei der Planung von Wärmepumpensystemen zu berücksichtigen und alternative Standorte in Betracht zu ziehen.

Die Analyse zeigt, dass die meisten Restriktionsgebiete ohnehin nicht in den primären Zielregionen für die Wärmenutzung liegen. Dies bedeutet, dass die potenziellen Konflikte zwischen der Wärmepumpennutzung und dem Naturschutz minimiert werden können. Eine sorgfältige Planung und Berücksichtigung dieser Gebiete ist jedoch unerlässlich, um mögliche rechtliche und ökologische Probleme zu vermeiden.

Darüber hinaus könnten spezielle Genehmigungsverfahren und Umweltverträglichkeitsprüfungen erforderlich sein, um sicherzustellen, dass die Installation und der Betrieb von Flusswärmepumpen in oder nahe Schutzgebieten keine negativen Auswirkungen haben. Durch die Einhaltung dieser Vorschriften kann sichergestellt werden, dass die Nutzung von Flusswärmepumpen nachhaltig und umweltfreundlich erfolgt.

Es ist auch ratsam, bei der Erwägung eines Standorts für Wärmepumpen weitere restriktive Faktoren zu berücksichtigen, wie etwa Naturschutzaufgaben, Wasserrechtsvorschriften und bestehende Landnutzungspläne. Diese Faktoren können die Auswahl geeigneter Standorte beeinflussen und sollten in die Planungsprozesse integriert werden. Eine umfassende Umweltverträglichkeitsprüfung und die Zusammenarbeit mit lokalen Behörden und Interessengruppen sind entscheidend, um die besten Standorte zu identifizieren und die nachhaltige Nutzung von Flusswärmepumpen zu gewährleisten.

## 8.6 Analyse zu Netzverlusten und Distanzen

Netzverluste sind ein wichtiger Faktor bei der Planung von Wärmepumpenstandorten. Je weiter die Wärmepumpen von den Nutzungsorten entfernt sind, desto größer sind die Netzverluste. Dies bedeutet, dass die Effizienz der Wärmeübertragung mit zunehmender Entfernung abnimmt. Eine Analyse der Wärmeverluste zeigt, dass es entscheidend ist, Wärmepumpen möglichst nah an den Gebieten mit hohem Wärmebedarf zu platzieren.

In urbanen Gebieten wie Wien, Graz, Linz und Salzburg, die sowohl hohe Bevölkerungsdichten als auch ein hohes Wärmepotenzial aufweisen, können die Netzverluste minimiert werden. Diese Städte bieten eine ideale Kombination aus hoher Wärmebedarfsdichte und verfügbarer Wärmeenergie aus Fließgewässern. Die Platzierung von Wärmepumpen in diesen Gebieten maximiert die Effizienz und reduziert die Netzverluste, was zu einer höheren Wirtschaftlichkeit führt.

Regionen entlang der Donau zeigen ebenfalls ein hohes Wärmepotenzial, das mit der Nachfrage in den umliegenden Gebieten korreliert. Dies ermöglicht eine effiziente Nutzung der Flusswärmepotenziale mit minimalen Netzverlusten. Die Nähe der Flüsse zu den städtischen Ballungszentren entlang der Donau, wie Wien und Linz, stellt sicher, dass die Wärmeenergie effizient genutzt werden kann.

In ländlichen Gebieten mit geringerer Bevölkerungsdichte und niedrigerem Wärmebedarf könnten die Netzverluste jedoch die Wirtschaftlichkeit und Effizienz der Wärmepumpen beeinträchtigen. Die größere Entfernung zwischen den Flüssen und den Wärmeabnehmern führt zu höheren Netzverlusten und verringert die Effizienz der Wärmeübertragung. Daher ist eine sorgfältige Abwägung und Planung erforderlich, um die optimalen Standorte für die Wärmepumpen zu bestimmen.

## 9 Zukunftsausblick

Die Nutzung von flusswassergespeisten Wärmepumpen bietet vielversprechende Möglichkeiten zur klimafreundlichen Energiegewinnung, insbesondere angesichts des fortschreitenden Klimawandels und der steigenden globalen Temperaturen. Der vorliegende Forschungsrahmen zeigt bereits das Potenzial dieser Technologie auf, dennoch gibt es mehrere Bereiche, die für zukünftige Studien und technologische Entwicklungen von großer Bedeutung sind.

Technologischer Fortschritt und Potenzialsteigerung:



Der technologische Fortschritt wird entscheidend sein für die Weiterentwicklung und Effizienzsteigerung der Wärmepumpensysteme. Während das Potenzial der Wasserkraft relativ konstant bleibt und langfristig zwischen 33 und 42 TWh/a erwartet wird, da hier kaum technische Verbesserungen zu erwarten sind, gibt es bei anderen erneuerbaren Energien wie Photovoltaik, Windenergie und Geothermie noch unerschlossene technische Entwicklungspotenziale. Ein Anstieg des Potenzials bei der Geothermie ist wahrscheinlich, wenn es gelingt, die Effizienz der Wärmenutzung aus dem Untergrund zu verbessern und kostengünstiger zu gestalten. Kaltschmitt et al. 2020 Diese Entwicklungen könnten dazu beitragen, die Nutzung von Wärmepumpen weiter zu optimieren und deren Einsatzgebiete zu erweitern. Da die Nutzung sehr ähnlich zu der Nutzung von flusswassergespeisten Wärmepumpen ist, lässt es auf ähnlich positive Entwicklungspotenziale hoffen.

#### Effizienz und Nachhaltigkeit:

Durch langfristige Beobachtungen und Anpassungen an lokale Gegebenheiten werden die Effizienz und Nachhaltigkeit sowie die Einsatzmöglichkeiten der Nutzungsmethoden von Oberflächengewässern weiter verbessert. Zukünftige Studien sollten sich auf die Praxistauglichkeit und die technologische Optimierung von Wärmepumpen konzentrieren. Spezifische Umweltfaktoren bei der Installation von Wärmepumpen in österreichischen Oberflächengewässern müssen berücksichtigt werden, und es sind innovative Lösungen zur Minimierung des Vereisungspotenzials in alpinen Regionen notwendig. Die Entwicklung und Implementierung neuer Technologien könnten dazu beitragen, die Effizienz und Zuverlässigkeit der Wärmepumpen in unterschiedlichen klimatischen Bedingungen zu erhöhen.

Politische Maßnahmen und Förderung: Um die Nutzung von flusswassergespeisten Wärmepumpen in Österreich zu fördern und zu unterstützen, sollten politische Maßnahmen ergriffen werden. Dies könnte durch finanzielle Anreize, Subventionen oder durch die Anpassung rechtlicher Rahmenbedingungen geschehen, die die Installation und den Betrieb von Wärmepumpen erleichtern. Die Einbindung von Stakeholdern und die Förderung von Kooperationen zwischen Forschungseinrichtungen, der Industrie und politischen Entscheidungsträgern sind entscheidend, um die notwendigen Rahmenbedingungen zu schaffen und die Technologie flächendeckend zu implementieren.

Potenzial für zukünftige Standortbestimmungen:

Ein weiterer zukunftsweisender Aspekt ist die Möglichkeit, potenzielle Standorte für den Bau wärmeintensiver Industrieanlagen oder anderer großflächiger Wärmeverbraucher zu lokalisieren. Durch die Analyse und Identifikation von Gebieten mit hohem Wärmepotenzial und dichter Bevölkerung können Standorte bestimmt werden, die ideal für die Ansiedlung solcher Industrien sind. Dies würde nicht nur die Energieeffizienz maximieren, sondern auch zur regionalen wirtschaftlichen Entwicklung beitragen. Die Möglichkeit, diese Standorte gezielt zu entwickeln und mit einer Infrastruktur für flusswassergespeiste Wärmepumpen auszustatten, könnte einen erheblichen Beitrag zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur Förderung nachhaltiger Energienutzung leisten.

Klimawandel und zukünftige Nutzungsmöglichkeiten:

Ein bedeutender Aspekt im Zusammenhang mit der Nutzung von Wärmepumpen ist die fortschreitende Erwärmung der globalen Temperaturen durch den Klimawandel. Tendenziell steigende Wassertemperaturen könnten die Nutzbarkeit von Fließgewässern für Wärmepumpen erhöhen und somit das Potenzial dieser Technologie weiter ausbauen. Der Klimawandel bietet jedoch nicht nur Chancen, sondern auch Herausforderungen, die in zukünftigen Studien adressiert werden müssen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Möglichkeit, Wärmepumpen zur Kühlung einzusetzen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte das Kühlpotenzial von flusswassergespeisten Wärmepumpen nicht untersucht werden. Es ist jedoch vielversprechend, in zukünftigen Studien die Möglichkeiten der Wärmepumpen als Kühltechnologie zu erforschen. Angesichts der steigenden Sommerhitze könnten Wärmepumpen zur Kühlung von Gebäuden und städtischen Infrastrukturen beitragen und so die Lebensqualität verbessern sowie den Energieverbrauch für Klimaanlage reduzieren.

Nutzung von Wasserleitungen und urbanen Kanälen:

Über die Fließgewässer hinaus gibt es auch Potenzial, große Wasserleitungen und Kanäle in urbanen Räumen für die Nutzung von Wärmepumpen zu erschließen.

Eine Studie aus England hat gezeigt, dass Kanäle eine wertvolle Ressource für die Wärmegewinnung darstellen können. (Department of Energy & Climate Change, 2015)

Diese Erkenntnisse könnten auf große Wasserleitungen in städtischen Gebieten übertragen werden. Solche Infrastrukturen könnten in Zukunft ebenfalls für Wärmepumpen nutzbar gemacht werden, was eine vielversprechende Er-

weiterung der Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie darstellt. Forschung in diesem Bereich wäre sehr interessant und könnte zu bedeutenden Fortschritten in der urbanen Energieversorgung führen.

Fazit:

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die flusswassergespeisten Wärmepumpen ein großes Potenzial für die klimafreundliche Energiegewinnung in Österreich bieten. In der Arbeit "Methodenwahl zur Temperaturinterpolation von Fließgewässerdaten und daraus folgenden Potenzialanalysen von flusswassergespeisten Wärmepumpen in Österreich" wurde die Frage untersucht: "Mit welchen Methoden können GIS-gestützte Wärmepotenzialkarten erstellt werden, um das regional variierende Potenzial flusswassergespeicherter Wärmepumpen in österreichischen Fließgewässern zu analysieren?" Die Analyse hat gezeigt, dass die Wahl der Interpolationsmethoden einen wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit der Potenzialabschätzungen hat. Besonders wichtig ist die Berücksichtigung der natürlichen Fließrichtung der Gewässer, um die Temperaturverteilungen realistisch abzubilden.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die fortschreitende technologische Entwicklung, die Berücksichtigung spezifischer Umweltfaktoren und die Unterstützung durch politische Maßnahmen entscheidend sind, um die Nutzung flusswassergespeicherter Wärmepumpen weiter zu optimieren und zu verbreiten. Angesichts des Klimawandels und der steigenden Temperaturen bieten Wärmepumpen nicht nur als Heiz-, sondern auch als Kühltechnologie vielversprechende Möglichkeiten.

Darüber hinaus könnte die weitere Erforschung und Nutzung von Wasserleitungen und urbanen Kanälen das Anwendungsspektrum erweitern und zur nachhaltigen Energieversorgung in urbanen Räumen beitragen. Die Arbeit unterstreicht die Bedeutung präziser GIS-gestützter Wärmepotenzialkarten, um fundierte Entscheidungen zur Implementierung solcher Systeme zu treffen und so zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur nachhaltigen Entwicklung in Österreich beizutragen.

## Referenzen

- [1] AIT-AUSTRIA GMBH Alpha innotec. *Funktion Sole/Wasser-Wärmepumpen*. <https://www.alpha-innotec.com/at/ratgeber/wissensquelle-waermepumpenfunktionsprinzip-waermepumpewarmequelle-erde>, 2024.
- [2] Ingeborg Auer, Johann Hiebl, Stefan Reisenhofer, Reinhard Böhm, and Wolfgang Schöner. Aktualisierung des digitalen klimaatlas österreichs 1961–1990. 2001.
- [3] Rob Ferguson. Linear regression in geography. Geo Abstracts, 1977.
- [4] D.M. German, Bram Adams, and Ahmed E. Hassan. The evolution of the r software ecosystem. pages 243–252, 03 2013.
- [5] Vaillant Group Austria GmbH. *Die Wasser-Wasser-Wärmepumpe*. <https://www.vaillant.at/privatanwendertipps-und-wissen/heiztechnologien/waermepumpen/wasser-wasser-waermepumpe>, 2024.
- [6] Spatial Energy Planning Green Energy Lab. Potential oberflächengewässer, internes dokument. 2015.
- [7] Chelsea Julian. How climate change and population growth will transform cities’ energy use. 2023.
- [8] Martin Kaltschmitt, Wolfgang Streicher, and Andreas Wiese. *Erneuerbare Energien : Systemtechnik Ä Wirtschaftlichkeit Ä Umweltaspekte*. Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, 6th ed. 2020 edition, 2020.
- [9] Gernot Katzlberger. *Neuabgrenzung der Siedlungseinheiten 2010*. statistik.at, 2010.
- [10] Gregor Laaha, Jon Olav Skøien, and G. Blöschl. Spatial prediction on river networks: comparison of top-kriging with regional regression. *Hydrological Processes*, 28, 2014.
- [11] Skøien J.O. Nobilis F. et al. Laaha, G. Spatial prediction of stream temperatures using top-kriging with an external drift. *Environ Model Assess (2013) 18:671–683*, pages 180–190, 2013.
- [12] Klaus Lüders. *Grundlagen der Physik : kurz und knapp*. Springer Berlin Heidelberg Imprint: Springer Spektrum, Berlin Heidelberg, 4th ed. 2023 edition, 2023.
- [13] Department of Energy Climate Change. National heat map: Water source heat map layer. pages 1–54, 2015.
- [14] Jon Olav Skøien and Qingyun Duan. Package ‘rtop’, 2024.

- [15] Jon Olav Skøien, Ralf Merz, and Günter Blöschl. Top-kriging - geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10:277–287, 2006.
- [16] J.O. Skøien, G. Blöschl, G. Laaha, E. Pebesma, J. Parajka, and A. Viglione. rtop: An r package for interpolation of data with a variable spatial support, with an example from river networks. *Computers Geosciences*, 67:180–190, 2014.
- [17] B. Windholz M. Hartl T. Fleckl, V. Wilk. Techno - ökonomische analyse der integration von flusswassergespeisten großwärmepumpen in fw-netzen, 2015. 2015.

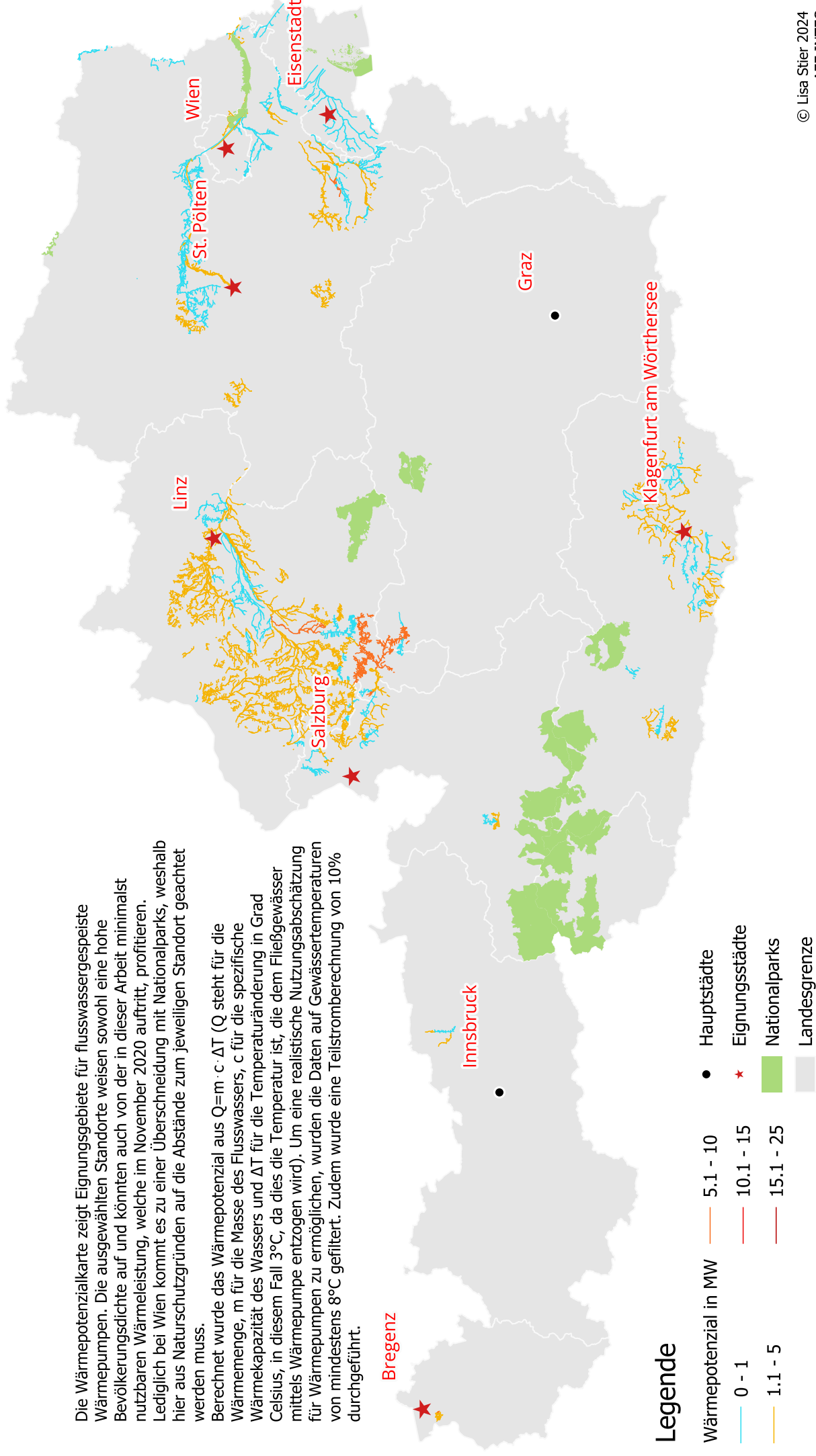
## Datenquellen

- [1] Statistik Austria. Siedlungseinheiten. 2016.
- [2] Regionen und Wasserwirtschaft Bundesministerium Land-und Forstwirtschaft. Gesamtgewässernetz - basiseinzugsgebiete. 2020.
- [3] Regionen und Wasserwirtschaft Bundesministerium Land-und Forstwirtschaft. Gesamtgewässernetz - fließgewässer (routen). 2020.
- [4] Regionen und Wasserwirtschaft Bundesministerium Land-und Forstwirtschaft. ehyd webgis-applikation. 2024.
- [5] Juraj Parajka, Ralf Merz, Jon Skøien, and Alberto Viglione. The role of station density for predicting daily runoff by topkriging interpolation in austria. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63, 09 2015.
- [6] Regionen und Tourismus Umweltbundesamt GmbH, BM für Landwirtschaft. Nationalparks. 2023.
- [7] Synergis Open Data und Projektionen für Österreich. Bundesländergrenzen. 2023.

# Minimal nutzbares Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer November 2020

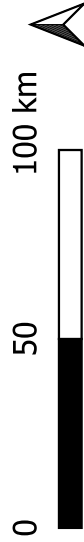
Die Wärmepotenzialkarte zeigt Eignungsgebiete für flusswassergespeiste Wärmepumpen. Die ausgewählten Standorte weisen sowohl eine hohe Bevölkerungsdichte auf und könnten auch von der in dieser Arbeit minimalst nutzbaren Wärmeleistung, welche im November 2020 auftritt, profitieren. Lediglich bei Wien kommt es zu einer Überschneidung mit Nationalparks, weshalb hier aus Naturschutzgründen auf die Abstände zum jeweiligen Standort geachtet werden muss.

Berechnet wurde das Wärmepotenzial aus  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$  ( $Q$  steht für die Wärmemenge,  $m$  für die Masse des Flusswassers,  $c$  für die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $\Delta T$  für die Temperaturänderung in Grad Celsius, in diesem Fall 3°C, da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpen entzogen wird). Um eine realistische Nutzungsabschätzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewässertemperaturen von mindestens 8°C gefiltert. Zudem wurde eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt.



## Legende

- Wärmepotenzial in MW
  - 0 - 1
  - 1.1 - 5
  - 5.1 - 10
  - 10.1 - 15
  - 15.1 - 25
- Eignungsstädte
- Nationalparks
- Landesgrenze



# Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer

## Januar 2020

Gezeigt wird das Wärmepotenzial der Fließgewässer in MW. Berechnet wurde es aus  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$  ( $Q$  steht für die Wärmemenge,  $m$  für die Masse des Flusswassers,  $c$  für die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $\Delta T$  für die Temperaturänderung in Grad Celsius, in diesem Fall 3°C, da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpe entzogen wird). Um eine realistische Nutzungsabschätzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewässertemperaturen von mindestens 8°C gefiltert. Zudem wurde eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt.

Bregenz

Innsbruck

Salzburg

Linz

St. Pölten

Wien

Eisenstadt

Graz

Klagenfurt am Wörthersee

### Legende

Wärmepotenzial in MW

- 0 - 1
- 1.1 - 5
- 5.1 - 10
- 10.1 - 15
- 15.1 - 25

Hauptstädte

Landesgrenze

0 50 100 km

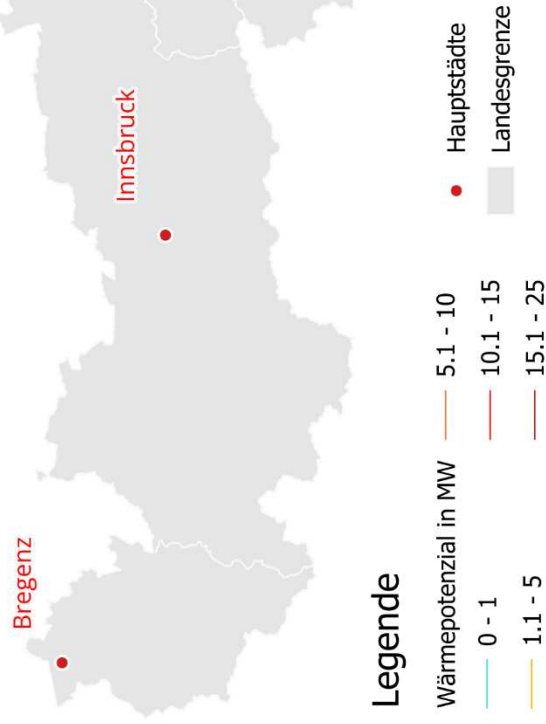




# Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer

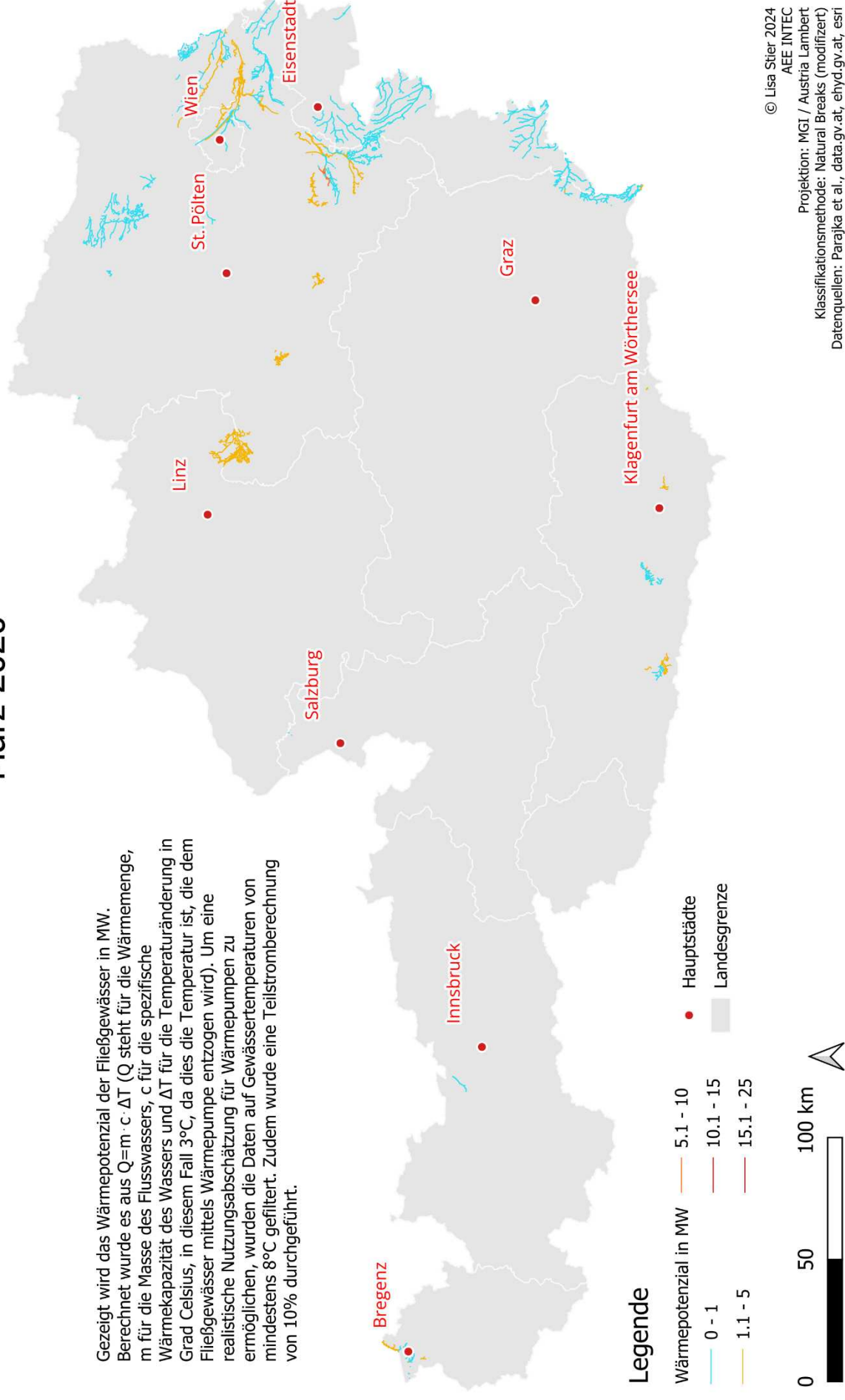
## Februar 2020

Gezeigt wird das Wärmepotenzial der Fließgewässer in MW. Berechnet wurde es aus  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$  ( $Q$  steht für die Wärmemenge,  $m$  für die Masse des Flusswassers,  $c$  für die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $\Delta T$  für die Temperaturänderung in Grad Celsius, in diesem Fall 3°C, da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpe entzogen wird). Um eine realistische Nutzungsabschätzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewässertemperaturen von mindestens 8°C gefiltert. Zudem wurde eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt.



# Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer März 2020

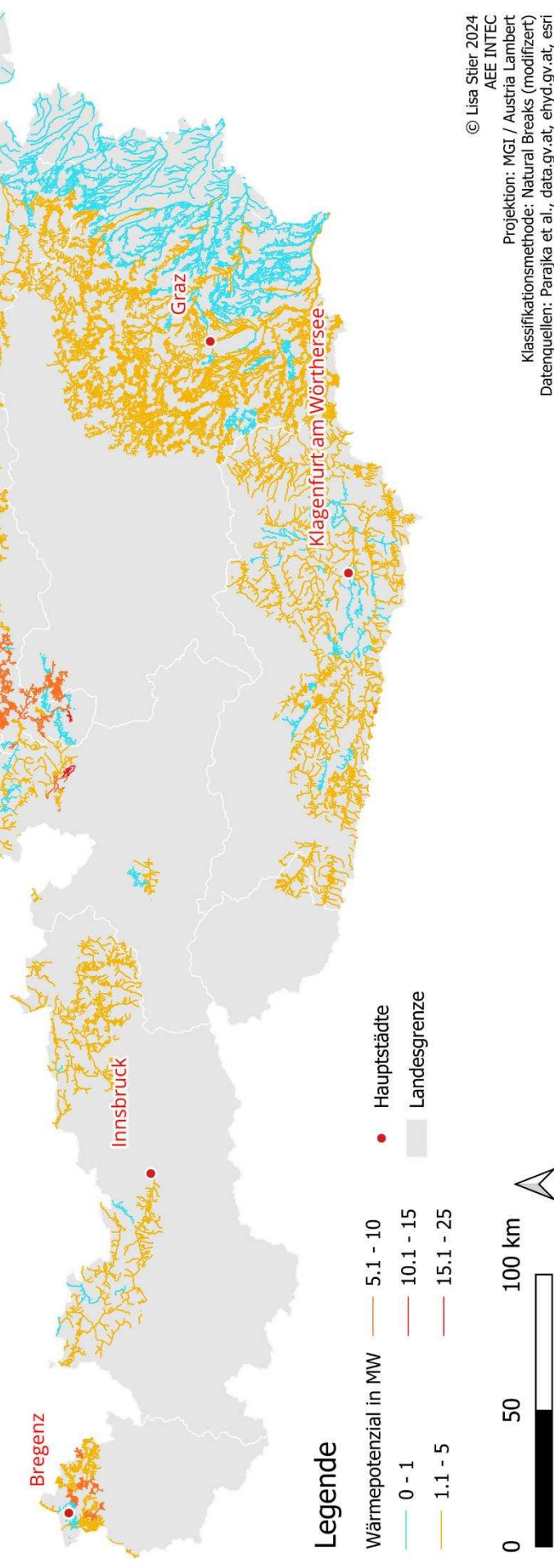
Gezeigt wird das Wärmepotenzial der Fließgewässer in MW. Berechnet wurde es aus  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$  (Q steht für die Wärmemenge, m für die Masse des Flusswassers, c für die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $\Delta T$  für die Temperaturänderung in Grad Celsius, in diesem Fall 3°C, da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpe entzogen wird). Um eine realistische Nutzungsabschätzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewässertemperaturen von mindestens 8°C gefiltert. Zudem wurde eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt.



# Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer

## April 2020

Gezeigt wird das Wärmepotenzial der Fließgewässer in MW. Berechnet wurde es aus  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$  (Q steht für die Wärmemenge, m für die Masse des Flusswassers, c für die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $\Delta T$  für die Temperaturänderung in Grad Celsius, in diesem Fall 3°C, da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpe entzogen wird). Um eine realistische Nutzungsabschätzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewässertemperaturen von mindestens 8°C gefiltert. Zudem wurde eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt.

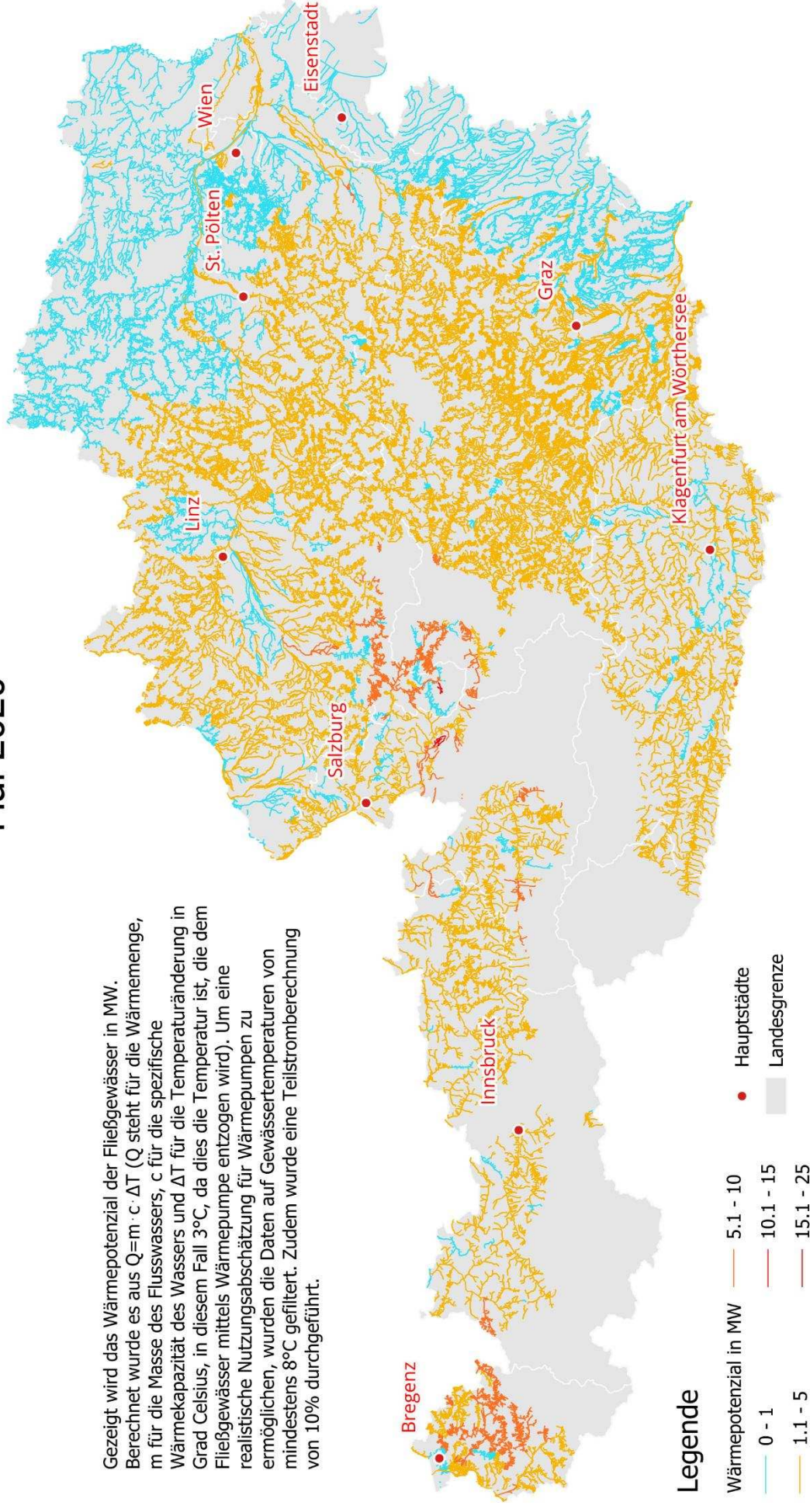




# Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer

Mai 2020

Gezeigt wird das Wärmepotenzial der Fließgewässer in MW. Berechnet wurde es aus  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$  (Q steht für die Wärmemenge, m für die Masse des Flusswassers, c für die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $\Delta T$  für die Temperaturänderung in Grad Celsius, in diesem Fall 3°C, da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpe entzogen wird). Um eine realistische Nutzungsabschätzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewässertemperaturen von mindestens 8°C gefiltert. Zudem wurde eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt.

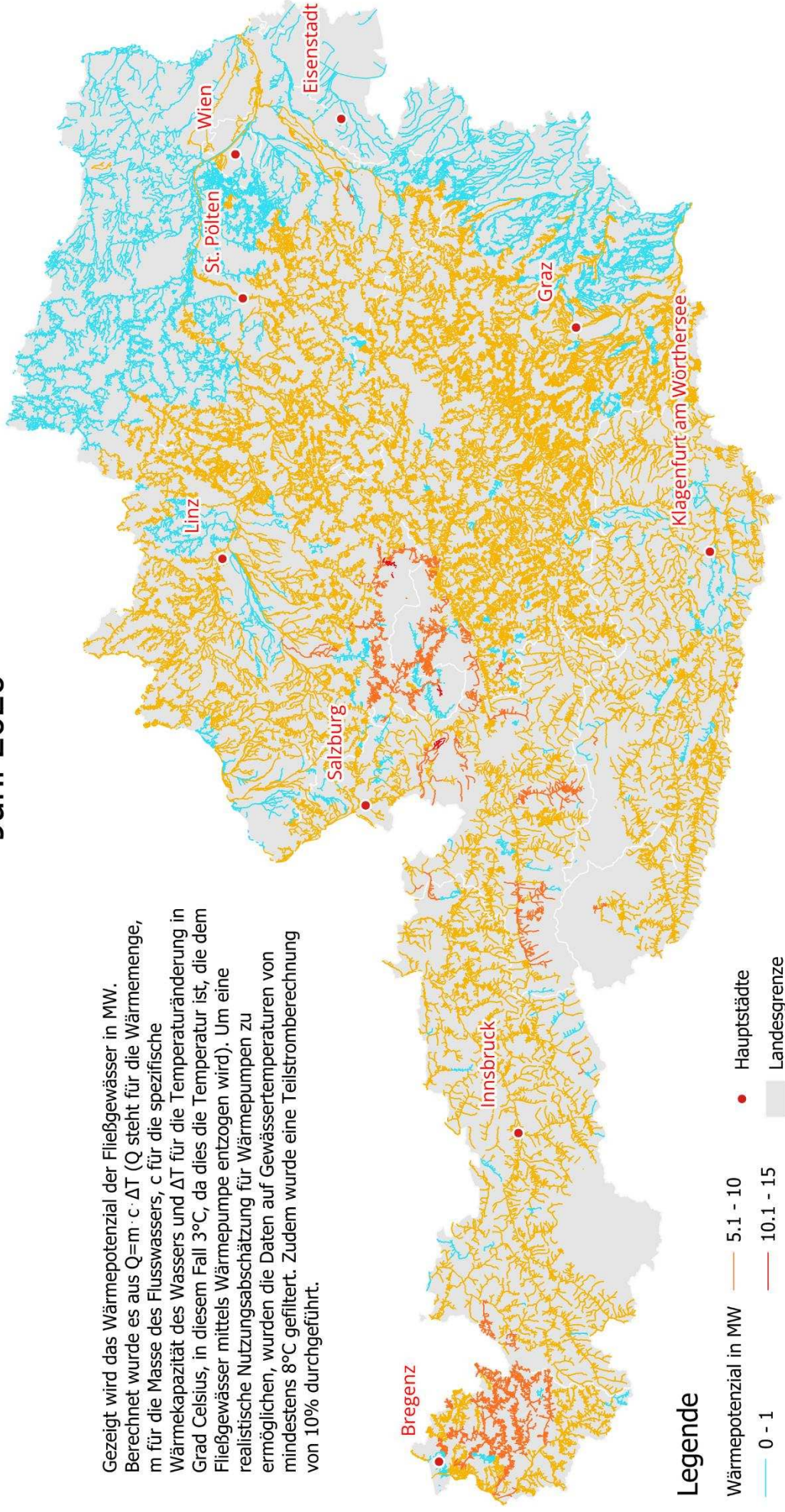




# Wärmpotenzial österreichischer Fließgewässer

## Juni 2020

Gezeigt wird das Wärmpotenzial der Fließgewässer in MW. Berechnet wurde es aus  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$  ( $Q$  steht für die Wärmemenge,  $m$  für die Masse des Flusswassers,  $c$  für die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $\Delta T$  für die Temperaturänderung in Grad Celsius, in diesem Fall 3°C, da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpe entzogen wird). Um eine realistische Nutzungsabschätzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewässertemperaturen von mindestens 8°C gefiltert. Zudem wurde eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt.



### Legende

Wärmpotenzial in MW

- 0 - 1
- 1.1 - 5
- 5.1 - 10
- 10.1 - 15
- 15.1 - 25

Hauptstädte

Landesgrenze

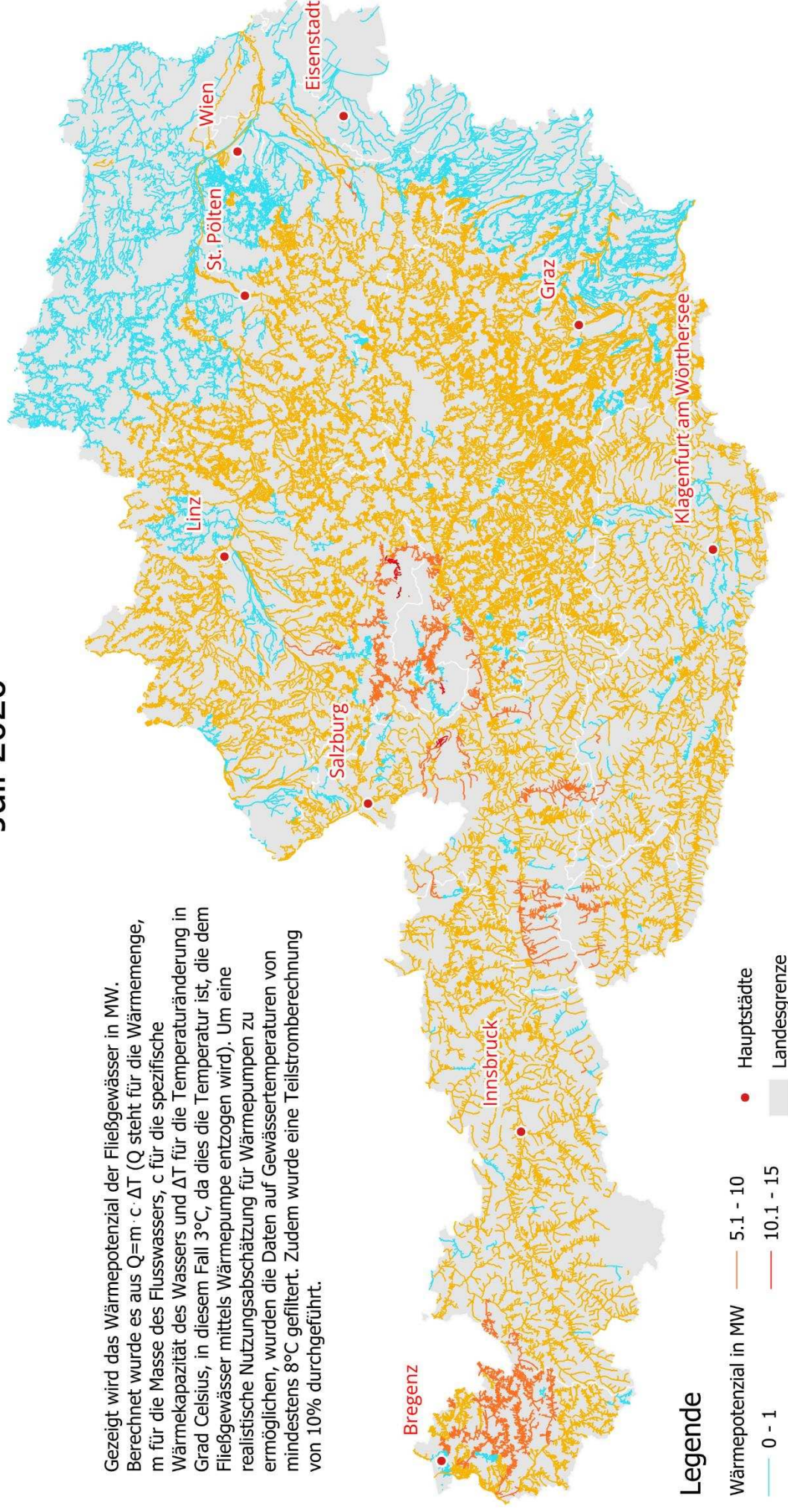
0 50 100 km



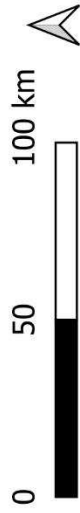
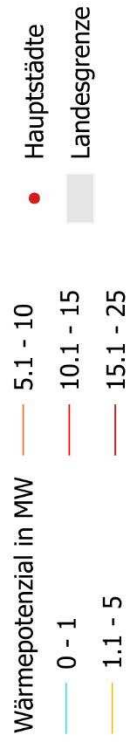
# Wärmpotenzial österreichischer Fließgewässer

## Juli 2020

Gezeigt wird das Wärmpotenzial der Fließgewässer in MW. Berechnet wurde es aus  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$  (Q steht für die Wärmemenge, m für die Masse des Flusswassers, c für die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $\Delta T$  für die Temperaturänderung in Grad Celsius, in diesem Fall 3°C, da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpe entzogen wird). Um eine realistische Nutzungsabschätzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewässertemperaturen von mindestens 8°C gefiltert. Zudem wurde eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt.



### Legende

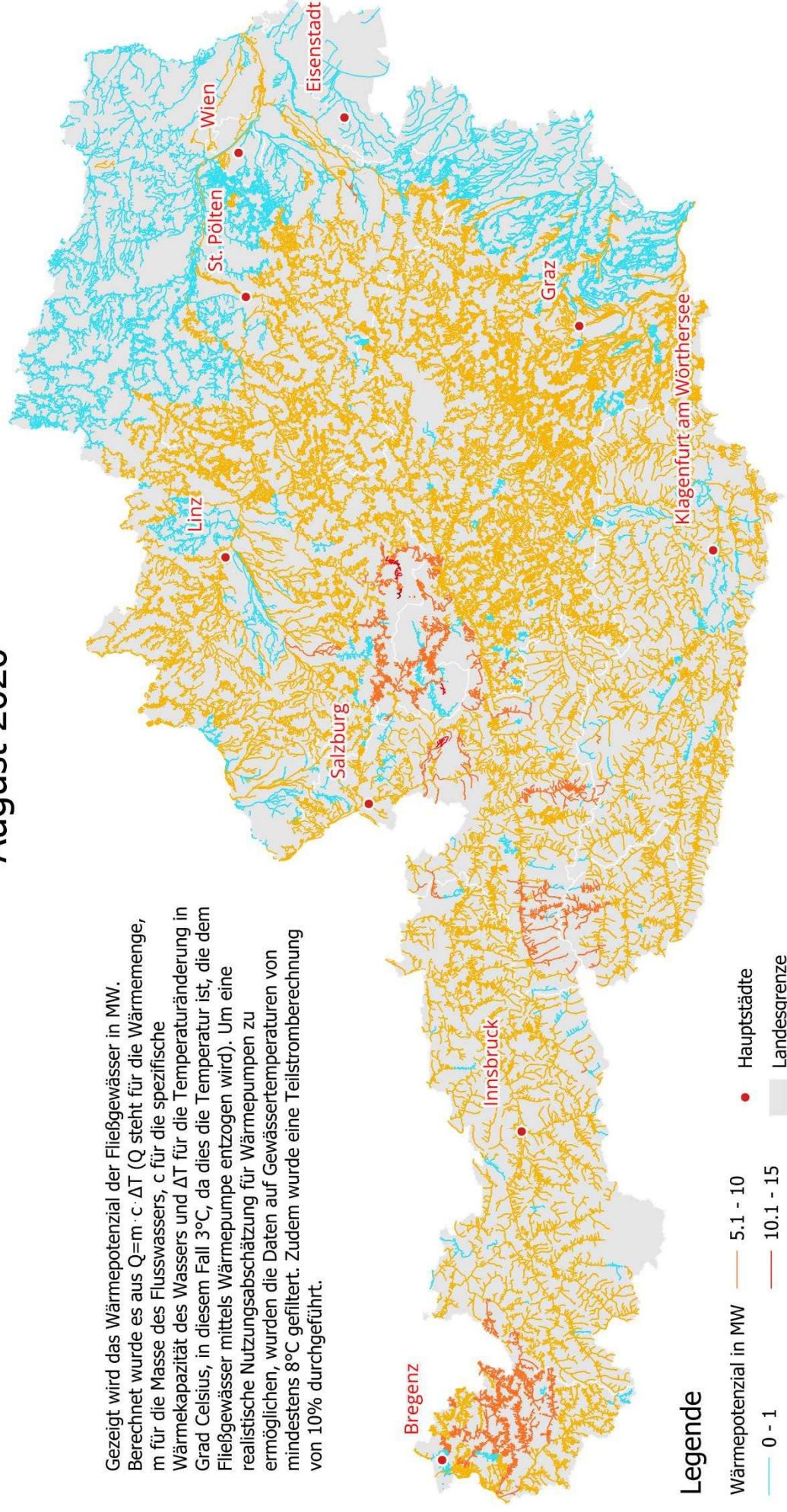




# Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer

## August 2020

Gezeigt wird das Wärmepotenzial der Fließgewässer in MW. Berechnet wurde es aus  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$  ( $Q$  steht für die Wärmemenge,  $m$  für die Masse des Flusswassers,  $c$  für die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $\Delta T$  für die Temperaturänderung in Grad Celsius, in diesem Fall 3°C, da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpe entzogen wird). Um eine realistische Nutzungsabschätzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewässertemperaturen von mindestens 8°C gefiltert. Zudem wurde eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt.



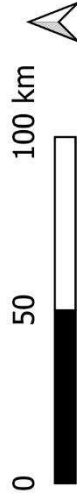
### Legende

Wärmepotenzial in MW

- 0 - 1
- 1.1 - 5
- 5.1 - 10
- 10.1 - 15
- 15.1 - 25

Hauptstädte

Landesgrenze

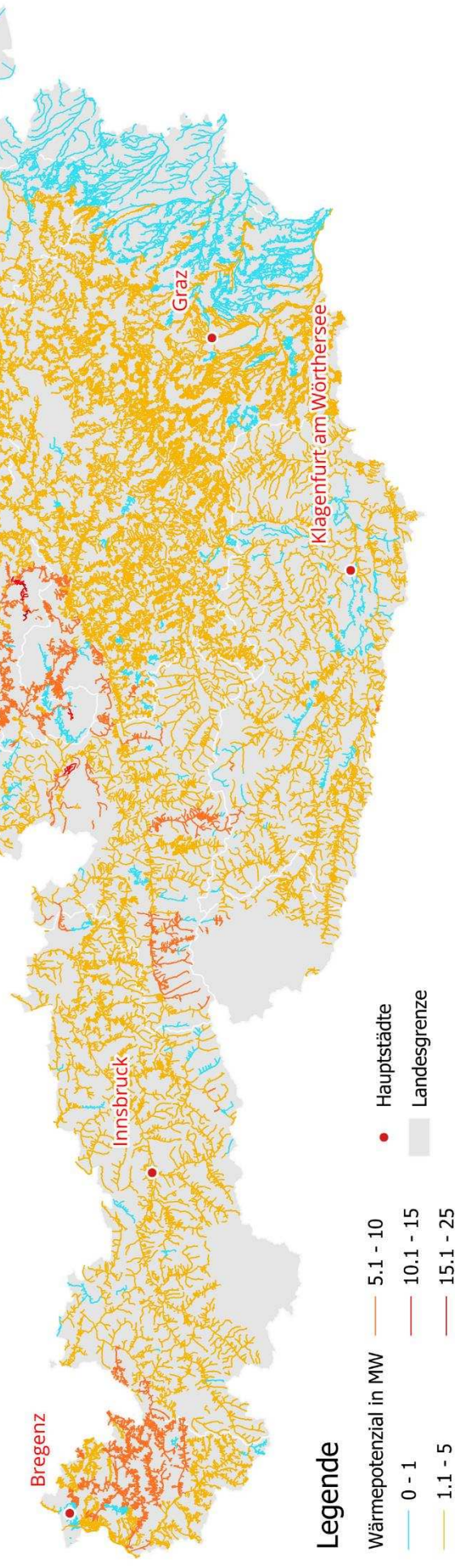




# Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer

## September 2020

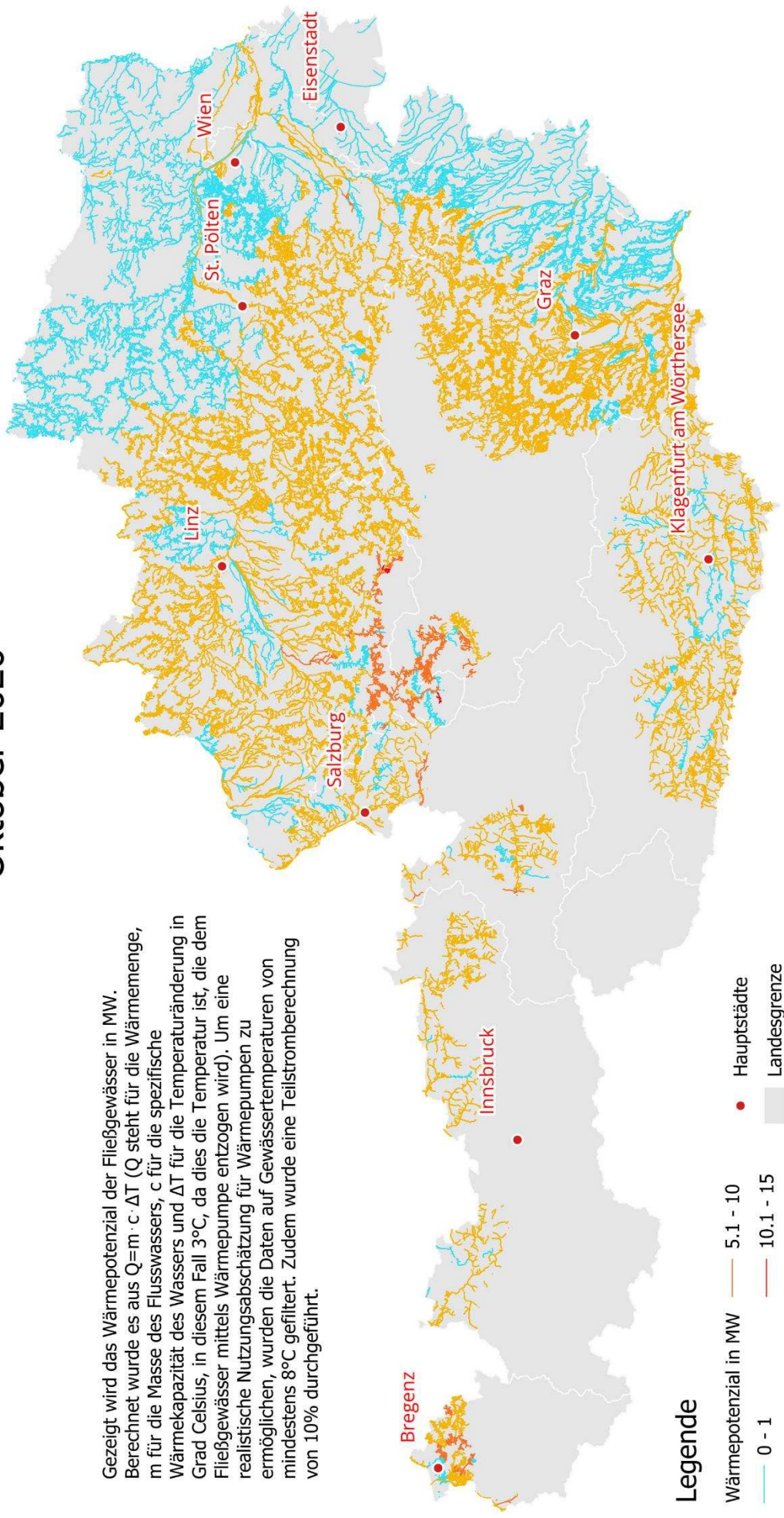
Gezeigt wird das Wärmepotenzial der Fließgewässer in MW. Berechnet wurde es aus  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$  (Q steht für die Wärmemenge, m für die Masse des Flusswassers, c für die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $\Delta T$  für die Temperaturänderung in Grad Celsius, in diesem Fall 3°C, da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpe entzogen wird). Um eine realistische Nutzungsabschätzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewassertemperaturen von mindestens 8°C gefiltert. Zudem wurde eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt.





# Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer Oktober 2020

Gezeigt wird das Wärmepotenzial der Fließgewässer in MW. Berechnet wurde es aus  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$  (Q steht für die Wärmemenge, m für die Masse des Flusswassers, c für die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $\Delta T$  für die Temperaturänderung in Grad Celsius, in diesem Fall 3°C, da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpe entzogen wird). Um eine realistische Nutzungsabschätzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewässertemperaturen von mindestens 8°C gefiltert. Zudem wurde eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt.



## Legende

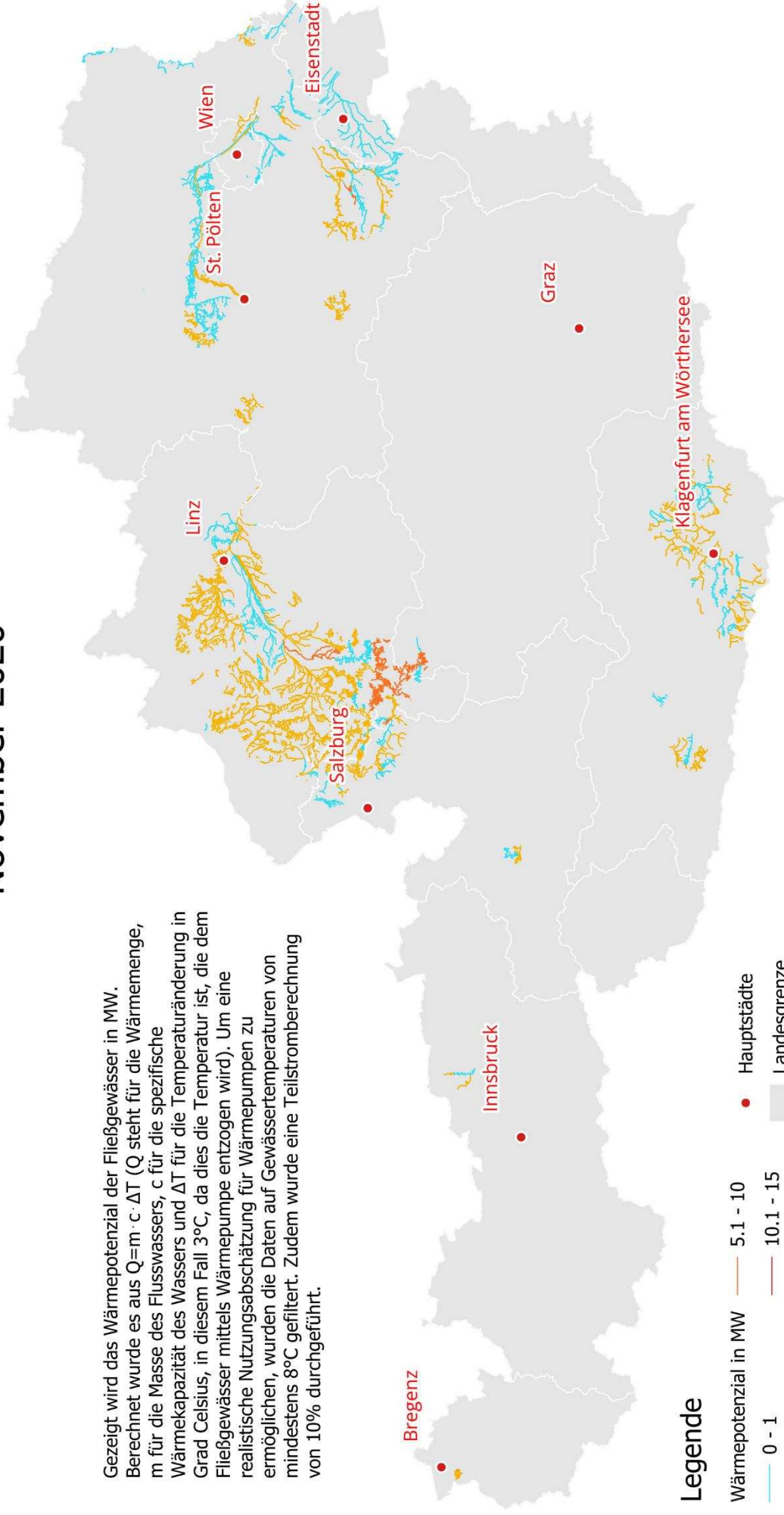
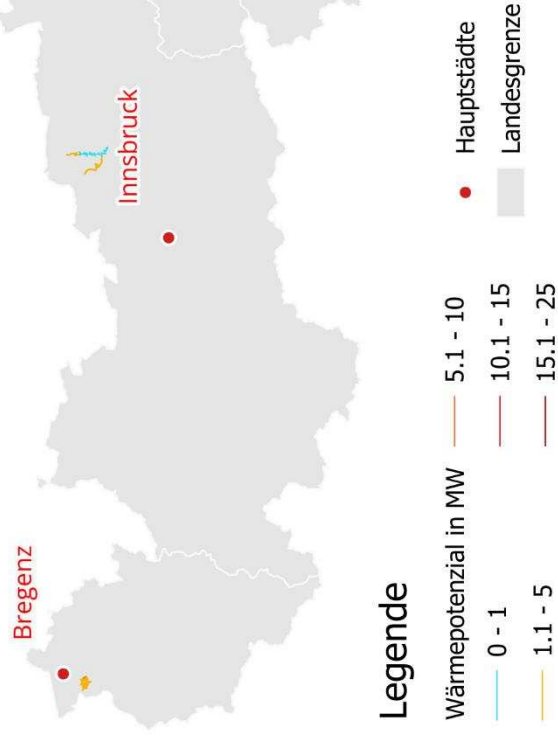
- Wärmepotenzial in MW
- 0 - 1
  - 1.1 - 5
  - 5.1 - 10
  - 10.1 - 15
  - 15.1 - 25
- Hauptstädte
- Landesgrenze



# Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer

## November 2020

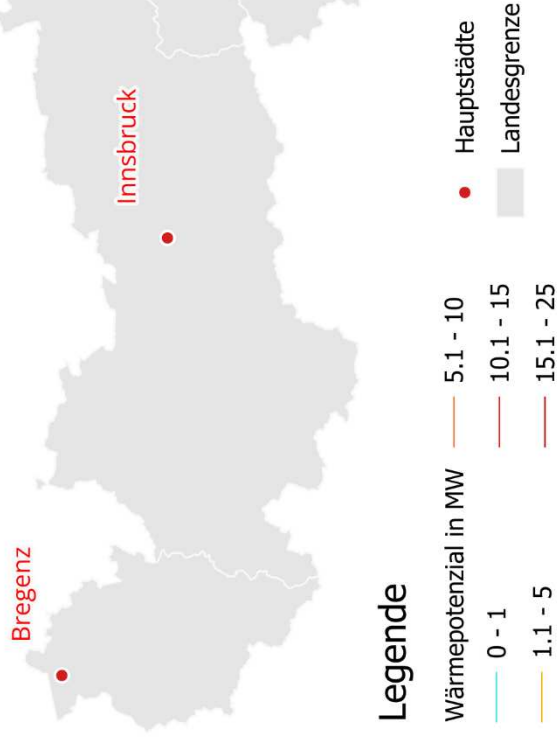
Gezeigt wird das Wärmepotenzial der Fließgewässer in MW. Berechnet wurde es aus  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$  ( $Q$  steht für die Wärmemenge,  $m$  für die Masse des Flusswassers,  $c$  für die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $\Delta T$  für die Temperaturänderung in Grad Celsius, in diesem Fall 3°C, da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpe entzogen wird). Um eine realistische Nutzungsabschätzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewassertemperaturen von mindestens 8°C gefiltert. Zudem wurde eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt.



# Wärmepotenzial österreichischer Fließgewässer

## Dezember 2020

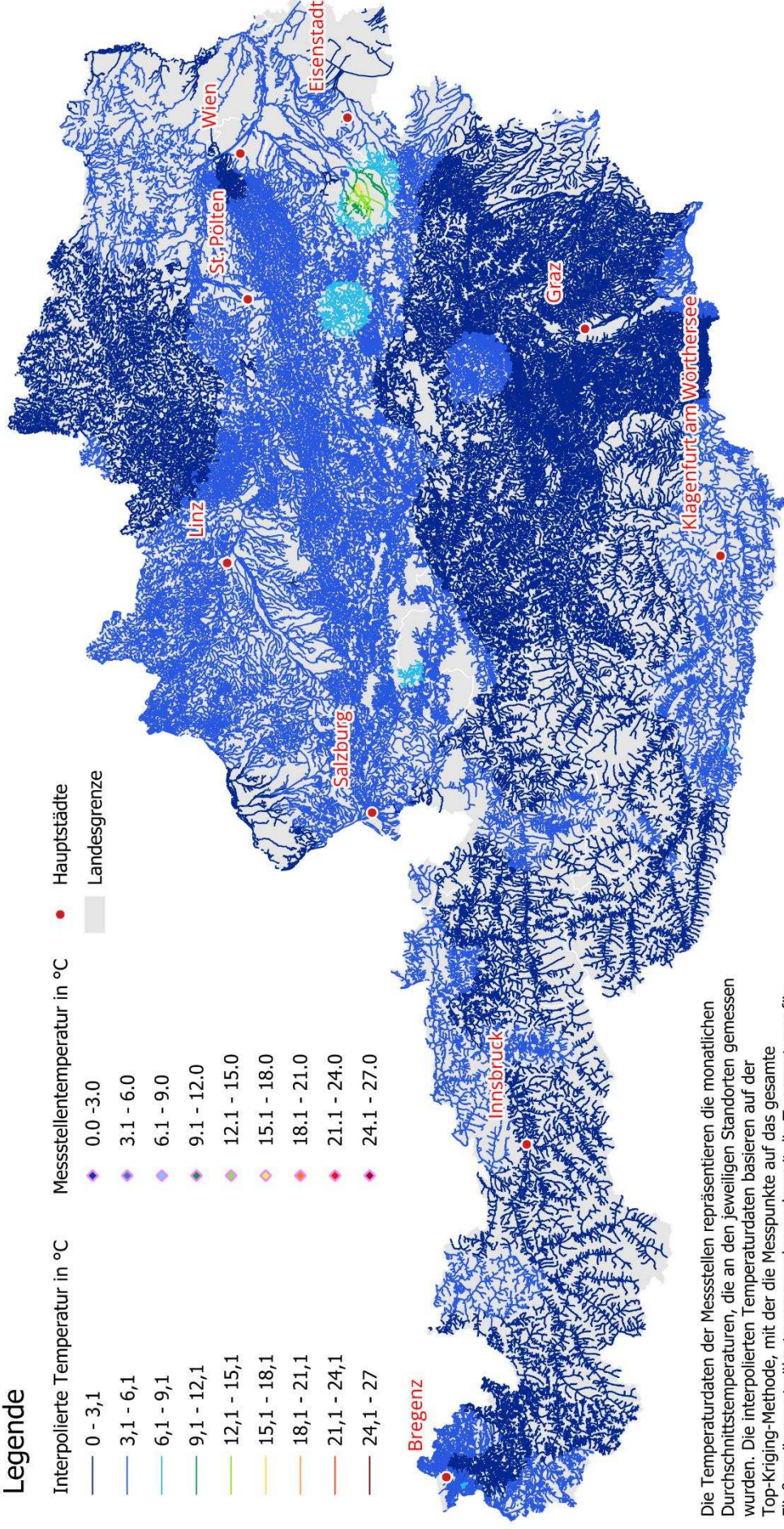
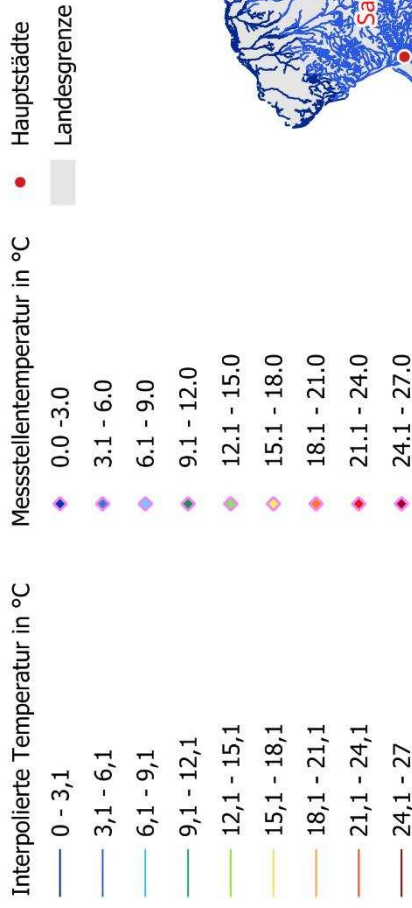
Gezeigt wird das Wärmepotenzial der Fließgewässer in MW. Berechnet wurde es aus  $Q = m \cdot c \cdot \Delta T$  ( $Q$  steht für die Wärmemenge,  $m$  für die Masse des Flusswassers,  $c$  für die spezifische Wärmekapazität des Wassers und  $\Delta T$  für die Temperaturänderung in Grad Celsius, in diesem Fall 3°C, da dies die Temperatur ist, die dem Fließgewässer mittels Wärmepumpe entzogen wird). Um eine realistische Nutzungsabschätzung für Wärmepumpen zu ermöglichen, wurden die Daten auf Gewassertemperaturen von mindestens 8°C gefiltert. Zudem wurde eine Teilstromberechnung von 10% durchgeführt.





# Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Januar 2020

## Legende



Die Temperaturdaten der Messstellen repräsentieren die monatlichen Durchschnittstemperaturen, die an den jeweiligen Standorten gemessen wurden. Die interpolierten Temperaturdaten basieren auf der Top-Kriging-Methode, mit der die Messpunkte auf das gesamte Fließgewässernetz übertragen wurden und somit die Temperaturen für alle Abschnitte des Gewässernetzes berechnet wurden.

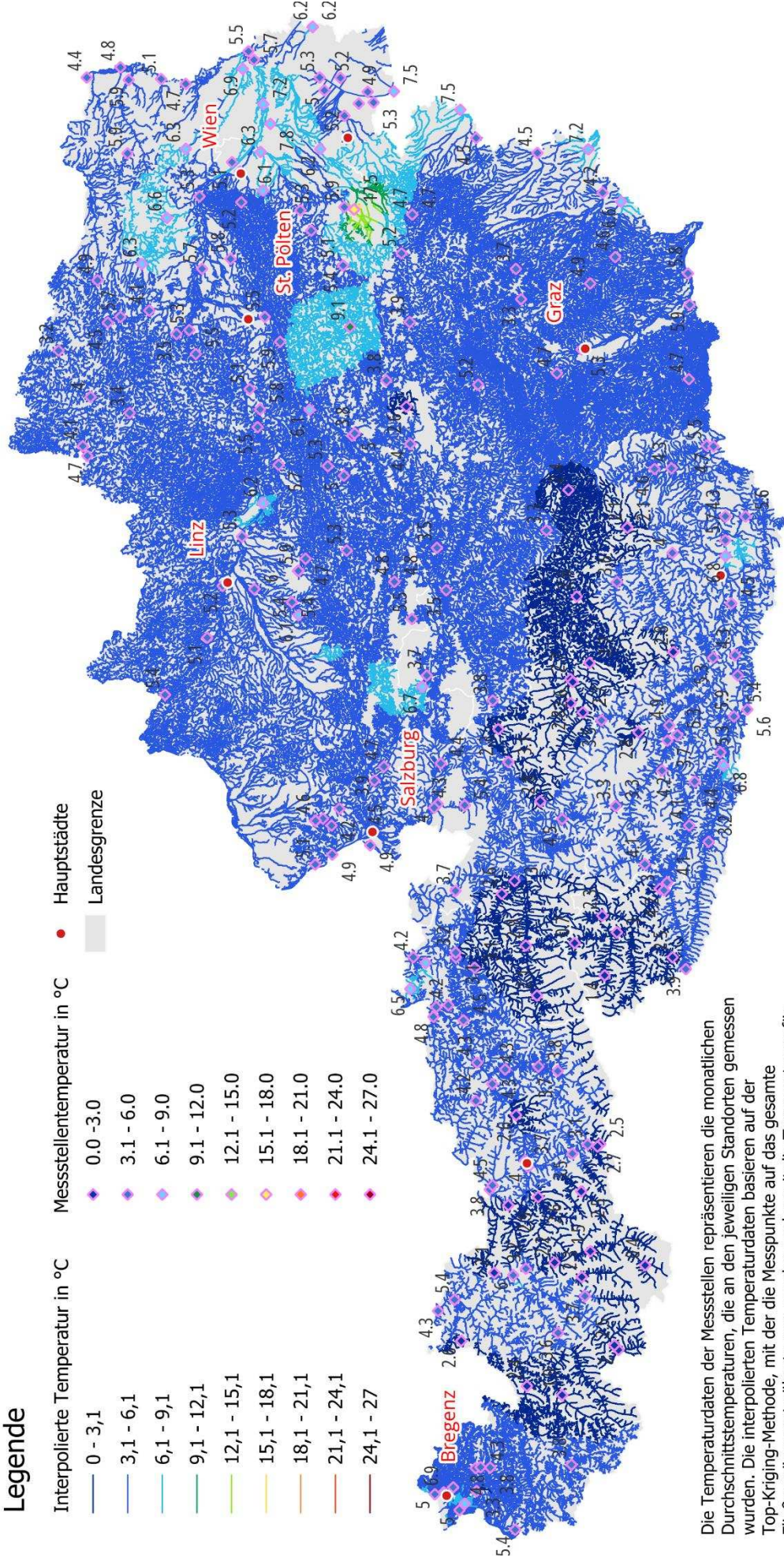
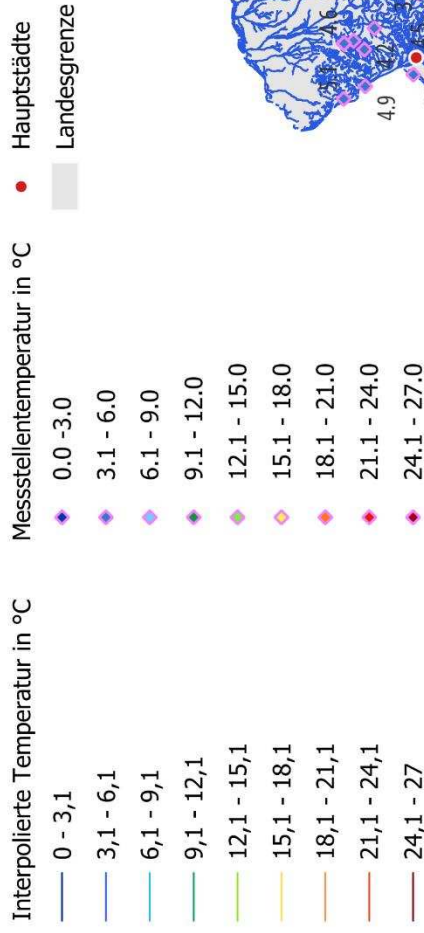




# Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer

## Februar 2020

### Legende



Die Temperaturdaten der Messstellen repräsentieren die monatlichen Durchschnittstemperaturen, die an den jeweiligen Standorten gemessen wurden. Die interpolierten Temperaturdaten basieren auf der Top-Kriging-Methode, mit der die Messpunkte auf das gesamte Fließgewässernetz übertragen wurden und somit die Temperaturen für alle Abschnitte des Gewässernetzes berechnet wurden.





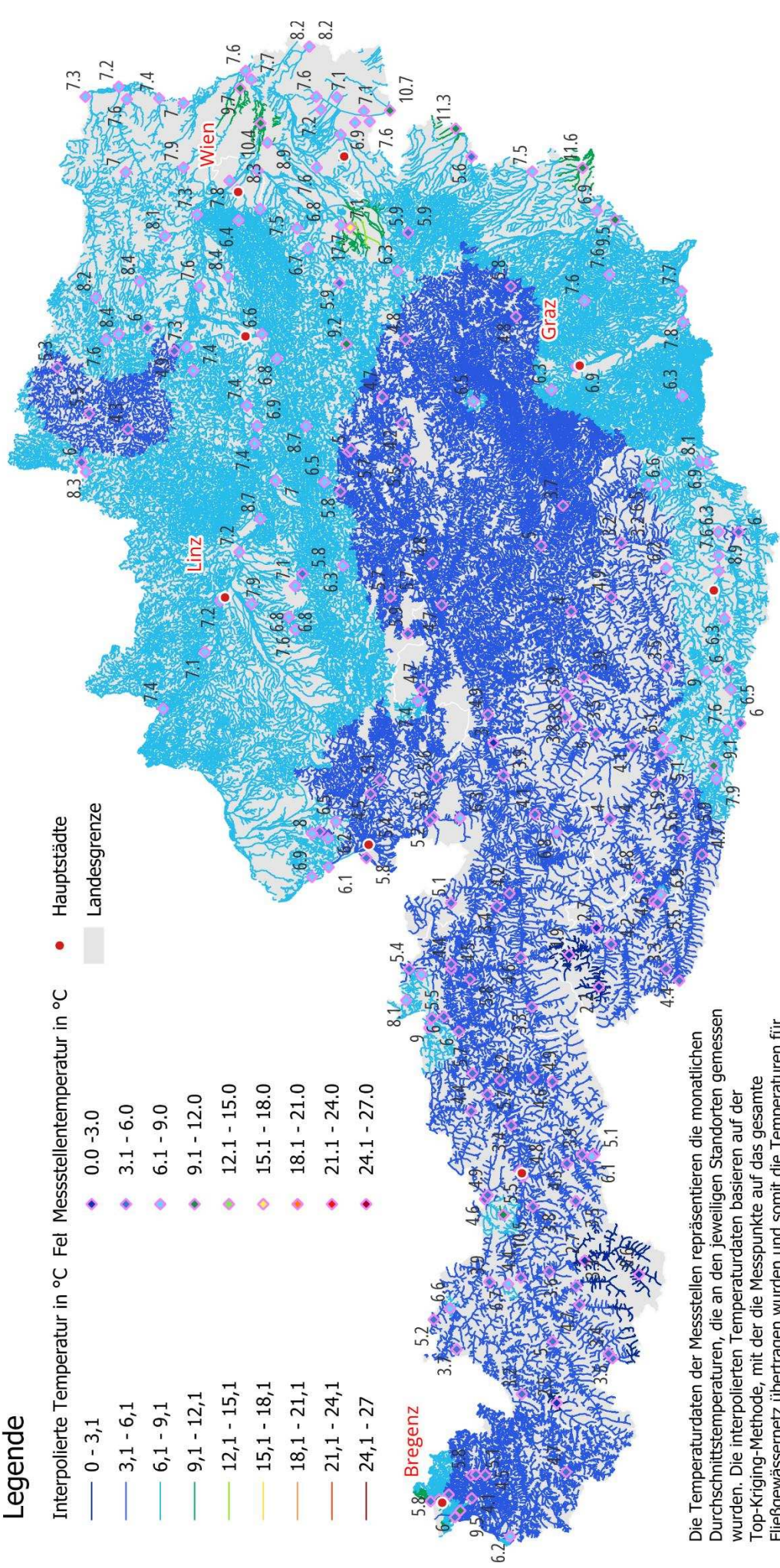
# Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer März 2020

## Legende

Interpolierte Temperatur in °C    Fel    Messstellentemperatur in °C    •    Hauptstädte

— 0 - 3,1    — 3,1 - 6,1    — 6,1 - 9,1    — 9,1 - 12,1    — 12,1 - 15,1    — 15,1 - 18,1    — 18,1 - 21,1    — 21,1 - 24,1    — 24,1 - 27

Landesgrenze



Die Temperaturdaten der Messstellen repräsentieren die monatlichen Durchschnittstemperaturen, die an den jeweiligen Standorten gemessen wurden. Die interpolierten Temperaturdaten basieren auf der Top-Kriging-Methode, mit der die Messpunkte auf das gesamte Fließgewässernetz übertragen wurden und somit die Temperaturen für alle Abschnitte des Gewässernetzes berechnet wurden.





# Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer April 2020

## Legende

Interpolierte Temperatur in °C Fel Messstellentemperatur in °C

• Hauptstädte

— 0 - 3,1

• 0.0 - 3.0

— 3,1 - 6,1

• 3.1 - 6.0

— 6,1 - 9,1

• 6.1 - 9.0

— 9,1 - 12,1

• 9.1 - 12.0

— 12,1 - 15,1

• 12.1 - 15.0

— 15,1 - 18,1

• 15.1 - 18.0

— 18,1 - 21,1

• 18.1 - 21.0

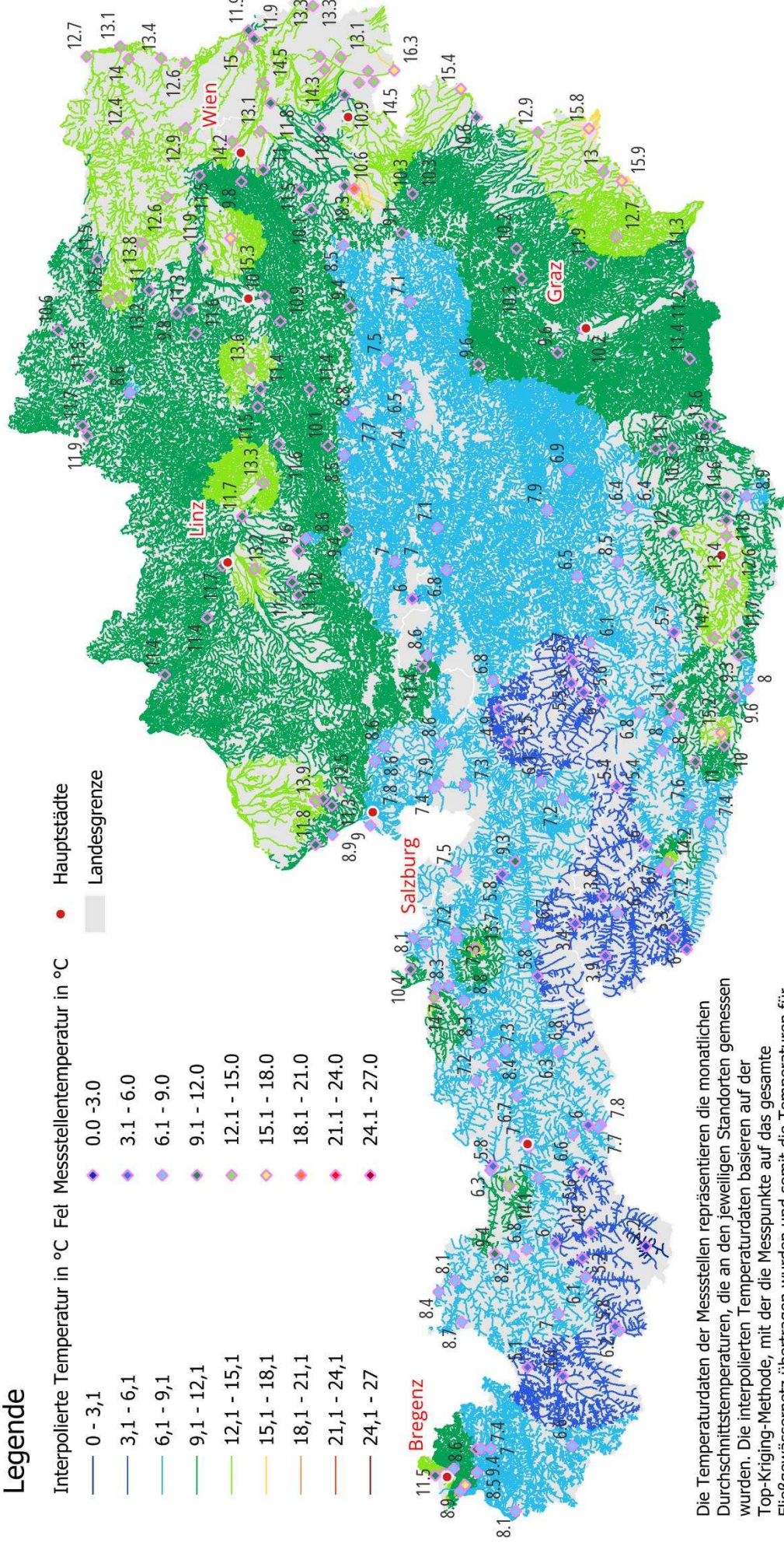
— 21,1 - 24,1

• 21.1 - 24.0

— 24,1 - 27

• 24.1 - 27.0

Landesgrenze



Die Temperaturdaten der Messstellen repräsentieren die monatlichen Durchschnittstemperaturen, die an den jeweiligen Standorten gemessen wurden. Die interpolierten Temperaturdaten basieren auf der Top-Kriging-Methode, mit der die Messpunkte auf das gesamte Fließgewässernetz übertragen wurden und somit die Temperaturen für alle Abschnitte des Gewässernetzes berechnet wurden.

0 50 100 km

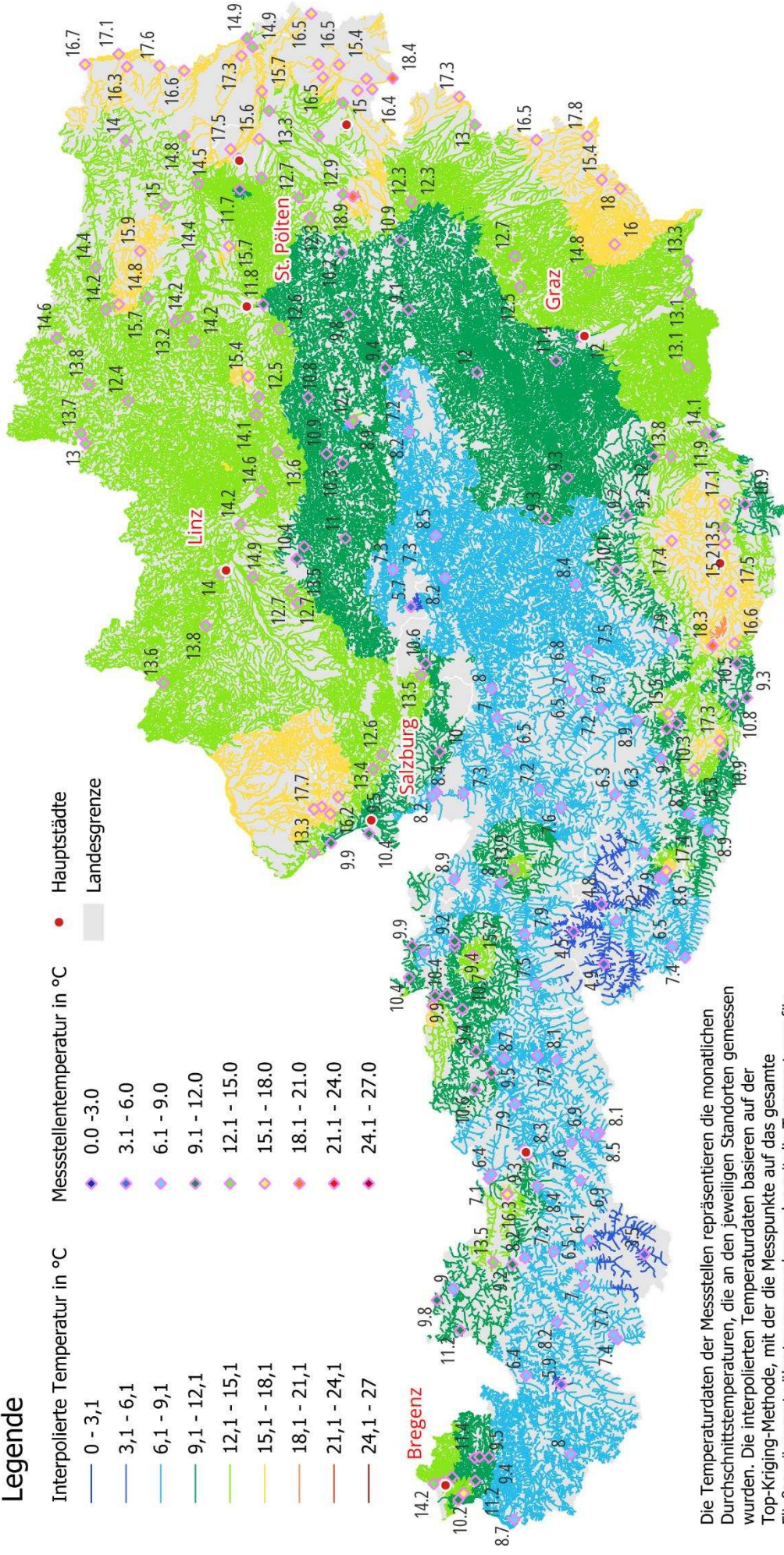




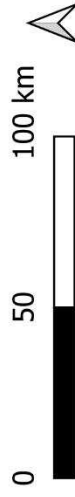
# Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Mai 2020

## Legende

Interpolierte Temperatur in °C	Messstellentemperatur in °C	Hauptstädte	Landesgrenze
— 0 - 3,1	◆ 0.0 - 3.0	●	■
— 3,1 - 6,1	◆ 3.1 - 6.0		
— 6,1 - 9,1	◆ 6.1 - 9.0		
— 9,1 - 12,1	◆ 9.1 - 12.0		
— 12,1 - 15,1	◆ 12.1 - 15.0		
— 15,1 - 18,1	◆ 15.1 - 18.0		
— 18,1 - 21,1	◆ 18.1 - 21.0		
— 21,1 - 24,1	◆ 21.1 - 24.0		
— 24,1 - 27	◆ 24.1 - 27.0		



Die Temperaturdaten der Messstellen repräsentieren die monatlichen Durchschnittstemperaturen, die an den jeweiligen Standorten gemessen wurden. Die interpolierten Temperaturdaten basieren auf der Top-Kriging-Methode, mit der die Messpunkte auf das gesamte Fließgewässernetz übertragen wurden und somit die Temperaturen für alle Abschnitte des Gewässernetzes berechnet wurden.





# Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer

Juni 2020

## Legende

Interpolierte Temperatur in °C

0 - 3,1

3,1 - 6,1

6,1 - 9,1

9,1 - 12,1

12,1 - 15,1

15,1 - 18,1

18,1 - 21,1

21,1 - 24,1

24,1 - 27

Messstellentemperatur in °C

0.0 - 3.0

3.1 - 6.0

6.1 - 9.0

9.1 - 12.0

12.1 - 15.0

15.1 - 18.0

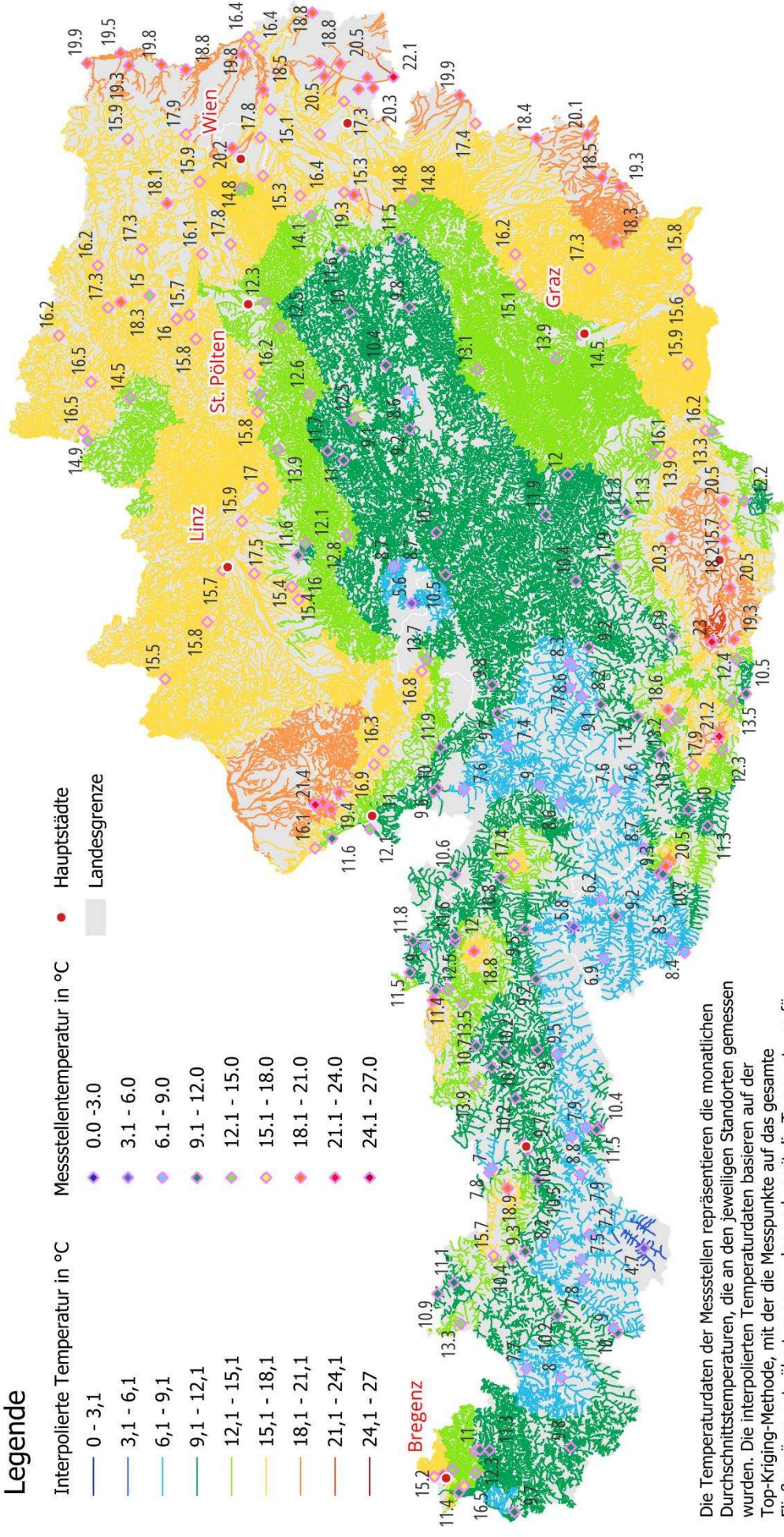
18.1 - 21.0

21.1 - 24.0

24.1 - 27.0

Hauptstädte

Landesgrenze



Die Temperaturdaten der Messstellen repräsentieren die monatlichen Durchschnittstemperaturen, die an den jeweiligen Standorten gemessen wurden. Die interpolierten Temperaturdaten basieren auf der Top-Kriging-Methode, mit der die Messpunkte auf das gesamte Fließgewässernetz übertragen wurden und somit die Temperaturen für alle Abschnitte des Gewässernetzes berechnet wurden.

0 50 100 km





# Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer

Juli 2020

## Legende

Interpolierte Temperatur in °C

0 - 3,1

3,1 - 6,1

6,1 - 9,1

9,1 - 12,1

12,1 - 15,1

15,1 - 18,1

18,1 - 21,1

21,1 - 24,1

24,1 - 27

Messstellentemperatur in °C

0.0 - 3.0

3.1 - 6.0

6.1 - 9.0

9.1 - 12.0

12.1 - 15.0

15.1 - 18.0

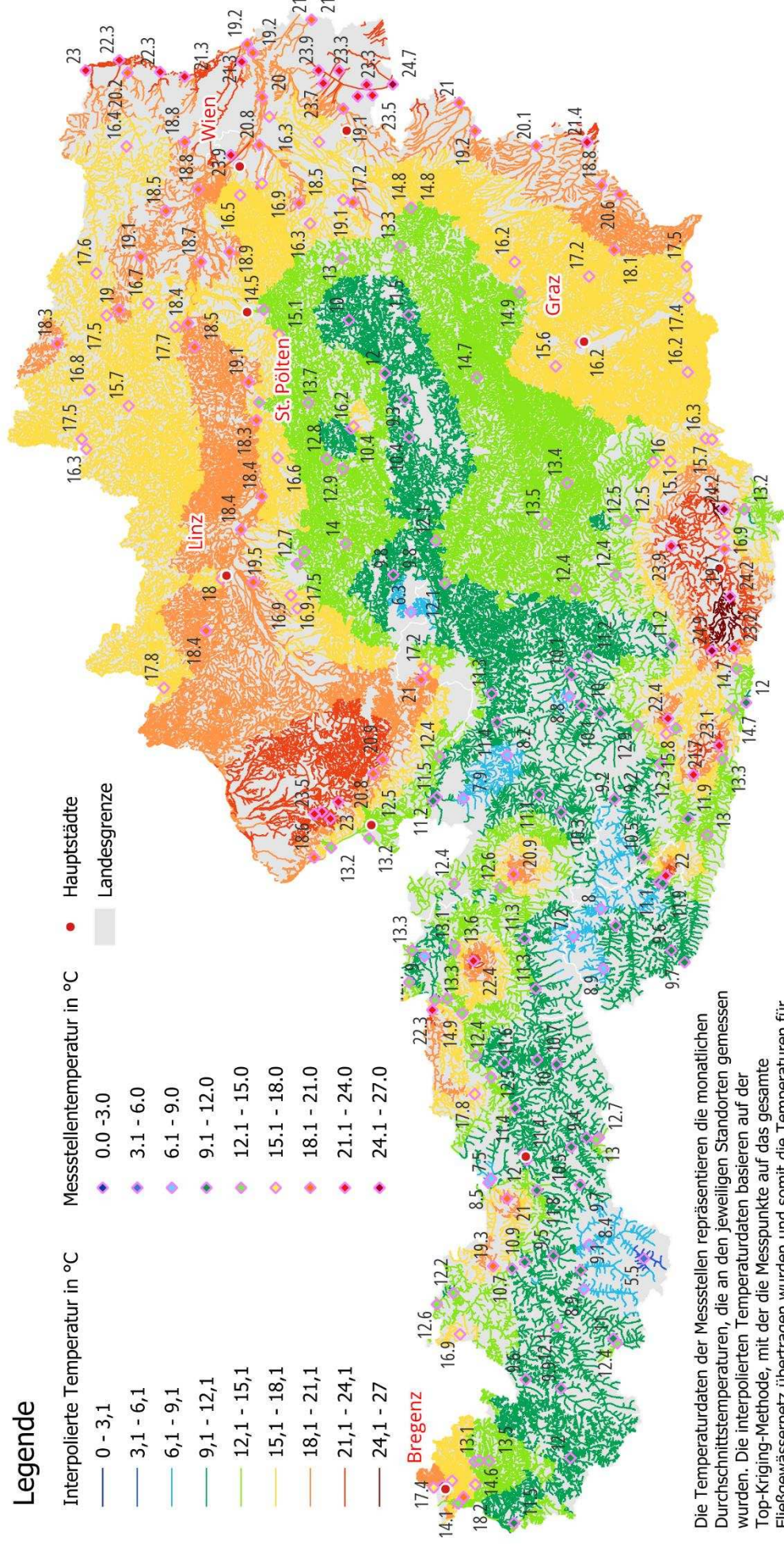
18.1 - 21.0

21.1 - 24.0

24.1 - 27.0

Hauptstädte

Landesgrenze



Die Temperaturdaten der Messstellen repräsentieren die monatlichen Durchschnittstemperaturen, die an den jeweiligen Standorten gemessen wurden. Die interpolierten Temperaturdaten basieren auf der Top-Kriging-Methode, mit der die Messpunkte auf das gesamte Fließgewässernetz übertragen wurden und somit die Temperaturen für alle Abschnitte des Gewässernetzes berechnet wurden.

0 50 100 km





# Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer

## August 2020

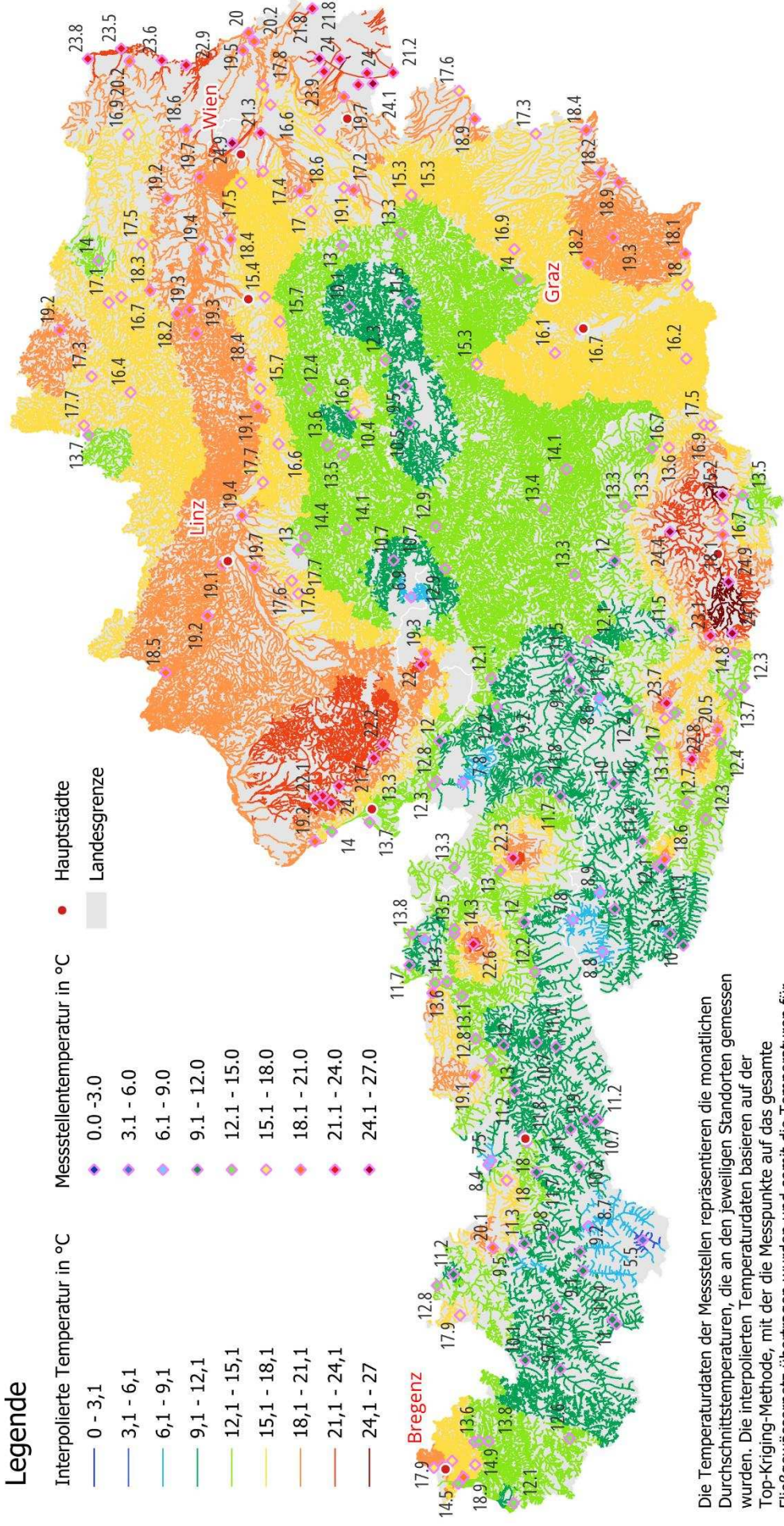
### Legende

Interpolierte Temperatur in °C	Messstellentemperatur in °C
0 - 3,1	0.0 - 3.0
3,1 - 6,1	3.1 - 6.0
6,1 - 9,1	6.1 - 9.0
9,1 - 12,1	9.1 - 12.0
12,1 - 15,1	12.1 - 15.0
15,1 - 18,1	15.1 - 18.0
18,1 - 21,1	18.1 - 21.0
21,1 - 24,1	21.1 - 24.0
24,1 - 27	24.1 - 27.0

Messstellentemperatur in °C

Landesgrenze

Hauptstädte



Die Temperaturdaten der Messstellen repräsentieren die monatlichen Durchschnittstemperaturen, die an den jeweiligen Standorten gemessen wurden. Die interpolierten Temperaturdaten basieren auf der Top-Kriging-Methode, mit der die Messpunkte auf das gesamte Fließgewässernetz übertragen wurden und somit die Temperaturen für alle Abschnitte des Gewässernetzes berechnet wurden.

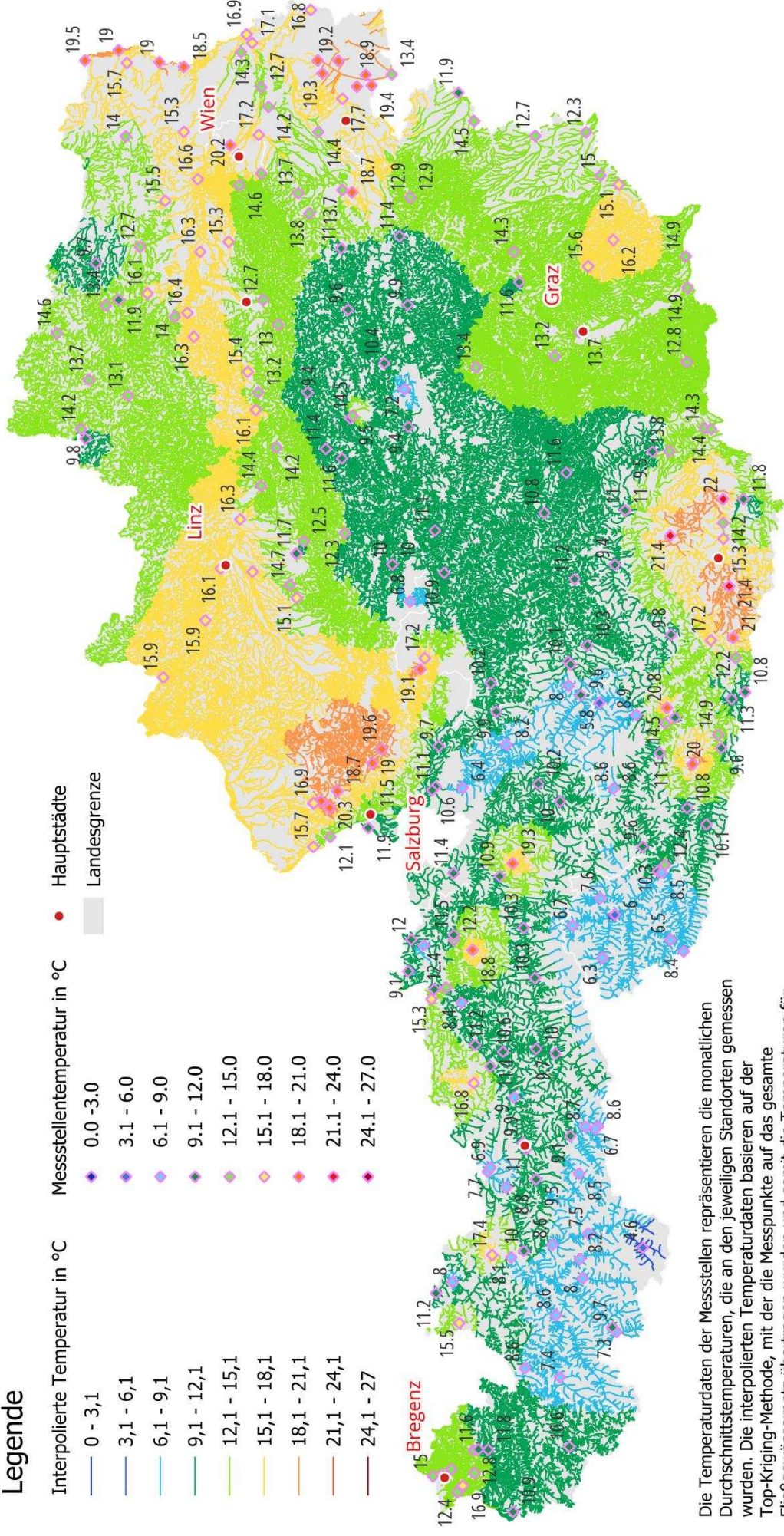
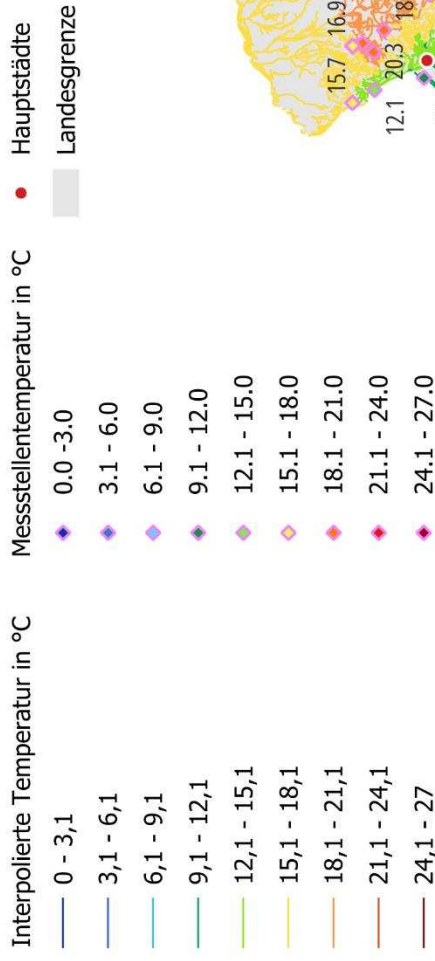
0 50 100 km





# Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer September 2020

## Legende



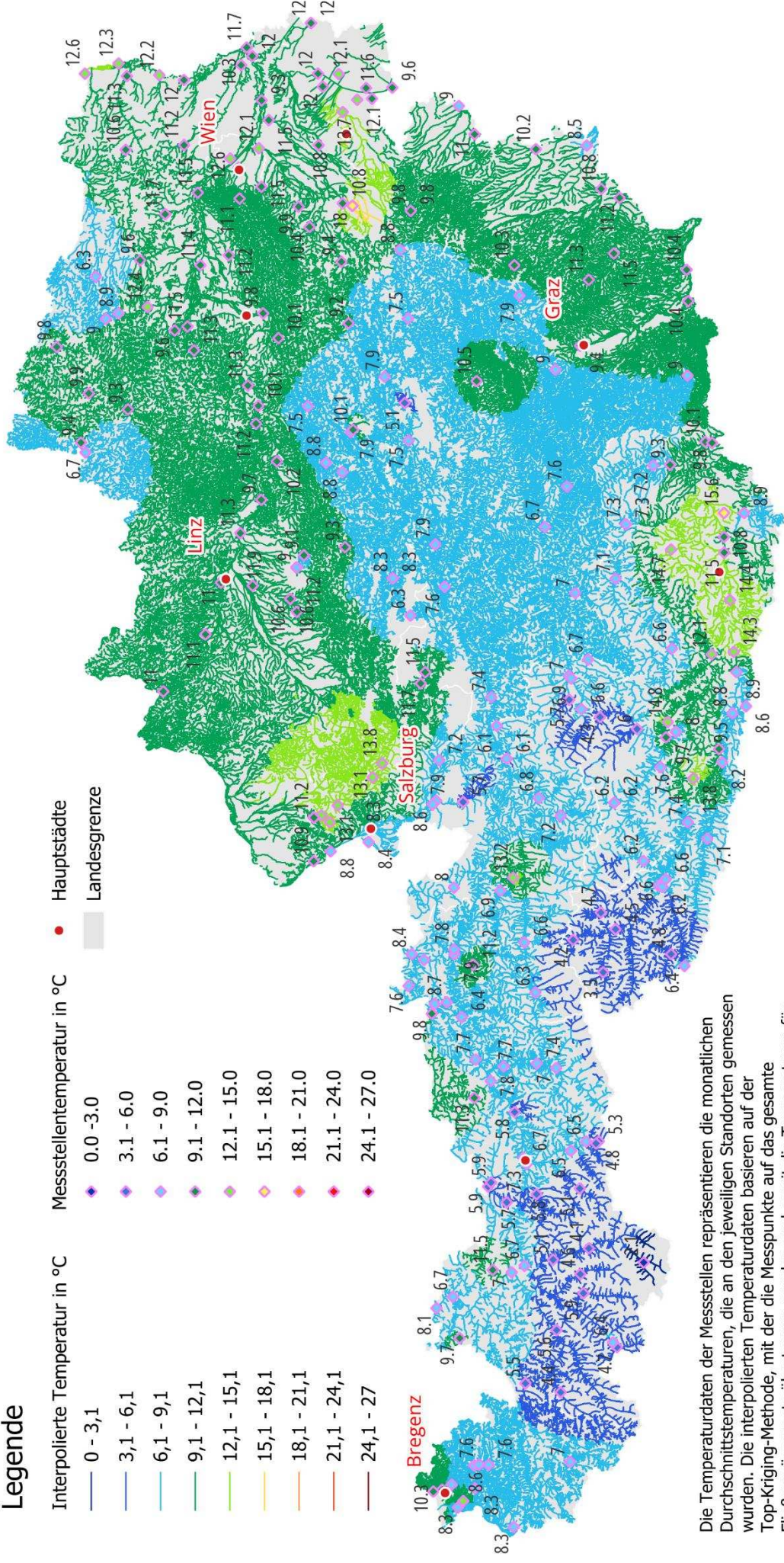
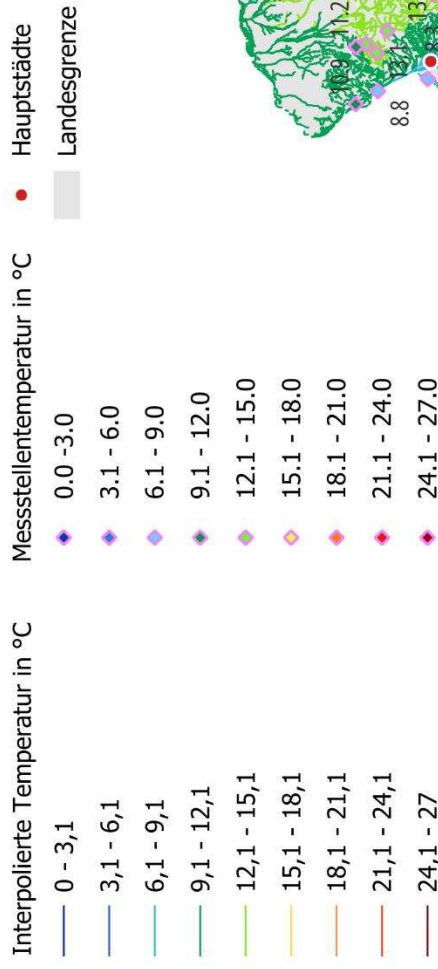
Die Temperaturdaten der Messstellen repräsentieren die monatlichen Durchschnittstemperaturen, die an den jeweiligen Standorten gemessen wurden. Die interpolierten Temperaturdaten basieren auf der Top-Kriging-Methode, mit der die Messpunkte auf das gesamte Fließgewässernetz übertragen wurden und somit die Temperaturen für alle Abschnitte des Gewässernetzes berechnet wurden.





# Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Oktober 2020

## Legende



Die Temperaturdaten der Messstellen repräsentieren die monatlichen Durchschnittstemperaturen, die an den jeweiligen Standorten gemessen wurden. Die interpolierten Temperaturdaten basieren auf der Top-Kriging-Methode, mit der die Messpunkte auf das gesamte Fließgewässernetz übertragen wurden und somit die Temperaturen für alle Abschnitte des Gewässernetzes berechnet wurden.





# Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer November 2020

## Legende

Interpolierte Temperatur in °C

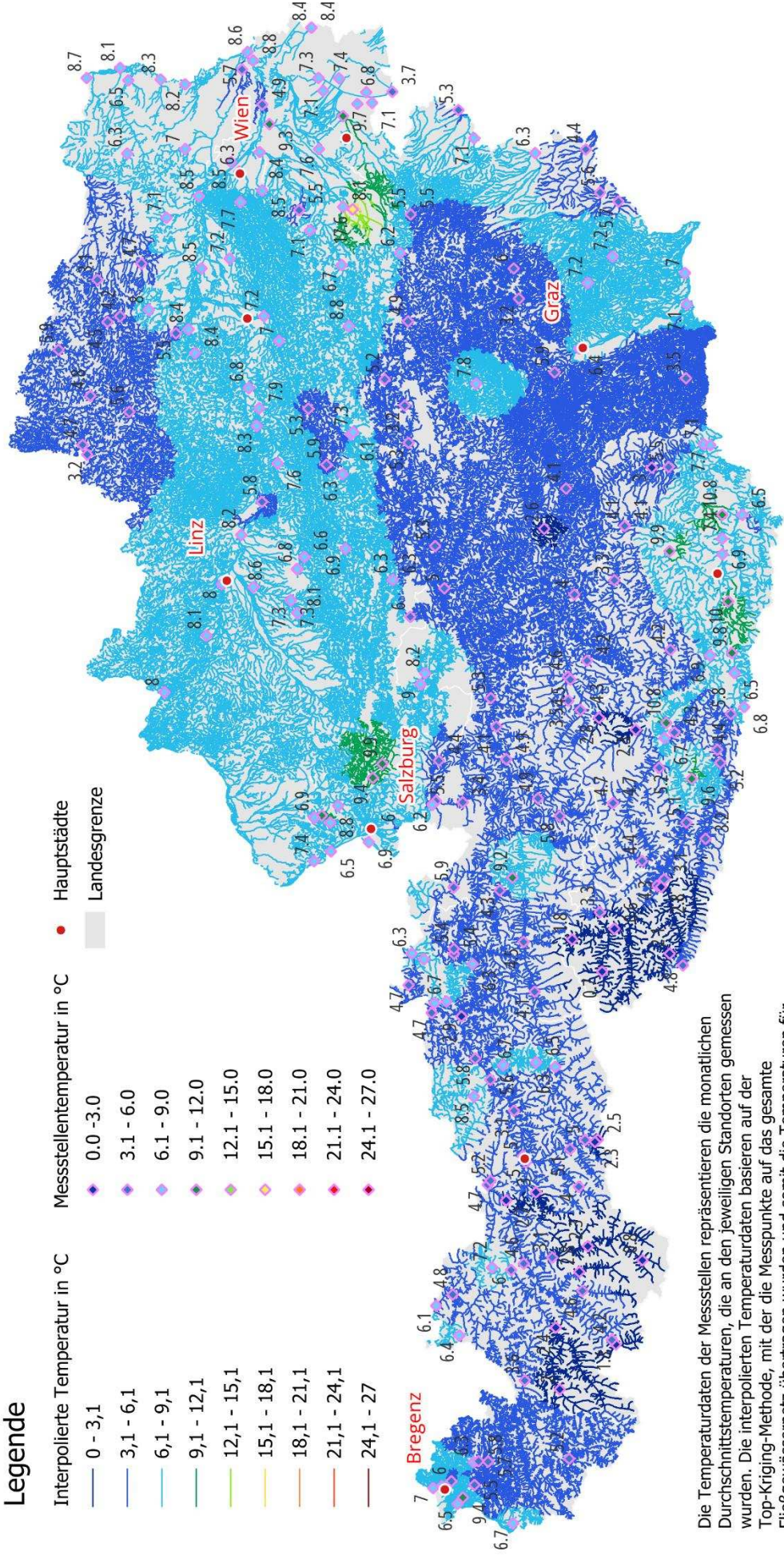
- 0 - 3,1
- 3,1 - 6,1
- 6,1 - 9,1
- 9,1 - 12,1
- 12,1 - 15,1
- 15,1 - 18,1
- 18,1 - 21,1
- 21,1 - 24,1
- 24,1 - 27

Messstellentemperatur in °C

- ◆ 0.0 - 3.0
- ◆ 3.1 - 6.0
- ◆ 6.1 - 9.0
- ◆ 9.1 - 12.0
- ◆ 12.1 - 15.0
- ◆ 15.1 - 18.0
- ◆ 18.1 - 21.0
- ◆ 21.1 - 24.0
- ◆ 24.1 - 27.0

Landesgrenze

- Hauptstädte



Die Temperaturdaten der Messstellen repräsentieren die monatlichen Durchschnittstemperaturen, die an den jeweiligen Standorten gemessen wurden. Die interpolierten Temperaturdaten basieren auf der Top-Kriging-Methode, mit der die Messpunkte auf das gesamte Fließgewässernetz übertragen wurden und somit die Temperaturen für alle Abschnitte des Gewässernetzes berechnet wurden.

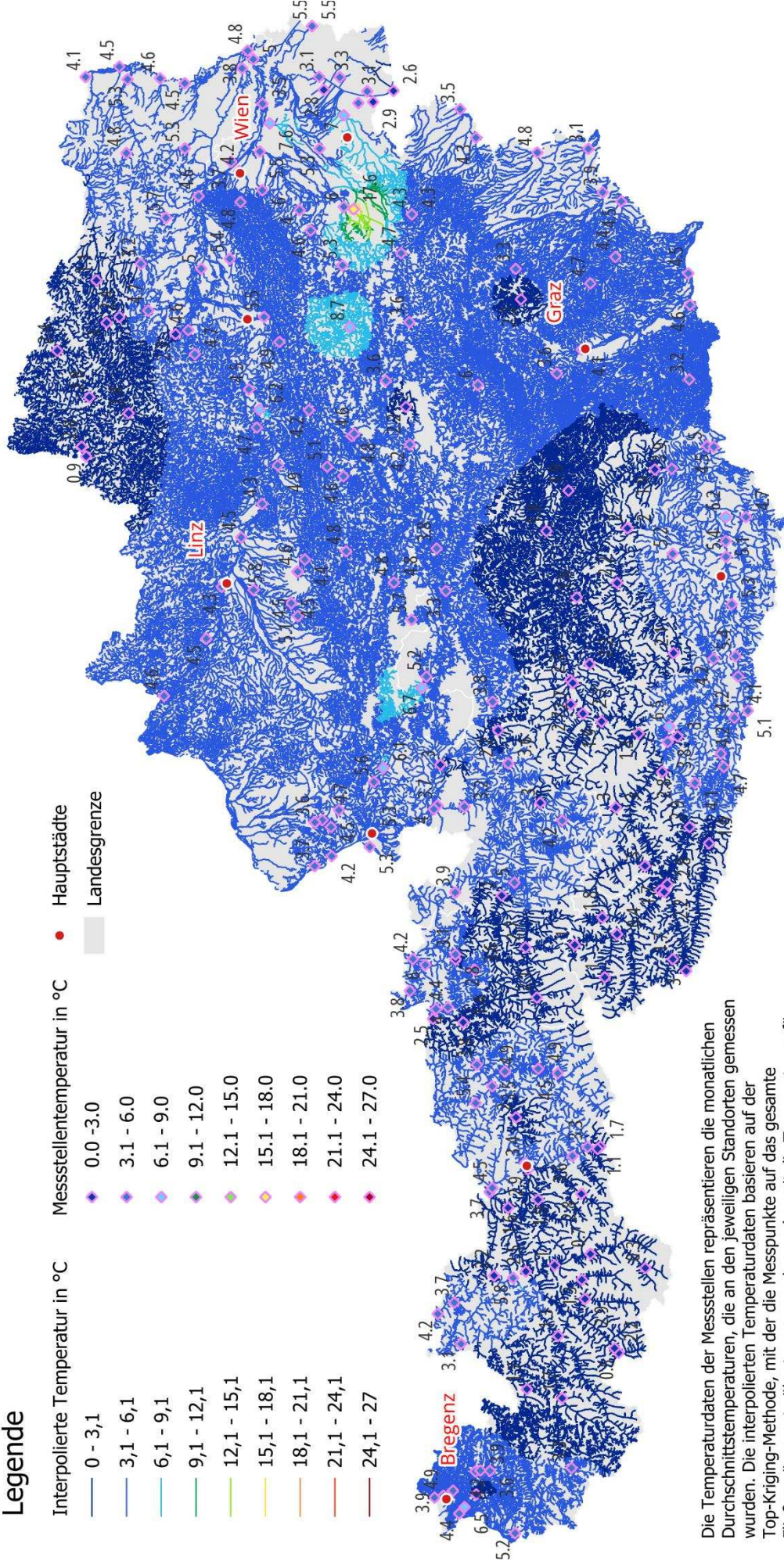




# Temperaturdaten österreichischer Fließgewässer Dezember 2020

## Legende

Interpolierte Temperatur in °C	Messstellentemperatur in °C	Hauptstädte	Landesgrenze
0 - 3,1	0.0 - 3.0	●	■
3,1 - 6,1	3.1 - 6.0		
6,1 - 9,1	6.1 - 9.0		
9,1 - 12,1	9.1 - 12.0		
12,1 - 15,1	12.1 - 15.0		
15,1 - 18,1	15.1 - 18.0		
18,1 - 21,1	18.1 - 21.0		
21,1 - 24,1	21.1 - 24.0		
24,1 - 27	24.1 - 27.0		



Die Temperaturdaten der Messstellen repräsentieren die monatlichen Durchschnittstemperaturen, die an den jeweiligen Standorten gemessen wurden. Die interpolierten Temperaturdaten basieren auf der Top-Kriging-Methode, mit der die Messpunkte auf das gesamte Fließgewässernetz übertragen wurden und somit die Temperaturen für alle Abschnitte des Gewässernetzes berechnet wurden.

