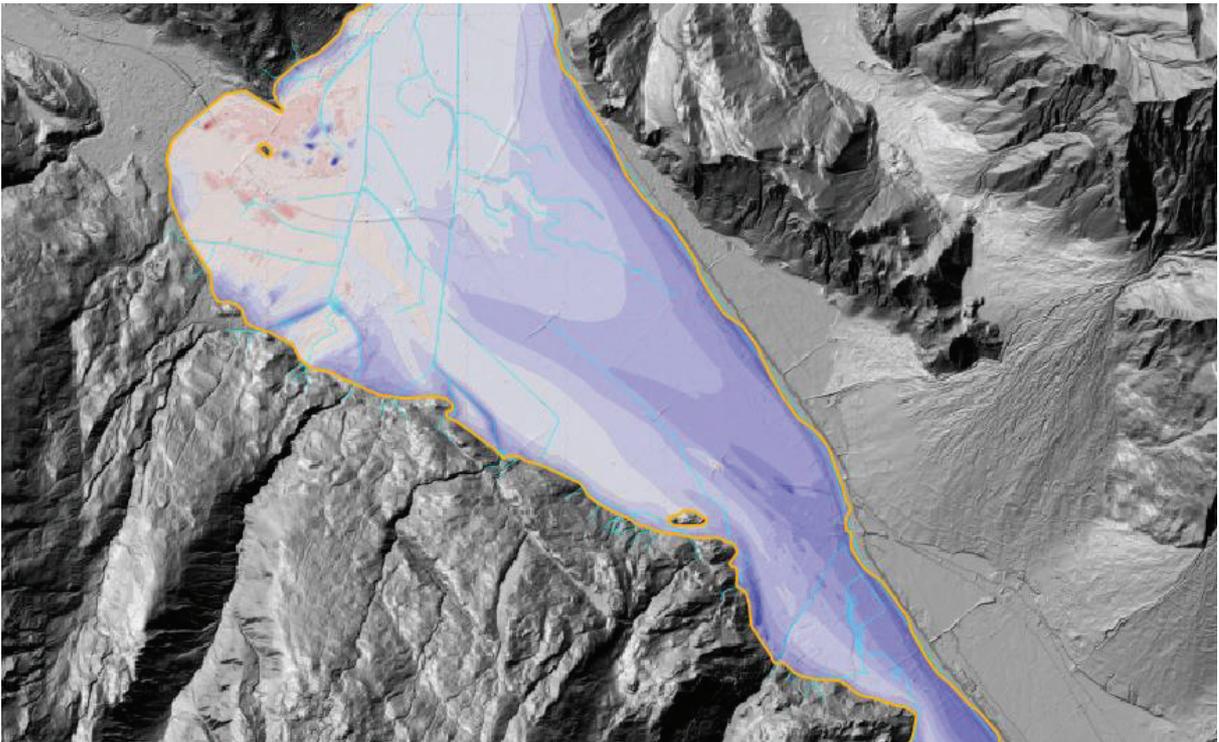


Thermische Grundwassernutzung des Lockergestein-Grundwasserleiters im St.Galler Rheintal

Hydrothermische 3D-Grundwassermodellierung

Technischer Bericht

26. April 2023



Amt für Wasser und Energie SG
Grundwasser/Energie
Lämmli brunnenstrasse 54
9001 St.Gallen

TK CONSULT AG
Neugasse 136
CH-8005 Zürich
Telefon +41 (0)44 288 81 81
tkc@tkconsult.ch
www.tkconsult.ch

TKC 26.044

Version	Datum	Sachbear- beitung	Freigabe	Änderungsdokumentation	Verteiler
1.0	26.04.2023	BAM	KUR	-	AWE SG

Inhaltsverzeichnis

1	Anlass und Auftrag	5
2	Grundlagen	7
2.1	Dokumente im Zusammenhang mit dem Projekt	7
2.2	Weitere Dokumente und Studien	7
2.3	Grundwassermodell	7
2.4	Temperaturmessdaten	7
2.5	Wärme- und Kältenutzung	8
2.6	Vektordaten	8
2.7	Rasterdaten	8
2.8	Gesetzliche Rahmenbedingungen	8
2.9	Software	9
3	Projektperimeter und aktuelle Grundwasserverhältnisse	10
3.1	Allgemeine Übersicht	10
3.2	Grundwassertemperatur	10
4	Modellierungskonzept	12
4.1	Modelltyp	12
4.2	Detaillierungsgrad	12
5	Aufbau 3D-Grundwassermodell	14
5.1	Bestehendes 2D-Grundwassermodell	14
5.2	Modellabgrenzung	15
5.3	Horizontale Diskretisierung	15
5.4	Vertikale Diskretisierung	16
6	Modellparameter	18
6.1	Strömung	18
6.2	Wärmetransport	19
7	Randbedingungen	20
7.1	Übernahme Randbedingungen aus dem 2D-Grundwassermodell	20
7.2	Randpotentiale zum restlichen 2D-Modellgebiet	20
7.3	Oberflächentemperatur	20
7.4	Wassertemperatur Oberflächengewässer	21
7.5	Temperatur der Rand- und Grundwasserzuflüsse	23
7.6	Geothermischer Wärmestrom	23
7.7	Wärmeeintrag Gebäude	24
7.7.1	Methodik	24

7.7.2	Abschätzung des Wärmeeintrags	25
7.8	Thermische Anlagen mit Grundwasserentnahme und -rückgabe	26
7.8.1	Übersicht und Datenaufbereitung	26
7.8.2	Abschätzung der thermischen Nutzung	28
7.9	Thermische Anlagen ohne Grundwasserentnahme und -rückgabe	30
7.9.1	Übersicht und Datenaufbereitung	30
7.9.2	Abschätzung der thermischen Nutzung	30
8	Hydrothermische 3D-Grundwassermodellierung	32
8.1	Szenarien und Vorgehensweise	32
8.2	Modellvalidierung	33
8.2.1	Vergleich mit 2D-Modell	33
8.2.2	Vergleich der mittleren Grundwassertemperatur	34
8.2.3	Vergleich der Temperaturganglinien	35
8.3	Natürlicher Zustand (Szenario 1)	36
8.4	Istzustand ohne thermische Nutzung (Szenario 2)	36
8.5	Istzustand mit thermischer Nutzung (Szenario 3)	37
8.5.1	Stationär	37
8.5.2	Instationär	38
9	Abschätzung thermisches Potenzial	39
9.1	Annahmen und Vorgehensweise	39
9.2	Ergebnisse	40
10	Schlussbemerkung / Fazit	42
11	Ausblick	43

Anhang

- Anhang 1: Thermische Anlagen mit Entnahme und Rückgabe
- Anhang 2: Temperaturganglinien Istzustand

Beilagen

- Beilage 1: Temperaturverteilung (mittlere Verhältnisse): Szenario 3 (Istzustand mit thermischer Nutzung)
- Beilage 2: Temperaturdifferenz (mittlere Verhältnisse): Szenario 2 (Istzustand ohne thermische Nutzung) - Szenario 1 (natürlicher Zustand) - Einfluss der Gebäude und der Trink- und Brauchwassernutzungen
- Beilage 3: Temperaturdifferenz (mittlere Verhältnisse): Szenario 3 (Istzustand mit thermischer Nutzung) - Szenario 1 (natürlicher Zustand) - Einfluss aller menschlicher Eingriffe
- Beilage 4: Temperaturdifferenz (mittlere Verhältnisse): Szenario 4 (Potenzialabschätzung) - Szenario 1 (natürlicher Zustand)

1 Anlass und Auftrag

Im St.Galler Rheintal gibt es eine Vielzahl von thermischen Wärme- und Kältenutzungen des Lockergestein-Grundwassers sowie Erdwärmesonden und weitere thermische Anlagen. Jährlich werden neue Anlagen bewilligt. Im Bewilligungsverfahren wird der Einfluss dieser Anlagen bisher einzeln betrachtet. Das Amt für Wasser und Energie (AWE) des Kantons St.Gallen hat Anfangs 2021 angestrebt, die thermischen Nutzungen im St.Galler Rheintal integral zu betrachten und dazu eine Projektskizze verfasst [1]. Wichtige Fragestellungen sind dabei, wie sich die heutigen bewilligten Anlagen und weitere menschliche Eingriffe auf die Grundwassertemperatur auswirken und wie gross das thermische Potenzial unter Berücksichtigung der Gewässerschutzgesetzgebung [38]-[43] insgesamt ist. Der Fokus soll dabei auf die Siedlungsgebiete gelegt werden.

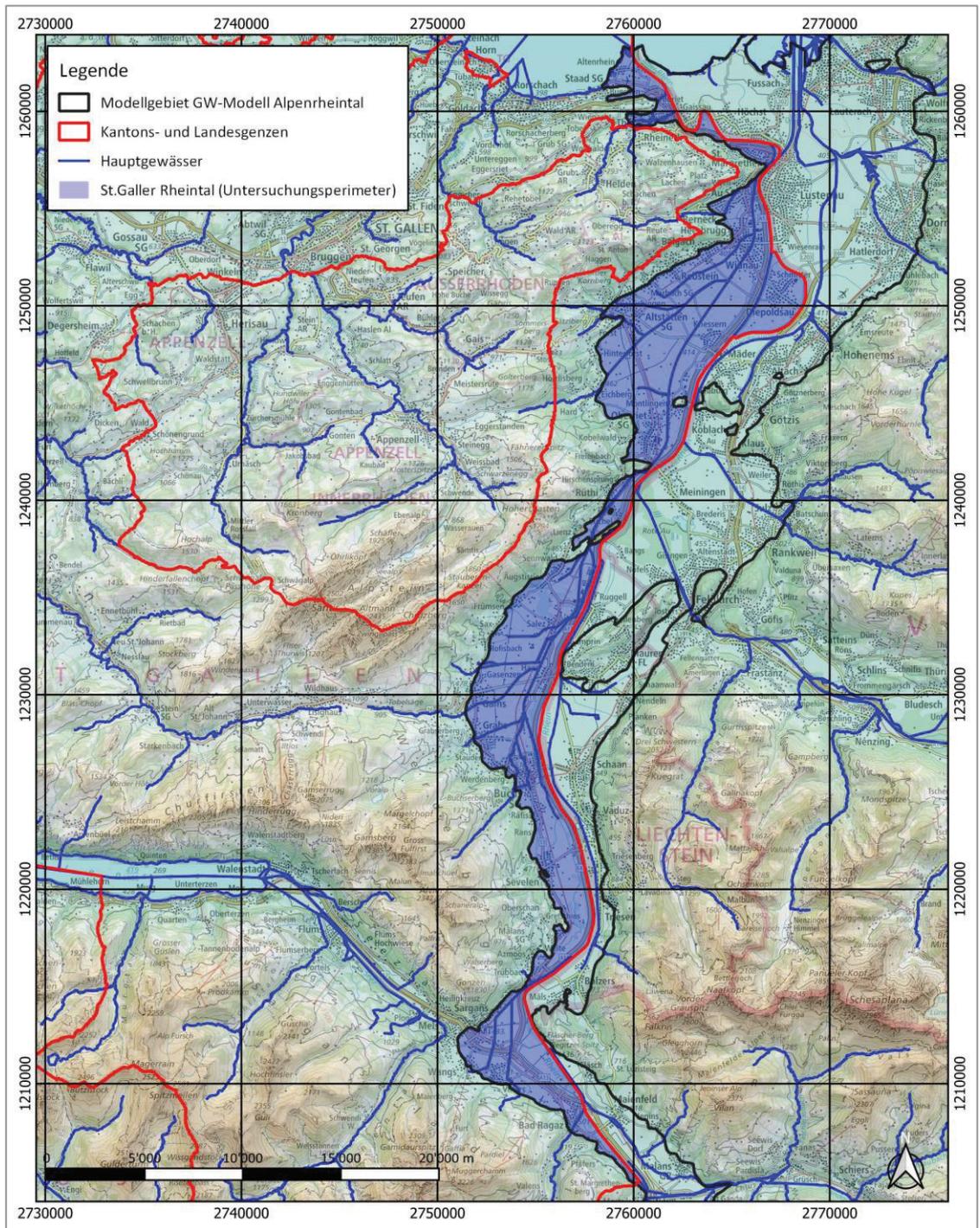
Die Beantwortung der Fragestellungen soll unter Verwendung eines hydrothermischen Grundwassermodells erfolgen. Der Einsatz eines Modells ermöglicht die integrale Betrachtung aller möglichen Einflussgrössen, die sich auf den Grundwasserhaushalt sowohl hydraulisch als auch thermisch auswirken. Es resultiert als Ergänzung zu den punktuellen Messungen eine zusammenhängende Aussage über die Grundwasserverhältnisse. Zudem können mit einem aufgebauten Grundwassermodell kostengünstig verschiedene Szenarien berechnet sowie neue hydrogeologische Erkenntnisse und thermische Anlagen regelmässig nachgeführt und deren Einfluss berechnet werden.

Im Frühling 2021 hat die TK CONSULT AG im Auftrag des Amts für Wasser und Energie (AWE) ein Konzept für die thermische Grundwassermodellierung im St.Galler Rheintal (Perimeter vgl. Abbildung 1) erstellt [2]. Das Konzept beinhaltet die Zieldefinition, die Bestandaufnahme, das Bearbeitungskonzept sowie eine Auflistung der erforderlichen Grundlagen.

Das AWE hat nun die thermischen Modellierungen gemäss vorliegendem Konzept durchführen lassen. Die Projektziele lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Ermittlung des Einflusses der heutigen bewilligten thermischen Anlagen (Wärme- und Kältenutzung durch Grundwasserentnahme und Erdwärmesonden) auf die Grundwassertemperatur des nutzbaren Lockergestein-Grundwasserleiters.
- Ermittlung des Einflusses weiterer menschlicher Eingriffe auf die Grundwassertemperatur des nutzbaren Lockergestein-Grundwasserleiters.
- Ermittlung des theoretischen Wärme- resp. Kältepotentials des nutzbaren Lockergestein-Grundwasserleiters in den einzelnen Siedlungsgebieten unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorgaben.

Die Ergebnisse der Studie sollen dem AWE St.Gallen als Entscheidungsgrundlage für die zukünftige Bewilligungspraxis bei thermischen Grundwassernutzungen dienen. Dadurch soll eine Übernutzung des Grundwasserleiters langfristig verhindert und das aquatische Ökosystem und das Grundwasser langfristig geschützt werden. Zudem sollen die Ergebnisse der Studie dem AWE St.Gallen als Hilfsmittel für die Energieplanung im Bereich Wärmeversorgung (Wärmeversorgungskonzepte) im Zusammenhang mit der angestrebten Umsetzung der Energie- und Klimapolitik zur Verfügung stehen.



2 Grundlagen

2.1 Dokumente im Zusammenhang mit dem Projekt

- [1] Projektskizze „Thermische Veränderung des Grundwassers und Potential im Rheintal durch Wärme- und Kältenutzungen“; Amt für Wasser und Energie Kanton St.Gallen (AWE St.Gallen); 12.03.2021.
- [2] Thermische Potentialstudie St.Galler Rheintal – Erarbeitung des Konzepts für die thermische Grundwassermodellierung mit Kostenschätzung; TK CONSULT AG; 21.05.2021.

2.2 Weitere Dokumente und Studien

- [3] Thermische Nutzung der Gewässer des Alpenrheintales; Universität Innsbruck – Institut für Umwelttechnik, Rudhardt+Gasser Ziviltechniker; Februar 2003.
- [4] Potenzialbewertung und Ressourcenmanagement von Grundwasser zur thermischen Nutzung (Postulat „Förderung der Grundwassernutzung“); AF-Colenco AG; 07.02.2011.
- [5] Grundwasserbewirtschaftung im Kanton St.Gallen (40.12.03); Kantonsrat St.Gallen; 06.03.2012.
- [6] Grundwassermodell Basel-Stadt – Modellpflege 2017/18; TK CONSULT AG; Dezember 2018.
- [7] Grundwassermodell Alpenrhein – Modellpflege 2019 (IRKA); TK CONSULT AG; 18.12.2019.
- [8] Thermische Grundwassernutzung Chur – Prognose der Nutzungsmöglichkeiten – Zwischenbericht Energiedurchfluss durch das Stadtgebiet Chur; TK CONSULT AG und Sieber, Cassina + Handke AG; 13.01.2021.
- [9] Thermischer Einfluss urbaner Untergrundstrukturen auf die Grundwassertemperaturen im Kanton Basel-Stadt; Grundwasser - Zeitschrift der Fachsektion Hydrogeologie, Autoren: Dominic Becker, Jannis Epting (Angewandte und Umweltgeologie Universität Basel); 27.05.2021.
- [10] Schotterabbau Paspels – UVE, Fachbereich Grundwassersimulation; TK CONSULT AG; 22.08.2022.

2.3 Grundwassermodell

- [11] Grundwassermodell Alpenrhein – Modellpflege 2022 (IRKA); TK CONSULT AG; Modellzustand August 2022.

2.4 Temperaturmessdaten

- [12] Temperatur Grundwasser; Hydrometrie St.Gallen; 11.02.2022.
- [13] Temperatur Gewässer; Hydrometrie St.Gallen; 11.02.2022.
- [14] Temperatur Rhein und Rheintaler Binnenkanal; BAFU; 31.01.2022.

- [15] Temperatur Grundwasser IRR; <https://irr.tbbm.at>; 30.08.2022.
- [16] Temperatur Gewässer IRR; <https://irr.tbbm.at>; 30.08.2022.
- [17] Lufttemperatur Standorte Rheintal; MeteoSchweiz; aus Projekt [11].
- [18] Geothermisches Potenzial in der Schweiz: <https://vgka.ch>.

2.5 Wärme- und Kältenutzung

- [19] Technische Daten zu den GW-Wärme- und -Kältenutzungen (Typ, Konzession, Leistung); Amt für Wasser und Energie; 07.02.2022.
- [20] Technische Daten zu den Wärme- und Kältenutzungen ohne Wasserentnahme (Erdwärmesonden, Energiepfähle, Erdregister); Amt für Wasser und Energie; 07.02.2022.

2.6 Vektordaten

- [21] Grundwasservorkommen (GWVK); <https://data.geo.sg.ch>; 28.10.2021.
- [22] Planerischer Gewässerschutz (PGS); <https://data.geo.sg.ch>; 16.11.2021.
- [23] Gewässernetz (GN10); <https://data.geo.sg.ch>; 08.12.2021.
- [24] Zonenplan (ZP); <https://data.geo.sg.ch>; 13.12.2021.
- [25] Datensatz GEOBAU2; <https://data.geo.sg.ch>; 05.01.2022.
- [26] Erdwärmesondenbohrungen (GNOBO_ERDW); <https://data.geo.sg.ch>; 06.01.2022.
- [27] Grundwasser Hydrometrie (MEDAT_GWH); <https://data.geo.sg.ch>; 06.01.2022.
- [28] Oberflächengewässer Hydrometrie (MEDAT_OGH); <https://data.geo.sg.ch>; 06.01.2022.
- [29] Hoheitsgrenzen (AVHG); <https://data.geo.sg.ch>; 08.01.2022.
- [30] Amtliche Vermessung reduziert - Ebene Einzelobjekte (AVR-EO); Amt für Raumentwicklung und Geoinformation St.Gallen; 28.01.2022.
- [31] Grundwasserfassungen (GNOBO_GWFASS); <https://data.geo.sg.ch>; 03.02.2022.
- [32] Rückgaben (GNOBO_RUECKGABE); <https://data.geo.sg.ch>; 03.02.2022.
- [33] Pegelstationen Messstellen IRR; <https://irr.tbbm.at>; 30.08.2022.

2.7 Rasterdaten

- [34] Landeskarte in diversen Massstäben; <https://wms.geo.admin.ch/>.
- [35] SWISSIMAGE Hintergrund; <https://wms.geo.admin.ch/>.
- [36] Digitales Terrainmodell und Reliefschattierung; aus Projekt [11].
- [37] Erdwärmesondenkarte Kanton St.Gallen; Quelle: <https://www.geoportal.ch/ch/map/29>.

2.8 Gesetzliche Rahmenbedingungen

- [38] Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (GSchG; SR 814.20) vom 24.01.1991; Stand 01.01.2021.
- [39] Gewässerschutzverordnung (GschV) vom 28.10.1998; Stand 01.01.2021.

- [40] Vollzug Umwelt, Wegleitung Grundwasserschutz; BUWAL; 2004.
- [41] Wärmenutzung aus Boden und Untergrund, Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmenutzung, Umwelt-Vollzug Nr. 0910; BAFU; 2009.
- [42] Gesetzessammlung des Kantons St.Gallen: Gesetz über die Gewässernutzung (751.1) vom 5. Dezember 1960; Stand 17. Mai 2009.
- [43] Gesetzessammlung des Kantons St.Gallen: Vollzugsverordnung zum Gesetz über die Gewässernutzung (751.11) vom 1. November 1961; Stand 1. Juli 2017.

2.9 Software

- [44] SPRING – Version 6.2; delta h Ingenieurgesellschaft mbH, Witten.

Der Aufbau des Grundwassermodells sowie sämtliche Simulationen im Rahmen der Grundwassermodellierung werden mit der Software SPRING [44] durchgeführt. Das Programm löst die stationäre oder instationäre 2D/3D-Grundwassergleichung nach der Methode der Finiten Elemente.

3 Projektperimeter und aktuelle Grundwasserverhältnisse

3.1 Allgemeine Übersicht

Der Grundwasserleiter des St.Galler Rheintals erstreckt sich entlang des Rheins bzw. des Alten Rheins von Bad Ragaz bis Altenrhein am Bodensee über eine Länge von rund 70 km (siehe Abbildung 1). Die Breite zwischen der hangseitigen Begrenzung des Grundwasserleiters und dem Rhein bzw. dem Alten Rhein variiert stark und beträgt 100 – 5'900 m.

Die Fläche des Grundwasserleiters des St.Galler Rheintals beträgt rund 170 km². Nur rund 19 % der Gesamtfläche (32 km²) sind gemäss Zonenplan [24] besiedelt und stehen primär für die thermische Nutzung zur Verfügung. Grundsätzlich besteht aber die Möglichkeit, auch ausserhalb des Siedlungsgebiets thermische Nutzungen zu installieren (z.B. zentrale Anlagen für Anergienetze), was aber nicht Inhalt der vorliegenden Studie ist. Insgesamt liegen 24 der total 77 politischen Gemeinden des Kantons St.Gallen teilweise oder vollständig auf dem Gebiet des Rheintaler Grundwasserleiters [29].

Die einzelnen Gebiete des St.Galler Rheintals unterscheiden sich bezüglich Strömungsverhalten des Grundwassers zum Teil erheblich: Der Grundwasserleiter weist Mächtigkeiten von bis zu 80 m auf. Die Mächtigkeit nimmt von Süd nach Nord tendenziell ab. Entsprechend nimmt auch der Grundwasserdurchfluss ab: In Bad Ragaz beispielsweise beträgt der Durchfluss mehrere 100 l/s. Auf Höhe Widnau liegt der Durchfluss bei wenigen 10 l/s [11]. Der Grundwassergradient beträgt im Hauptgrundwasserstrom parallel zum Rhein rund 2 – 3 ‰. In den geringmächtigen Randbereichen liegt die Strömungsrichtung stellenweise orthogonal zur Hauptströmungsrichtung und kann Gradienten von bis zu 20 ‰ aufweisen.

Die Schwankungen des Grundwasserspiegels sind vor allem vom Rheinwasserspiegel geprägt und haben einen typischen alpinen Charakter mit hohen Ständen im Frühling/Sommer und tiefen Ständen im Winter. In Gebieten, wo keine grundwasserstabilisierenden Vorfluter vorhanden sind (z.B. Bad Ragaz), können die Schwankungen bis zu 3.5 m betragen.

Im Projektperimeter gibt es 29 Schutzzonen vom Typ S1, 24 Schutzzonen vom Typ S2, 21 Schutzzonen vom Typ S3 sowie vier rechtskräftige und zwei provisorische Schutzareale [22]. Die Schutzzonen und -areale liegen fast ausschliesslich ausserhalb des Siedlungsgebiets und werden demnach nur indirekt durch die thermische Nutzung beeinflusst.

3.2 Grundwassertemperatur

Im gesamten Projektperimeter gibt es von der Hydrometrie St.Gallen 20 aktive Grundwassermessstellen mit Temperatursonden, die für die Bearbeitung zur Verfügung stehen [12]. Zudem betreibt die IRR im unteren Teil des Modellgebiets im Rahmen des Rhesi-Projekts eine Vielzahl an Grundwassermessstellen [15], die ebenfalls bei der Bearbeitung berücksichtigt werden können. Die Messstellendichte ist im unteren Teil des Modellgebiets entsprechend dichter. Die Standorte aller Messstellen sind in Abbildung 2 dargestellt.

Der Einfluss des Rheins auf die Grundwassertemperatur ist deutlich zu erkennen. Im Nahbereich des Rheins ist die mittlere Grundwassertemperatur mit 8 – 9 °C weitgehend geringer als

in den peripheren Bereichen. Anhang 2 zeigt die Ganglinien der gemessenen Grundwassertemperaturen. Die Amplituden variieren zwischen 1 und 13 °C. Die Ganglinien zeigen eine typische Phasenverschiebung der Temperaturmaxima und -minima gegenüber der Lufttemperatur von wenigen Wochen bis zu mehreren Monaten.

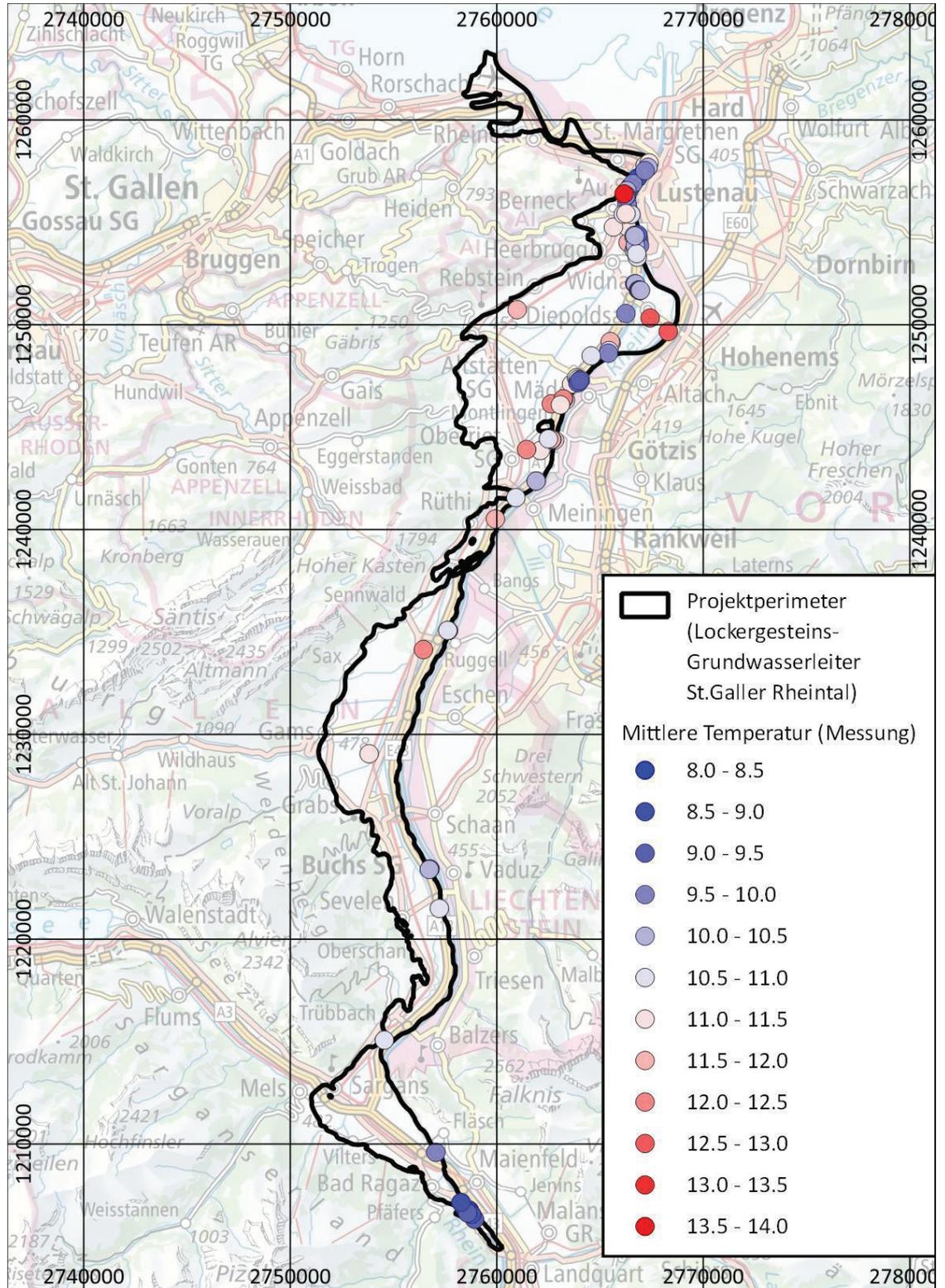


Abbildung 2: Standorte Grundwassermessstellen und mittlere Temperaturen

4 Modellierungskonzept

4.1 Modelltyp

Beim bestehenden Grundwassermodell [11] handelt es sich um ein 2D-Modell (Kap. 5.1). Dieser Modelltyp bildet vertikale Strömungen und die Verhältnisse in der ungesättigten Zone nicht ab. Der Einsatz eines 2D-Modells eignet sich für die Simulation grossräumiger horizontaler Grundwasserströmungen ohne Transportprozesse in Gebieten, bei denen die horizontale Ausdehnung wesentlich grösser ist als die vertikale Ausdehnung und vertikale Strömungen vernachlässigt werden können.

Sollen dichteabhängige Transportprozesse wie zum Beispiel die Temperaturobreitung im Grundwasserleiter abgebildet werden, muss ein **3D-Modell** eingesetzt werden. Dadurch kann die vertikal gerichtete Strömung durch das Absinken von kaltem Wasser bzw. das Aufsteigen von warmem Wasser erfasst werden. Der Einsatz eines 3D-Modells ermöglicht zudem die Abbildung der Prozesse in der ungesättigten Zone, wo aufgrund der reduzierten hydraulischen Leitfähigkeit und der vorwiegend vertikal gerichteten Strömung wesentlich andere Strömungs- und Transportprozesse vorherrschen als in der gesättigten Zone.

In Kapitel 3.1 wird darauf hingewiesen, dass nur rund 19 % der Gesamtfläche des St.Galler Rheintals besiedelt sind und für die thermische Nutzung zur Verfügung stehen. Aufgrund der gegenseitigen thermischen Beeinflussung der einzelnen Siedlungsgebiete sowie aufgrund der Beeinflussung durch natürliche Randbedingungen ausserhalb der Siedlungsgebiete ist es nicht sinnvoll bzw. möglich, die einzelnen Gebiete isoliert zu betrachten. Es wird deshalb ein **Gesamtmodell** des St.Galler Rheintals eingesetzt. Bei der Auswertung kann wiederum auf die einzelnen Siedlungsgebiete eingegangen werden.

Das Grundwassermodell wird so aufgebaut, dass es in Zukunft regelmässig aktualisiert werden kann. Eine **mögliche Aktualisierung** kann u.a. folgende Arbeiten beinhalten:

- Einbau neuer thermischer Anlagen
- Berücksichtigung neuer hydrogeologischer Erkenntnisse
- Einbau von Bauwerken, die den Grundwasserleiter thermisch beeinflussen

4.2 Detaillierungsgrad

Das aufzubauende thermische 3D-Grundwassermodell soll den **Charakter eines Regionalmodells** haben und somit einen geringeren Detaillierungsgrad aufweisen als ein Lokalmodell. Die Unsicherheiten in der Grundwasserströmung des 2D-Modells (siehe Kap. 5.1) bleiben im 3D-Modell bestehen. Dazu kommen die Unsicherheiten bei der thermischen Modellierung (z.B. Nutzungsregime bei den Anlagen, Beschaffenheit der Gebäude und thermische Modellparameter).

Im Fokus steht die **Erfassung der allgemeinen thermischen Situation** (Kap. 8). Zwar werden bei der Modellierung alle Gebäude und thermischen Anlagen mit sinnvollen Annahmen be-

rücksichtigt, um der Realität möglichst nahe zu kommen, allerdings erfolgt keine Detailbeurteilung der einzelnen Anlagen. Ebenfalls wird keine Überprüfung der Anlagen hinsichtlich der gesetzlichen Rahmenbedingungen [39][40][41] (3 °C-Regel) durchgeführt.

Bei der Abschätzung des thermischen Potenzials (Kap. 9) resultieren aus der Modellierung entsprechend des regionalen Charakters des Modells **Richtwerte für die potenzielle thermische Nutzung**.

Soll das Modell im Rahmen einer Detailstudie oder einer projektierten thermischen Nutzung eingesetzt werden, kann aus dem Regionalmodell ein Lokalmodell extrahiert und entsprechend verfeinert werden.

5 Aufbau 3D-Grundwassermodell

5.1 Bestehendes 2D-Grundwassermodell

Das bestehende Grundwassermodell der IRKA [11] deckt das gesamte Alpenrheintal von Reichenau bis zum Bodensee ab. Es weist eine Fläche von über 475 km² auf und umfasst Gebiete des Kantons Graubünden, des Fürstentums Liechtenstein, des Landes Vorarlberg und des Kantons St.Gallen (Abbildung 2). Das Modell liegt als zweidimensionales Finite Elemente Modell vor. Die aktuelle Berechnungsperiode umfasst die fünfjährige Zeitspanne von 2013 – 2017. Für diese Zeit liegt über das gesamte Modellgebiet ein instationärer Datensatz vor.

Das Grundwassermodell des Alpenrheintals wird seit über 20 Jahren im Rahmen von Pflegeaufträgen jährlich aktualisiert und den neuen Gegebenheiten und hydrogeologischen Erkenntnissen angepasst. Die neuste Aktualisierung des Modells im Bereich des Kantons St.Gallen beinhaltet den Abgleich des Modellrands und des Grundwasserstauers mit der kantonalen Grundwasserkarte.



Abbildung 3: 2D-Grundwassermodell

Mehrfach wurde für konkrete Fragestellungen von privaten oder öffentlichen Auftraggebern aus dem 2D-Modell ein Teilmodell exportiert und zu einem 3D-Modell erweitert. So beispielsweise auch im Bereich der Stadt Chur [8], wo das Grundwassermodell erfolgreich für ähnliche thermische Fragestellungen eingesetzt wird.

In der Modellpflege 2019 wurde das bestehende Grundwassermodell der IRKA auf dessen Zuverlässigkeit bezüglich der Grundwasserspiegellage in Abhängigkeit der Messstellendichte und des Grundwassergradienten untersucht [7]. Die Analyse zeigt, dass insbesondere in den Randbereichen von Altstätten, Oberriet, Sennwald, Gams und Grabs grössere Unsicherheiten bezüglich der Lage des Grundwasserspiegels vorherrschen. Stellenweise beträgt die abgeschätzte Unsicherheit ± 2 -5 m. Bei den übrigen Randbereichen kann von einer Unsicherheit von maximal ± 1 -2 m ausgegangen werden. Gegen die Talmitte hin steigt die Zuverlässigkeit des Modells tendenziell an. Mehrheitlich liegt die abgeschätzte Unsicherheit im Bereich von ± 0.25 m.

Im bestehenden 2D-Grundwassermodell sind sämtliche öffentlichen Grundwasserfassungen sowie die grössten Brauchwasserbrunnen als stationäre oder, falls Daten vorhanden sind, als instationäre Randbedingung berücksichtigt. In Absprache mit der IRKA wurden Entnahmen mit Rückgaben bis jetzt nicht berücksichtigt, da diese auf die Strömungsbilanz grossräumig keinen Einfluss ausüben.

5.2 Modellabgrenzung

Das bestehende Grundwassermodell [11] zeigt, dass der Rhein bzw. der Alte Rhein, sowohl in Diepoldsau als auch zwischen St. Margrethen und dem Bodensee, vorwiegend als natürliche hydraulische Grenzen auftreten. Die östliche Modellgrenze wird deshalb entlang des Talwegs des Rheins bzw. entlang der Gewässerachse des Alten Rheins festgelegt. Um einen möglichen Grundwasseraustausch unter dem Rhein zu ermöglichen, wird an der Modellgrenze eine Festpotentialrandbedingung definiert (Kap. 7.2).

Der westliche, hangseitige Modellrand sowie der nördliche Modellrand beim Bodensee können vom 2D-Modell (Kap. 7.1) übernommen werden. Der südliche Modellrand zwischen Rhein und dem Talrand im Bereich Sarelli wird entlang der Kantonsgrenzen gesetzt und mit einer Festpotentialrandbedingung versehen (Kap. 7.2).

5.3 Horizontale Diskretisierung

Das bestehende horizontale Finite Elemente Modellnetz mit Elementflächen von bis zu 100'000 m² genügt den Ansprüchen für eine thermische Transportmodellierung nicht. Zudem fehlen viele Strukturen, die bei der thermischen Modellierung berücksichtigt werden sollen. Aus diesem Grund wird ein neues Modellnetz aufgebaut.

Folgende Strukturen bzw. Bedingungen werden bei der Netzerstellung des unstrukturierten Modellnetzes (Dreieckselemente) berücksichtigt:

- Modellrand (Kap. 5.2)
- Geometrie des Rheins, Übernahme aus dem bestehenden 2D-Modell [11]
- Alle Oberflächengewässer des offiziellen Gewässernetzes [23]
- Standorte der Trink- und Brauchwassernutzungen [31] inkl. radiale Verfeinerung
- Standorte der thermischen Nutzungen (Entnahmen, Rückgaben, Sonden, Energiepfähle, Erdregister) [26][31][32] inkl. radiale Verfeinerung
- Standorte der Grundwassermessstellen [27][33]
- Gebäude [30] (detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 7.7)
- Maximale Fläche der Dreieckselemente: 1'000 m²
- Kleinster zulässiger Winkel der Dreieckselemente: 25 °

Die Gesamtfläche des Modellgebiets beträgt 169 km². Das horizontale Modellnetz besteht aus rund 355'000 Knoten und 695'000 Elementen. Abbildung 4 zeigt zwei Ausschnitte des erstellten Modellnetzes. Im rechten Ausschnitt sind zudem die berücksichtigten Strukturen dargestellt.

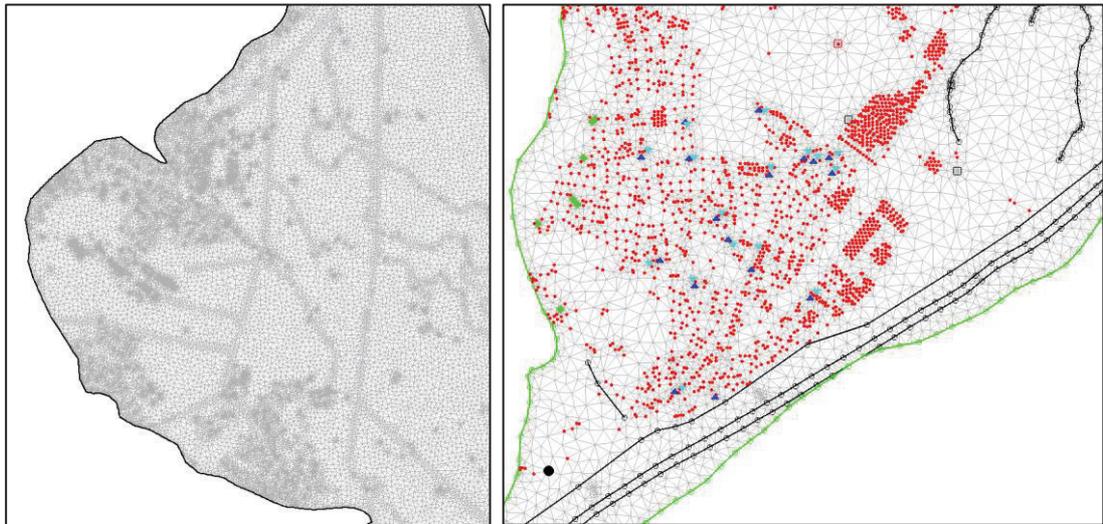


Abbildung 4: Erstelltes horizontales Finite Elemente Netzes. Links: Sarganser Ebene, Rechts: Trübbach/Azmoos (grüne Linien: Modellrand, schwarze Linien: Konturen Oberflächengewässer und Rhein, rote Quadrate: Trinkwassernutzung, schwarze Quadrate: Brauchwassernutzung, dunkelblaue Dreieckssymbole: Entnahmen für thermische Anlagen, hellblaue Dreieckssymbole: Rückgaben der thermischen Anlagen, grüne Punkte: Erdwärmesonden, rote Punkte: Gebäude, schwarze Punkte: Grundwassermessstellen)

5.4 Vertikale Diskretisierung

Der Grundwasserstauer wird vom bestehenden 2D-Grundwassermodell übernommen [11]. Die Geländeoberkante entspricht dem Digitalen Terrainmodell (DTM) [36]. Der vertikale Bereich zwischen der Geländeoberkante und dem Grundwasserstauer wird nach folgenden Kriterien in Schichten unterteilt, um die vertikale Strömungs- und Wärmeausbreitung sowie die thermischen Anlagen und Wärmeeinträge durch Gebäude zuverlässig abbilden zu können:

- Der mittlere Grundwasserspiegel des bestehenden Grundwassermodells wird als Schicht-horizont definiert. Zwischen der Staueroberfläche und dieser Schicht ist der mehrheitlich gesättigte, oberhalb dieser Schicht bis zur Geländeoberkante der mehrheitlich ungesättigte Bereich.
- Im mehrheitlich gesättigten Bereich werden Elementschichten parallel zum Grundwasserspiegelhorizont eingefügt. Die Mächtigkeiten werden wie folgt begrenzt:
 - 0 – 10 m Tiefe: Mächtigkeit = 2.5 m
 - 10 – 50 m Tiefe: Mächtigkeit = 5 m
 - 50 – 100 m Tiefe: Mächtigkeit = 10 m
- Im mehrheitlich ungesättigten Bereich werden Elementschichten parallel zur Geländeoberkante eingefügt. Die Mächtigkeiten werden wie folgt begrenzt:
 - 0 – 10 m Tiefe: Mächtigkeit = 2.5 m (Schicht 1 und 2 immer vorhanden)
 - 10 – 40 m Tiefe: Mächtigkeit = 5 m
- Die Schichten 1 und 2 unterhalb der Geländeoberkante haben gegenüber den übrigen Schichten Priorität. Bei Flurabständen von weniger als 5 m wird die oberste Schicht bzw.

die obersten beiden Schichten des mehrheitlich gesättigten Bereichs gestaucht oder verschwinden vollständig. Damit wird garantiert, dass der Wärmeaustausch von der Oberfläche in den Untergrund zuverlässig abgebildet wird.

Die Anzahl an Elementschichten in der Vertikalen ist von der lokalen Mächtigkeit abhängig. Oberhalb des mittleren Grundwasserspiegels ergeben sich maximal 11 Elementschichten, unterhalb des mittleren Grundwasserspiegels maximal 17 Elementschichten. Das erstellte, dreidimensionale Finite Elemente Netz umfasst rund 3.6 Mio. Knoten und 6.6 Mio. Elemente. Ein Schnitt durch das erstellte Modellnetz auf Höhe Sennwald kann Abbildung 5 entnommen werden.

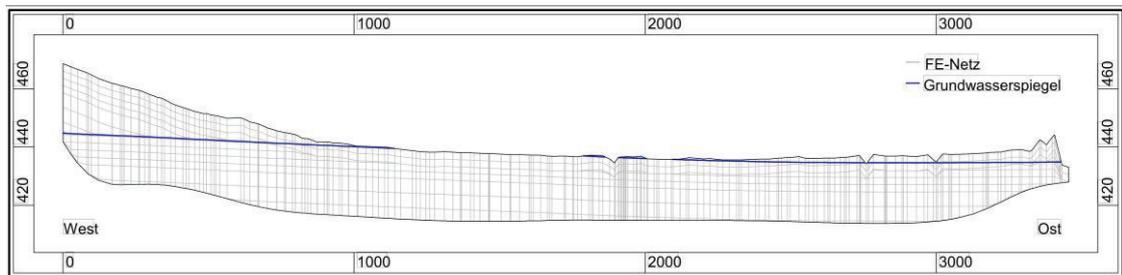


Abbildung 5: Vertikalschnitt des erstellten Finite Elemente Netzes (Bereich Sennwald)

6 Modellparameter

6.1 Strömung

Sämtliche Materialeigenschaften (k-Werte, Leakagekoeffizienten, Speicherkoeffizient) können vom bestehenden 2D-Grundwassermodell [11] übernommen werden. Die kalibrierte horizontale k-Wert-Verteilung wird in die Vertikale projiziert und entsprechend von einer homogenen k-Wert-Verteilung in der Tiefe ausgegangen. Der k-Wert in vertikaler Richtung wird in Beziehung zum horizontalen k-Wert gesetzt. Erfahrungsgemäss ist ein Faktor von 0.1 sinnvoll. Die ungesättigte Zone wird mit dem Ansatz von van Genuchten und dessen Standardwerten abgebildet. Eine Validierung des Modells im Vergleich zum 2D-Modell ist erforderlich (vgl. Kap. 8.2.1). Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die Modellparameter der Strömungsmodellierung.

Tabelle 1: Modellparameter Strömung

Parameter	Wert
Kalibrierte k-Werte Grundwasserleiter	$1.0 \cdot 10^{-5} - 2.0 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$
Angesetztes Verhältnis vertikaler/ horizontaler k-Wert (Erfahrungswert)	0.1
Kalibrierter Flächen-Leakagekoeffizient Gewässersohle Rhein	$3.0 \cdot 10^{-5} - 2.0 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (Exfiltrationsstrecken) $5.0 \cdot 10^{-7} - 7.0 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ (Infiltrationsstrecken)
Kalibrierter Linien-Leakagekoeffizient übrige Oberflächengewässer	$1.0 \cdot 10^{-6} - 1.0 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$
Speicherkoeffizient global	10 %
Angesetzte Van-Genuchten-Parameter (S_{res} , a, n), entspricht Literaturwerten	0.2, 0.0014 m^2/N , 1.5

6.2 Wärmetransport

Die thermische Berechnung erfordert die Definition folgender Grössen: spezifische Wärme, Dichte und Wärmeleitfähigkeit des Wassers bzw. der Matrix, longitudinale und transversale Dispersivität sowie die dynamische Fluidviskosität des Wassers. Bei der Dichte und der dynamische Fluidviskosität wird eine Temperaturabhängigkeit berücksichtigt. Es werden die Standardwerte von SPRING [44] verwendet. Tabelle 2 zeigt eine Übersicht über die Modellparameter der Wärmetransportmodellierung.

Tabelle 2: Modellparameter Wärmetransport

Parameter	Wert
Spezifische Wärme des Wassers	4'182 J/(kg·K)
Spezifische Wärme der Matrix	650 J/(kg·K)
Dichte des Wassers	1'000 kg/m ³ bei 20 °C (temperaturabhängig!)
Dichte der Matrix	2'650 kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit des Wassers	0.6 W/(m·K)
Wärmeleitfähigkeit der Matrix	2.0 W/(m·K)
Longitudinale Dispersivität	20 m
Transversale Dispersivität	2 m
Dynamische Fluidviskosität Wasser	1.0 kg/(m·s) bei 20 °C (temperaturabhängig!)
Porosität	0.1

7 Randbedingungen

Die Randbedingungen mussten während des Validierungsprozesses (Kap. 8.2) teilweise iterativ angepasst werden. Die im vorliegenden Kapitel beschriebenen Randbedingungen stellen den endgültigen Datensatz nach erfolgter Validierung dar.

7.1 Übernahme Randbedingungen aus dem 2D-Grundwassermodell

Alle Strömungsrandbedingungen (Flächenneubildung durch Niederschlag, Randzufluss, Wasserspiegel der Oberflächengewässer inkl. Bodensee, Entnahmemengen von Brauchwasserbrunnen und Grundwasserfassungen der öffentlichen Grundwasserversorgungen) können vom bestehenden 2D-Grundwassermodell [11] übernommen werden. Es handelt sich dabei sowohl um mittlere als auch um instationäre Randbedingungen der aktuellen Berechnungsperiode 2013 – 2017.

7.2 Randpotentiale zum restlichen 2D-Modellgebiet

Beim südlichen Modellrand entlang der Kantonsgrenzen zwischen Rhein und dem Talrand im Bereich Sarelli sowie bei der östlichen Modellgrenze entlang des Talwegs des Rheins wird eine Festpotentialrandbedingung angesetzt. Die Festpotentialwerte entsprechen den berechneten Grundwasserpotentialen des 2D-Grundwassermodells [11] der Periode 2013 – 2017. Der Schwankungsbereich des Festpotentials beträgt 2.5 – 3.0 m. Für die stationäre Berechnung wird der Mittelwert der fünfjährigen Berechnungsperiode berücksichtigt.

7.3 Oberflächentemperatur

Im Rahmen der thermischen Modellierung für den Kanton Basel-Stadt wurde der Zusammenhang zwischen Luft- und Bodentemperatur detailliert untersucht [6]. Dabei wurde festgestellt, dass die Bodentemperatur in 0.2 m Tiefe in engem Zusammenhang mit der über 10 Tage gemittelten Lufttemperatur in 2.0 m Höhe steht. Die Auswertung sowie die abgeleitete Formel sind in Abbildung 6 dargestellt.

Die Messreihen der Lufttemperatur bei den Stationen Bad Ragaz, Vaduz, Oberriet und Altenrhein [17] zeigen für die Periode 2013 – 2017 Korrelationskoeffizienten von mindestens 0.97. Die mittleren Temperaturen liegen ebenfalls in einem engen Wertebereich (10.3 – 11.0 °C). Aus diesem Grund wird in Anbetracht des Modellierungskonzepts (Kap. 4) darauf verzichtet, die Oberflächentemperatur zonenweise festzulegen. Die Oberflächentemperatur wird anhand der über die vier Stationen gemittelten Lufttemperatur berechnet. Dabei wird die Formel in Abbildung 6 angesetzt.

Die mittlere Lufttemperatur der Periode 2013 – 2017 beträgt über die vier Stationen 10.6 °C. Die berechnete Bodentemperatur liegt zwischen 1.1 und 22.5 °C. Für die stationäre Berechnung wird die mittlere Temperatur der fünfjährigen Berechnungsperiode von 11.6 °C berücksichtigt.

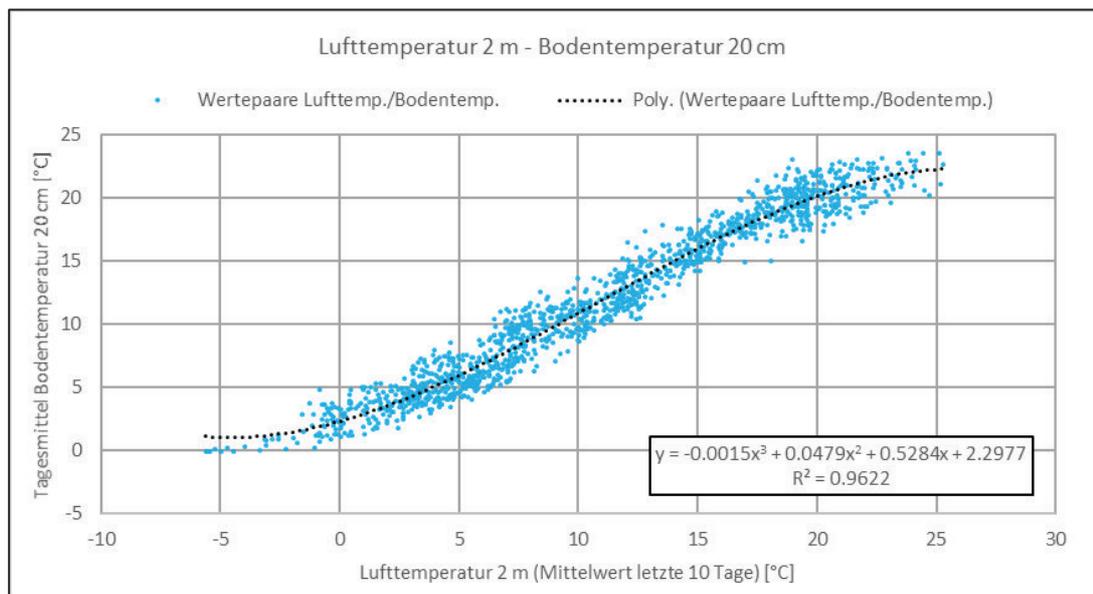


Abbildung 6: Bodentemperatur in Abhängigkeit der Lufttemperatur (aus [6])

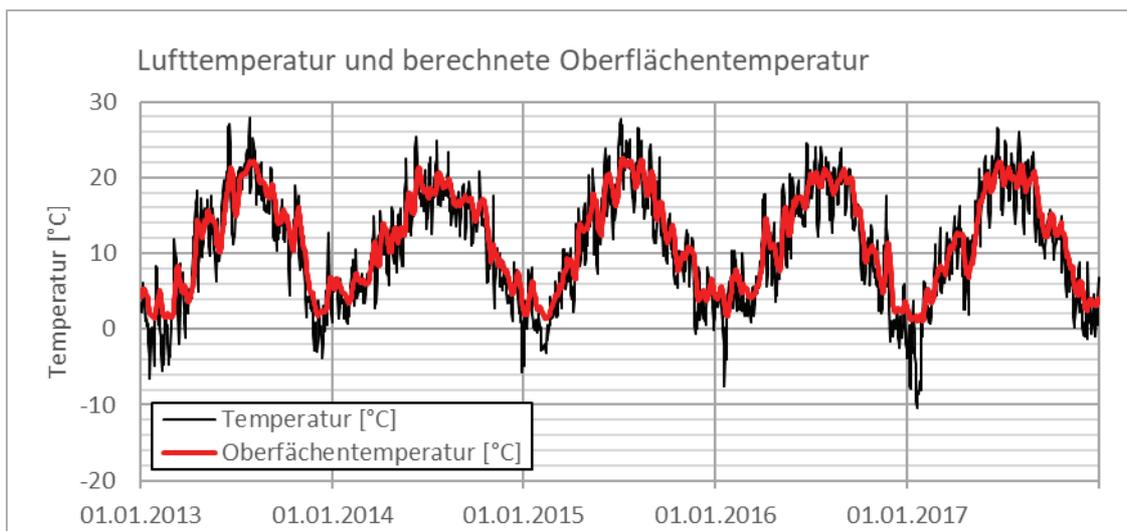


Abbildung 7: Lufttemperatur und berechnete Oberflächentemperatur

7.4 Wassertemperatur Oberflächengewässer

Bei den Oberflächengewässern sind acht Messstationen der Hydrometrie St.Gallen mit Temperatursonden ausgestattet [13]. Daneben gibt es die Temperaturmessungen vom BAFU im Rhein Diepoldsau und im Rheintaler Binnenkanal [14]. Die Ganglinien der gemessenen Wassertemperaturen weisen unterschiedliche Verhaltensweisen auf (Abbildung 8). Aufgrund von Grundwasserexfiltration sind die Temperaturschwankungen im Vilterser-Wangser-Kanal, im Werdenberger Binnenkanal sowie im Rheintaler Binnenkanal stark gedämpft. Gewässer, die Randeinzugsgebiete mit einer geringen mittleren Höhe entwässern, zeigen die stärksten Schwankungen (Simmi, Rietaach).

Beim Alten Rhein in Diepoldsau ist aufgrund der nahegelegenen Grundwassermessstelle HG2052 davon auszugehen, dass die mittlere Temperatur bei rund 13 °C liegt und sich damit deutlich von den mittleren Temperaturen von 7.2 °C (Vilterser-Wangser-Kanal, Vilters-Wangs) bis 10.9 °C (Rietaach) der übrigen Gewässer abhebt. Aus diesem Grund werden die Messdaten des nahegelegenen Gufelsees in Meiningen [10], bei dem es sich auch um einen Baggersee handelt, herangezogen. Die Messdaten zeigen einen Mittelwert von rund 13 °C.

Im Rhein wird auf der gesamten Gewässerachse die Temperaturganglinie der Messstation Diepoldsau angesetzt. Die mittlere Temperatur beträgt 8.5 °C. Die übrigen Gewässer werden Messstationen zugeordnet, bei denen ein ähnliches saisonales Temperaturverhalten zu erwarten ist. Die Zuordnung ist in Abbildung 9 dargestellt. Für die stationäre Berechnung wird die mittlere Temperatur der fünfjährigen Berechnungsperiode angesetzt.

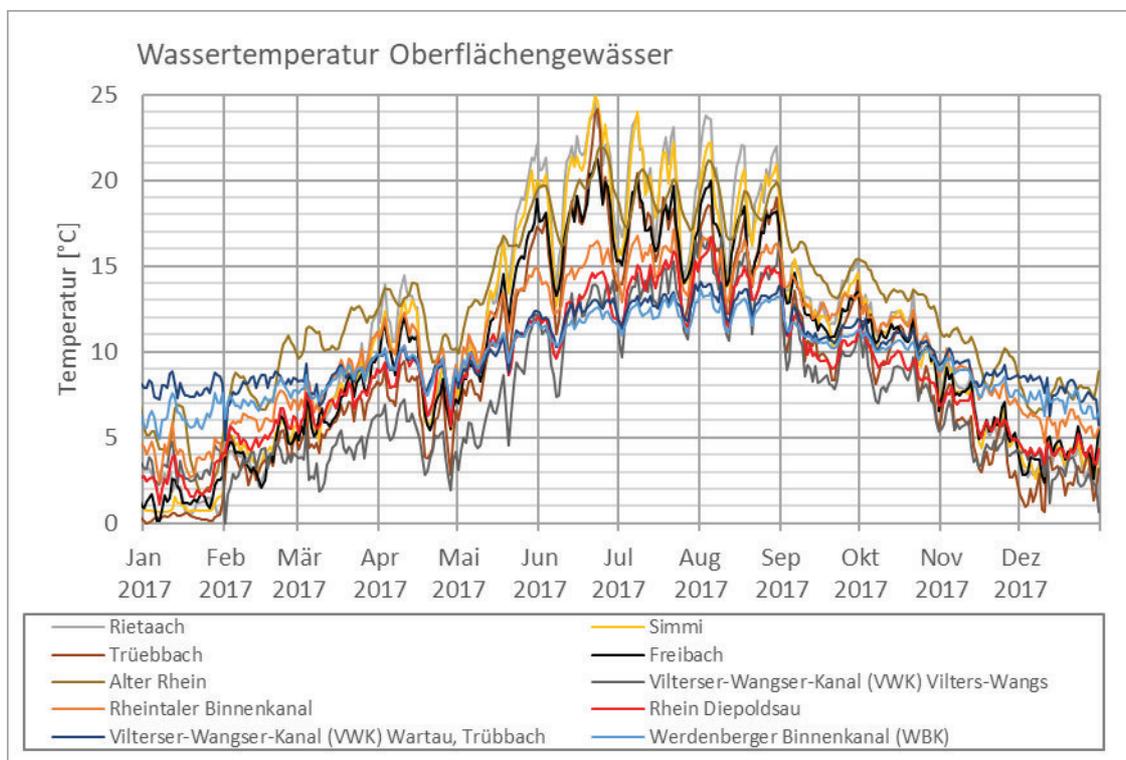


Abbildung 8: Wassertemperaturen Oberflächengewässer (beispielhaft für das Jahr 2017)

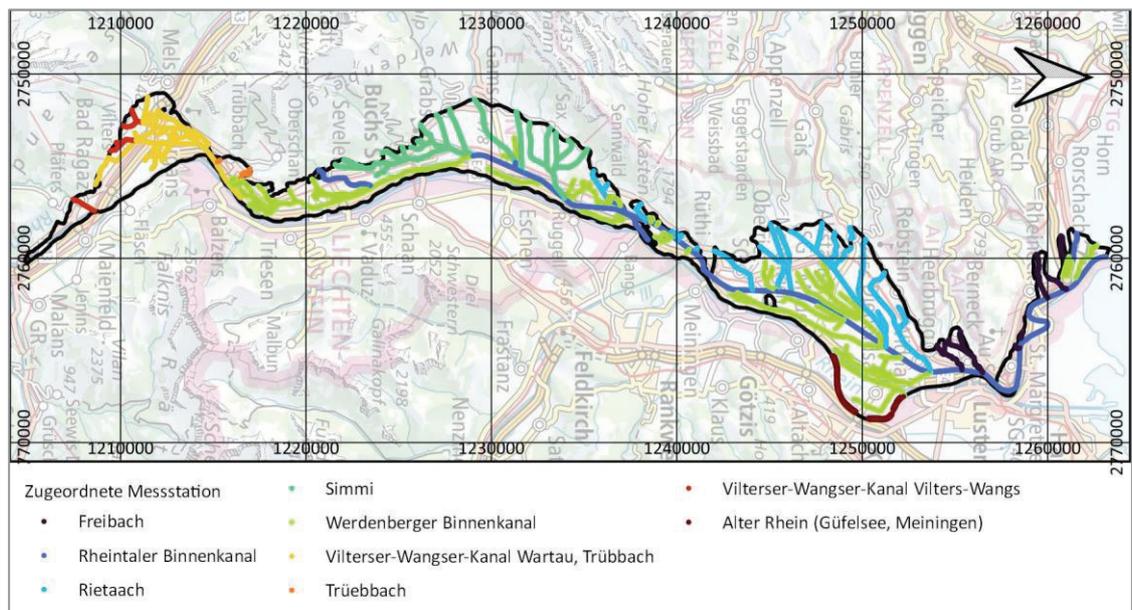


Abbildung 9: Zugeordnete Messstation für die Zuweisung der Wassertemperatur der übrigen Oberflächengewässer (exkl. Rhein)

7.5 Temperatur der Rand- und Grundwasserzuflüsse

Entsprechend dem Konzept [2] werden die Temperaturen der Rand- und Grundwasserzuflüsse stationär angesetzt. Zwischen Bad Ragaz und Sennwald wird aufgrund der tendenziell höher gelegenen Randeinzugsgebiete eine Temperatur des Randzuflusses von 9 °C angenommen. Von Sennwald bis Thal wird eine Temperatur vom 10 °C angesetzt.

Die Messungen der Grundwassertemperaturen im Gebiet Neugüeter (Bad Ragaz) zeigen eine verhältnismässig geringe mittlere Temperatur von 8.4 – 9.0 °C. Es ist anzunehmen, dass dies nicht nur durch die Wasserinfiltration des Rheins in den Grundwasserleiter verursacht wird, sondern dass auch die unterirdischen Grundwasserzuflüsse beim südlichen Modellrand (Sarelli) sowie unterhalb des Rheins relativ geringe Temperaturen aufweisen. Mit der Annahme einer Temperatur von 8.5 °C ergibt sich bei den Pegeln eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messung. Von Sargans bis St. Margrethen wird eine Temperatur der unterirdischen Grundwasserzuflüsse unterhalb des Rheins von 10 °C angenommen.

7.6 Geothermischer Wärmestrom

Die geothermische Wärmestromdichte liegt im St.Galler Rheintal bei rund 70 mW/m². Dieser Wert wird bei der Modellierung auf der untersten Knotenschicht als thermische Randbedingung angesetzt.

7.7 Wärmeeintrag Gebäude

7.7.1 Methodik

Bei der Modellierung soll der Wärmeeintrag sämtlicher Gebäude berücksichtigt werden. Als Datengrundlage liegt der Datensatz «GEOBAU2» (Hauptfassade der bestehenden und projektierten Gebäude) [25] und die unterirdischen Gebäude der amtlichen Vermessung zur Verfügung [30]. Entsprechend dem Modellierungskonzept (vgl. Kap. 4) wird der Wärmeeintrag vereinfacht angesetzt und die Gebäude nicht einzeln geometrisch in das Modellnetz integriert. Folgende Arbeitsschritte werden ausgeführt (vgl. Abbildung 10):

- Datensätze auf Modellbereich ausschneiden
- Einzelne Geometriefehler korrigieren
- Überlappungen von unterirdischen Gebäuden und Hauptfassaden löschen (z.B. Tiefgarage unterhalb eines Gebäudes)
- Abspeichern aller Polygone in einem Datensatz (Anzahl Polygone: 42'000)
- Unterteilen der Polygone auf maximal 100 m² (Anzahl Polygone: 90'000)
- Berechnung des Schwerpunkts der Polygone, der die entsprechende Gebäudeteilfläche abbildet
- Zuweisung der Wärmequelle in W/m² bei den einzelnen Punkten bzw. Modellknoten in Abhängigkeit von Literaturwerten, der Polygonfläche, des Flurabstands und der Fließgeschwindigkeit des Grundwassers (siehe Kap. 7.7.2)



Abbildung 10: Berücksichtigung der Gebäude: Hauptfassaden (rosa), unterirdische Gebäude (schwarz kariert), Polygone mit Maximalfläche von 100 m² (schwarze Linien), Schwerpunkte der Polygone (schwarze Punkt)

Die durch die Gebäude versiegelte Fläche beträgt 8.9 km², was einem Anteil von 5.3 % am Modellgebiet entspricht.

7.7.2 Abschätzung des Wärmeeintrags

Auf die Berücksichtigung der Art und Beschaffenheit der Gebäude bei der Abschätzung des Wärmeeintrags wird verzichtet, da diesbezüglich keine Grundlagen wie beispielsweise das Baujahr zur Verfügung stehen. Auch anhand der Grundnutzung aus dem Zonenplan kann der mögliche Wärmeeintrag nicht eindeutig abgeschätzt werden, da auch innerhalb einer Nutzungszone die Gebäude sehr unterschiedlich beschaffen sein können und unterschiedlich genutzt werden, weshalb auf die Berücksichtigung dieser Datenquelle verzichtet wird.

Hingegen wird der lokale Flurabstand und die Fliessgeschwindigkeit des Grundwassers bei der Abschätzung des Wärmeeintrags berücksichtigt, da diese Grössen einen bedeutenden Einfluss auf den Wärmeeintrag ausüben; schnell fliessendes Grundwasser, das in Kontakt mit der Gebäudeunterkante steht, kann wesentlich mehr Wärme wegführen als im Bereich von Gebäuden, die weit über dem Grundwasserspiegel liegen.

Der Flurabstand und die Fliessgeschwindigkeit lassen sich anhand der Ergebnisse der Strömungsmodellierung ermitteln. Die Beziehung zwischen den beiden Grössen und dem Wärmeeintrag wird anhand eines konzeptionellen Modells abgeschätzt, das im Folgenden beschrieben wird.

Das konzeptionelle Modell wird als Scheibe aufgebaut (Länge 200 m, Breite: 1 m, Mächtigkeit 20 m) und ist in Abbildung 11 dargestellt. Es besteht aus 100 Schichten, welche eine vertikale Diskretisierung von 0.2 m aufweisen. Das nicht durchströmbare Gebäude befindet sich in der Mitte des Modellgebiets mit einer Länge von 10 m, einer Tiefe von 3 m und einem Wärmedurchgangskoeffizient von $0.6 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Der Grundwassergradient beträgt 2 ‰. Als Temperaturdifferenz zwischen dem zuströmenden Grundwasser und dem Gebäude wird ein Wert von 3 K angesetzt. Als Dispersivität für den Wärmetransport wird ein Wert von 2.0 (horizontal) bzw. 0.2 m (vertikal) angenommen. Ansonsten wird von den Strömungs- und Wärmetransportparametern in Tabelle 1 und Tabelle 2 (Kap. 6) ausgegangen.



Abbildung 11: Vertikalprofil des konzeptionellen Modells

Die Modellierung erfolgt für verschiedene Grundwasserspiegellagen und für unterschiedliche Fliessgeschwindigkeiten im Grundwasser, gesteuert über den k-Wert des Grundwasserleiters. Abbildung 12 zeigt die ermittelte Beziehung. Ein Wert von $1 - 4 \text{ W}/\text{m}^2$ bei geringen Flurabstän-

den erscheint im Vergleich mit den Literaturwerten [9] als plausibel. Bei grösseren Flurabständen zeigt der Wärmeeintrag keine Abhängigkeit mehr zu den Fließgeschwindigkeiten im Grundwasser.

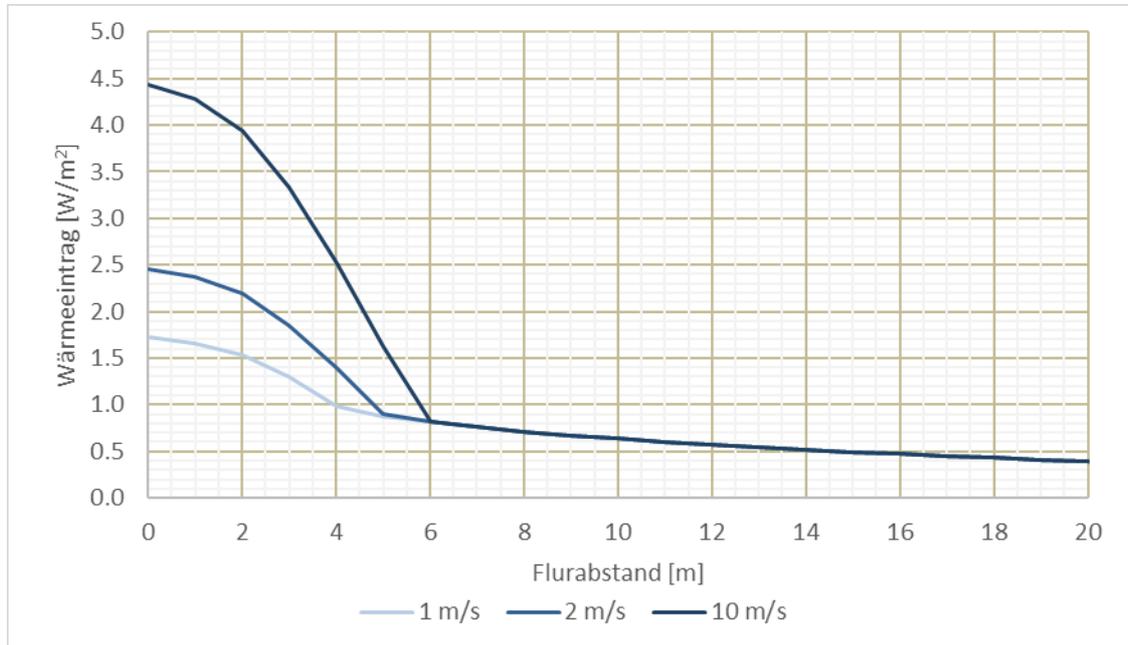


Abbildung 12: Einfluss des Flurabstands und der Fließgeschwindigkeit auf den Wärmeeintrag

Anhand der mit dem konzeptionellen Modell ermittelten Beziehung und den Flurabständen und Fließgeschwindigkeiten im Modell wird der Wärmeeintrag berechnet. Da keine Angaben zur Anzahl an Untergeschossen vorliegen, wird bei allen Gebäuden eine Unterkellerung von 3 m angenommen und der Wärmeeintrag entsprechend in dieser Tiefe ab GOK angesetzt.

Der totale Wärmeeintrag durch die Gebäude beläuft sich auf 17 MW. Der Wert wird stationär angesetzt. Weitere Einbauten wie Strassenunterführungen und Tunnelbauwerke werden nicht berücksichtigt, da im Vergleich zu den Gebäuden nur wenige Objekte dieser Art vorhanden sind.

7.8 Thermische Anlagen mit Grundwasserentnahme und -rückgabe

7.8.1 Übersicht und Datenaufbereitung

Thermische Anlagen mit Grundwasserentnahme und -rückgabe werden im ganzen St.Galler Rheintal bewilligt. Allerdings ist es aufgrund der hydrogeologischen Gegebenheiten und zu geringer Ergiebigkeit nicht überall möglich und sinnvoll, Grundwasserfassungen zu bauen. Für die genehmigten Anlagen gibt es bezüglich minimaler Wärme- bzw. Kühlleistung keine Beschränkung, wie das teilweise bei anderen Kantonen der Fall ist. Deshalb gibt es auch viele Anlagen mit geringen Entnahmemengen.

Einige Siedlungsgebiete weisen mehrheitlich oder ausschliesslich thermische Nutzungen in Form von Wärme- und Kältenutzung durch Grundwasserentnahme auf (z.B. Bad Ragaz). In an-

deren Siedlungsgebieten gibt es wenige oder keine thermischen Anlagen mit Grundwasserentnahme und -rückgabe, sondern mehrheitlich oder ausschliesslich Anlagen in Form von Erdwärmesonden (z.B. Altstätten). Die Standorte sind in den Beilagen zu finden.

Im gesamten Projektperimeter gibt es rund 500 aktive oder geplante Grundwasserfassungen für thermische Zwecke [31]. Rund 10 % der Fassungen, bei denen ein Wert angegeben ist, weisen Konzessionsmengen von mehr als 600 l/min (10 l/s) auf. Eine Konzessionsmenge von mehr als 1'200 l/min (20 l/s) ist bei rund 5 % der Fassungen vorhanden. Die vier grössten Fassungen mit Konzessionsmengen von mehr als 6'000 l/min (100 l/s) befinden sich in Sargans, Sevelen, Buchs und Haag (Gem. Sennwald).

Bei 84 % aller Grundwasserfassungen handelt es sich um Wärmenutzungen. Fassungen für Kälte- und Wärmenutzung machen 9 %, reine Kältenutzung nur 7 % aller Fassungen aus. Dafür weisen die Kältenutzungen in der Regel wesentlich grössere Konzessionsmengen auf. Der Mittelwert der Konzessionsmengen aller Kältenutzungen beträgt über 2'500 l/min. Bei den reinen Wärmeanlagen beläuft sich der Mittelwert auf nur rund 200 l/min. Die grösste reine Wärmenutzung weist eine Entnahmemenge von 2'000 l/min auf.

Die Datenbank des Kantons St.Gallen zeigt im Projektgebiet insgesamt 400 aktive oder geplante Rückgabestandorte ins Grundwasser [32]. Als Rückgabearart wird Brunnen, Schacht oder Versickerung angegeben. Bei einigen thermischen Nutzungen erfolgt die Rückgabe des Wassers in die Vorflut oder in die ARA und bewirken dadurch keine direkte Erwärmung oder Abkühlung des Grundwasserleiters.

In Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber werden die Datenbanken der Entnahme- und Rückgaben [19][31][32] wie folgt überarbeitet:

- Visualisierung Entnahme-Rückgabe im GIS (vgl. Abbildung 13)
- Lokalisierung von möglichen Unstimmigkeiten (vgl. Abbildung 13)
- Anpassung der Datenbank falls erforderlich

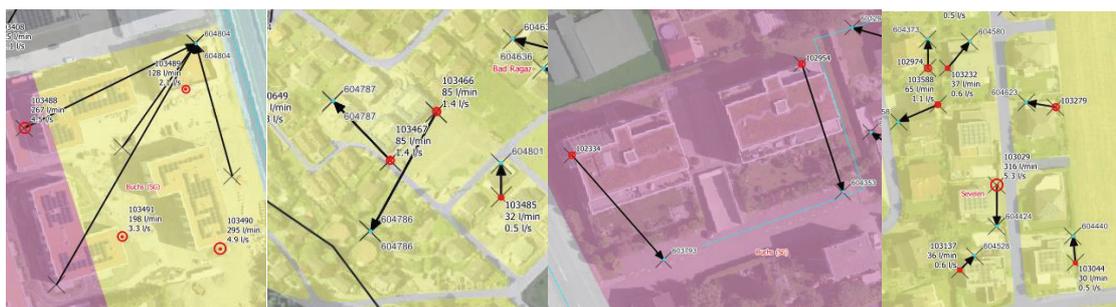


Abbildung 13: Beispiele für Unstimmigkeiten in der Datenbank der thermischen Anlagen: Verbindungen zwischen Entnahme und Rückgabe (schwarze Pfeile), Entnahme- und Rückgabestandort gemäss [19] (schwarze Kreuze), Entnahme- und Rückgabestandorte gemäss [31][32] (rote und hellblaue Kreise bzw. Punkte). 1. Bild: Unstimmigkeit zwischen den Entnahmestandorten in [19][31]. 2. Bild: Versickerung auf fremdem Grundstück. 3. und 4. Bild: Rückgabe gegen Fließrichtung.

7.8.2 Abschätzung der thermischen Nutzung

Neben den Jahresverbrauchsdaten bei wenigen Anlagen [19] liegen keine Messungen der Entnahme- und Rückgabemenge vor. Da der Heiz- und Kühlbedarf saisonal stark variiert, ist es aber erforderlich, die Entnahme- und Rückgabemenge instationär abzuschätzen. Entsprechend dem Modellierungskonzept (vgl. Kap. 4) und aufgrund der Datenbasis werden vereinfachte Annahmen getroffen. Zuerst müssen die einzelnen thermischen Anlagen bzw. Entnahme- und Rückgabestandorte bzgl. ihrer mittleren Jahresmengen und der Temperaturdifferenz zwischen Entnahme und Rückgabe aufbereitet werden. Dabei wird folgendermassen vorgegangen (vgl. Tabelle Anhang 1):

- Anhand der Angabe «Verwendungszweck» in [19] und der Grundnutzung gemäss Zonenplan wird der Anteil an Kühlnutzung pro Anlage abgeschätzt (Spalte «Anteil Kühlen» in der Tabelle von Anhang 1) und der Kühlnutzungstyp (Industrie (I) oder Wohn- oder Geschäftszone (W/G)) angenommen (Spalte «Typ Kühlen»). Eine Anlage (zu identifizieren über die Nummer in der Spalte «VERZNR») kann mehreren Entnahme- und Rückgabebrunnen beinhalten.
- Bei den wenigen Anlagen, wo keine Angabe zur Konzessionsentnahme vorhanden ist, wird ein Wert anhand der installierten Leistung in [19] abgeschätzt (rote Werte in Spalte «Q Anlage Konzession»).
- Der Ausnutzungsgrad der konzessionierten Jahresmenge wird pro Anlage anhand der Jahresverbrauchsdaten in [19] definiert (Spalte «Ausnutzung»). Teilweise ist der Jahresverbrauch grösser als die konzessionierte Menge. Wenn keine Angaben vorhanden sind, wird ein Wert von 80 % angenommen (rote Werte).
- Berechnung des tatsächlichen Verbrauchs für Kühl- und Heizzwecke (Spalten «Q Anlage Kühlen» und «Q Anlage Heizen») anhand der Ausnutzung und des Anteils an Kühlen- und Heizen pro Anlage.
- Aufteilung der Entnahme- bzw. Rückgabemenge bei den Anlagen, die mehrere Entnahme- bzw. Rückgabestandorte (Spalte «Aufteilung Entnahmen» und «Aufteilung Rückgaben») aufweisen. In den meisten Fällen sind keine Angaben vorhanden, weshalb eine gleichmässige Aufteilung angenommen wird. Falls keine Rückgabe in den Grundwasserleiter erfolgt (Spalte «Rückgabe»), ist in der Spalte «Aufteilung Rückgabe» kein Wert angegeben.
- Berechnung der tatsächlichen jährlichen Entnahme- und Rückgabemenge pro Entnahme- und Rückgabestandort, aufgeteilt auf Kühl- und Heiznutzung (Spalten «Q Entnahme Kühlen», «Q Entnahme Heizen», «Q Rückgabe Kühlen» und «Q Rückgabe Heizen»).
- Annahme bzgl. Temperaturdifferenz zwischen Entnahme- und Rückgabewasser anhand der installierten Leistung in [19], falls keine Angabe vorhanden ist (Spalten « ΔT Kühlen» und « ΔT Heizen»). Falls keine Rückgabe in den Grundwasserleiter erfolgt (Spalte «Rückgabe»), ist keine Temperaturdifferenz angegeben.

Die Aufbereitung der thermischen Anlagen mit Grundwasserentnahme ergeben in der Summe folgende Kennwerte:

- Kältenutzung
 - Entnahme: 6.0 Mio. m³/a (190 l/s)

- Rückgabe ins Grundwasser: 2.4 Mio. m³/a (75 l/s)
- Mittlere Leistung bei Anlagen mit Rückgabe ins Grundwasser: 1.6 MW
- Thermische Energiemenge bei Anlagen mit Rückgabe ins Grundwasser: 13.7 GWh/a
- Wärmenutzung
 - Entnahme: 9.0 Mio. m³/a (286 l/s)
 - Rückgabe ins Grundwasser: 7.2 Mio. m³/a (229 l/s)
 - Mittlere Leistung bei Anlagen mit Rückgabe ins Grundwasser: 3.8 MW
 - Thermische Energiemenge bei Anlagen mit Rückgabe ins Grundwasser: 33.2 GWh/a

Für die instationäre Auslastung der thermischen Anlagen werden die gemessenen Lufttemperaturen [17] herangezogen. Die Berechnung der Auslastung für Heizanlagen erfolgt mit einem linearen Ansatz (100 % bei -5.0 °C Tagesmittelwert Temperatur, 0 % bei 12.0 °C). Es wird angenommen, dass die Anlagen auch für Warmwasser eingesetzt werden. Bei Annahme eines Verhältnisses des Jahresenergiebedarf zwischen Warmwasser und Heizen von 1:3 und einem konstanten Warmwasserbedarf resultiert die instationäre Auslastung in Abbildung 14. Die mittlere Auslastung beträgt 39.7 %.

Bei den Kühlanlagen erfolgt die Berechnung der instationären Auslastung ebenfalls anhand der Lufttemperaturmessung und mit einem linearen Ansatz (Kühlanlagen in Wohn- bzw. Gewerbegebieten: 0 % bei 16.0 °C, 100 % bei 25.0 °C, Kühlanlagen in Industriezonen: 50 % bei 0.0 °C, 100 % bei 30.0 °C). Die mittlere Auslastung errechnet sich zu 15.6 % (Wohnen/Gewerbe) bzw. 69.7 % (Industrie).

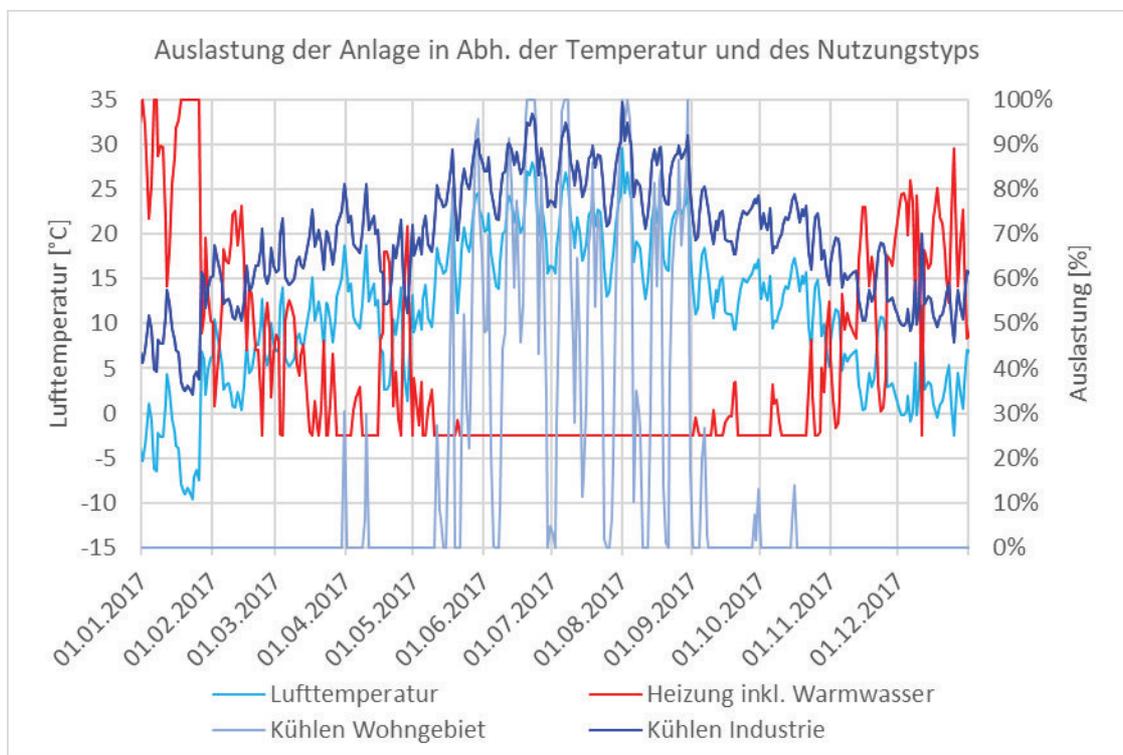


Abbildung 14: Auslastung der Anlage in Abhängigkeit der Temperatur und des Nutzungstyps

Bei der Modellierung wird anhand der Temperaturdifferenzen zwischen Entnahme- und Rückgabe (Anhang 1) die Rückgabetemperatur bei jedem Zeitschritt anhand der Entnahmetemperatur aktualisiert. Die Anlagen mit einer Rückgabe in die Vorflut oder in die ARA werden thermisch nicht berücksichtigt. Berücksichtigt wird nur die Entnahmemenge und entsprechend die hydraulische Beeinflussung des Grundwasserleiters.

Die Entnahme bzw. Rückgabe wird im Modell in einer Tiefe von 5 – 10 m unter dem Grundwasserspiegel angenommen.

7.9 Thermische Anlagen ohne Grundwasserentnahme und -rückgabe

7.9.1 Übersicht und Datenaufbereitung

Bei den thermischen Anlagen ohne Grundwasserentnahme und -rückgabe handelt es sich gemäss Datenbank [20][26] um Erdwärmesondenanlagen, Energiepfahlanlagen und Erdregister. Rund 1'700 Erdwärmesondenanlagen liegen innerhalb des Modellgebiets. Energiepfahlanlagen bzw. Erdregister sind mit 35 bzw. 10 Anlagen wesentlich seltener.

Erdwärmesonden werden auf Grundlage der Erdwärmesondenkarte bewilligt [37]. Die Karte weist drei Zulässigkeitsstufen auf: gelb, braun und rot. Es gibt Gebiete, wo Erdwärmesonden zulässig (Zulässigkeitsstufe gelb) bzw. bedingt zulässig (braun) sind. In Gebieten mit nutzbarem Grundwasservorkommen (Mächtigkeit > 2 m gemäss Grundwasserkarte [21]) sind Erdwärmesonden in der Regel nicht zulässig (rot). Es gibt allerdings einige Ausnahmen, die sich ausschliesslich auf Gebiete beziehen, wo das Grundwasser sauerstoffreduziert ist und gleichzeitig Bauzonen ausgeschieden sind (z.B. Sargans, Diepoldsau, Widnau, Au, St. Margrethen).

Wie bereits in Kapitel 7.8.1 erwähnt, weisen einige Siedlungsgebiete mehrheitlich oder ausschliesslich thermische Nutzungen in Form von Erdwärmesonden auf (z.B. Altstätten). In anderen Siedlungsgebieten gibt es wenige oder keine thermischen Anlagen mit Grundwasserentnahme und -rückgabe, sondern mehrheitlich oder ausschliesslich Anlagen in Form von Erdwärmesonden (z.B. Bad Ragaz). Die Standorte sind in den Beilagen zu finden.

Der vorhandene Datensatz [20] enthält Angaben über die installierte Leistung, die Sondenanzahl und die Sondenlänge. Bei den Erdwärmesondenanlagen beträgt die Bohrtiefe wenige 10 m bis über 300 m. Die mittlere Tiefe beträgt 150 m. Die meisten Anlagen bestehen aus weniger als 10 Sonden. Bei den Energiepfahlanlagen beträgt die Tiefe 6 – 24 m, die Anlagen bestehen aber aus einer Vielzahl an Pfählen. Erdregister bestehen aus oberflächennahen Erdkolektorkreisläufen, die eine Gesamtlänge von 100 bis über 4'000 m aufweisen.

7.9.2 Abschätzung der thermischen Nutzung

Von den thermischen Anlagen ohne Grundwasserentnahme und -rückgabe liegen keine Messwerte vor. Analog zu den thermischen Anlagen mit Grundwasserentnahme ist es erforderlich, die thermische Nutzung instationär abzuschätzen. Entsprechend dem Modellierungskonzept (vgl. Kap. 4) und aufgrund der Datenbasis werden vereinfachte Annahmen getroffen. Dabei wird folgendermassen vorgegangen:

- Es kann davon ausgegangen werden, dass die thermischen Anlagen ohne Grundwasserentnahme und -rückgabe aufgrund der Angaben in der Datenbank [20] hauptsächlich für Heizzwecke eingesetzt werden. Entsprechend werden die Anlagen mittels Entzugsleistungen bei der Modellierung berücksichtigt.
- Anhand der Tiefe, aus welcher die Anlage die Wärme dem Untergrund entzieht und anhand der installierten Leistung in [20] wird die spezifische Entzugsleistung in W/m berechnet. Dabei wird angenommen, dass der Wärmeentzug in der gesamten Tiefe gleichmässig erfolgt.
- Berechnung der Entzugsleistung in W bei den einzelnen Modellknoten, die eine Anlage abbilden, unter Berücksichtigung der Geometrie (anhand des repräsentativen Volumens des Modellknotens). Viele Erdwärmesonden durchstossen den Grundwasserstauer und liegen dadurch teilweise ausserhalb des Modellgebiets. Bei der Modellierung wird nur der Wärmeentzug aus dem Grundwasserleiter berücksichtigt.
- Für die instationäre Auslastung der thermischen Anlagen wird die gleiche Ganglinie wie bei den thermischen Heizanlagen mit Grundwasserentnahme angesetzt (Abbildung 14).

Die Aufbereitung der thermischen Anlagen ohne Grundwasserentnahme und -rückgabe ergeben in der Summe folgende Kennwerte:

- Mittlere Entzugsleistung aus dem Grundwasserleiter: 1.3 MW
- Thermische Energiemenge aus dem Grundwasserleiter: 11.7 GWh/a

8 Hydrothermische 3D-Grundwassermodellierung

8.1 Szenarien und Vorgehensweise

In Anlehnung an das Konzept [2] werden neben der Abschätzung des thermischen Potenzials, auf die in Kapitel 9 eingegangen wird, die in Tabelle 3 aufgelisteten drei Szenarien modelliert.

Tabelle 3: Szenarienübersicht

Szenario	Beschreibung	Berechnung
Szenario 1: Natürlicher Zustand	Dieses Szenario bildet die natürlichen thermischen Grundwasserverhältnisse im St.Galler Rheintal ab, ohne Trink- und Brauchwassernutzung (Kap. 7.1), thermische Nutzungen (Kap. 7.8 und 7.9) und die in Kapitel 7.7 thematisierte thermische Beeinflussung durch Gebäude. Der Einfluss weiterer menschlicher Eingriffe werden allerdings nicht abgebildet (Gewässerkorrektur, Klimawandel, etc.). Diesbezüglich wird vom heutigen Zustand ausgegangen. Dieses Szenario dient primär als Referenzszenario für den Vergleich mit den Szenarien 2 und 3.	Stationäre & instationäre Berechnung
Szenario 2: Istzustand ohne thermische Nutzung	Dieses Szenario zeigt die Auswirkung menschlicher Eingriffe auf die Grundwassertemperatur durch Gebäude (vgl. Kap. 7.7) und durch Strömungsveränderung aufgrund von Trink- und Brauchwassernutzungen (Kap. 7.1), ausgenommen der thermischen Nutzungen (Kap. 7.8 und 7.9).	Stationäre Berechnung
Szenario 3: Istzustand mit thermischer Nutzung	Dieses Szenario zeigt die Auswirkung aller menschlicher Eingriffe, inklusive der heutigen bewilligten thermischen Anlagen (Kap. 7.8 und 7.9).	Stationäre & instationäre Berechnung

Um die Zuverlässigkeit des Modells aufzuzeigen, wird das Modell anhand des bestehenden 2D-Grundwassermodells (Kap. 8.2.1) und anhand der Temperaturmessungen (Kap. 8.2.2) validiert. Die Validierung muss anhand des Istzustands mit thermischer Nutzung (Szenario 3) erfolgen, da sowohl das bestehende 2D-Modell als auch die Temperaturmessungen den Istzustand repräsentieren. Die Berechnung erfolgt sowohl stationär als auch instationär, um einerseits die mittlere Temperaturverteilung im gesamten Modellgebiet mit den mittleren gemessenen Temperaturen und andererseits die Temperaturschwankungen mit den gemessenen Temperaturganglinien vergleichen zu können. Das Ergebnis der stationären Berechnung dient als Anfangszustand für die instationäre Berechnung der Zeitperiode 2013 – 2017.

Entsprechend dem vorhandenen instationären Datensatz [11] wird die Berechnung mit einer Zeitschrittweite von einem Tag durchgeführt. Eine weitere Zeitschrittverfeinerung ist aufgrund des Stabilitätskriteriums bei der Modellierung von Transportprozessen nötig. Die Zeitschrittweite für den Transport beträgt 20 Minuten (Faktor 72 gegenüber der Zeitschrittweite für die Strömungsberechnung).

Nach erfolgter Validierung werden die übrigen Szenarien (natürlicher Zustand und Istzustand ohne thermische Nutzung) berechnet und die Ergebnisse in den Kapiteln 8.3 und 8.4 diskutiert. Die Berechnung von Szenario 2 (Istzustand ohne thermische Nutzung) erfolgt nur stationär, da hier nur der mittlere Zustand von Interesse ist. Der natürliche Zustand wird sowohl stationär als auch instationär modelliert, um als Referenzzustand für die instationäre Berechnung des Istzustands mit thermischer Nutzung (Szenario 3) herangezogen werden zu können. Auch dem natürlichen Zustand dient das stationäre Ergebnis als Anfangszustand für die instationäre Berechnung.

8.2 Modellvalidierung

8.2.1 Vergleich mit 2D-Modell

Das aus dem bestehenden 2D-Grundwassermodell erstellte 3D-Modell wird hydraulisch bezüglich Grundwasserspiegellage und Bilanzmengen mit dem kalibrierten 2D-Modell verglichen. Es ist möglich, dass die Randbedingungen und Materialeigenschaften aufgrund der Berücksichtigung der ungesättigten Zone und der Vertikalströmung im 3D-Modell stellenweise angepasst werden müssen, um den Ergebnissen des 2D-Modells zu entsprechen. Die Erfahrung zeigt, dass die Überführung in der Regel problemlos erfolgt. Das ist auch im vorliegenden Modell der Fall.

Nach der ersten 3D-Modellberechnung zeigten sich im Nahbereich des Rheins teilweise Differenzen von bis zu 1.0 m. Dies macht deutlich, dass die Unterströmung des Rheins nicht zu vernachlässigen ist. Wenn an der östlichen Modellgrenze entlang des Talwegs des Rheins die berechneten Grundwasserpotentiale aus dem 2D-Modell [11] als Randbedingung beim 3D-Modell angesetzt werden (vgl. Kap. 7.2), betragen die Differenzen im Nahbereich des Rheins weniger als 0.1 m. Weiter muss bei einigen Gewässern der Leakagekoeffizient angepasst werden, um die berechnete Leakagemenge des 2D-Modells wiederzugeben.

Nach erfolgter Anpassung des 3D-Modells gibt es nur noch wenige Stellen, wo die Differenz zum 2D-Modell mehr als 0.2 m beträgt. Dies betrifft hauptsächlich Randgebiete, wo der Grundwassergradient steil und der Grundwasserspiegel aufgrund der geringen Messdatendichte grössere Unsicherheiten aufweist als in der Talmitte. Das 3D-Modell kann aufgrund der erfolgten Validierung im Hinblick auf die hydraulische Zuverlässigkeit für die thermischen Fragestellungen eingesetzt werden.

Die berechnete Strömungsbilanz für mittlere Grundwasserverhältnisse ist in Tabelle 4 ersichtlich. Die Bilanzmengen entsprechen der Strömungsbilanz des 2D-Modells für den Modellbereich St.Gallen, mit Ausnahme der Entnahme- und Rückgabemengen der thermischen Anlagen, die im 2D-Modell nicht berücksichtigt sind (siehe Kap. 5.1). Es resultiert ein totaler Grundwasserumsatz von 11'680 l/s, wobei die Entnahmen und Rückgaben für thermische Zwecke nur einen Anteil von 4.1 bzw. 2.6 % ausmachen. Auf der Wegflusseite der Strömungsbilanz überwiegt der Anteil der Exfiltrationsmengen der Oberflächengewässer. Die Grundwasserneubildung durch Niederschlag sowie die Infiltrationsmengen der Oberflächengewässer liegen auf der Zuflusseite in einem ähnlichen Wertebereich.

Tabelle 4: Mittlere Strömungsbilanzgrössen

Strömungsbilanzgrösse	Zufluss [l/s]	Wegfluss [l/s]
Grundwasserneubildung durch Niederschlag	3'080	
Randzufluss aus den angrenzenden Einzugsgebieten	1'370	
Leakagemengen Oberflächengewässer	3'320	7'840
Unterirdischer Grundwasserzu- und -wegfluss (südlicher Rand, unterhalb Rhein, Bodensee)	3'610	3'120
Entnahmemengen von Brauchwasserbrunnen und Grundwasserfassungen der öffentlichen Grundwasserversorgungen		240
Entnahmen für thermische Anlagen		480
Rückgaben aus thermischen Anlagen	300	
Total	11'680	11'680

8.2.2 Vergleich der mittleren Grundwassertemperatur

Wie in Kapitel 7 erwähnt, müssen während des Validierungsprozesses die Randbedingungen teilweise iterativ überarbeitet werden. Die im vorliegenden Kapitel beschriebenen Modellergebnisse stellen den endgültigen Zustand dar.

Auf die Temperaturmessungen im Grundwasser, die für die Validierung des Modells herangezogen werden können, wird in Kapitel 3.2 eingegangen. Die gemessenen mittleren Grundwassertemperaturen sind in Beilage 1 zusammen mit der modellierten mittleren Grundwassertemperaturverteilung dargestellt. Ebenfalls dargestellt sind die Standorte der Grundwasserentnahmen und -rückgaben, die Standorte der thermischen Anlagen ohne Grundwasserentnahme und -rückgabe sowie die Gebäudeflächen.

Die berechnete Temperaturverteilung zeigt in Bad Ragaz deutlich den Einfluss des kühlen, zufließenden Grundwasserstroms von Graubünden. Ebenfalls deutlich zu erkennen sind die Bereiche, wo grosse Infiltrationsmengen aus dem Alpenrhein vorhanden sind, welche die Grundwassertemperatur beeinflussen. Auch an den Talrändern gibt es aufgrund des kühleren Randzuflusses Gebiete mit verhältnismässig geringen Temperaturen.

Erhöhte Temperaturen sind aufgrund des Wärmeeintrags durch die Gebäude in den Siedlungsgebieten auszumachen. Ebenfalls kommt es durch die thermische Nutzung zu lokalen Temperaturanomalien. Diese menschlichen Einflüsse lassen sich aber besser durch Temperaturdifferenzen gegenüber dem natürlichen Zustand darstellen als durch absolute Temperaturen, weshalb an dieser Stelle auf Kapitel 8.4 und 8.5 verwiesen wird.

In Abbildung 15 sind die gemessenen den modellierten mittleren Temperaturen gegenübergestellt. Pegel mit zu kurzen Messreihen, um einen zuverlässigen Mittelwert berechnen zu können, werden nicht berücksichtigt. Der mittlere absolute Fehler beträgt 0.56 °C. Bei über 85 % der Pegel ist die Differenz kleiner als 1.0 °C. Bei einem Pegel liegt die Differenz bei über 2.0 °C. Dem Charakter eines Regionalmodells und dem Modellierungskonzept entsprechend (vgl. Kap. 4) weist das hydrothermische 3D-Grundwassermodell im Hinblick auf die mittlere Grundwassertemperatur eine genügende Zuverlässigkeit auf, um für die thermischen Fragestellungen eingesetzt zu werden.

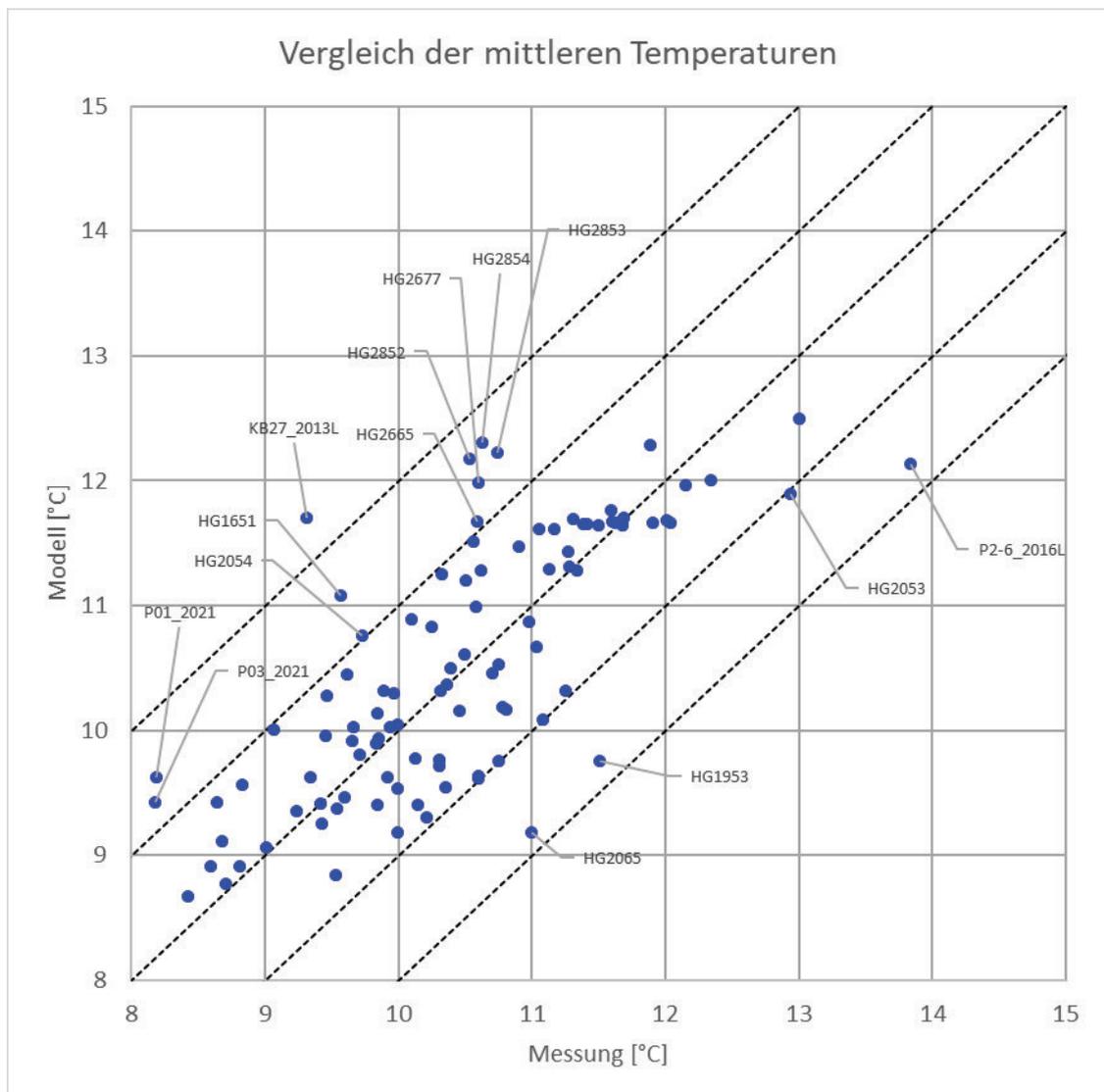


Abbildung 15: Vergleich der gemessenen und modellierten mittleren Temperaturen

8.2.3 Vergleich der Temperaturganglinien

Anhang 2 zeigt die gemessenen und modellierten Temperaturganglinien bei den Messstellen der Hydrometrie St.Gallen [12] und der IRR [15]. Auf die Charakteristik der gemessenen Grundwassertemperaturen im Grundwasser wird in Kapitel 3.2 eingegangen.

Das instationäre Modell zeigt analog zu den Messungen die typische Phasenverschiebung der Temperaturmaxima und -minima gegenüber der Lufttemperatur von wenigen Wochen bis zu mehreren Monaten. Bei einigen Messstellen ist die Übereinstimmung zwischen Messung und Modell sehr gut (z.B. HG3351, HG2668, HG2052, HG2062). Bei anderen Messstellen zeigen sich im Modell zu geringe Temperaturschwankungen wie beispielsweise in Bad Ragaz (HG3660, HG3659, HG3667). Das hängt vermutlich damit zusammen, dass der unterirdische Grundwasserzufluss aus Graubünden im Modell mit einer festen Temperatur angesetzt wird. Es gibt auch Messstellen, bei denen das Modell die Temperaturschwankungen überschätzt (z.B. HG2151,

HG1752). Weiter unten wird auf mögliche Ursachen der genannten Abweichungen eingegangen.

Vereinzelt zeigt sich bei Messstellen im Nahbereich des Rheins im Modell ein leicht ansteigender Trend der Grundwassertemperatur (z.B. HG2854). Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass bei der instationären Modellierung im Sommer aufgrund des erhöhten Wasserspiegels verhältnismässig mehr warmes Wasser in den Grundwasserleiter gelangt als im Winter kaltes Wasser. Die mittlere, modellierte Temperatur im stationären Modell entspricht dadurch nicht exakt der mittleren, langjährigen Temperatur des instationären Modells.

Allgemein kann festgehalten werden, dass sich kleinräumige Heterogenitäten im Grundwasserleiter, die sich mit einem Regionalmodell nur annähernd erfassen lassen, bei der Temperaturverteilung im Untergrund stärker auswirken als bei den Grundwasserpotentialen. Folgende Phänomene können für grössere Abweichungen bei einigen Pegeln sowohl beim Auftreten der Extrema als auch bei den Temperaturschwankungen sorgen:

- Bei den Messstellen kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Oberflächentemperatur über Wärmeleitung im Filterrohr die Temperatur im Untergrund beeinflusst, wodurch die Extrema rascher erreicht werden als im Modell (erhöhte vertikale Wärmeleitung).
- Wird beispielsweise die Infiltration eines Oberflächengewässers im Modell lokal über bzw. unterschätzt, ist es möglich, dass bei einem nahegelegenen Pegel die Extrema früher bzw. später erreicht werden und die Schwankungen höher bzw. tiefer ausfallen als in Realität (erhöhter bzw. verringerter advektiver Wärmestrom).
- Geneigt liegende, lokal vorkommende hochdurchlässige Kieslinsen oder Stauerschichten können Vertikalströmungen verursachen, wodurch lokal ein rascheres bzw. langsames Ausbreiten von Temperaturschwankungen im Untergrund verursacht wird (erhöhter bzw. verringerter advektiver Wärmestrom in der Vertikalen).
- Horizontal liegende Stauerschichten können einen vertikalen Austausch von Grundwasser lokal unterbinden, wodurch sich die Temperatur nur durch Wärmeleitung durch die Stauerschicht ausbreiten kann und dadurch die Schwankungen möglicherweise gedämpft werden.

8.3 Natürlicher Zustand (Szenario 1)

Die Berechnung des Szenarios 1 (natürlicher Zustand) erfolgt stationär und instationär für die Zeitperiode 2013 – 2017. Analog zu Szenario 3 wird eine Zeitschrittweite von einem Tag und eine Zeitschrittverfeinerung für den Wärmetransport mit einem Faktor 72 gewählt. Wie bereits in Kapitel 8.1 erwähnt, dient dieses Szenario als Referenzzustand für den Vergleich mit den Szenarien 2 und 3, insbesondere für die Darstellung der Temperaturdifferenzkarten. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle darauf verzichtet, das Ergebnis des Szenarios 1 detailliert darzustellen.

8.4 Istzustand ohne thermische Nutzung (Szenario 2)

Beilage 2 zeigt die Temperaturdifferenz bei mittleren Verhältnissen gegenüber dem natürlichen Zustand aufgrund der menschlichen Eingriffe durch Gebäude (vgl. Kap. 7.7) und durch

Strömungsveränderung aufgrund von Trink- und Brauchwassernutzungen (Kap. 7.1), ausgenommen der thermischen Nutzungen (Kap. 7.8 und 7.9).

Der Einfluss des Wärmeeintrags durch die Gebäude in den Siedlungsgebieten ist deutlich zu erkennen. Mehrheitlich ist gemäss der Modellierung ein Temperaturanstieg von weniger als 1.0 °C zu erwarten. Stellenweise werden aber grössere Temperaturdifferenzen modelliert, insbesondere im Bereich von grossflächigen Gebäuden, wo die Temperatur lokal um über 3 °C ansteigt. Die Temperaturanomalie erholt sich im Allgemeinen verhältnismässig schnell; in einer Distanz von 200 m stromabwärts der Siedlungsgebiete beträgt der Temperaturanstieg in der Regel weniger als 0.1 °C.

In Bereichen mit grossem Flurabstand haben die Gebäude einen untergeordneten Einfluss auf die Grundwassertemperatur. So zeigen sich beispielsweise in Bad Ragaz und Vilters nur geringe Temperaturanstiege.

Im Bereich der Entnahmebrunnen Viscose in Widnau sinkt die Grundwassertemperatur lokal um über 0.5 °C ab. Grund dafür ist die Veränderung der Grundwasserströmung, verursacht durch die Grundwassernutzung, wodurch grössere Mengen an kaltem Rheinfiltrat in den Grundwasserleiter gelangen.

8.5 Istzustand mit thermischer Nutzung (Szenario 3)

8.5.1 Stationär

Auf Szenario 3 (Berücksichtigung aller menschlichen Eingriffe) wurde bereits bei der Modellvalidierung eingegangen (Kap. 8.2). An dieser Stelle wird die Differenz zum natürlichen Zustand veranschaulicht. Beilage 3 zeigt die Temperaturdifferenz bei mittleren Verhältnissen gegenüber dem natürlichen Zustand. Neben dem Temperaturanstieg, der vom Wärmeeintrag der Gebäude verursacht wird (vgl. Szenario 2), zeigen sich bei diesem Szenario auch die Auswirkungen der thermischen Nutzung.

Je nach Typ der thermischen Anlage (Kühlen bzw. Heizen) ergeben sich im Abstrom der Rückgaben gegenüber dem natürlichen Zustand Kälte- bzw. Wärmefahnen. Die Ausdehnung und Form der Temperaturanomalie hängt stark mit der Grösse der Anlage und der Strömungsrichtung des Grundwassers zusammen. Im Nahbereich der Rückgaben zeigen sich stellenweise Temperaturdifferenzen von mehreren Grad Celsius. Im Abstrombereich nähern sich die Temperaturen grossräumig betrachtet in der Regel schnell der natürlichen Temperatur an, wodurch die Temperaturfahnen eine maximale Länge von wenigen 100 m aufweisen.

In einigen Gebieten kommt es zu einer Akkumulation der Temperaturanomalie und zu entsprechend ausgedehnteren Temperaturfahnen, wie beispielsweise im westlichen Randbereich von Bad Ragaz. Hier liegen einige thermische Anlagen mit Wärmenutzung hintereinander, wodurch dem jeweiligen Unterlieger kühleres Wasser bei der Entnahme zur Verfügung steht. In Abbildung 16 ist ein Histogramm dargestellt, das die Temperaturdifferenz bei den Entnahmestandorten gegenüber dem Zustand ohne thermische Nutzung (Szenario 2) darstellt. Mehrheitlich sind die Entnahmestandorte durch eine Abkühlung des Grundwassers betroffen, verursacht

durch oberstromige Wärmenutzungen. 86 % der Entnahmen zeigen eine Temperaturdifferenz von weniger als 0.5 °C.

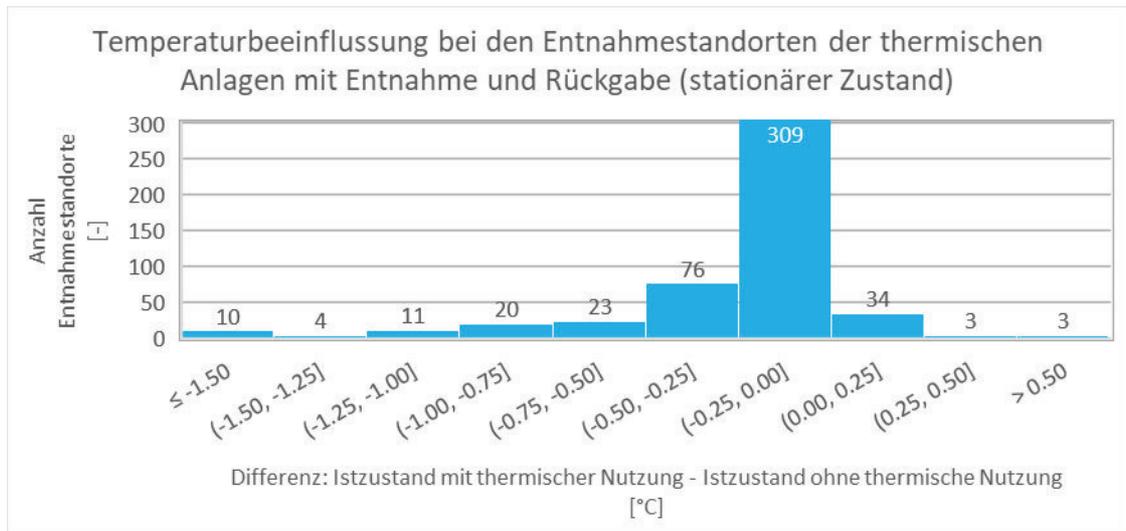


Abbildung 16: Temperaturbeeinflussung bei den Entnahmestandorten der thermischen Anlagen mit Entnahme und Rückgabe (stationärer Zustand)

Eine Abkühlung des Grundwasserleiters durch Erdwärmesonden ist nur vereinzelt bei grossen Anlagen festzustellen. Die Energieentzugsdichte ist in der Regel gegenüber den thermischen Anlagen mit Grundwasserentnahme und -rückgabe verhältnismässig gering. Wesentlich grösser ist die Wärmeentzugsdichte bei Energiepfahlanlagen, wodurch sich in deren Nahbereich Temperaturdifferenzen gegenüber dem natürlichen Zustand von teilweise mehreren Grad Celsius einstellen. So sind die Abkühlungen beispielsweise in Sargans hauptsächlich auf solche Anlagen zurückzuführen.

8.5.2 Instationär

Die Ergebnisse der instationären Berechnung zeigen, dass die Temperaturdifferenz gegenüber dem natürlichen Zustand, grossräumig betrachtet, nur einer geringen Dynamik unterworfen ist. Das hängt einerseits damit zusammen, dass die Geschwindigkeit der Temperaturentbreitung aufgrund des Wärmeaustauschs mit der Matrix wesentlich langsamer ist als die Fließgeschwindigkeit des Grundwassers. Dadurch können sich erwärmte oder abgekühlte Bereiche des Grundwasserleiters über mehrere Monate halten. Andererseits zeigt Abbildung 14, dass der angesetzte Jahresgang der Auslastung der Heiz- und industriellen Kühlanlagen nicht in grossem Ausmass von der mittleren Auslastung abweicht; Die Heizanlagen werden auch in den Sommermonaten für die Warmwasserbereitstellung verwendet. Bei den industriellen Kühlanlagen wird davon ausgegangen, dass der Bedarf an Kühlleistung nur in geringem Ausmass mit der Lufttemperatur zusammenhängt.

9 Abschätzung thermisches Potenzial

9.1 Annahmen und Vorgehensweise

Mit dem erstellten und validierten hydrothermischen 3D-Grundwassermodell werden Richtwerte für die potenzielle thermische Nutzung des Lockergestein-Grundwasserleiters des St.Galler Rheintals entsprechend dem Modellierungskonzept (Kap. 4) abgeschätzt. In Anlehnung an das Konzept von 2021 [2] werden bei der Potenzialabschätzung folgende Bedingungen berücksichtigt:

- Die obersten 20 m des Grundwasserleiters stehen für die thermische Nutzung zur Verfügung. Die Abschätzung des Potenzials erfolgt also für diesen Bereich.
- Die Potenzialabschätzung in der vorliegenden Studie beschränkt sich auf die Siedlungsgebiete. Das Potenzial ausserhalb des Siedlungsgebiets wird nicht ermittelt.
- Die Potenzialabschätzung beschränkt sich auf die Bestimmung des Wärmepotenzials. Anhand des bestimmten Wärmepotenzials werden im Anschluss an die Modellierung Rückschlüsse auf das Kältepotenzial gezogen.
- Die Potenzialabschätzung erfolgt unter Berücksichtigung der gesetzlichen Rahmenbedingungen [39][40], die besagen, dass die Grundwassertemperatur nicht mehr als 3 °C gegenüber dem natürlichen Zustand verändert werden darf.

Wie bereits im Konzept [2] festgehalten, erfolgt die Potenzialabschätzung unter folgenden Annahmen:

- Bei allen zukünftigen Anlagen erfolgt eine Rückgabe ins Grundwasser, so dass bezüglich der Strömungsbilanz keine Veränderung gegenüber dem Istzustand resultiert und die hydraulische Ergiebigkeit des Grundwasserleiters nicht ausgeschöpft wird.
- Die Standorte der zukünftigen Entnahmen und Rückgaben sind so weit voneinander entfernt, so dass keine thermische Rückkopplung entsteht.
- Durch die Entnahmen und Rückgaben wird die Grundwasserströmung grossräumig auf das Siedlungsgebiet betrachtet nicht verändert, wodurch der Ansatz einer rein thermischen Potenzialabschätzung gerechtfertigt ist (siehe unten).

Es ist ein iteratives Vorgehen erforderlich. Die Siedlungsgebiete werden in Teilgebiete unterteilt. Bei den einzelnen Teilgebieten wird flächig eine fiktive thermische Entzugsleistungen in einer Tiefe von 5 – 20 m unter dem Grundwasserspiegel ohne Entnahme- und Rückgabemenge (siehe oben) definiert. Die Werte werden iterativ so eingestellt, dass eine maximale Ausnutzung pro Siedlungsgebiet bzw. pro Teilgebiet erfolgt. In Realität erfolgt der Wärmeentzug punktuell, wodurch es lokal zu grösseren Temperaturdifferenzen kommen kann, was innerhalb von 100 m auch im gesetzlichen Rahmen ist. Dies wird in der vorliegenden Studie nicht untersucht.

Die Berechnung erfolgt stationär und ohne Berücksichtigung des Wärmeeintrags durch Gebäude. Mit diesem konservativen Ansatz wird sichergestellt, dass das ermittelte Potenzial pro Teilgebiet gegenüber der Realität nicht überschätzt wird. Ebenfalls nicht berücksichtigt werden

die bestehenden thermischen Anlagen. Die Bewertung bzw. der Vergleich erfolgt im Anschluss an die Potenzialabschätzung.

Die konkrete Vorgehensweise bei der Potenzialabschätzung (bezeichnet als **Szenario 4**) ist folgende:

1. Berechnung des repräsentativen Volumens des Modellknotens.
2. Unterteilen der Siedlungsgebiete in Teilflächen in Anlehnung an den Zonenplan und unter Berücksichtigung der Grundwasserströmung (siehe Beilage 4).
3. Abschätzen des spezifischen Wärmeentzugs (W/m^3) pro Teilfläche.
4. Berechnung des Wärmeentzugs pro Modellknoten (W) unter Berücksichtigung des repräsentativen Volumens des Modellknotens.
5. Stationäre thermische Berechnung anhand der natürlichen Randbedingungen und des definierten Wärmeentzugs.
6. Berechnung und Bewertung der Grundwassertemperaturdifferenz zum natürlichen Zustand (Szenario 1).

Die Schritte 2. – 6. werden so oft wiederholt, bis eine maximale Ausnutzung unter Berücksichtigung der oben genannten Bedingungen resultiert.

9.2 Ergebnisse

Beilage 4 zeigt das Ergebnis der Potentialabschätzung. Die Temperaturabkühlung beträgt per Definition maximal 3 °C . Die grösste Temperaturdifferenz tritt meistens am unteren Ende der Teilflächen bzgl. der Strömungsrichtung auf. Die Temperaturanomalie akkumuliert sich entsprechend bis zu diesem Bereich. Analog zu Szenario 3 nähert sich die Temperatur im Abstrombereich der Teilflächen in der Regel schnell der natürlichen Temperatur an, wodurch ausserhalb der Siedlungsgebiete nur vereinzelt grössere Flächen mit Temperaturdifferenzen von mehr als 1.0 °C resultieren. In Randbereichen ergibt sich stellenweise keine Abkühlung des Grundwasserleiters, da aufgrund der geringen Grundwassermächtigkeit ($< 5\text{ m}$) kein Wärmeentzug angesetzt wird.

Der abgeschätzte spezifische Wärmeentzugs beträgt je nach Teilfläche $0.05 - 1.00\text{ W/m}^3$. Die unterschiedlichen Werte hängen mit der lokalen Energieergiebigkeit zusammen, die wiederum hauptsächlich von den lokalen Strömungsverhältnissen des Grundwassers beeinflusst wird. So kann beispielsweise im unteren Teil von Bad Ragaz mit einem Wert von 0.5 W/m^3 wesentlich mehr Wärme dem Grundwasserleiter entzogen werden als im oberen Teil (0.1 W/m^3). Neben den lokalen Strömungsverhältnissen kann auch ein oberliegendes Teilgebiet die Entzugsleistung stromabwärts limitieren. So ist beispielsweise das abstromige Teilgebiet von Bad Ragaz stark von den oberliegenden Gebieten beeinflusst, wodurch die spezifische Entzugsleistung mit einem Wert vom 0.2 W/m^3 verhältnismässig gering ist.

Im Rahmen der Studie «Grundwasserbewirtschaftung im Kanton St.Gallen» wurde eine Potenzialbewertung des Rheintaler Grundwasserleiters durchgeführt [4][5]. Hier wurde eine Entzugsleistung von 2 W/m^2 abgeschätzt, die nachhaltig genutzt werden kann. Ein direkter Vergleich mit den angesetzten Werten in der vorliegenden Studie ist nicht möglich, da der Wert flächen- und nicht volumenspezifisch ist. Wird allerdings eine mittlere nutzbare Mächtigkeit

von 10 m angenommen, ergibt sich ein volumenspezifischer Wärmeentzug von 0.2 W/m^3 , der in der gleichen Grössenordnung liegt wie die abgeschätzten Entzugsleistungen der Teilgebiete. Neben den spezifischen Entzugsleistungen sind in Beilage 4 auch die absoluten Werte pro Teilgebiet in kW dargestellt. In der Summe ergibt sich ein Wärmeentzug von total 93 MW. Im Vergleich zur mittleren Leistung der bestehenden Anlagen von total 5.1 MW (vgl. Kap. 7.8.2 und 7.9.2) zeigt sich ein Ausnutzungsgrad von rund 5.4 %. Allerdings gibt es stellenweise wesentlich grössere Ausnutzungsgrade; im oberen Teilgebiet von Bad Ragaz beispielsweise zeigt sich eine Ausnutzung von 35 %, was sich auch in der verhältnismässig grossen Temperaturfahne des Istzustands (Beilage 3) niederschlägt.

Wie oben erwähnt, wurde der Wärmeeintrag durch Gebäude bei der Potenzialabschätzung nicht berücksichtigt. Im Bereich von dicht besiedelten Gebieten mit verhältnismässig grossem Wärmeeintrag durch Gebäude wäre das Potenzial für Wärmenutzungen entsprechend grösser. Da nur wenig Informationen zu den Gebäuden vorliegen und grobe Annahmen getroffen wurden (vgl. Kap. 7.7), lässt sich das dadurch erhöhte Potenzial im Rahmen dieser Studie nicht zuverlässig quantifizieren.

Das Gleiche gilt für das thermische Potenzial für Kältenutzungen. Aufgrund der Erwärmung durch die Gebäude reduziert sich die potenziell nutzbare Temperaturdifferenz von $3 \text{ }^\circ\text{C}$ gegenüber dem natürlichen Zustand. Bei einer Erwärmung des Grundwasserleiters durch die Gebäude von beispielsweise $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, wie das in einigen Siedlungsgebieten aufgrund der getroffenen Annahmen der Fall ist (vgl. Kap. 8.4), würde sich das Kältepotenzial gegenüber dem abgeschätzten Wert um beachtliche 17 % reduzieren.

10 Schlussbemerkung / Fazit

Das vorliegende Dokument beschreibt den Aufbau, die Annahmen und die Anwendung des hydrothermischen 3D-Grundwassermodells des Lockergestein-Grundwasserleiters im St.Galler Rheintal. Anhand des Modells wurden die Temperaturverteilungen des natürlichen Zustands und des Istzustands berechnet und mit den gemessenen Grundwassertemperaturen verglichen und dadurch validiert. Die Resultate zeigen den Einfluss der bestehenden thermischen Anlagen und die Auswirkungen des Wärmeeintrags durch die Gebäude.

Zudem wurde das Grundwassermodell dafür eingesetzt, das thermische Nutzungspotenzial in den Siedlungsgebieten unter Berücksichtigung der gesetzlichen Vorgaben ($\Delta T < 3 \text{ }^\circ\text{C}$) zu bestimmen. Durch das Ansetzen von Entzugsleistungen in einer Tiefe von 5- 20 m unter dem Grundwasserspiegel resultiert ein Wärmepotenzial von 93 MW. Dabei wurde von verschiedenen Annahmen ausgegangen, was die möglichen zukünftigen thermischen Anlagen betrifft (keine thermische Rückkopplung, keine grossräumige Strömungsveränderung durch die Nutzungen, genutztes Wasser wird vollumfänglich wieder zurückgegeben). Das Nutzungspotenzial der einzelnen Siedlungsgebiete unterscheidet sich aufgrund der lokalen Strömungsverhältnisse im Grundwasser teilweise erheblich. Die Werte liegen zwischen $0.05 - 1.00 \text{ W/m}^3$. Der momentane mittlere Ausnutzungsgrad des thermischen Potenzials errechnet sich zu 5.4 %. In einigen Gebieten ist der Ausnutzungsgrad aber wesentlich höher.

Das Kältepotenzial wurde nicht direkt abgeschätzt. Es kann aber festgehalten werden, dass durch den Wärmeeintrag der Gebäude die potenziell nutzbare Temperaturdifferenz von $3 \text{ }^\circ\text{C}$ gegenüber dem natürlichen Zustand reduziert ist und dadurch auch das Kältepotenzial gegenüber dem Wärmepotenzial geringer ausfällt.

11 Ausblick

Es wird empfohlen, regelmässige Aktualisierungen des aufgebauten 3D-Grundwassermodells durchzuführen, indem neue Entnahmen und Bauwerke sowie neue hydrogeologische Erkenntnisse eingebaut und berücksichtigt werden. Dadurch lassen sich die Unsicherheiten im Modell minimieren. Ein regelmässiger Abgleich mit dem übergeordneten 2D-Grundwassermodell der IRKA [11] wird ebenfalls empfohlen. Durch die periodische Modellpflege steht dem AWE St.Gallen auch in Zukunft ein aktuelles Instrument bei der Entscheidungsfindung im Rahmen von thermischen Fragestellungen im Grundwasser zur Verfügung.

Soll das Modell im Rahmen einer Detailstudie oder einer projektierten thermischen Nutzung eingesetzt werden, kann aus dem Regionalmodell ein Lokalmmodell extrahiert werden. Innerhalb des gewählten Modellausschnitts können von den bestehenden Gebäuden und Nutzungen gezielt Daten erhoben und diese Objekte im Modell geometrisch abgebildet werden.

Zürich, 26. April 2023

Verfasser: Michael Ballmer

TK CONSULT AG



Dr. Rouven Künze
Geschäftsführer
rouven.kuenze@tkconsult.ch
044 288 81 88



Michael Ballmer
Projektleiter
michael.ballmer@tkconsult.ch
044 288 81 84