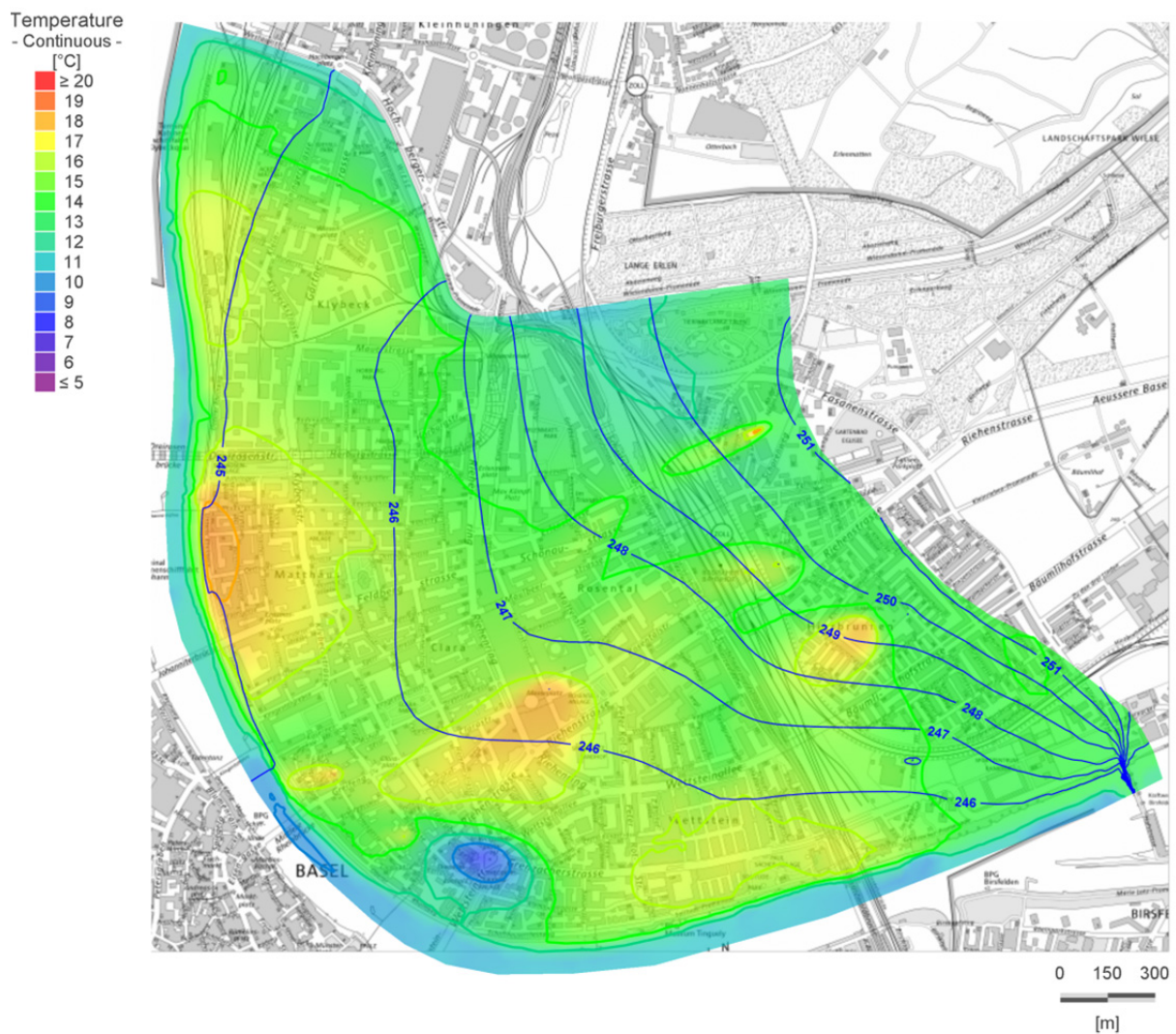




Schlussbericht

Thermische Bewirtschaftungssysteme für den oberflächennahen Untergrund der Region Basel





Datum: 30. Juni 2017

Ort: Bern

Auftraggeberin:

Bundesamt für Energie BFE

CH-3003 Bern

www.bfe.admin.ch

Kofinanzierung:

Departement für Wirtschaft, Soziales und Umwelt des Kantons Basel-Stadt

Amt für Umwelt und Energie

Hochbergerstrasse 158

CH-4019 Basel

Auftragnehmer/in:

Angewandte & Umweltgeologie (AUG)

Departement Umweltwissenschaften

Universität Basel

Bernoullistrasse 32

CH-4056 Basel

<http://aug.duw.unibas.ch/index.php>

Autor/in:

Prof. Peter Huggenberger, AUG, peter.huggenberger@unibas.ch

Dr. Jannis Epting, AUG, jannis.epting@unibas.ch

Dr. Matthias H. Müller, AUG, matthiash.mueller@unibas.ch

BFE-Bereichsleitung:

Gunter Siddiqi, gunter.siddiqi@bfe.admin.ch

BFE-Programmleitung:

Céline Weber, cweber@focus-e.ch

BFE-Begleitung:

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

BFE-Vertragsnummer:

SI/501044-01

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

Bundesamt für Energie BFE

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen; Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 58 462 56 11 · Fax +41 58 463 25 00 · contact@bfe.admin.ch · www.bfe.admin.ch



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Zusammenfassung	4
Résumé	4
Summary	5
1 Ausgangslage und Untersuchungsgebiet	6
1.1 Aufbau des Berichts	6
1.2 Ausgangslage, Zielsetzung und Auftrag	6
1.3 Hydrogeologische Grundlagen des Untergrunds von Basel	7
1.4 Anthropogene thermische Einflüsse auf den Untergrund im urbanen Raum	9
1.5 Fazit Kapitel 1	16
1.6 Referenzen Kapitel 1	16
2 Ableitung „thermischer Istzustand“ urbaner Grundwasserbereiche - Beispiel Basel-Stadt...	18
2.1 Temperaturmonitoringsysteme	18
2.2 Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodelle	29
2.3 Fazit Kapitel 2: „Thermischer Istzustand“	59
2.4 Referenzen Kapitel 2	60
3 Szenarienberechnungen	61
3.1 Thermische Auswirkung neuer Grundwassernutzungen	61
3.2 Evaluation der Quartiersentwicklung – potenziell nutzbare Energie	65
3.3 Fazit Kapitel 3: Szenarienberechnungen	72
3.4 Referenzen Kapitel 3	73
4 Grundlagen und Werkzeuge für die Erarbeitung von Nutzungskonzepten für die thermische Bewirtschaftung des oberflächennahen urbanen Untergrundes	74
4.1 Planungsinstrumente/Vollzugshilfen des Bundes	74
4.2 Vergleich von Nutzungsstrategien in verschiedenen Regionen	74
4.3 Nachhaltige thermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes in urbanen Gebieten	75
4.4 Referenzen Kapitel 4	77
5 Danksagung	79



Zusammenfassung

Die Grundwassertemperaturen im Kanton Basel-Stadt waren in den letzten Jahren höher als die Jahresmitteltemperatur der Luft, welche als Referenztemperatur für thermisch unbeeinflusstes Grundwasser betrachtet werden kann. Bei etwa der Hälfte aller Grundwassermessstellen, die im städtischen Gebiet liegen, war die Grundwassertemperatur um 3.0 ± 0.7 K höher als die Lufttemperatur. Der Anstieg der Grundwassertemperaturen ist vor allem auf die Abwärme von Untergrundstrukturen (Gebäude, Infrastruktur- und Verkehrsbauten), auf die zunehmende Oberflächenversiegelung, sowie eine vermehrte Nutzung des Grundwassers zu Kühlzwecken zurückzuführen. Neben qualitativen Auswirkungen auf urbane Grundwasserressourcen können sich dadurch auch Einschränkungen für thermische Nutzungen ergeben. Gleichzeitig kann die zusätzlich in den Untergrund eingetragene Wärme auch als potenziell nutzbare Energie betrachtet werden.

Mit dem vorliegenden Projekt sind Werkzeuge für thermische Bewirtschaftungssysteme des oberflächennahen Untergrundes der Stadt Basel erarbeitet worden, die eine quantitative Abschätzung des thermischen Nutzungspotenzials erlauben. Zur Evaluation von Grundwasser- und Wärmebilanzen sind auf Basis des bestehenden kantonalen Grundwasserbeobachtungsnetzes und von hochauflösenden tiefendifferenzierten Temperaturmesssystemen, Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodelle für einzelne Teilgebiete des Kantons entwickelt worden. Mit den nun vorhandenen Werkzeugen können Grundwasser- und Energieressourcen im urbanen Kontext, unter Berücksichtigung der sich gegenseitig beeinflussenden Nutzungen und zeitlich variabler Randbedingungen, betrachtet werden. Im Gegensatz zu Einzelbetrachtungen von Nutzungsänderungen können somit zukünftige Änderungen in den verschiedenen urbanen Grundwasserbereichen integral betrachtet werden. Mittels Szenarientechnik können Grundwasser- und Wärmebilanzen in einzelnen Quartieren, in denen städtebauliche Veränderungen geplant sind, untersucht und thermische Nutzungspotenziale quantifiziert werden. Die so ermittelten Nutzungspotenziale des oberflächennahen Untergrundes könnten anschliessend bei energetischen Planungen einzelner Quartiere miteinbezogen werden.

Résumé

Au cours de ces dernières années, la température des eaux souterraines du canton de Bâle-Ville était plus élevée que la température moyenne de l'air. Cette dernière est généralement considérée comme température de référence pour les eaux souterraines thermiquement non-influencées par l'homme. En région urbaine, la température des eaux souterraines était 3.0 ± 0.7 K plus élevée que la température moyenne de l'air dans 50% des puits de mesure. L'augmentation observée de la température des eaux souterraines est principalement due aux pertes de chaleur dans le sous-sol par les infrastructures urbaines (fondations et caves d'immeubles, tunnels, etc.), à l'imperméabilisation croissante des surfaces ainsi qu'à l'exploitation intensive d'eau souterraine à des fins de refroidissement. En plus d'avoir un impact sur la qualité des ressources en eaux souterraines, ces intrusions peuvent restreindre le potentiel géothermique. Cependant, la chaleur stockée dans les eaux souterraines constitue une source d'énergie potentiellement exploitable.

Ce projet pose les bases d'un système de gestion de géothermie superficielle pour la ville de Bâle, qui permet d'estimer quantitativement le potentiel thermique du sous-sol. Afin d'évaluer les ressources en eau souterraine et énergie thermique, des modèles d'écoulement souterrain et de transport de chaleur ont été développés pour différentes régions du canton. Ces modèles s'appuient sur le réseau cantonal de mesure des eaux souterraines et sur des puits de mesure de température à multiples niveaux. Le système de gestion développé permet une meilleure exploitation des eaux souterraines et des ressources énergétiques dans le contexte urbain en tenant compte des interactions entre les diverses utilisations des ressources souterraines ainsi que des conditions aux limites instationnaires. Ainsi, les changements d'utilisation des ressources souterraines peuvent être analysés intégralement dans chaque région, par opposition à des analyses sur l'impact individuel de chaque utilisation. Dans les quartiers où des aménagements urbains sont prévus, les bilans d'eau et de chaleur ainsi que le potentiel thermique du sous-sol peuvent être évalués à l'aide de scénarios. Ainsi, l'énergie thermique



potentiellement exploitable peut être prise en considération dès lors de la planification énergétique du quartier.

Summary

The groundwater temperatures in the Canton Basel-City are higher than the mean air temperatures, which can be used as reference temperatures for thermally undisturbed groundwater. At about half of the groundwater observation wells in the urban areas the mean annual groundwater temperature was 3.0 ± 0.7 K higher than the mean annual air temperature. The increase in groundwater temperatures is mainly due to the waste heat from underground structures (buildings, infrastructure and transportation constructions), the increased sealing of surfaces and the increased use of groundwater for cooling purposes. Beside negative qualitative effects on the urban groundwater resources, the thermal use of groundwater might be restricted. Furthermore, the additional heat input into the subsurface can be considered as potentially usable energy.

This project has laid the foundations for thermal management systems for the subsurface of the city of Basel, which allow a quantitative estimation of the thermal utilization potential. For the evaluation of the groundwater and heat balances, groundwater flow and heat transport models have been developed for individual subareas of the canton Basel-City, based in the cantonal groundwater monitoring network and high-resolution multilevel temperature wells. These tools facilitate the management of groundwater and energy resources in the urban context, thereby taking into account the mutually influencing uses and temporally variable boundary conditions. In contrast to an isolated consideration of changes in groundwater use or urban development, the stress changes in the delineated groundwater subareas are considered holistically. Using different scenarios, the tools can be used to investigate groundwater and heat balances in individual quarters in which urban development takes place and to quantify the thermal potential in individual urban areas. The potentially available energy in the subsurface and groundwater can then be included in the energy management of a district.



1 Ausgangslage und Untersuchungsgebiet

1.1 Aufbau des Berichts

In Kapitel 1 wird die Ausgangslage, der Auftrag und die Zielsetzung des Projekts beschrieben. Des Weiteren werden die wichtigsten Charakteristika des Untersuchungsgebiets und anthropogenen Einflüsse im Kanton Basel-Stadt vorgestellt.

In Kapitel 2 wird der „**thermische Istzustand**¹“ anhand der verschiedenen Temperaturmesssysteme in Basel-Stadt beschrieben. Mögliche Einflussfaktoren auf die räumliche und zeitliche Temperaturverteilung werden diskutiert. In Kapitel 2 wird ausserdem der Aufbau und die Analyse der Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodelle, der sich an handhabbaren Teilgebieten (Grundwasserbereiche²) orientiert, und die Auswertung der Grundwasser- und Wärmebilanzen dieser Teilgebiete erläutert. Mit Hilfe der erarbeiteten Werkzeuge lässt sich der „**hydraulische und thermische Istzustand**“ der Grundwasserbereiche anhand von der Grundwasserfluss- und thermischen Regimen, einschliesslich jahreszeitenabhängiger Temperaturverteilungen und -veränderungen, beschreiben.

In Kapitel 3 werden die Ergebnisse ausgewählter Szenarien und berechnete Grundwasser- und Wärmebilanzen vorgestellt. Szenarien umfassen eine: (1) Evaluation neuer bereits geplanter thermischer Grundwassernutzungen, sowie (2) Abschätzungen des thermischen Nutzungspotenzials des oberflächennahen Untergrundes für ausgewählte Quartiersentwicklungen in Basel-Stadt.

Kapitel 4 beschreibt die Grundlagen und Werkzeuge, welche für den Aufbau eines thermischen Bewirtschaftungssystems für den oberflächennahen Untergrund in Basel-Stadt notwendig wären. In einigen Regionen der Schweiz existieren bereits einzelne, voneinander unabhängige Vorgehensweisen zur thermischen Bewirtschaftung des Grundwassers (einschl. Erdwärme) oder energetischen Stadtplanung, aber es fehlen gemäss einer Studie des BAFU (Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2014) meist Nutzungsstrategien, die sowohl die Wasserversorgung als auch die energetische Nutzung miteinander kombinieren. In Kapitel 4 dieses Berichts werden einige Beispiele für Nutzungsstrategien aufgezeigt und, basierend auf den durchgeführten Untersuchungen, ein Vorgehen zur nachhaltigen thermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes, ausgearbeitet. Wesentliches Element der Nutzungsstrategie ist eine Skizzierung von Vorgehensweisen und Erarbeitung von Werkzeugen, welche auf die jeweiligen planerischen und hydrogeologischen Randbedingungen verschiedener Stadtgebiete zugeschnitten sind. Dieses Vorgehen ermöglicht es, thermische Nutzungspotentiale des oberflächennahen Untergrundes bei energietechnischen Planungen in einzelnen Quartieren mit zu berücksichtigen.

1.2 Ausgangslage, Zielsetzung und Auftrag

In urbanen Gebieten werden die Temperaturen im oberflächennahen Untergrund aufgrund zahlreicher anthropogener Einflüsse, z.B. durch Versiegelung von Flächen, Bauwerke, die ins Grundwasser reichen oder thermische Grundwassernutzung (Wärmegewinnung oder Kühlung) im Vergleich zu einem potenziellen natürlichen thermischen Zustand verändert. Da Wärmeinträge in urbanen Gebieten häufig überwiegen wird die Temperatur des Grundwassers erhöht und es bilden sich sogenannte *urbane Wärmeinseln im Untergrund* aus (subsurface urban heat island, SUHI (Menberg et al., 2013)).

¹„Hydraulische und thermischer Istzustände“ beschreiben die mittlere hydraulische und thermische Situation, einschliesslich saisonaler aber auch ereignis- und nutzungsbedingter als auch tiefenabhängiger Variation des thermischen und Grundwasserflussesregimes für einen definierten Grundwasserbereich.

²Grundwasserbereiche werden als Bewirtschaftungs-Einheiten für das Grundwasser und die oberflächennahe Geothermie definiert. Die Gebietsgrenzen eines Grundwasserbereichs sind nicht nur für die Ressourcen-Bewirtschaftung relevant, sondern sie definieren auch Modellränder, die für Berechnungen von Massen- und Wärmebilanzen herangezogen werden (vgl. Epting et al., 2017).



Gemäss der Schweizer Gewässerschutzverordnung (GSchV, 2015) und der „Wegleitung Grundwasserschutz“ (Bundesamt für Umwelt; Wald und Landschaft (BUWAL), 2004) darf die Grundwassertemperatur 100 m im Abstrom des Rückgabestandortes thermischer Nutzungen um höchstens 3 K im Vergleich zum „natürlichen“ Zustand verändert werden. Eine Schwierigkeit besteht jedoch in der Ermittlung von „natürlichen“ Grundwassertemperaturen (Referenzzustand als Grundlage für die Interpretation von Temperaturveränderung) in urbanen Gebieten.

Im Kanton Basel-Stadt werden in stark urbanisierten Bereichen Grundwassertemperaturen von bis zu 19 °C im Jahresmittel gemessen. Etwa 50 % der Messstellen, die im städtischen Gebiet liegen, wiesen in den Jahren 1994 bis 2015 Grundwassertemperaturen von über 12.9 bis 14.4 °C im Jahresmittel auf und lagen damit über der, gemäss der Wegleitung über die Grundwassernutzung im Kanton Basel-Stadt (Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt, 2014), vorgegebenen Referenztemperatur („natürlichen Grundwassertemperatur“) von 12 °C.

Die in den oberflächennahen Untergrund eingetragene Abwärme stellt eine potentielle Energiequelle für urbane Quartiere dar (Epting and Huggenberger, 2014). Diese zusätzliche Energiequelle könnte daher einen Beitrag zur Vision der 2000-Watt-Gesellschaft, wie sie der Kanton Basel-Stadt verfolgt, betrachtet werden.

Für eine effiziente thermische Bewirtschaftung der oberflächennahen Ressourcen Wasser und Energie werden Werkzeuge benötigt, die es ermöglichen das hydraulische und thermische Regime, unter Berücksichtigung der verschiedenen Nutzungen und Interaktionen, wie zum Beispiel erhöhte anthropogene Wärmeeinträge durch Gebäude oder natürliche Austauschprozesse zwischen Fluss- und Grundwasser, abzubilden. Um die potenziell nutzbare thermische Energie im oberflächennahen Untergrund einzelner Quartieren evaluieren zu können, werden Temperatur-Monitoringsysteme sowie numerische Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodellierungen eingesetzt. Mit diesen Werkzeugen lassen sich, unter Berücksichtigung von sich zeitlich verändernden hydraulischen und thermischen Randbedingungen sowie räumlich variabler Aquiferparameter, der „hydraulische und thermische Istzustand“ (Epting et al., 2013; Epting and Huggenberger, 2013a) sowie Grundwasser- und Wärmeströme in den verschiedenen Teilgebieten des Stadtgebiets quantitativ erfassen. Auf Grundlage dieser quantitativen Erfassung können anschliessend thermische Nutzungspotenziale des oberflächennahen Untergrundes bei energietechnischen Planungen in einzelnen Quartieren mitberücksichtigt und Szenarienberechnungen durchgeführt werden.

Im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE) erarbeitete die Angewandte und Umweltgeologie (AUG), Departement Umweltwissenschaften der Universität Basel, Grundlagen für „Thermische Bewirtschaftungssysteme für den oberflächennahen Untergrund der Region Basel“ (Projektnummer SI/501044-01). Für den Kanton Basel-Stadt konnten Monitoringsysteme und Modellwerkzeuge entwickelt werden, die eine Gesamtplanung der thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes in urbanen Gebieten ermöglicht.

1.3 Hydrogeologische Grundlagen des Untergrunds von Basel

Der Kanton Basel-Stadt liegt auf einer Höhe von etwa 260 m ü.M. an den Ausläufern des Falten- und Tafeljuras, sowie den Vogesen und dem Schwarzwald im südlichen Oberrheingraben. Das Jahresmittel der Lufttemperatur (gemessen in 2 m Höhe über Grund) an der Station Basel-Binningen (MeteoSwiss, 2016) lag im Zeitraum 1994 bis 2015 bei 10.9 ± 0.6 °C. Der mittlere Jahresniederschlag an dieser Station betrug in diesem Zeitraum 862 ± 144 mm.

Die gesamte Fläche der grundwasserführenden Schotter im Untersuchungsgebiet beträgt in etwa 32 km² und besteht vor allem aus fluvialen Schottern, die durch die Oberflächengewässer Rhein, Wiese, Birs und Birsig abgelagert wurden (Huggenberger and Epting, 2011b). Die Schottermächtigkeit beträgt bis zu 38 m und der Grundwasserspiegel liegt bei Mittelwassersituation maximal etwa 30 m unter der Geländeoberkante. Die wassergesättigte Zone erreicht bei mittlerem Grundwasserstand eine Mächtigkeit von bis zu 16 m. Die Lockergesteinsablagerungen weisen mit mittleren Durchlässigkeitsbeiwerten von etwa $k_f = 1.0 \times 10^{-4}$ und $5 \times 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$ eine gute hydraulische



Durchlässigkeit auf. Der Grundwasserstauer wird von den tertiären Einheiten des Oberrheingraben gebildet, die als nahezu „wasserundurchlässig“ betrachtet werden können (Huggenberger and Epting, 2011b).

Die regionale Grundwasserströmung verläuft in nord-östlicher und süd-westlicher Richtung zum Vorfluter Rhein. Abbildung 1.1 zeigt den Kanton Basel-Stadt und interpolierte Grundwasserisohypsen (Mittelwasser der Jahre 1994 bis 2013). Das Gefälle der Grundwasseroberfläche variiert zwischen 0 und 4.3 % mit einem Mittelwert von 0.7 %.

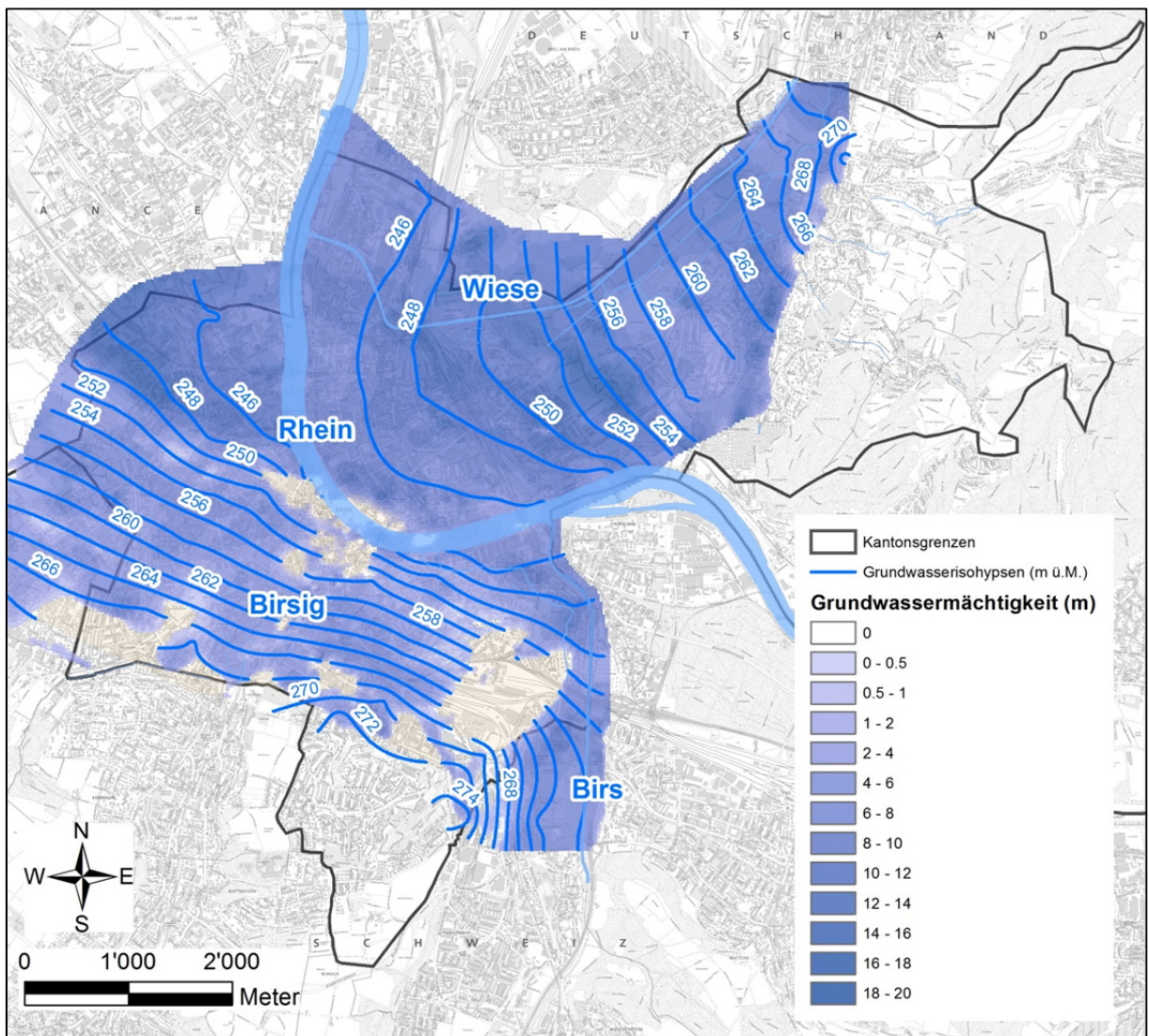


Abbildung 1.1: Interpolierte Grundwasserisohypsen (2 m äquidistant) und Grundwassermächtigkeiten im Untersuchungsgebiet des Kantons Basel-Stadt (Mittelwerte der Jahre 1994 bis 2013). Im Bereich Grossbasel südlich des Rheins befinden sich einige Gebiete, die aufgrund der Topographie des Grundwasserstauers kein oder nur zeitweise Grundwasser führen.

1.4 Anthropogene thermische Einflüsse auf den Untergrund im urbanen Raum

Oberflächenbedeckung & Siedlungsentwicklung

Die Art der Oberflächenbedeckung (z.B. Flächenversiegelung, Grünflächen) beeinflusst das thermische Regime im urbanen Raum durch unterschiedliche thermische Eigenschaften (z.B. Wärmeleitfähigkeit) der Oberflächenbedeckung. Versiegelte Flächen führen zu erhöhtem Wärmeeintrag in den Untergrund (Epting et al., 2013). Kenntnisse über die räumliche Verteilung unterschiedlicher Oberflächenbedeckungen geben Auskunft über die räumliche Temperaturverteilung, also den „thermischen Istzustand“, im urbanen Raum. Im folgenden Abschnitt werden die Datenanalysen und -erhebungen zur Oberflächenbedeckung und Landnutzung im Kanton Basel-Stadt beschrieben.

In Abbildung 1.2 ist die Siedlungsentwicklung seit dem Jahr 1860 im Kanton Basel-Stadt dargestellt. Die ältesten bebauten Flächen befinden sich im Stadtzentrum beidseitig des Rheins (und im Ortskern der Gemeinde Riehen). Im Zeitraum 1950 bis 1975 verlangsamte sich der Zuwachs an bebauter Siedlungsfläche (Abbildung 1.3a) im Vergleich zu den Vorjahren. Hingegen stieg der Bau an Hochhäusern mit einer Höhe über 25 m in diesem Zeitraum markant an (Abbildung 1.3b). Der Bau von Hochhäusern bedeutet eine vertikale Verdichtung der Stadt, während gleichzeitig eine Ausbreitung in die Fläche, die im Kanton Basel-Stadt nach aussen hin begrenzt ist, verringert wird.

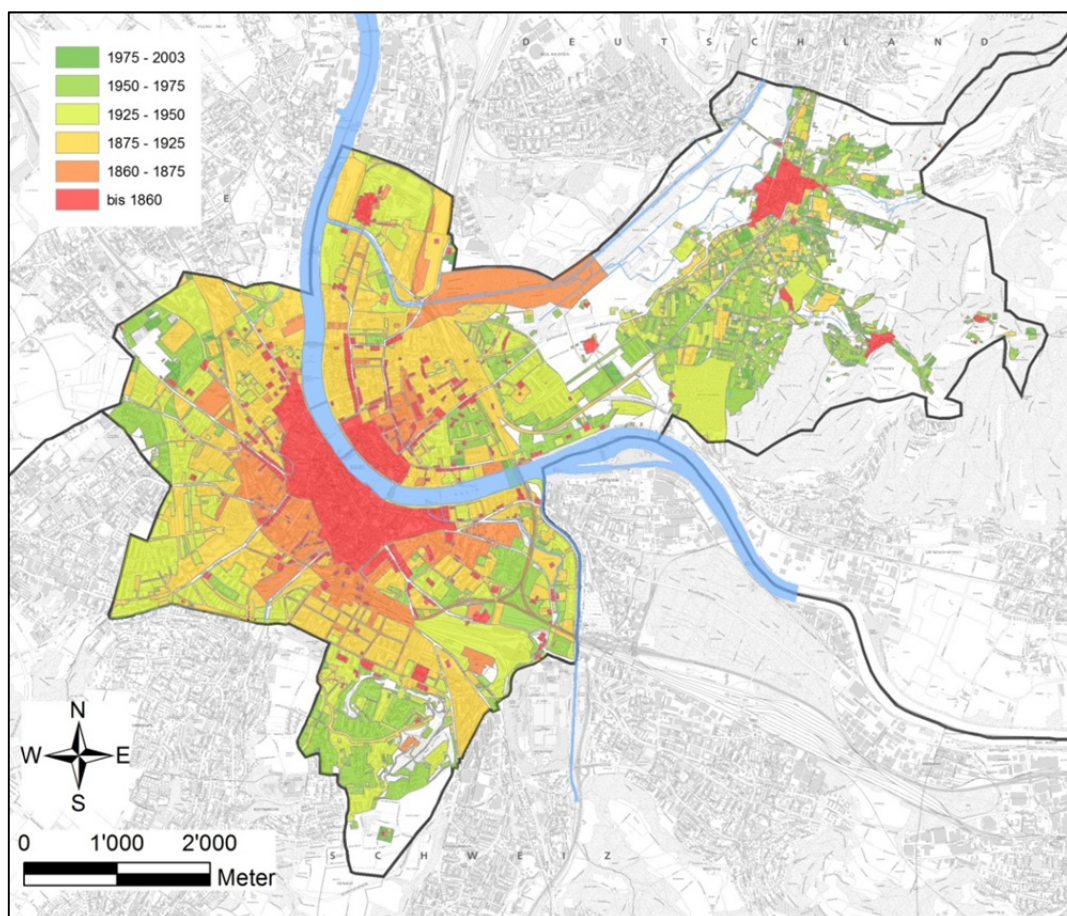


Abbildung 1.2: Siedlungsentwicklung im Kanton Basel-Stadt von 1860 bis 2003 (Quelle: Städtebau & Architektur Planungsamt und Grundbuch und Vermessungsamt BS).

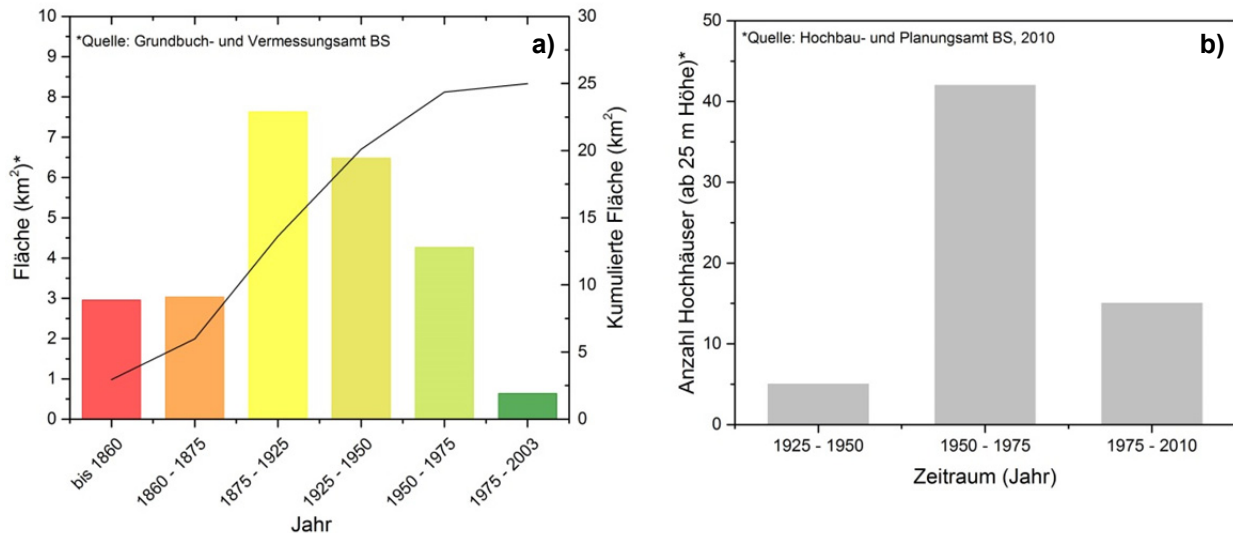


Abbildung 1.3: a) Zeitliche Entwicklung der Siedlungsfläche im Kanton Basel-Stadt von 1860 bis 2003 (Quelle: Städtebau & Architektur Planungsamt und Grundbuch- und Vermessungsamt Basel-Stadt). b) Zeitliche Entwicklung der gebauten Hochhäuser im Kanton Basel-Stadt (Quelle: Hochbau- und Planungsamt (2010).

In Abbildung 1.4 ist die aktuelle Landnutzung/Oberflächenbedeckung im Kanton Basel-Stadt dargestellt. Der Versiegelungsgrad durch Gebäude und versiegelte Flächen ist im Stadtzentrum, in den Industriearealen im Norden auf beiden Seiten des Rheins, entlang des Bahnareals der SBB in Grossbasel und im süd-östlichen Industrieareal am höchsten. Insgesamt beträgt die Fläche von Gebäuden, versiegelten Flächen und den Bahnarealen etwa 16.9 km², was etwa 45.7 % der gesamten Kantonsfläche entspricht (14.6 km² bzw. etwa 61 % der Fläche, wenn die weniger urban geprägten Gemeinden Riehen und Bettingen nicht mitberücksichtigt werden).

Eine Versiegelung der Oberfläche verringert zum einen die Grundwasserneubildung im Stadtgebiet, zum anderen erwärmen sich versiegelte (asphaltierte) Flächen stärker als Grünflächen, was zu einem erhöhten Wärmeeintrag in den Untergrund führt.

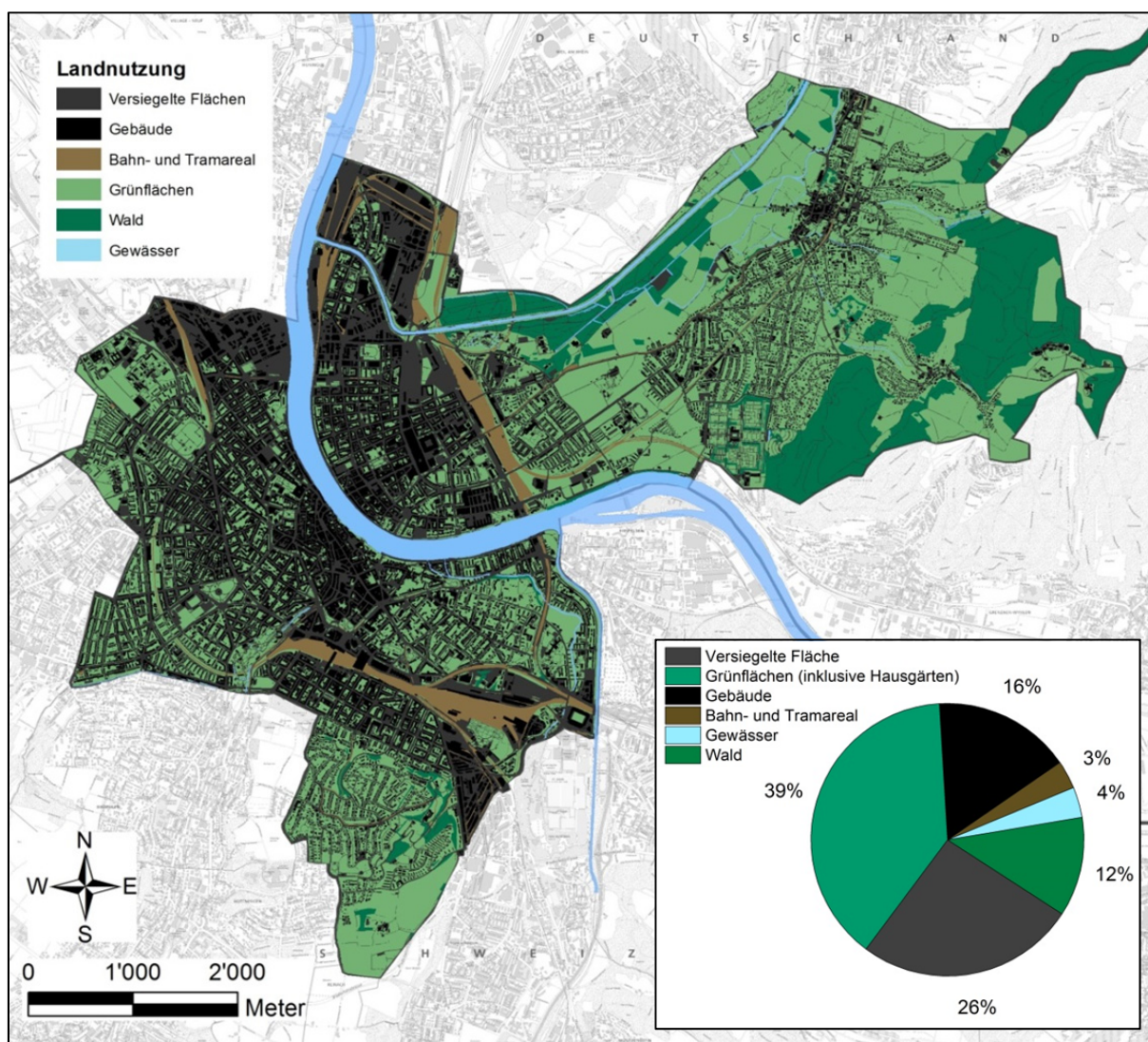


Abbildung 1.4: Landnutzung/Oberflächenbedeckung im Kanton Basel-Stadt (Quelle: Grundbuch- und Vermessungsamt Basel-Stadt).

Untergrundstrukturen

Der Wärmeeintrag in den Untergrund wird durch eine intensivere Nutzung des Untergrundes beispielsweise durch tiefe Einbauten von Gebäuden (vertikale Verdichtung im urbanen Raum) oder durch Infrastrukturbauwerke wie zum Beispiel Tunnel zusätzlich erhöht. Gebäudestrukturen im Untergrund tragen während der winterlichen Heizperioden zu einem erhöhten Wärmeeintrag in den Untergrund bei, insbesondere, wenn die Gebäude in das Grundwasser reichen (Epting et al., 2013). Die Auswertung von Gebäudetiefen und die räumliche Verteilung der Anzahl Untergeschosse stellt ein wichtiges Instrument für die Evaluation des „thermischen Istzustandes“ dar. Durch die eingebauten Gebäude und durch eine dichte Bebauung ergeben sich diffuse Wärmeeinträge in den Untergrund. Zusätzlich führen tieferreichende, grossflächige Gebäude lokal zu erhöhten Wärmeeinträgen. Durch den thermischen Einfluss der Untergrundstrukturen in Kombination mit erhöhten thermischen Einträgen aufgrund der Oberflächenversiegelung als auch der Einleitung von Wasser mit erhöhten Temperaturen (Kühlwassernutzung) bilden sich sogenannte *urbane Wärmeinseln im Untergrund* (Menberg et al., 2013) aus.

Die Gebäudeversicherung Basel-Stadt hat von etwa 26000 Gebäuden im Kanton die Anzahl der Untergeschosse erfasst. Die Auswertung der räumlichen Verteilung der Anzahl Untergeschosse für



die einzelnen Wohnbezirke im Kanton Basel-Stadt zeigt, dass der Anteil der Gebäude mit drei und mehr Untergeschossen in den zentralen Wohnbezirken (vor allem in Grossbasel) am grössten ist (Abbildung 1.5). In diesen Bereichen ist (bei beheizten Gebäuden) mit einem erhöhten Wärmeeintrag in den Untergrund zu rechnen.

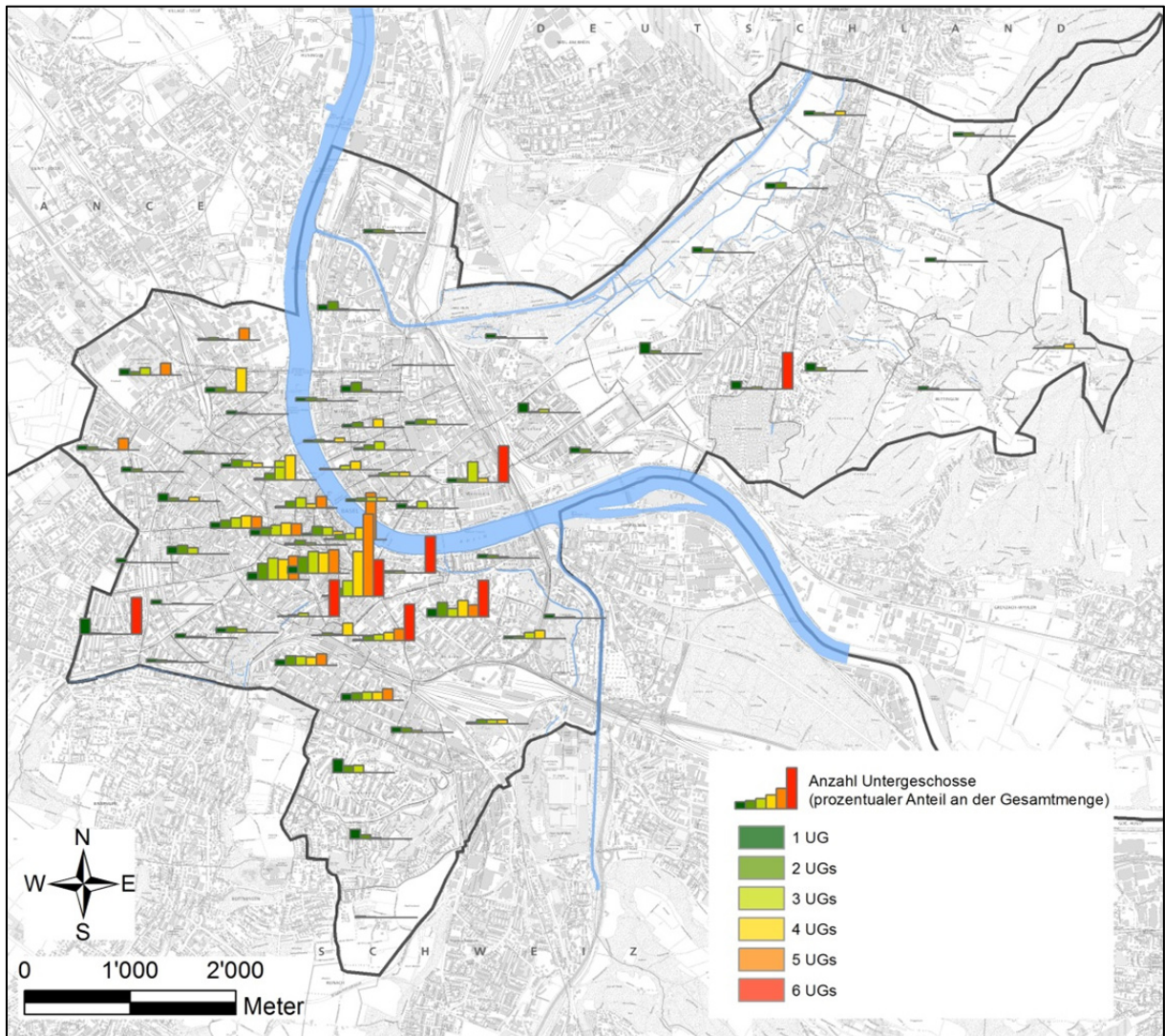


Abbildung 1.5: Anzahl der Untergeschosse (UGs) in den Wohnbezirken des Kantons Basel-Stadt (dargestellt ist jeweils der prozentuale Anteil an der Gesamtmenge). Datengrundlage: Gebäudeversicherung Basel-Stadt.

Da die Informationen der Gebäudeversicherung keine Angaben zu absoluten Gebäudetiefen enthalten und bisher keine systematisch erhobenen und ausgewerteten Daten zu den Gebäudetiefen und deren zeitlichen Entwicklung für den Kanton Basel-Stadt existierten, wurden im Rahmen dieses Projekts gezielte Datenerhebungen zu den Gebäudetiefen durchgeführt. Hierfür wurden verschiedene bestehende mit neu erhobenen kantonalen Datensätzen und Daten der Gebäudeversicherung Basel-Stadt zusammengeführt. Die Bauwerkstiefen von folgenden Gebäudedatensätzen wurden dabei ausgewertet (Abbildung 1.6):

- bereits aus früheren Datenauswertungen bekannte Gebäudetiefen
- Gebäude mit einer Grundfläche von mehr als 3000 m²
- Gebäude mit 4 und mehr Untergeschossen (Datengrundlage Gebäudeversicherung Basel-Stadt)
- Industrieareale mit dichter Bebauung (Novartis Campus, Roche, Klybeck, Rosental)

Etwa 2000 Gebäude und Baustrukturen im Untergrund wurden mit den jeweiligen Tiefen erfasst und räumlich analysiert (Abbildung 1.6).

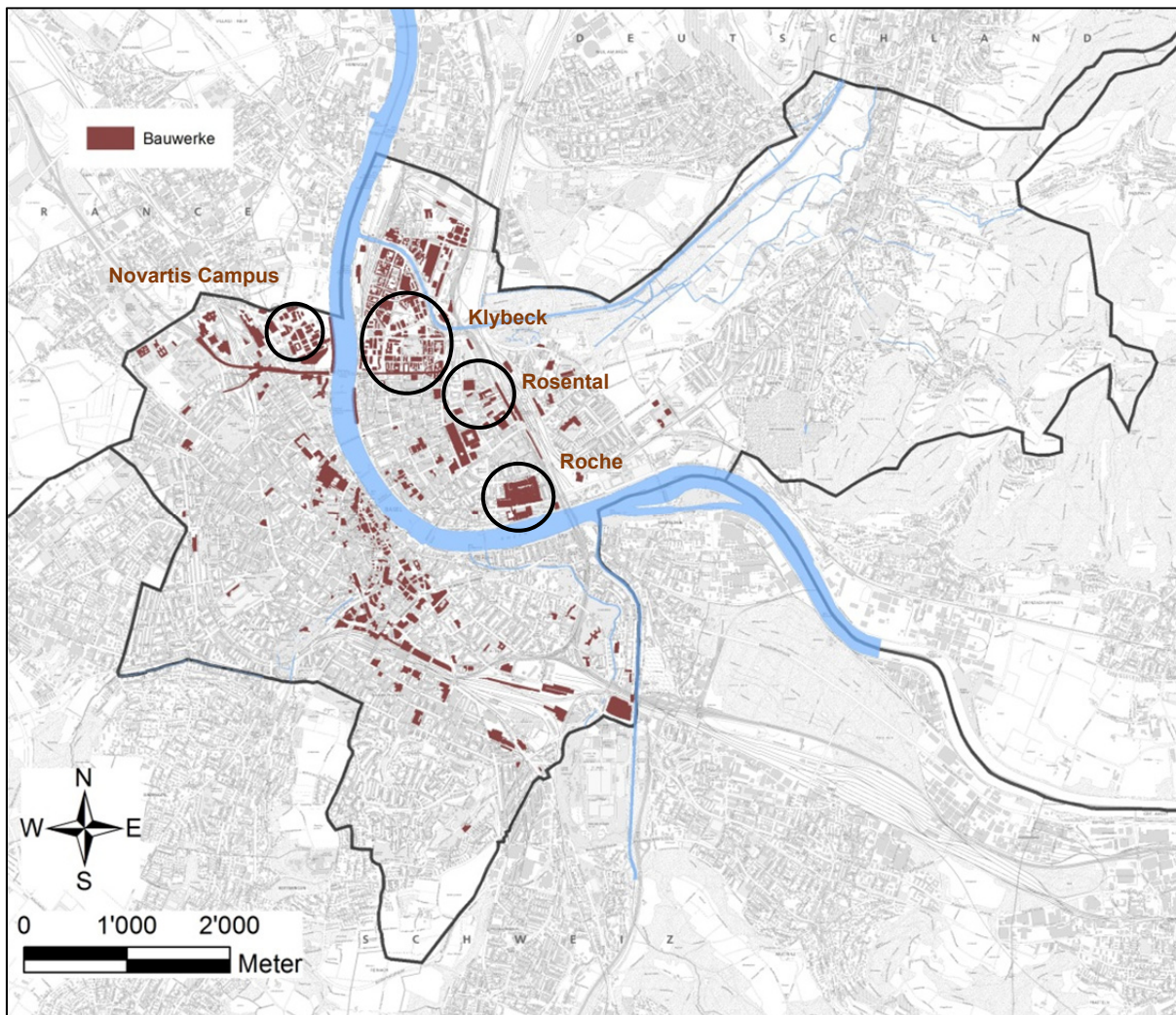


Abbildung 1.6: Baustrukturen im Untergrund.

Die Summe der Flächen, von in den Untergrund eingebauter Gebäudestrukturen, nahm während der letzten 50 Jahre markant zu (Abbildung 1.7). Ein Maximum des Zuwachses fällt mit etwa 1.5 bis $2.4 \times 10^6 \text{ m}^2$ in die 1970er Jahre. Wird eine mittlere Wärmestromdichte über die Gebäudefläche von 0.28 Wm^{-2} (Menberg et al., 2013) bzw. 0.44 Wm^{-2} (Epting et al., 2017) angenommen, ergibt sich bei einer Gesamtfläche von $4.0 \times 10^7 \text{ m}^2$ ein mittlerer Wärmestrom von etwa 11.2 bis 17.6 MW in den Untergrund allein durch die erhobenen Gebäudestrukturen im Untergrund des Kantons Basel-Stadt. Werden die gesamten Gebäudeflächen aus den Daten des Kantons Basel-Stadt von $6.0 \times 10^6 \text{ m}^2$ (etwa 16 % der Kantonsfläche, vgl. Abbildung 1.4) verwendet und als konservative Schätzung Gebäude mit 1 Untergeschoss (2 m Tiefe) angenommen, ergeben sich aus einer Gesamtfläche im Untergrund von $8.3 \times 10^6 \text{ m}^2$ (Gebäudeumfang (m) x Gebäudetiefe (m) + Grundfläche) ein Wärmestrom von etwa 2.3 bis 3.7 MW durch Gebäudeflächen im Untergrund des Kantons Basel-Stadt.

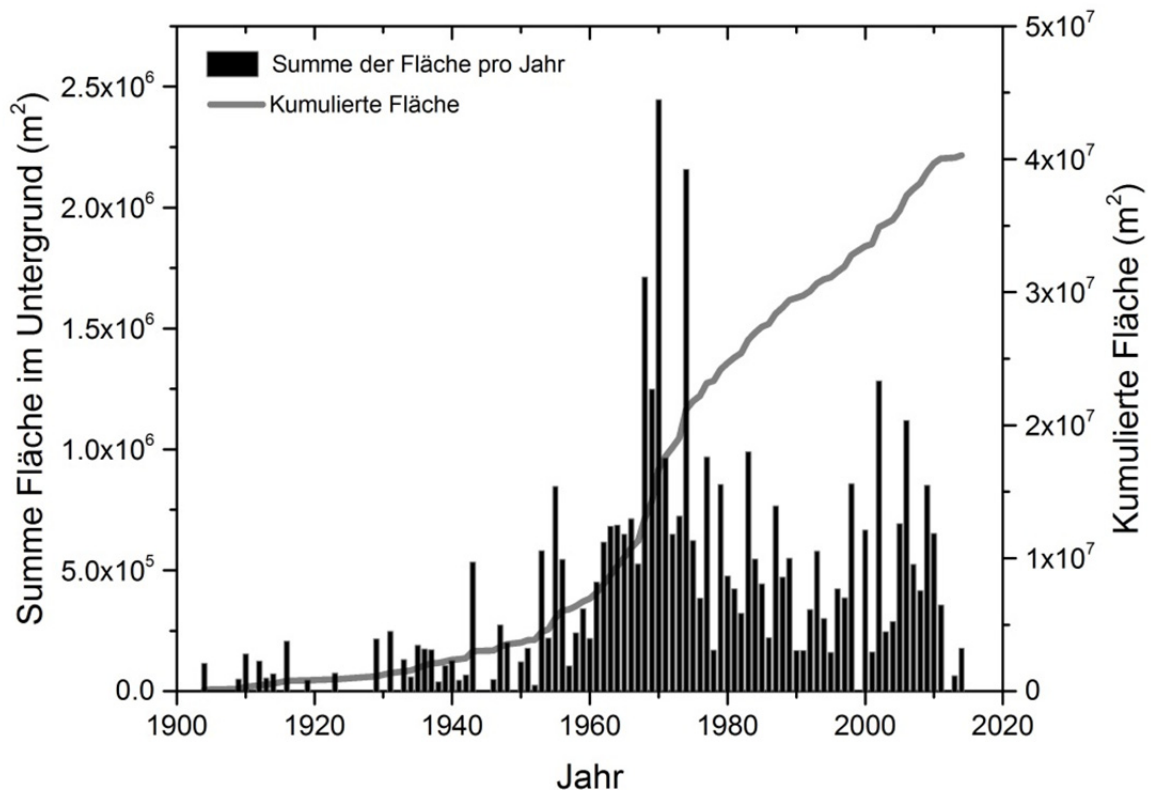


Abbildung 1.7: Summe der Flächen von Gebäudestrukturen, welche pro Jahr von 1920 bis 2014 in den Untergrund des Kantons Basel-Stadt eingebracht wurden (Die Daten umfassen nur den Anteil der Gebäude, der detailliert erhoben wurde – siehe Beschreibung oben. Die tatsächlich eingebaute Fläche liegt daher über der hier berechneten Fläche).

Grundwassernutzungen

Das Grundwasser im Kanton Basel-Stadt wird vor allem für die Trinkwasserproduktion und „industrielle“ Zwecke (Brauchwasser und thermische Nutzung, v.a. für Kühlzwecke) verwendet. Grundwasserentnahmen und -rückgaben in den Grundwasserleiter finden im gesamten Stadtgebiet statt (Abbildung 1.8). Der grösste Anteil des geförderten Wassers (etwa 15 Millionen m³ pro Jahr) wird zur Trinkwasserproduktion (siehe auch Grundwasserschutzzonen in Abbildung 1.8) verwendet (Abbildung 1.9a). Die Trinkwasserförderung übersteigt den natürlichen Grundwasserzustrom quantitativ, deshalb wird das Grundwasser künstlich mit Flusswasser aus dem Rhein angereichert.

Fast 10 Millionen m³ wurden im Jahr 2015 für „industrielle“ Zwecke verwendet, d.h. als Brauchwasser, Kühlwasser (etwa 5 Millionen m³) oder zur Wärmegewinnung (etwa 0.8 Millionen m³) (Abbildung 1.9a). Ein grosser Anteil des genutzten Wassers wird anschliessend in die Oberflächengewässer und die Kanalisation abgeleitet. Der Anteil an thermisch genutztem Wasser, das in den Grundwasserleiter zurückgeführt wird, variierte in den letzten Jahren, stieg aber im Mittel deutlich an (Abbildung 1.9a). Etwa 0.6 Millionen m³ an relativ „kaltem“ Wasser aus Wärmegewinnungsprozessen wurde im Jahr 2015 zurückgeführt (Abbildung 1.9b). Der Anteil an relativ „warmem“ Wasser aus Kühlprozessen war mit etwa 1 Millionen m³ im Jahr 2015 (wie auch in den Jahren davor) grösser als der Anteil an zurückgeführten „kaltem“ Wasser (Abbildung 1.9b). Eine Einleitung von relativ warmem Wasser aus Kühlprozessen führt tendenziell zu einer Erwärmung des Grundwassers (vor allem im Nahbereich des Abstroms von Rückversickerungsanlagen).

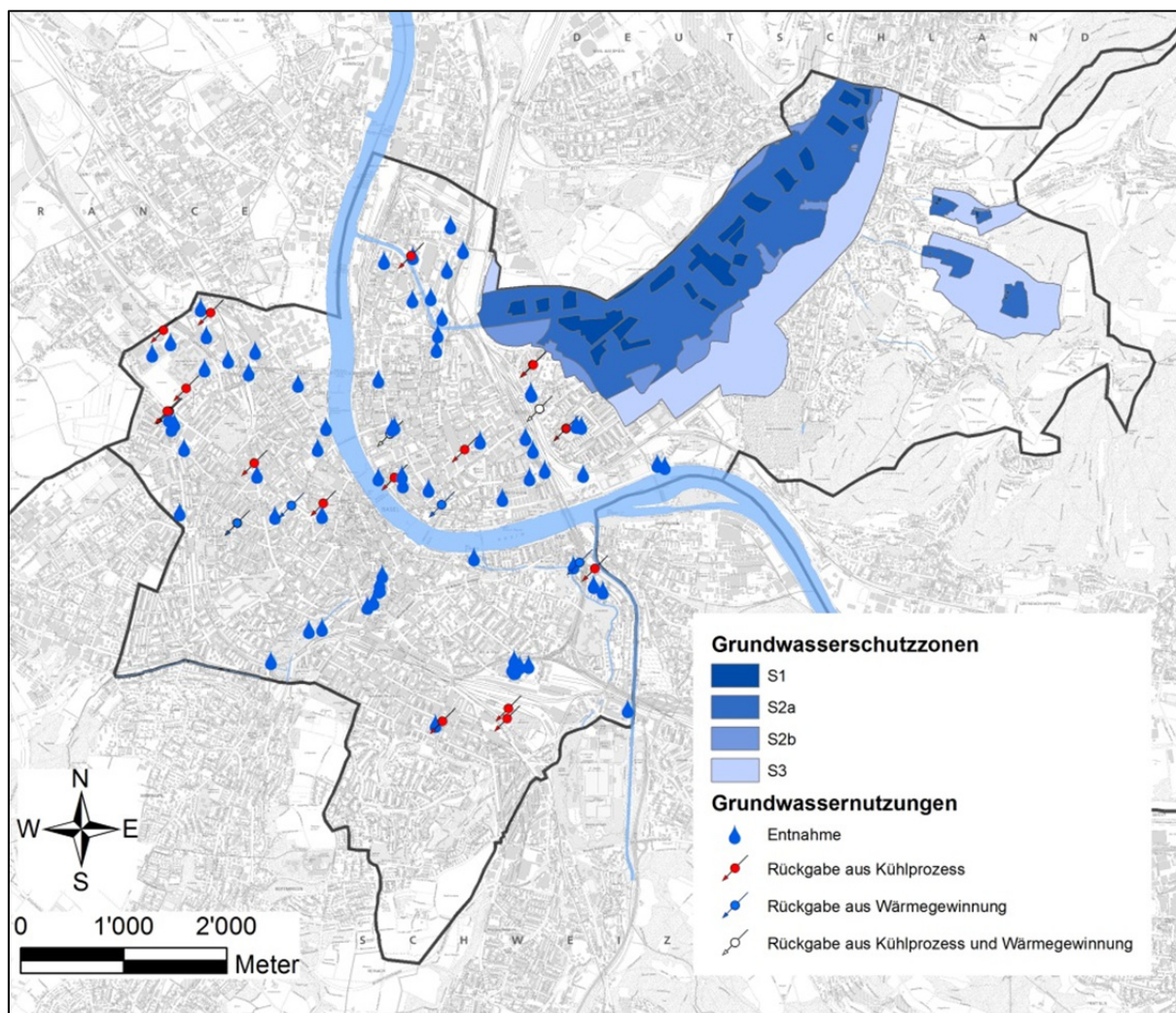


Abbildung 1.8: Grundwassernutzungen (Entnahmen und Rückgaben) im Kanton Basel-Stadt während der Jahre 1994 bis 2015 (vereinzelte Anlagen waren im Jahr 2015 nicht mehr in Betrieb). Im Nord-Osten sind die Grundwasserschutz-zonen dargestellt, in denen Grundwasser zur Trinkwasserproduktion gefördert sowie künstlich angereichert wird.

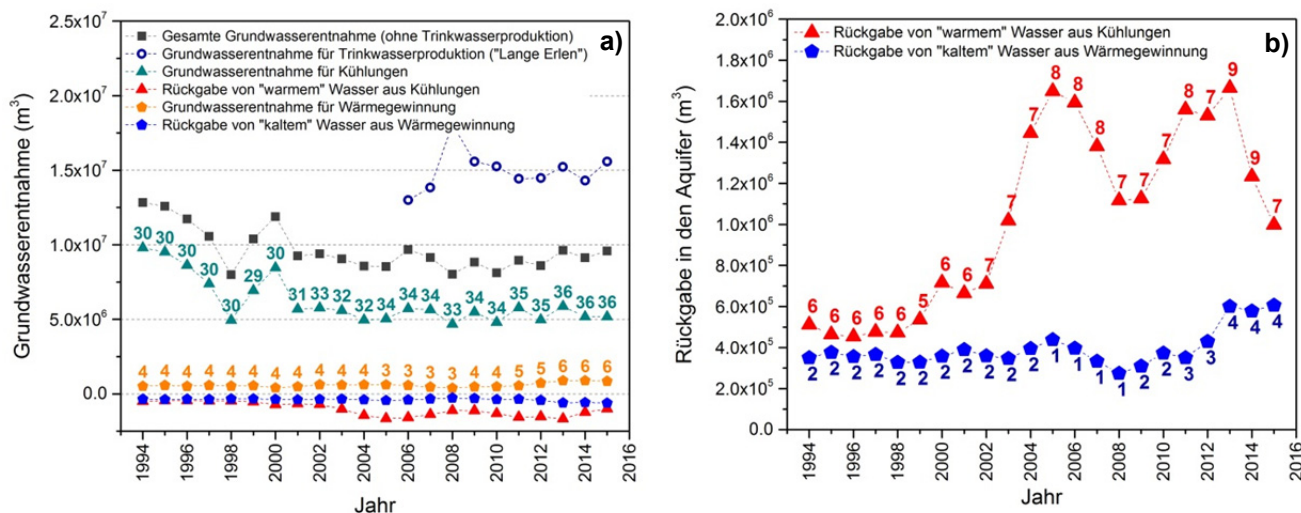


Abbildung 1.9: a) Entnommenes Grundwasser und zurückgeführtes Wasser aus und in den Grundwasserleiter im Kanton Basel-Stadt. b) Vergrösserte Darstellung der in den Grundwasserleiter zurückgeführten Wassermengen aus thermischer Nutzung (Kühl- und Heizzwecke). Beide Darstellungen zeigen auch die Entwicklung der Anzahl Grundwassernutzer.

1.5 Fazit Kapitel 1

Das Stadtgebiet von Basel verfügt über ergiebige Grundwasserleiter mit Grundwassermächtigkeiten von bis zu 16 m. Anthropogene Tätigkeiten beeinflussen die Grundwasserressourcen sowohl quantitativ als auch thermisch. Dem Grundwasserleiter werden etwa 25 Millionen m³ jährlich entnommen. Durch thermische Grundwassernutzungen wird die Grundwassertemperatur im Bereich der Nutzung verändert. Durch Flächenversiegelung und durch Bauwerke im Untergrund erhöht sich der Wärmeeintrag in den Untergrund.

Zur Quantifizierung der anthropogenen Einflüsse auf das hydraulische und thermische Regime des Untergrundes wird empfohlen systematisch Daten zu thermischen Grundwassernutzungen (Entnahme- und Rückgabemengen und Temperaturen) und zur räumlichen Verteilung von Gebäudestrukturen im Untergrund zu erheben.

1.6 Referenzen Kapitel 1

Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt. Wegleitung über die Grundwassernutzung im Kanton Basel-Stadt. In: Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt, Basel, Schweiz, 2014, www.aue.bs.ch/wegleitung-grundwassernutzung.pdf

Bundesamt für Umwelt (BAFU). Grundlagen für die Wasserversorgung 2025. Risiken, Herausforderungen und Empfehlungen. In: Umwelt-Wissen, Bern, Schweiz, 2014, www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/wasser/uw-umwelt-wissen/grundlagen_fuer_diewasserversorgung2025.pdf.download.pdf/grundlagen_fuer_diewasserversorgung2025.pdf

Bundesamt für Umwelt; Wald und Landschaft (BUWAL). Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt, Bern, Schweiz, 2004.



- Epting J, Händel F, Huggenberger P. Thermal management of an unconsolidated shallow urban groundwater body. *Hydrology and Earth System Sciences* 2013; 17: 1851-1869.
- Epting J, Huggenberger P. Unraveling the heat island effect observed in urban groundwater bodies - Definition of a potential natural state. *Journal of Hydrology* 2013; 501: 193-204.
- Epting J, Huggenberger P. Energie als Abfall? Gefragt sind neue thermische Bewirtschaftungskonzepte des oberflächennahen Untergrunds. *Aqua und Gas* 2014; 7/8: 34-39.
- Epting J, Scheidler S, Affolter A, Borer P, Mueller MH, Egli L, et al. The thermal impact of subsurface building structures on urban groundwater resources – A paradigmatic example. *Science of The Total Environment* 2017; 596–597: 87-96.
- GSchV. Gewässerschutzverordnung Schweiz, Bern, Schweiz, 2015.
- Hochbau- und Planungsamt. Hochhäuser in Basel, Grundlagen und Konzepte, Basel, Schweiz, 2010, www.planungsamt.bs.ch/dms/planungsamt/download/konzepte/Zonenplan/Hochh-user-in-Basel/Hochh%C3%A4user%20in%20Basel.pdf
- Huggenberger P, Epting J. *Urban Geology: Process-Oriented Concepts for Adaptive and Integrated Resource Management*. Basel, Switzerland: Springer Basel, 2011.
- Menberg K, Blum P, Schaffitel A, Bayer P. Long-Term Evolution of Anthropogenic Heat Fluxes into a Subsurface Urban Heat Island. *Environmental Science & Technology* 2013; 47: 9747-9755.



2 Ableitung „thermischer Istzustand“ urbaner Grundwasserbereiche - Beispiel Basel-Stadt

2.1 Temperaturmonitoringsysteme

Grundwasserüberwachung im Kanton Basel-Stadt

Auf Grundlage des kantonalen Grundwasser-Beobachtungsnetzes kann die räumliche und zeitliche Variation des „thermischen Istzustands“ statistisch beschrieben werden. Im Kanton Basel-Stadt besteht das kantonale Grundwasser-Beobachtungsnetz seit 1976 (Amt für Umwelt und Energie (AUE), 2016). Ursprünglich war es aber nicht zur Überwachung der Grundwassertemperatur konzipiert, sondern für die Messung des Grundwasserspiegels und der Entnahme von Grundwasserproben.

Die flächendeckende digitale Aufzeichnung der Grundwasserstände sowie -temperaturen begann im Jahr 1994. Aufgrund der zunehmenden Verfügbarkeit von vergleichsweise kostengünstigen Temperatursensoren werden seit 1980 vermehrt auch Temperaturdaten erhoben.

Zusätzlich zum kantonalen Grundwasser-Beobachtungsnetz konnten für die Auswertungen im vorliegenden Bericht Grundwassermessstellen der Industriellen Werke Basel (IWB) und eine Grundwassermessstelle des Bundesamts für Umwelt (BAFU) mit einbezogen werden (Abbildung 2.1). Insgesamt standen Temperaturdaten von 18 Grundwassermessstellen von bis zu 22 Jahren zur Verfügung. 71 Grundwassermessstellen umfassen Datenreihen von mindestens 8 Jahren (2008-2015).

Die Messstellen des kantonalen Grundwasser-Beobachtungsnetzes lassen keine Aussagen über die vertikale Temperaturverteilung im Grundwasser oder in der ungesättigten Zone zu. Auch Auswirkungen von Heterogenitäten auf die Temperaturverteilung im Untergrund können nicht erfasst werden. Kenntnisse über die vertikale Temperaturverteilung in der ungesättigten Zone liefern Informationen über den Wärmestrom von der Oberfläche in den oberflächennahen Untergrund und das Grundwasser und ermöglichen eine Definition von thermischen Randbedingungen. Daher wurden im Rahmen eines Pilotprojektes (Huggenberger and Epting, 2011a) und des vorliegenden Projektes insgesamt 7 tiefendifferenzierte Temperaturmesssysteme installiert (Abbildung 2.1). Diese wurden für detaillierte Prozessstudien zum Wärmeeintrag und -transport und zur vertikal hochauflösenden Betrachtung der Temperaturverteilung im oberflächennahen Untergrund (ungesättigte und wassergesättigte Zone) ausgewertet.

Auf Grundlage der analysierten Zeitreihen der Grundwassermessstellen und der tiefendifferenzierten Temperaturmessstellen wird der „thermische Istzustand“ des oberflächennahen Untergrunds des Kantons Basel-Stadt im folgenden Kapitel statistisch beschrieben.

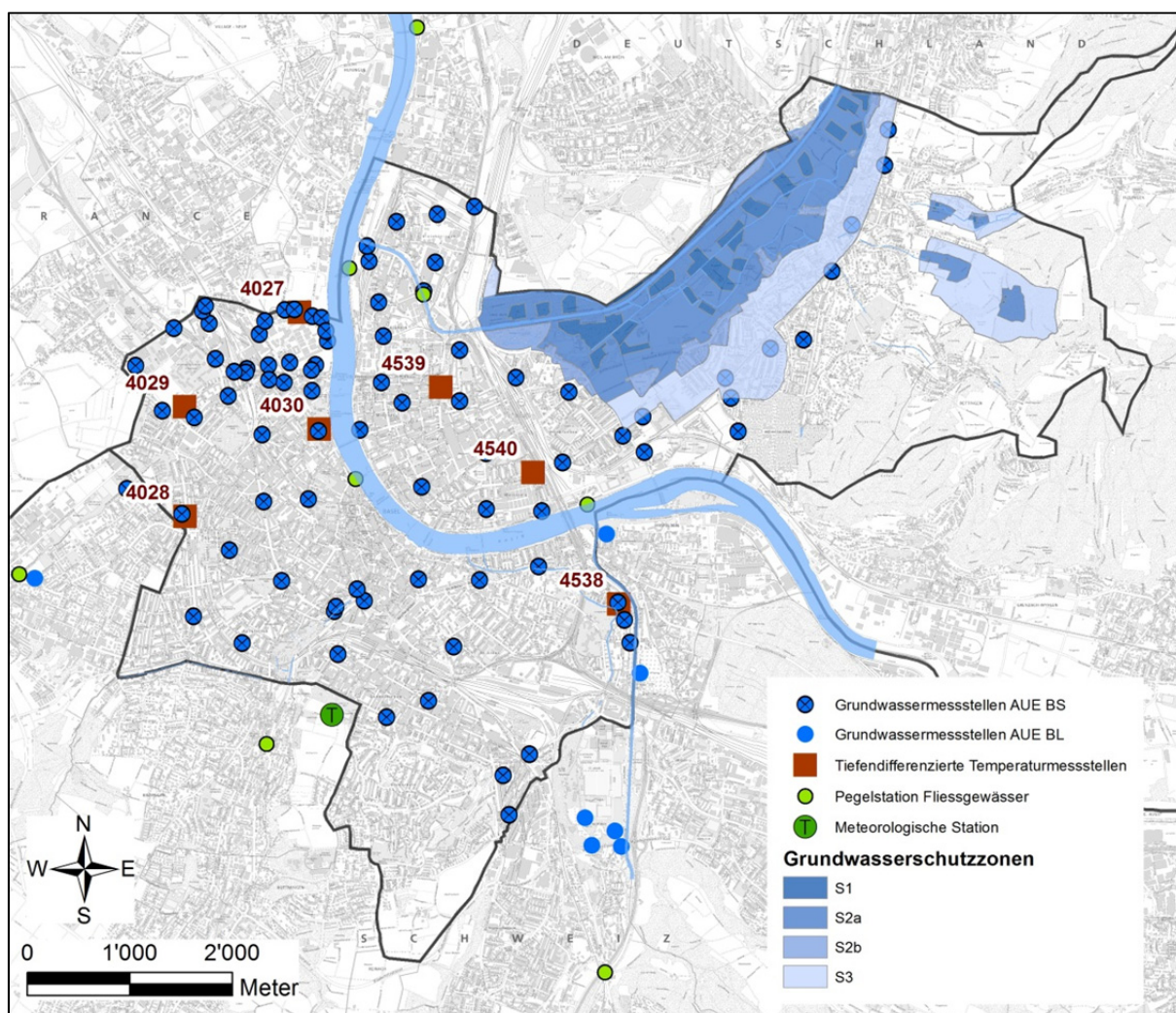


Abbildung 2.1: Lage der Grundwassermessstellen, tiefendifferenzierten Temperaturmessstellen, Messstationen der Fließgewässer, Meteorologischen Station und Grundwasserschutzzonen im Untersuchungsgebiet. Die Grundwassermessstellen im Bereich der Grundwasserschutzzonen S1-S2 werden aus Datenschutzgründen nicht gezeigt.

Zeitliche Entwicklung des „thermischen Istzustands“ 1994 bis 2015

Zur Evaluation des „thermischen Istzustandes“ und der zeitlichen Dynamik der Grundwassertemperaturen konnten Daten der kantonalen Grundwasserüberwachung und der Industriellen Werke Basel (IWB) von je 86 bzw. 32 Grundwassermessstellen (Abbildung 2.1), die zwischen 1994 und 2015 Daten aufgezeichnet haben, statistisch ausgewertet werden (die tiefendifferenzierten Temperaturmessstellen werden in einem weiteren Abschnitt gesondert betrachtet).

In stark urbanisierten Bereichen lagen die Grundwassertemperaturen zwischen 18 bis 19 °C im Jahresmittel. Etwa 50 % der Messstellen, die im städtischen Gebiet liegen, wiesen in den Jahren 1994 bis 2015 eine Grundwassertemperatur von über 12.9 bis 14.4 °C im Jahresmittel auf und lagen damit über dem Referenzwert von derzeit 12 °C (gemäss Wegleitung über die Grundwassernutzung im Kanton Basel-Stadt (Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt, 2014)). Im Gesamt-Mittel lagen die Grundwassertemperaturen in stark urbanisierten Bereichen von Basel-Stadt (Gebiete, die ausserhalb der Grundwasserschutzzonen liegen) bei 13.5 bis 14.7 °C (Abbildung 2.2, blaue Punkte ●). Die mittlere Veränderung der Grundwassertemperatur in den urbanen Gebieten (Abbildung 2.2,



blaue Punkte ●) betrug im Zeitraum von 1994 bis 2015 etwa $+0.05 \text{ K Jahr}^{-1}$ (statistisch signifikante Veränderung, $p < 0.05$). Bei 48 % der Messstellen ist die jährliche Temperaturerhöhung statistisch signifikant ($p < 0.05$) und insgesamt liegt die jährliche Temperaturerhöhung bei etwa 50 % aller Messstellen mit mindestens 8 Jahren Datenerhebung bei mindestens $+0.04 \text{ K Jahr}^{-1}$.

Am Stadtrand, in den weniger urban geprägten Gebieten (z.B. Grünflächen der Grundwasserschutzgebiete), lagen die Jahresmitteltemperaturen um etwa 1 bis 1.5 K tiefer als in den urbanen Bereichen (Abbildung 2.2, grüne Quadrate ■). Die Jahresmitteltemperatur der Luft an der Station Basel-Binningen (MeteoSchweiz Stationsnummer 1940) lag um $3.0 \pm 0.7 \text{ K}$ niedriger als die Jahresmittel der Grundwassertemperatur in den stark urban geprägten Gebieten. Wird von einer Referenztemperatur für das Grundwasser von 12 °C ausgegangen und die gesetzlich erlaubte maximale Veränderung von $\pm 3 \text{ K}$ in 100 m Entfernung des thermischen Eingriffes hinzugezogen, wäre eine Grundwasserabkühlung auf 9 °C zulässig. Bei einer mittleren Grundwassertemperatur von 14.7 °C kann somit für eine Wärmegegewinnung aus dem Grundwasser eine Temperaturdifferenz von $14.7 \text{ °C} - 9.0 \text{ °C} = 5.7 \text{ K}$ als mittleres thermisches Nutzungspotential für den Kanton Basel-Stadt im Jahr 2015 angesehen werden.

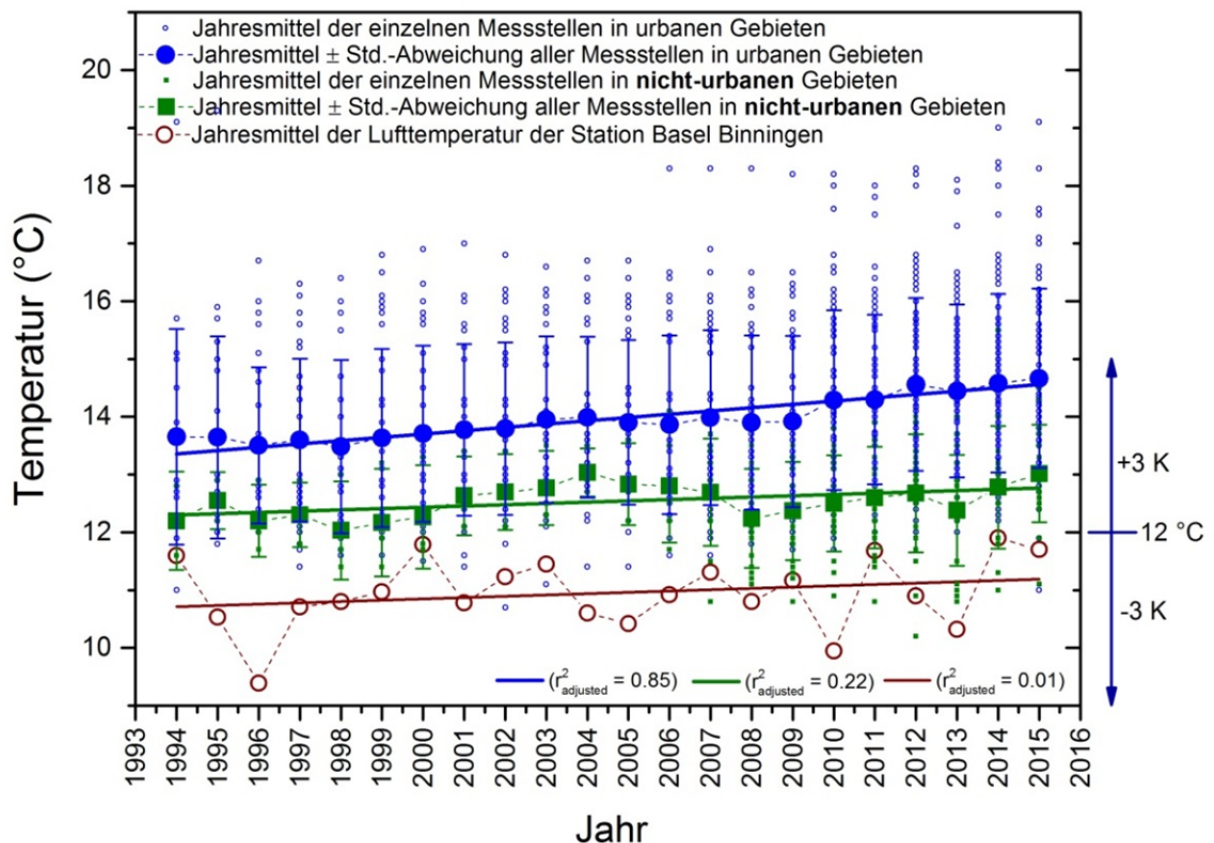


Abbildung 2.2: Jahresmittelwerte der Grundwassertemperaturen für den Zeitraum 1994 bis 2015 (Datengrundlage: AUE BS und IWB) und der Lufttemperatur (Basel-Binningen „BAS 1940“, MeteoSwiss (2016)).

Die Grundwassertemperaturen wurden für das gesamte Untersuchungsgebiet auch räumlich differenziert ausgewertet, um das thermische Nutzungspotential für verschiedene Quartiere evaluieren zu können. Die Randbereiche im Süden des Untersuchungsgebiets umfassen daher auch Grundwassermessstellen des Kantons Basel-Landschaft (Abbildung 2.1).

Im Jahr 2015 lagen die mittleren interpolierten Grundwassertemperaturen in stark urbanisierten Bereichen beidseitig des Rheins (Gross- und Kleinbasel) bei ca. 16 bis 17.5 °C , während sie in

weniger stark urbanisierten Bereichen, vor allem in den Randgebieten der Stadt, bei ca. 11.5 °C lagen (Abbildung 2.3). Die mittlere jährliche Temperaturerhöhung beträgt in manchen stark urbanisierten Bereichen wie z.B. dem nord-westlichen Gebiet in Grossbasel bis zu +0.14 K Jahr⁻¹ (Abbildung 2.4; Auswertung von 70 Messstellen und Datenreihen, die mindestens seit dem Jahr 2008 vorhanden waren. Die Temperaturerhöhung ist bei etwa der Hälfte der Messstellen statistisch signifikant). Nur in wenigen Bereichen (14 Messstellen) konnten keine Temperaturerhöhung oder sogar eine Temperaturabnahme beobachtet werden.

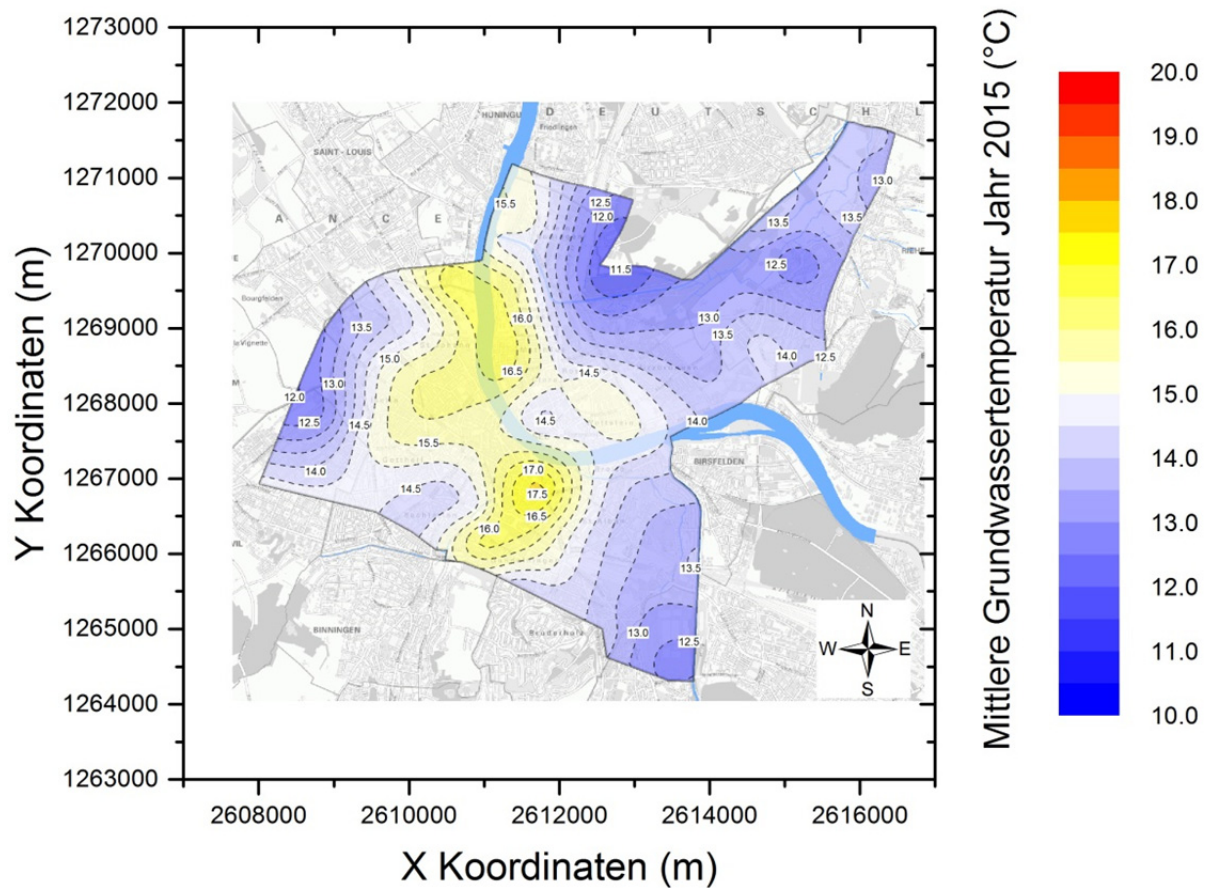


Abbildung 2.3: Interpolierte Jahresmittel der Grundwassertemperaturen im Jahr 2015 im Untersuchungsgebiet (Landeskoordinaten LV95).

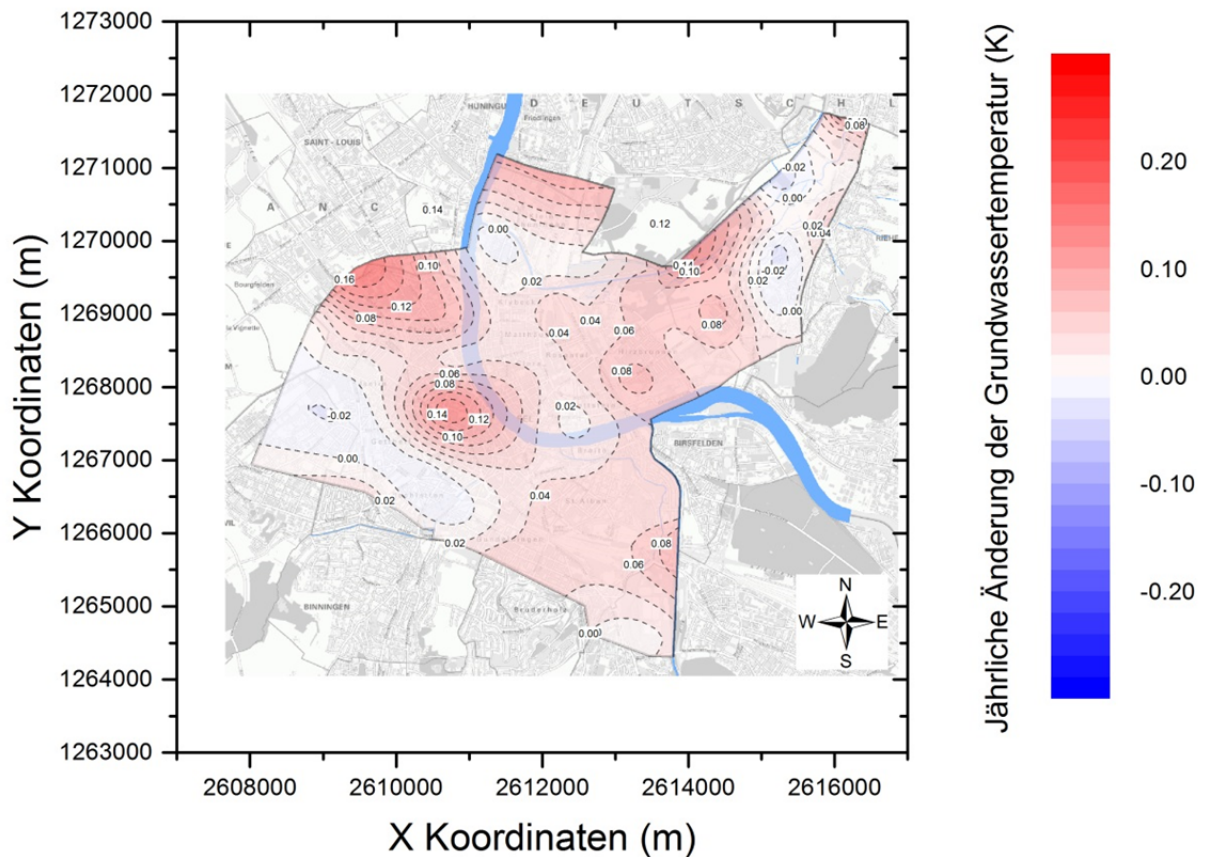


Abbildung 2.4: Interpolierte jährliche Veränderung der Grundwassertemperaturen im Untersuchungsgebiet (Auswertung von 70 Messstellen, die mindestens seit dem Jahr 2008 in Betrieb waren. Die Temperaturerhöhung ist bei etwa der Hälfte der Messstellen statistisch signifikant ($p < 0.05$). Landeskoordinaten LV95).

Tiefendifferenzierte Temperaturmessungen

Das Monitoring mit tiefendifferenzierten Temperaturmesssystemen (Abbildung 2.1) erlaubt es, detaillierte Temperaturdaten für Prozessstudien, z.B. zum advektiven Wärmetransport oder dem Eintrag von Wärme durch Gebäude im Grundwasser zu erheben. Ferner ermöglichen die Messungen eine vertikal hochauflösende Betrachtung der räumlichen Heterogenität der Temperaturverteilung im oberflächennahen Untergrund. Vier dieser tiefendifferenzierten Temperaturmesssystemen existieren seit dem Jahr 2010 und wurden im Rahmen einer Pilotstudie errichtet (Epting et al., 2013; Epting and Huggenberger, 2013a), drei weitere wurden im Dezember 2013 installiert. Mit diesen Messsystemen können die Temperaturen des Untergrundes sowohl in der ungesättigten Zone, als auch im grundwassergesättigten Bereich kontinuierlich erfasst werden. Die tiefendifferenzierten Temperaturmesssysteme sind an folgenden Positionen errichtet worden (Abbildung 2.1), um jeweils spezifische Fragestellungen beantworten zu können:

1. Messstelle 4027: Untersuchung des thermischen Einflusses im Abstrom eines Gebäudes, welches in das Grundwasser reicht (jahreszeitenabhängige Wärmeabstrahlung; Quantifizierung des Wärmeeintrags).
2. Messstelle 4028: Im Randgebiet der Stadt zur Erfassung des regionalen advektiven Wärmetransports aus dem vergleichsweise thermisch wenig beeinflussten Gebiet im Zustrom.
3. Messstelle 4029: Untersuchung des thermischen Einflusses im Abstrom einer Kühlwassernutzung (jahreszeitenabhängige Einleitung von erwärmtem Wasser).

4. Messstellen 4030 und 4538: Untersuchung des thermischen Einflusses der Fluss-Grundwasser Interaktion (saisonale Komponenten und Extremereignisse).
5. Messstelle 4539: Untersuchung des thermischen Einflusses im Abstrom eines Quartiers, welches neu überbaut wurde (jahreszeitenabhängige Wärmeabstrahlung; Quantifizierung des Wärmeeintrags).
6. Messstelle 4540: Untersuchung zum Wärmetransport im Zustrom eines Industrieareals.

Messstelle 4027

Die Messstelle 4027 ist im Grundwasserabstrom eines Gebäudes errichtet worden (Abbildung 2.1), welches bis in den Grundwasserstauer reicht. Die Temperaturen in 9 bzw. 18.5 m Tiefe unter Geländeoberkante (GOK) variieren jahreszeitlich zwischen ca. 12.5 und 16 °C (Abbildung 2.5). Die Temperaturmaxima in 9 m Tiefe sind im Vergleich zur Lufttemperatur um etwa 5 bis 6 Monate verschoben. In der ungesättigten Zone in etwa 9 m Tiefe unter GOK werden im Mittel um ca. 0.9 K niedrigere Temperaturen als in der wassergesättigten Zone in 18.5 m Tiefe unter GOK gemessen. Auch in einer Tiefe von 18.5 m unter GOK sind saisonale Schwankungen erkennbar, die unter den gegebenen Bedingungen (saisonaler Verlauf der Lufttemperatur, Bodeneigenschaften) in dieser Tiefe nicht mehr zu erwarten wären. Eine analytische Berechnung der Bodentemperatur nach Baehr and Stephan (2006) ergibt, dass die jahreszeitlichen Schwankungen der Lufttemperatur in der Region etwa bei einer Tiefe von 12 m unter GOK ausgeglichen sind, so dass die Temperatur in dieser Tiefe in etwa dem Jahresmittel der Lufttemperatur von etwa 10 bis 12 °C entsprechen müsste (Jahre 2010 bis 2014). Die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen in grosser Tiefe deuten auf einen Einfluss des tiefen Gebäudes durch jahreszeitlich bedingte Wärmeabstrahlung hin.

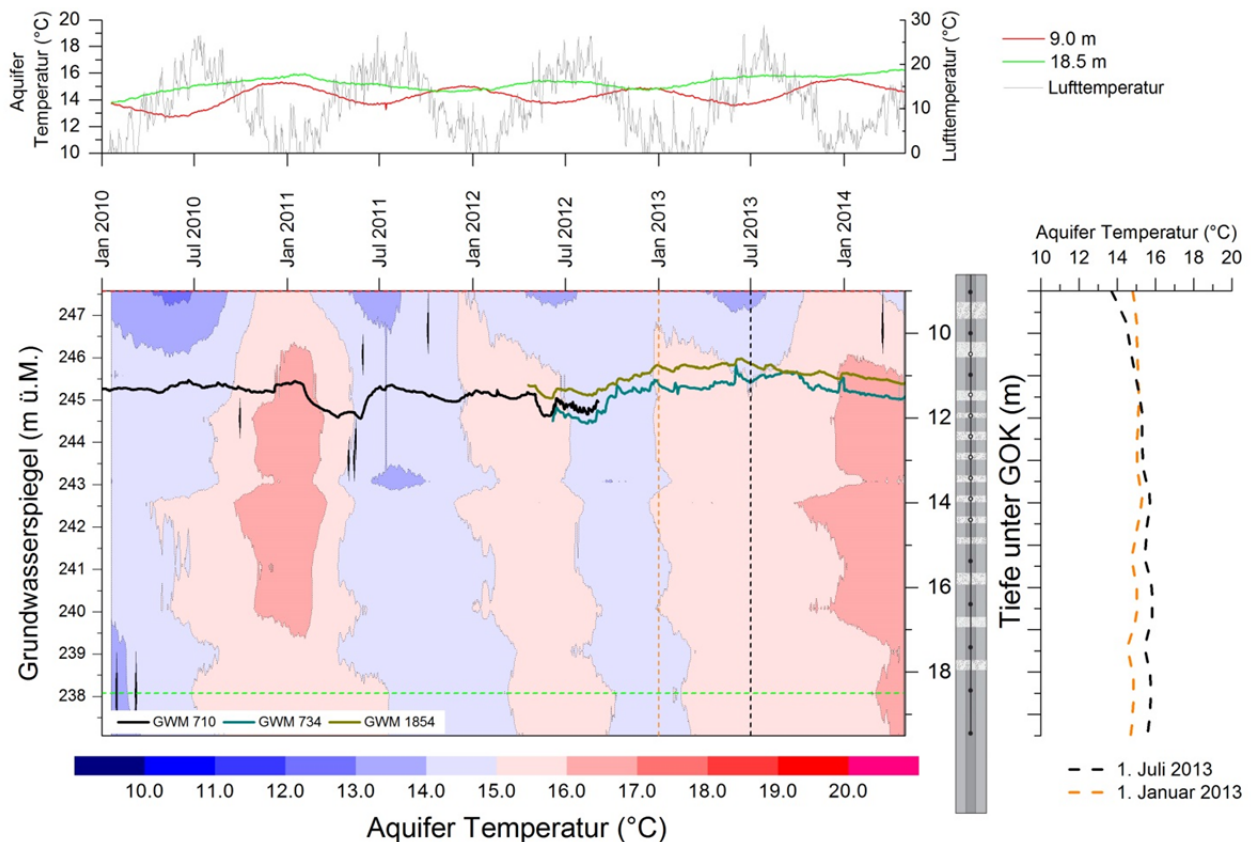


Abbildung 2.5: Zeitliche und räumliche Temperaturverteilung der tiefendifferenzierten Temperaturmessstelle 4027 im Grundwasserabstrom eines bis in den Grundwasserstauer reichenden Gebäudes im Gebiet Grossbasel Nord-West (Abbildung 2.1). Die grüne (--) und die rote (--) Profillinie (oben) geben den jahreszeitlichen Verlauf der Temperaturen in zwei Tiefen wieder. Die orangefarbene (--) und die schwarze (--) Profillinie (rechts) geben die Temperaturverteilung in der Tiefe an zwei verschiedenen Tagen wieder (Winter und Sommer). Kontinuierlich gemessene Grundwasserspiegel nahegelegener Grundwassermessstellen (GWM) sind im Konturdiagramm dargestellt.



Messstelle 4028

Die Temperatur entlang des Tiefenprofils der Messstelle 4028, die am westlichen Rand des Stadtgebiets liegt (Abbildung 2.1), ist im Jahresverlauf sehr ausgeglichen und schwankt nur um etwa 0.2 K (mittlere Standardabweichung entlang der Tiefe, Abbildung 2.6). Der Grundwasserspiegel befindet sich in einer Tiefe von 18 bis 19 m unter GOK. In dieser Tiefe ist die Grundwassertemperatur erwartungsgemäss unbeeinflusst von saisonalen Schwankungen der Lufttemperatur (siehe oben). Die Temperaturen im Untergrund im Zustrom am süd-westlichen Rand von Grossbasel liegen im Mittel bei etwa 14.3 °C und somit über dem Jahresmittelwert der Lufttemperatur von 11 °C der Station Basel-Binningen.

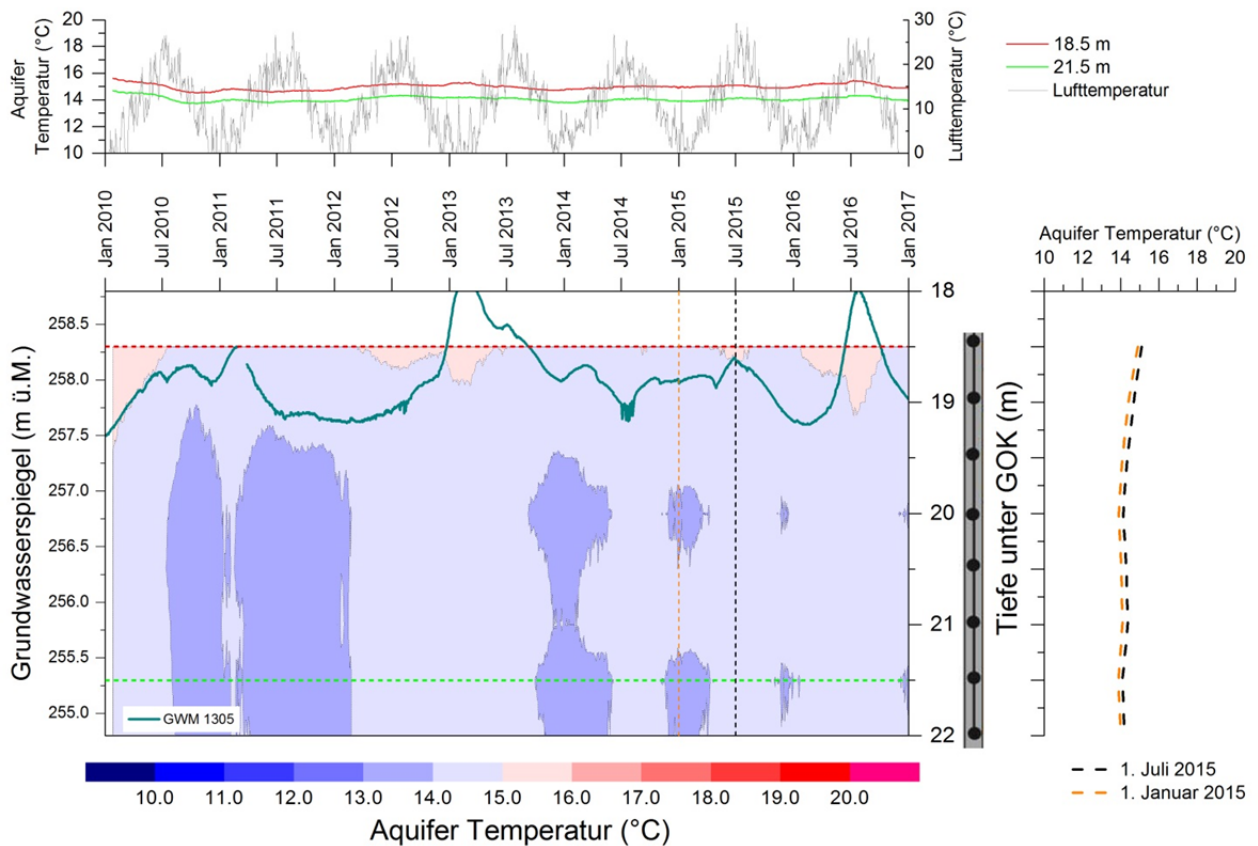


Abbildung 2.6: Zeitliche und räumliche Temperaturverteilung der tiefendifferenzierten Temperaturmessstelle 4028 im Zustroms aus dem, vergleichsweise thermisch wenig beeinflussten, Gebiets in Grossbasel Nord-West (Abbildung 2.1). Die grüne (---) und die rote (---) Profillinie (oben) geben den zeitlichen Verlauf in zwei Tiefen wieder. Die orangefarbene (---) und die schwarze (---) Profillinie (rechts) geben die Temperaturverteilung in der Tiefe an zwei verschiedenen Tagen wieder (Winter und Sommer). Der kontinuierlich gemessene Grundwasserspiegel einer nahegelegenen Grundwassermessstelle (GWM) ist im Konturdiagramm dargestellt.

Messstelle 4029

Die Messstelle 4029 (Abbildung 2.1) wurde im Abstrom einer Kühlwassernutzung installiert. Die jahreszeitlichen Schwankungen der Lufttemperatur sind in Tiefen zwischen 15.5 bis 23 m unter GOK nicht mehr zu erkennen (die Standardabweichung der Temperaturen liegen bei ca. 0.2 K, Abbildung 2.7). Die Temperaturen verlaufen räumlich und zeitlich relativ konstant und liegen bei ca. 14 °C. Ein direkter Einfluss der Kühlwassereinleitung ist in dieser Messstelle nicht zu erkennen. Da die Messstelle 4029 nicht exakt im Grundwasserabstrom der Kühlwassereinleitung positioniert werden konnte, wird die zeitlich variable Kühlwassereinleitung möglicherweise nicht erfasst (Köhler et al., 2015).

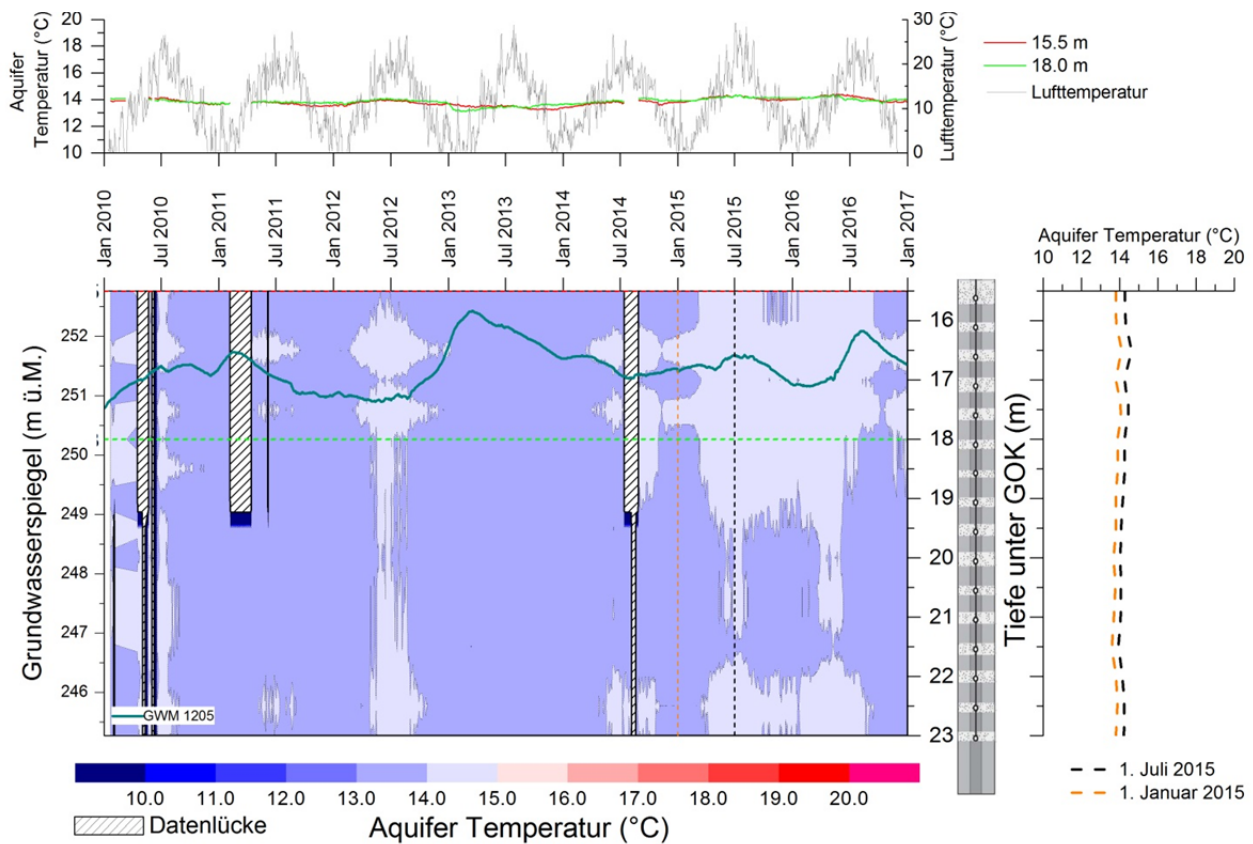


Abbildung 2.7: Zeitliche und räumliche Temperaturverteilung der tiefendifferenzierten Temperaturmessstelle 4029 im Abstrom einer Kühlwassernutzung im Gebiet Grossbasel Nord-West (Abbildung 2.1). Die grüne (--) und die rote (--) Profillinie (oben) geben den zeitlichen Verlauf in zwei Tiefen wieder. Die orangefarbene (--) und die schwarze (--) Profillinie (rechts) geben die Temperaturverteilung in der Tiefe an zwei verschiedenen Tagen wieder (Winter und Sommer). Der kontinuierlich gemessene Grundwasserspiegel einer nahegelegenen Grundwassermessstelle (GWM) ist im Konturdiagramm dargestellt.

Messstelle 4030

Die Messstelle 4030 (Abbildung 2.1) wurde im Gebiet Grossbasel in der Nähe des Rheins installiert, um die thermische Interaktion zwischen Rhein- und Grundwasser zu untersuchen. Die mittleren Temperaturen dieser Messstelle liegen zwischen 14.7 und 15.3 °C (Abbildung 2.8). Die saisonalen Schwankungen sind in einer Tiefe von 9 m unter GOK zeitverzögert gegenüber der Lufttemperatur feststellbar. Mit der Tiefe nehmen die saisonalen Schwankungen tendenziell ab. In Tiefen von ca. 20 bis 21 m unter GOK ist eine Einschichtung von etwas wärmerem Grundwasser erkennbar, was auf eine präferentielle advective Wärmeausbreitung in dieser Schicht hindeutet. Detailuntersuchungen ergaben, dass bei Hochwasserereignissen (im Sommer und im Winter) der thermische Einfluss des Oberflächenwassers auf die Temperaturen des Untergrundes nicht direkt zu erkennen war (Köhler et al., 2015).

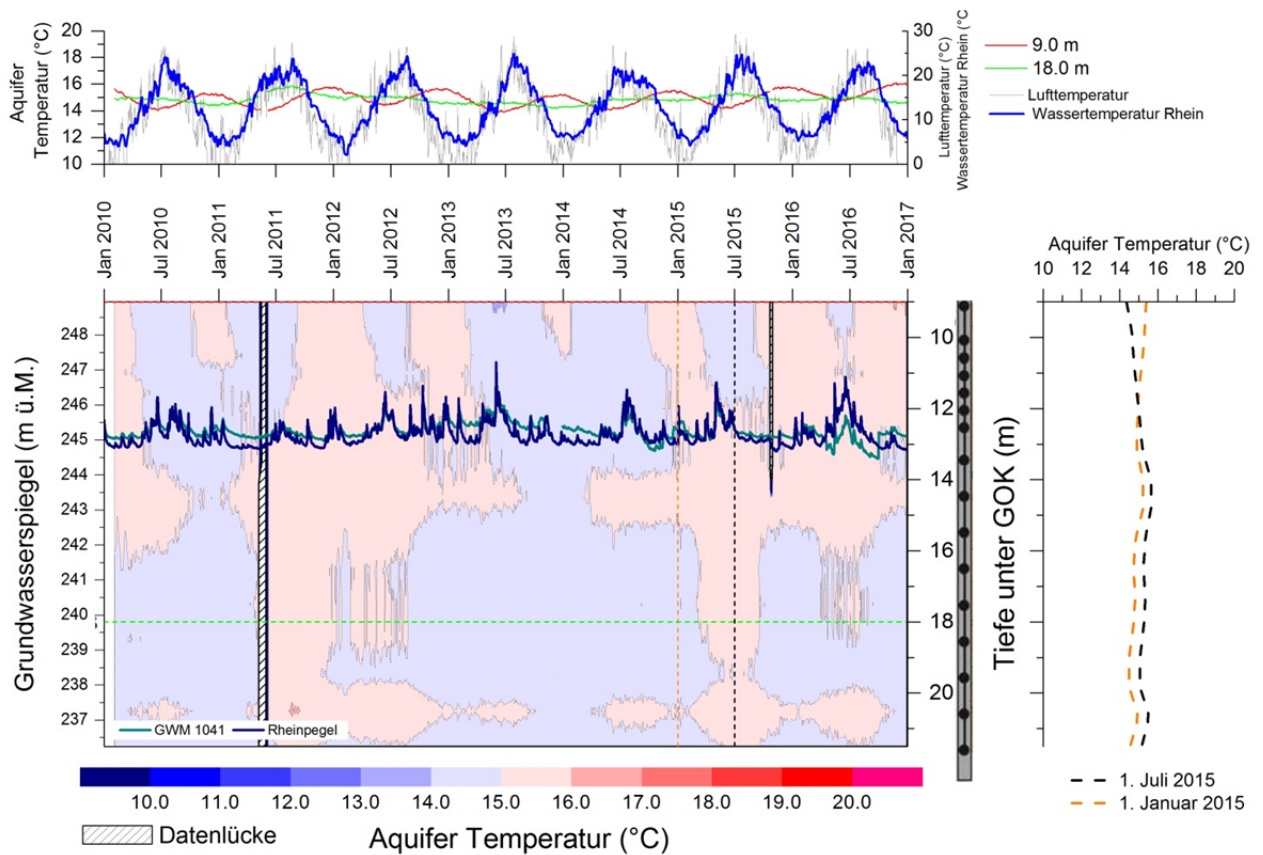


Abbildung 2.8: Zeitliche und räumliche Temperaturverteilung der tiefendifferenzierten Temperaturmessstelle 4030 im Gebiet Grossbasel Nord-West in der Nähe des Rheins (Abbildung 2.1). Die grüne (--) und die rote (--) Profillinie (oben) geben den zeitlichen Temperaturverlauf in zwei Tiefen wieder; die blaue Linie (-) zeigt die Temperatur des Rheinwassers. Die orangefarbene (--) und die schwarze (--) Profillinie (rechts) geben die Temperaturverteilung in der Tiefe an zwei verschiedenen Tagen wieder (Winter und Sommer). Der kontinuierlich gemessene Grundwasserspiegel einer nahegelegenen Grundwassermessstelle (GWM) und der Wasserstand des Rheins (Pegelstation BAFU Station Nr. 2615 ca. 600 m stromaufwärts der Messstelle 4030, Abbildung 2.1) sind im Konturdiagramm dargestellt.

Messstelle 4538

Die Messstelle 4538 (Abbildung 2.1) in der Nähe des Flusses Birs verfügt über Temperatur-Sonden in Tiefen zwischen etwa 0.5 und 13.5 m unter GOK. Durch die sehr oberflächennahe Installation der Temperatur-Sonden liefert diese Messstelle Informationen über die oberflächennahe ungesättigte Zone (Abbildung 2.9) und ermöglicht es, den Wärmeeintrag über die Atmosphäre und in diesem Bereich versiegelte Oberflächen in den Untergrund abzuschätzen. Im oberflächennahen Bereich, bis etwa 3 m Tiefe unter GOK, treten sehr grosse jahreszeitliche Temperaturschwankungen zwischen 5 und 28 °C auf. Im Übergang zur wassergesättigten Zone in etwa 3 m Tiefe unter GOK werden die Temperaturschwankungen deutlich auf Temperaturschwankungen zwischen 12 bis 16 °C abgeschwächt (vgl. Tiefenprofile im Januar und Juli 2015 in Abbildung 2.9). Eine Detailuntersuchung von Hochwasserereignissen in der Birs zeigte, dass in den oberen Bereichen der gesättigten Zone eine Veränderung der Temperatur zu detektieren war. In tieferen Bereichen der gesättigten Zone (bereits ab ca. 7 m unter GOK) war bei Hochwasserereignissen keine deutliche Reaktion der Temperatur zu erkennen. Dies deutet, wie auch schon beim Rhein und Messstelle 4030 beobachtet wurde, darauf hin, dass der thermische Einfluss des Oberflächenwassers in einem Abstand von mehr als 100 m vom Ufer für die untersuchten Messstellen nicht mehr zu detektieren ist.

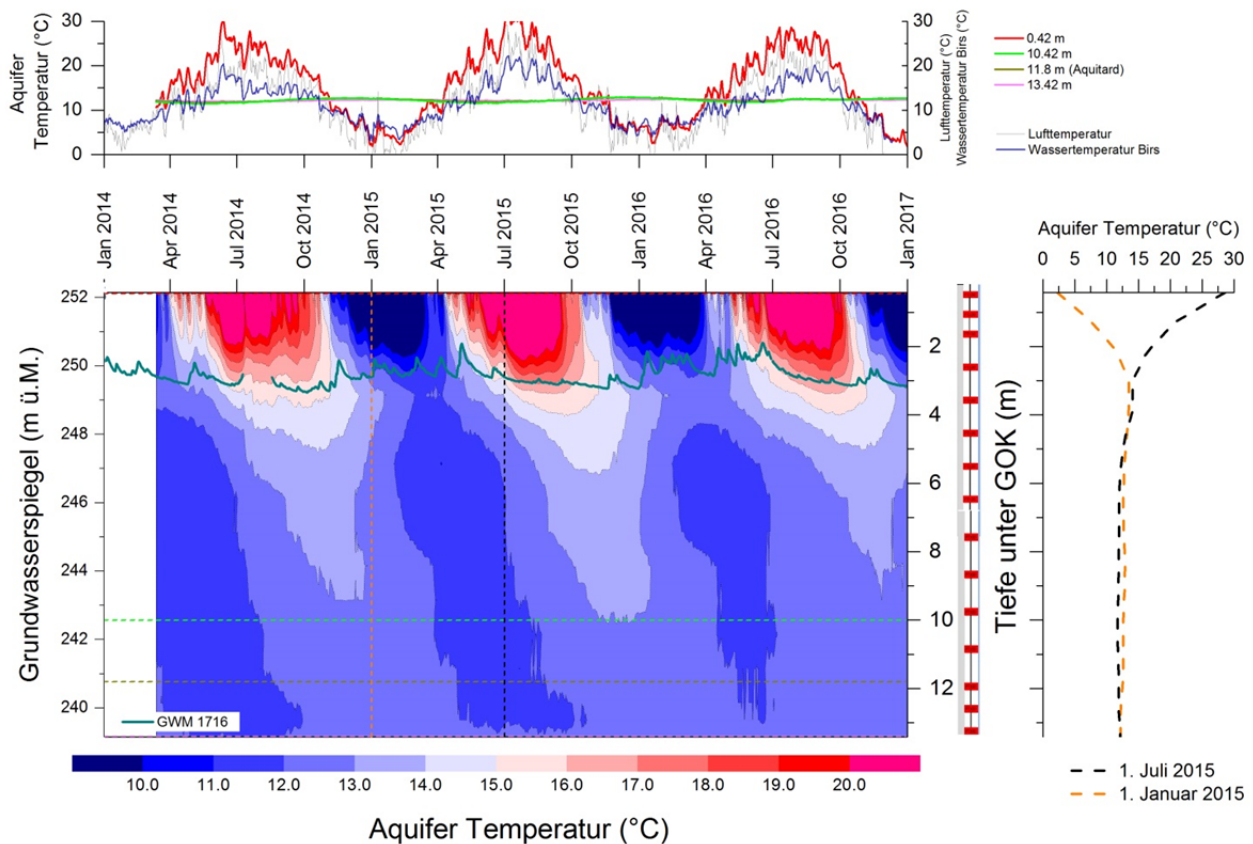


Abbildung 2.9: Zeitliche und räumliche Temperaturverteilung der tiefendifferenzierten Temperaturmessstelle 4538 in einem Wohngebiet nahe des Flusses Birs im Gebiet Grossbasel Süd-Ost (Abbildung 2.1). Die grüne (---), rote (---), olivgrüne (---) und magentafarbene (---) Profillinie (oben) geben den zeitlichen Verlauf in vier Tiefen wieder. Die orangefarbene (---) und die schwarze (---) Profillinie (rechts) geben die Temperaturverteilung in der Tiefe an zwei verschiedenen Tagen wieder (Winter und Sommer). Der kontinuierlich gemessene Grundwasserspiegel einer nahegelegenen Grundwassermessstelle (GWM) ist im Konturdiagramm dargestellt.

Messstelle 4539

Die Temperaturen in Messstelle 4539 (Abbildung 2.1), die sich im Abstrom einer neuen Überbauung im Erlenmatt-Areal befindet, schwanken jahreszeitenbedingt in der ungesättigten Zone zwischen 11.5 und 18.5 °C (Abbildung 2.10). Das Temperaturmaximum in 6 m Tiefe unter GOK ist gegenüber der Lufttemperatur um etwa ein halbes Jahr verzögert. In der wassergesättigten Zone gehen diese saisonalen Schwankungen stark zurück (ab ca. 14.6 m unter GOK beträgt die Standardabweichung der Temperatur ≤ 0.5 K) und die Temperaturen liegen hier im Bereich von 12.7 und 15.8 °C. Ab April 2016 steigen die Temperaturen in ca. 11.6 m unter GOK markant von etwa 12.5 auf 15 °C an. Dieser Anstieg ist ein Hinweis auf Wärmeeinträge im Untergrund durch die Gebäude während der ersten Heizperiode im Winter 2015/2016. Diese Messstelle eignet für die langfristige Dokumentation des thermischen Einflusses der neuen Quartiersüberbauung im Erlenmatt Areal.

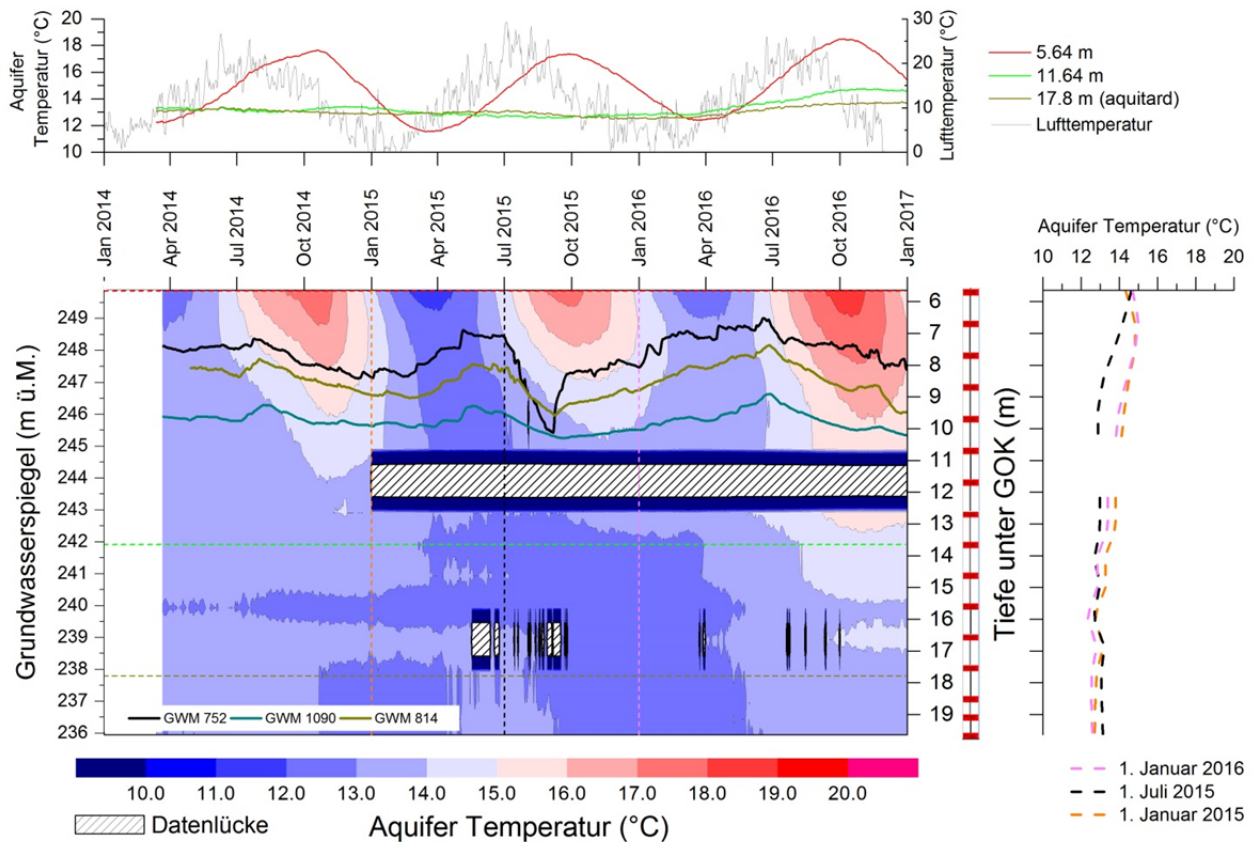


Abbildung 2.10: Zeitliche und räumliche Temperaturverteilung der tiefendifferenzierten Temperaturmessstelle 4539 im Grundwasserabstrom einer neuen Siedlungsüberbauung im Gebiet Kleinbasel (Abbildung 2.1). Die grüne (---), rote (---) und olivgrüne (---) Profilinie (oben) geben den zeitlichen Verlauf in drei Tiefen wieder. Die orangefarbene (---) und die schwarze (---) Profilinie (rechts) geben die Temperaturverteilung in der Tiefe an zwei verschiedenen Tagen wieder (Winter und Sommer). Der kontinuierlich gemessene Grundwasserspiegel von nahegelegenen Grundwassermessstellen (GWM) ist im Konturdiagramm dargestellt. Datenlücken sind weiss dargestellt. Die Datenlücke in 11 bis 12 m Tiefe ist auf einen Defekt des Temperatursensors zurückzuführen.

Messstelle 4540

Die Temperaturen in Messstelle 4540 (Abbildung 2.1), die sich im Zustrom eines Industrieareals befindet, schwanken jahreszeitenbedingt in der ungesättigten Zone zwischen 12.7 und 15.8 °C (Abbildung 2.11). Das Temperaturmaximum in 7 m Tiefe ist gegenüber der Lufttemperatur um etwa ein halbes Jahr verzögert. In der wassergesättigten Zone gehen diese Schwankungen stark zurück und die Temperaturen liegen hier im Bereich von 13.4 und 14.5 °C. In den Tiefen ab ca. 13.7 m unter GOK beträgt die Standardabweichung der Temperatur weniger als 0.2 K. Selbst starke Grundwasserspiegeländerungen von bis zu fast 3 m im Jahr 2015 und 2016 wirken sich kaum auf den Temperaturverlauf in 12 m Tiefe unter GOK aus (dieser Bereich ist bei starker Grundwasserspiegelabsenkung ungesättigt). Diese Messstelle zeigt, dass dem Industrieareal ganzjährig Grundwasser mit vergleichsweise konstanter Temperatur zufließt und bei einer Grundwassernutzung mit nur sehr geringen Temperaturschwankungen zu rechnen wäre.

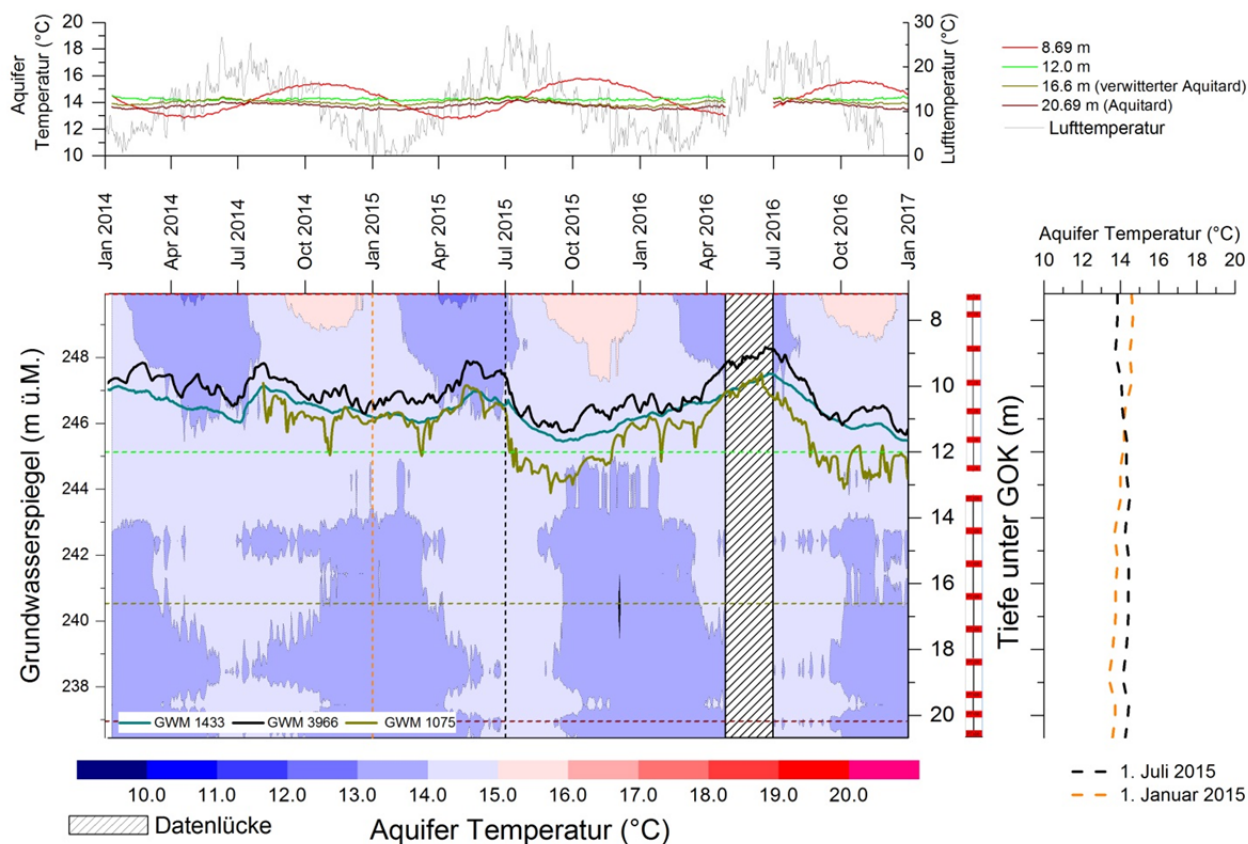


Abbildung 2.11: Zeitliche und räumliche Temperaturverteilung der tiefendifferenzierten Temperaturmessstelle 4540 im Grundwasserzustrom eines Industrieareals im Gebiet Kleinbasel (Abbildung 2.1). Die grüne (---), rote (---), olivgrüne (---) und braune (---) Profillinie (oben) geben den zeitlichen Verlauf in vier Tiefen wieder. Die orangefarbene (---) und die schwarze (---) Profillinie (rechts) geben die Temperaturverteilung in der Tiefe an zwei verschiedenen Tagen wieder (Winter und Sommer). Der kontinuierlich gemessene Grundwasserspiegel von nahegelegenen Grundwassermessstellen (GWM) ist im Konturdiagramm dargestellt.

2.2 Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodelle

Im folgenden Abschnitt werden die Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodelle beschrieben, die Wasser- und Wärmebilanzen der einzelnen Teilgebiete von Basel diskutiert und daraus der „thermische Istzustand“ anhand ausgewählter Zeitpunkte abgeleitet.

Modellaufbau, Kalibrierung und Validierung

Die urban geprägten Bereiche des Kantons Basel-Stadt wurden für das Erstellen der Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodelle in vier Teilgebiete unterteilt (Teilgebiete A-D, Abbildung 2.12). Die Fläche dieser Teilgebiete entspricht mit ca. 22.3 km² etwa 80 % der Gemeinde Basel, ohne die Gemeinden Riehen und Bettingen. Bei den ausgewählten Bereichen handelt es sich um die Gebiete mit dem grössten Zuwachs an Konzessionen und Konzessionsgesuchen für die Wärmenutzung oder Gebäudekühlung. Die Gemeinde Riehen und der Bereich Wiese wurden aufgrund des insgesamt geringeren Bebauungsgrades (vor allem fehlende tiefe Bauwerke) und der geringeren Anzahl an (bestehenden und geplanten) thermischen Grundwassernutzungen vorerst nicht weiter behandelt. Die Gemeinde Bettingen befindet sich in einem Seitental und nicht auf den Lockergesteinsablagerungen der untersuchten Grundwasserbereiche.



Die Implementierung der Randbedingungen der einzelnen Teilgebiete orientiert sich am Vorgehen, das in Epting et al. (2013) beschrieben ist. Die gewählten Grenzen der jeweiligen Teilgebiete basieren auf natürlichen hydrologischen Grenzen (den Fliessgewässern Rhein, Wiese, Birs und Birsig), hydrogeologischen Begrenzungen der grundwassergesättigten Lockergesteine oder verlaufen parallel bzw. senkrecht zu Grundwassergleichen. Das gewählte Vorgehen ermöglicht eine Definition von hydraulisch und thermisch eindeutigen Randbedingungen, da an diesen Rändern Messdaten zu Grundwasserspiegelhöhen, Wasserständen in den Fliessgewässern und den jeweiligen Temperaturen vorliegen.

Die für die Modellierung verwendete Software FEFLOW (Versionen 6.2 und 7.0) (Diersch, 2013) beruht auf der Methode der Finiten Elemente. Für die Generierung des Modellnetzes werden Punkte (z.B. Grundwassermessstellen und -entnahmekbrunnen) oder Linien (z.B. Gebäude, Flussufer, Spundwände oder versiegelte Flächen und unversiegelte Grünflächen), an denen sich das Modellnetz orientiert, definiert. Die Simulationssoftware ermöglicht eine gekoppelte Simulation der Grundwasserströmung und des (konduktiven und advektiven) Wärmetransports.

Folgende Daten werden für den Modellaufbau, die Implementierung der Randbedingungen, die Kalibrierung und die Validierung der Modelle und die anschliessenden Szenarienberechnungen berücksichtigt:

- Aktualisierte Felsoberfläche im Gebiet des Kantons Basel-Stadt (AUG, Stand 2014).
- Digitale Geländemodelle zur Definition der Topographie.
- Daten der Topographie der Flusssohlen von Rhein, Wiese und Birs.
- Datenreihen der Grundwasserspiegelhöhen und -temperaturen aus den kantonalen Überwachungsprogrammen der Kantone Basel-Stadt und Basel-Landschaft sowie den Industriellen Werken Basel (IWB) der Jahre 2010 bis 2015.
- Datenreihen der tiefendifferenzierten Temperaturmessstellen der Jahre 2010 bis 2015.
- Monatliche Grundwasserentnahmen und -anreicherungsmengen der Grundwassernutzer (z.T. AUE BS und BL, Kontakt mit Grundwassernutzern) der Jahre 2010 bis 2015.
- Angaben über Entnahme- und Rückgabetemperaturen von Grundwassernutzern, welche das Grundwasser thermisch nutzen (z.T. AUE BS, Kontakt mit Grundwassernutzern) der Jahre 2010 bis 2015.
- Wasserstand und -temperaturen der Fliessgewässer (Rhein, Wiese, Birs, Birsig) der Jahre 2010 bis 2015 (BAFU, IWB).
- Meteorologische Grundlagendaten (z.B. Lufttemperatur und Niederschlag) der Jahre 2010 bis 2015 (MeteoSwiss).
- Informationen zu Untergrundstrukturen, wie z.B. Fläche, Tiefe und Nutzung von Einbauten in den Untergrund (AUE BS, Gebäudeversicherung Basel-Stadt).
- Information zu geplanten Bebauungen und Bebauungspläne des Kantons Basel-Stadt (Grundbuch- und Vermessungsamt BS, Tiefbauamt BS, Planungsamt BS, öffentlich zugängliche Information im Internet).

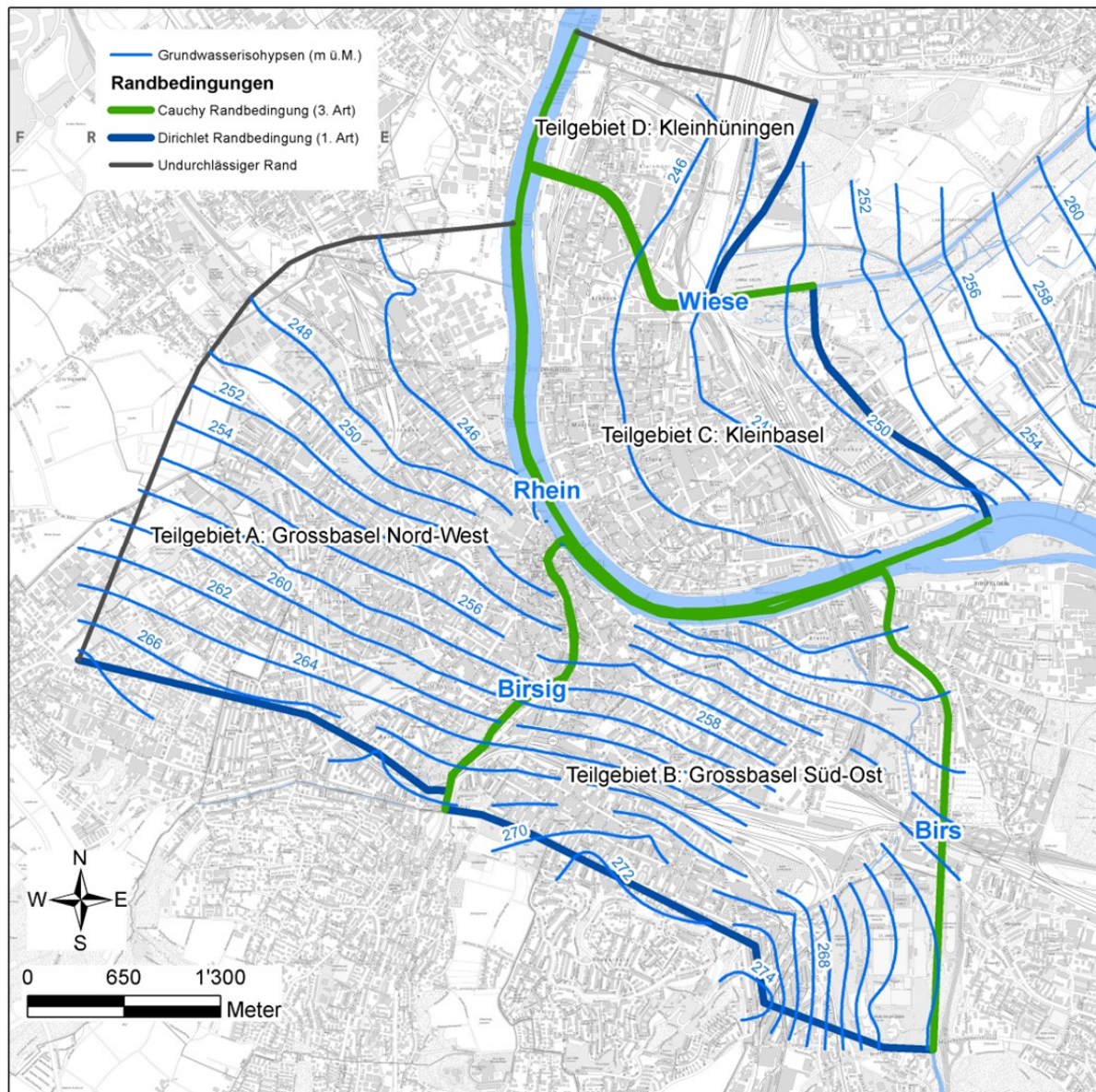


Abbildung 2.12: Interpolierte Grundwasserisohypsen und Einteilung des Untersuchungsgebiets in Teilgebiete und gewählte Randbedingungen für die Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodelle.

Für die automatisierte inverse Kalibrierung wurde die in FEFLOW implementierte Software FEPEST, die eine Schnittstelle zur Software PEST (Doherty, 2004) darstellt, verwendet. Die instationäre Kalibrierung der Strömungsmodelle umfasst das Jahr 2010 mit den Tagesmittelwerten der in den Grundwassermessstellen gemessenen Grundwasserstände. Hierbei wurden die hydraulischen Leitfähigkeiten mit Hilfe der „pilot point“ Methode (Doherty, 2003) räumlich variabel kalibriert. Die Durchlässigkeitskoeffizienten für die Cauchy-Randbedingungen der Fliessgewässer wurden zonal kalibriert. Die hydraulischen Leitfähigkeiten werden bei der „pilot point“ Methode mit der Kriging-Methode geostatistisch interpoliert. Die Datenreihen der Jahre 2011 bis 2015 dienten der Validierung der Strömungsmodelle. Hierbei zeigte sich, dass die gemessenen Grundwasserspiegelhöhen zufriedenstellend simuliert werden. Das Bestimmtheitsmass (R^2) für die mittleren Grundwasserstände liegt bei den simulierten Teilgebieten bei 0.97 bis 0.99.

Nach der Kalibrierung der hydraulischen Parameter wurden die Wärmetransferterme für die Oberfläche räumlich variabel (Interpolation mit Hilfe der Kriging-Methode) invers kalibriert. Die Wärmetransferterme für die Flusssohlen der Fließgewässer Rhein, Wiese, Birs und Birsig sind bei der Kalibrierung zonal berücksichtigt worden. Die Tagesmittelwerte der Grundwassertemperaturen und der tiefendifferenzierten Temperaturmessstellen dienen der Kalibrierung der Wärmetransferraten von der Oberfläche in den Untergrund. Die Verwendung von zwei Jahren gewährleistete, dass eine jahreszeitlich bedingte Phasenverschiebung der Temperaturen mit der Tiefe berücksichtigt werden konnte. Die Validierung der Wärmetransportmodelle umfasste die verfügbaren Datenreihen der jeweils übrigen vier Jahre (2010 bis 2013 oder 2012 bis 2015). Hierbei zeigte sich, dass die gemessenen Grundwassertemperaturen zufriedenstellend simuliert werden konnten. Das Bestimmtheitsmass (R^2) für die mittleren Grundwassertemperaturen liegt bei den simulierten Teilgebieten bei 0.84 bis 0.96 (im Gesamtmittel bei 0.73, Abbildung 2.13). Bei einzelnen Ausreissern ergeben sich Abweichungen von maximal 2.6 K zwischen den simulierten und den gemessenen Grundwassertemperaturen (Abbildung 2.13). Dies betrifft vor allem die Grundwassermessstellen, die auch bei der statistischen Auswertung (Kapitel 2.1) als Ausreisser mit vergleichsweise hohen gemessenen Grundwassertemperaturen identifiziert werden konnten (Abbildung 2.2).

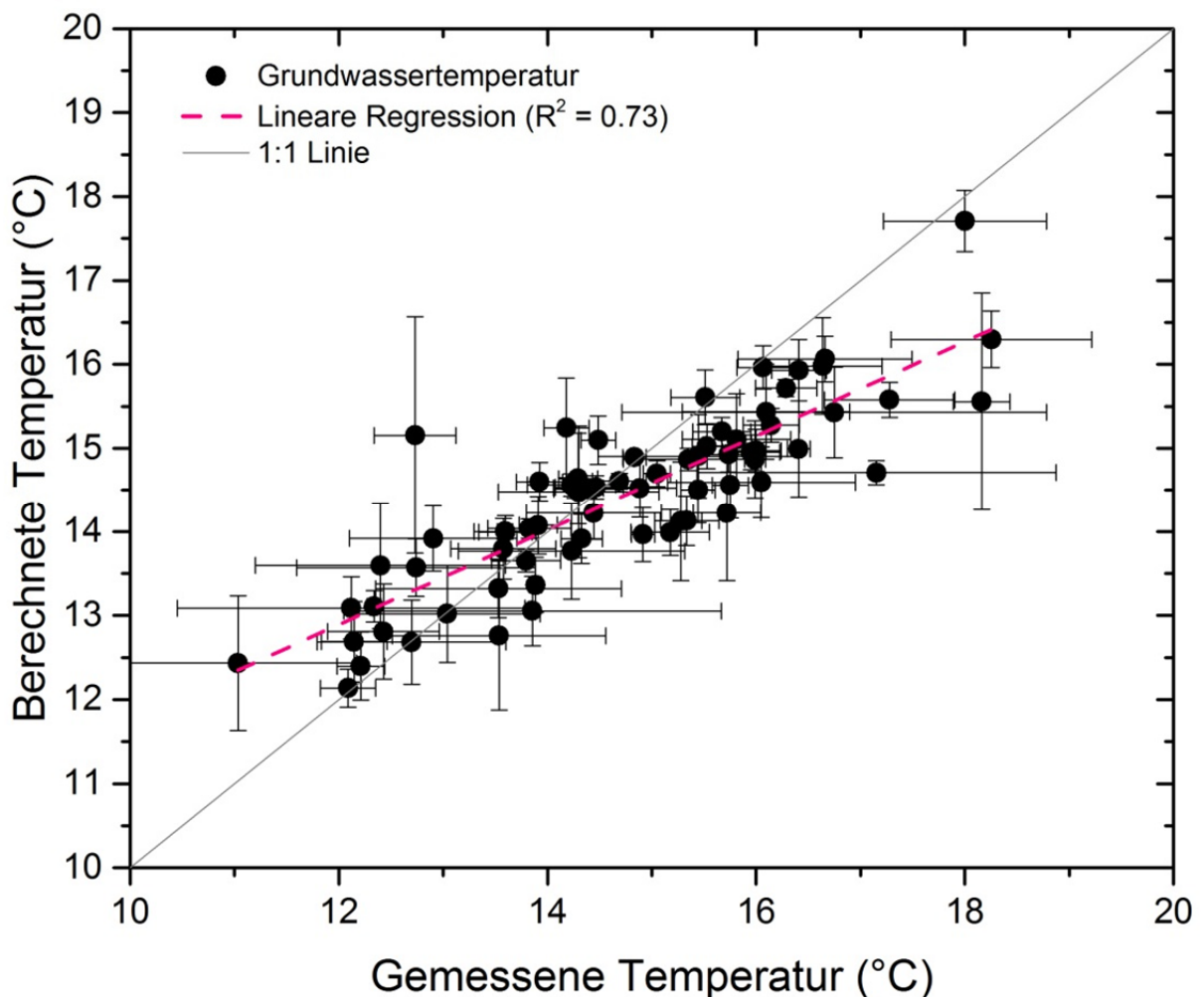


Abbildung 2.13: Mittelwerte und Standardabweichung der gemessenen und mit den Wärmetransportmodellen berechneten Grundwassertemperaturen der vier Teilgebiete Grossbasel Nord-West, Grossbasel Süd-Ost, Kleinbasel und Kleinhüningen (betrachteter Zeitraum: Jahre 2010 bis 2015 (Teilgebiete A-D, Abbildung 2.12)).



Ableitung des thermischen Istzustands und der Wärmeströme mit Hilfe der Wärmetransportmodelle

Auf Grundlage der kalibrierten und validierten Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodelle kann der thermische Istzustand des gesamten urbanen Stadtgebiets des Kantons Basel-Stadt (22.3 km²), eingeteilt in vier Teilgebiete, abgeleitet werden. Im Folgenden werden die simulierten Grundwassertemperaturen für ausgewählte Zeitpunkte und die Gesamt-Wärmebilanzen der einzelnen Teilgebiete über die Jahre 2010 bis 2015 beschrieben.

Der Wärmetransport wird über die Advektions-Dispersions-Gleichung berechnet, die Diffusions-/Dispersions-Effekte, sowie den Wärmetransport durch den Grundwasserfluss (advektiver Transport) gekoppelt berücksichtigt (de Marsily, 1986 und Domenico & Schwartz, 1998):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\kappa_e}{\rho c} \nabla^2 T - \frac{\rho_w c_w}{\rho c} \nabla \cdot (qT) \quad (\text{Gleichung 1}),$$

mit T = Temperatur, t = Zeit, ρ und c = Dichte und spezifische Wärmekapazität der Wasser-Gesteins-Matrix, ρ_w und c_w = Dichte und spezifische Wärmekapazität des Wassers, q = Filtergeschwindigkeit. Der Parameter κ_e beschreibt die Wärmeleitfähigkeit der Wasser-Gesteins-Matrix und umfasst Effekte der Konduktion, sowie der thermischen Dispersion.

Die Wärmebilanzen zeigen die Wärmeströme (Energie pro Zeitschritt) über die im Modell definierten Ränder und ermöglichen eine Auswertung der dem Gebiet zu- und abfließenden thermischen Energie (Wärmeströme) und eine Abschätzung des thermischen Nutzungspotenzials im betrachteten Zeitraum. Der Wärmestrom Q_T , beispielsweise an Modellrändern mit einem Fliessgewässer (Cauchy-Randbedingung), ergibt sich aus der Fläche A , über die der Wärmeaustausch stattfindet, dem Wärmeübergangskoeffizient Φ und der Temperaturdifferenz zwischen der in der Randbedingung definierten, zeitlich variablen Temperatur T_{Rand} und im Modell berechneten Temperatur T :

$$Q_T = A \cdot \Phi \cdot (T_{\text{Rand}} - T) \quad (\text{Gleichung 2}).$$

Zur Berechnung der Wärmeströme zum Beispiel bei Grundwasserentnahmen wird die Temperaturdifferenz zwischen der im Modell berechneten Temperatur und einer definierten Referenztemperatur von 10 °C verwendet, um die potenziell entnommene Energie bei einer angenommenen Abkühlung des geförderten Wassers auf 10 °C zu quantifizieren. Dies entspricht etwa der Lufttemperatur ausserhalb des Siedlungsgebiets von Basel (siehe oben) und kann als Referenztemperatur für anthropogen thermisch unbeeinflusstes Grundwasser betrachtet und somit für die Berechnung des thermischen Nutzungspotenzials verwendet werden.

Teilgebiet A: Grossbasel Nord-West

Die simulierten Grundwassertemperaturen betragen im Teilgebiet Grossbasel Nord-West im Mittel am 1. Januar 2014 ca. 14.3 ± 0.8 °C und am 1. Juli 2014 ca. 14.2 ± 0.8 °C (Abbildung 2.14). Die höchsten Temperaturen (ca. 19.6 °C) treten in den östlichen durch Industrie geprägten Bereichen nahe dem Rhein auf, in denen eine Vielzahl von Bauwerken bis in das Grundwasser oder den Grundwasserstauer reichen (Abbildung 1.6). Ausserdem werden im Bereich von Kühlwassereinspeisungen vergleichsweise hohe Temperaturen festgestellt. Im nord-westlichen Bereich zum Beispiel, ist eine Wärmefahne mit Temperaturen um etwa 15.3 bis 16.7 °C zu erkennen. In der ungesättigten Zone bis etwa 2 m Tiefe (Abbildung 2.15) liegen die Temperaturen am 1. Januar 2014 bei ca. 12.8 ± 2.6 °C und am 1. Juli 2014 ca. 14.7 ± 2.3 °C. Die saisonalen Unterschiede sind somit im Teilgebiet Grossbasel West in der ungesättigten Zone, wie zu erwarten, grösser als im Grundwasser.

Die mittleren Temperaturen liegen über dem Jahresmittel der Lufttemperatur der Station Basel-Binningen von etwa 11.9 °C im Jahr 2014. Dadurch ergibt sich eine durch thermische Nutzung bedingte, theoretische Temperaturreduktion von etwa 2.3 K gegenüber der Lufttemperatur, wenn diese als potenziell natürliche Referenztemperatur angenommen wird.

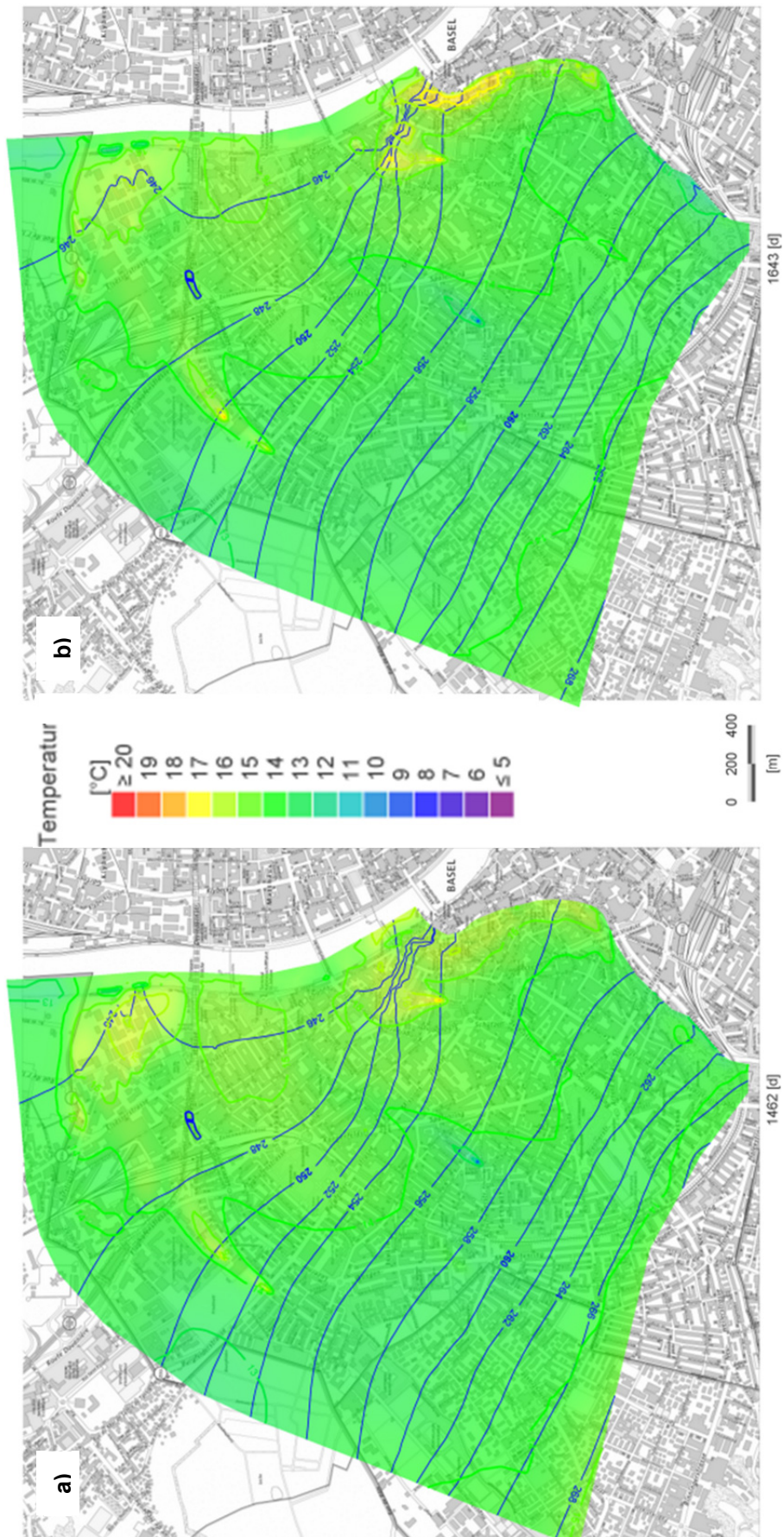


Abbildung 2.14: Simulierte Grundwasserisohypsen und -temperaturen im Teilgebiet A Grossbasel West für a) den 1. Januar 2014 und b) den 1. Juli 2014.

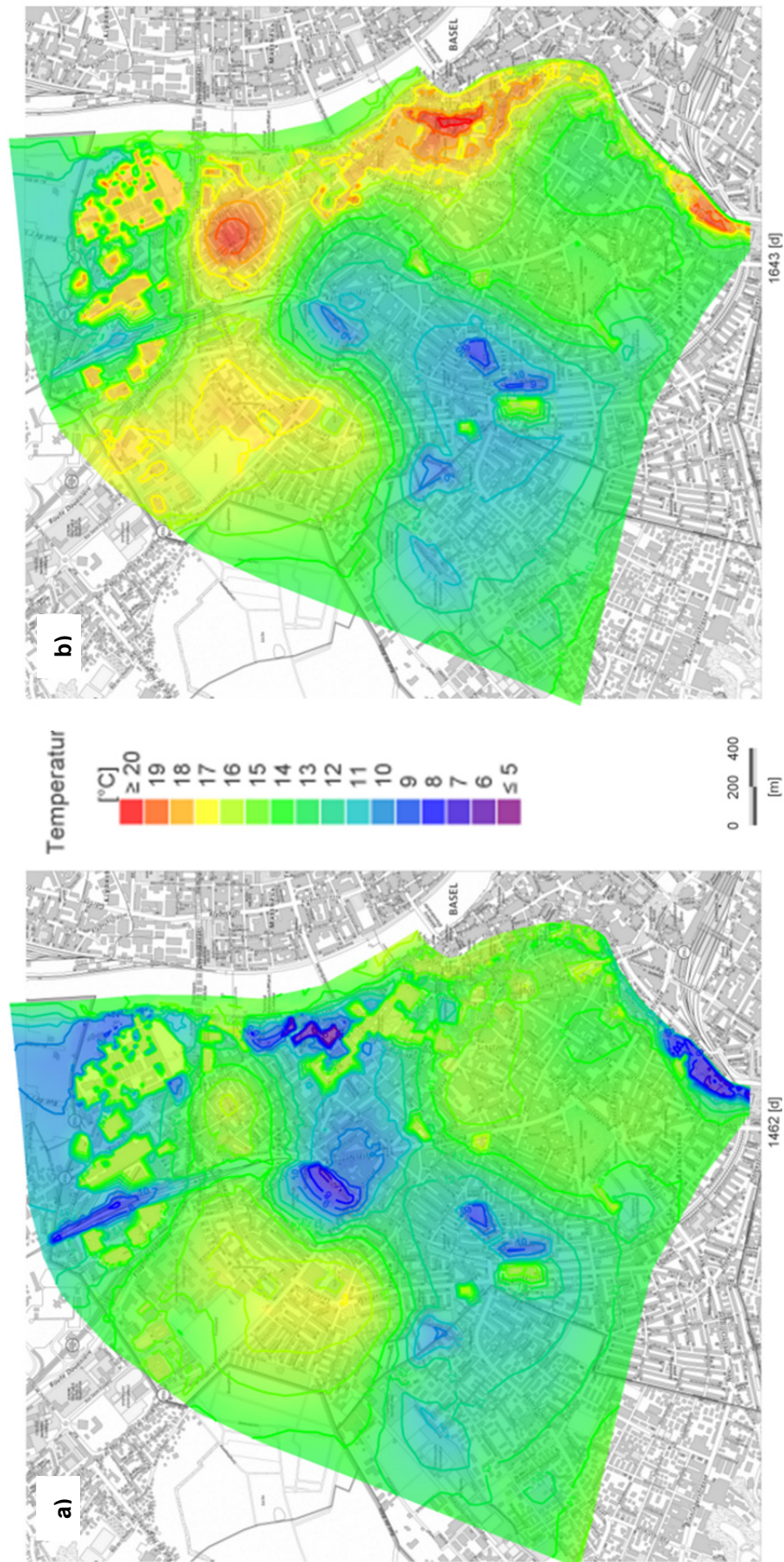


Abbildung 2.15: Simulierte Temperaturen in der ungesättigten Zone im Teilgebiet A Grossbasel West für a) den 1. Januar 2014 und b) den 1. Juli 2014.



Dem Teilgebiet A Grossbasel Nord-West strömen pro Tag während den Jahren 2010 bis 2015 etwa 20'000 bis 25'000 m³ über den regionalen Grundwasserstrom zu (Abbildung 2.16). Der Rhein ist Vorfluter des Gebiets und der Grundwasseraustausch beträgt etwa 15'000 bis 25'000 m³ pro Tag. Die Grundwasserentnahmen erreichen Entnahmeraten von bis zu etwa 6'000 m³ pro Tag, während die Wasserrückgaben in den Aquifer nur bei etwa 1'000 m³ pro Tag liegen. Die Grundwasserentnahme beträgt damit etwa 20 % des regional zuströmenden Grundwassers und spielt somit für die Grundwasserbilanz des Systems eine wichtige Rolle. Die Grundwasserneubildung durch flächig versickerndes Niederschlagswasser und der Austausch mit dem Fluss Birsig, der sehr stark verbaut ist, sind im Vergleich zu den anderen Randbedingungen vernachlässigbar.

Durch den regionalen Grundwasserstrom wird dem Gebiet Grossbasel Nord-West ein Wärmestrom von etwa 5 bis 8 MW zugeführt³ (Abbildung 2.17). Der Wärmeeintrag über die Oberfläche beträgt 20 MW der Wärmeaustrag bis zu 40 MW. Durch Grundwasserentnahmen werden (gerechnet auf eine Referenztemperatur von 10 °C) etwa 1 MW entnommen, während etwa 0.25 bis 0.5 MW in den Aquifer durch Grundwasserrückgaben zugeführt werden. Der Wärmestrom durch die im Modell berücksichtigten Gebäude beträgt in den Heizperioden und im Sommer etwa 10 MW, während im Frühjahr und Herbst dem Untergrund bis zu 5 MW entzogen werden. Insgesamt ist die berechnete Wärmebilanz im Teilgebiet Grossbasel Nord-West nahezu ausgeglichen.

Würden dem durch die Nutzung entnommenen Grundwassers 1 MW für eine Wärmergewinnung entzogen, so könnten etwa 20 % des regional zugeführten Wärmestroms genutzt werden, ohne das thermische und Grundwasserfließregime weiter negativ zu beeinträchtigen.

³ Der Wärmestrom errechnet sich aus der gekoppelten Simulation des Grundwasserflusses und dem Wärmetransport (siehe Gleichung 1). Hierbei werden Wärmediffusion, -dispersion und der advective Wärmetransport durch den Grundwasserfluss berücksichtigt.

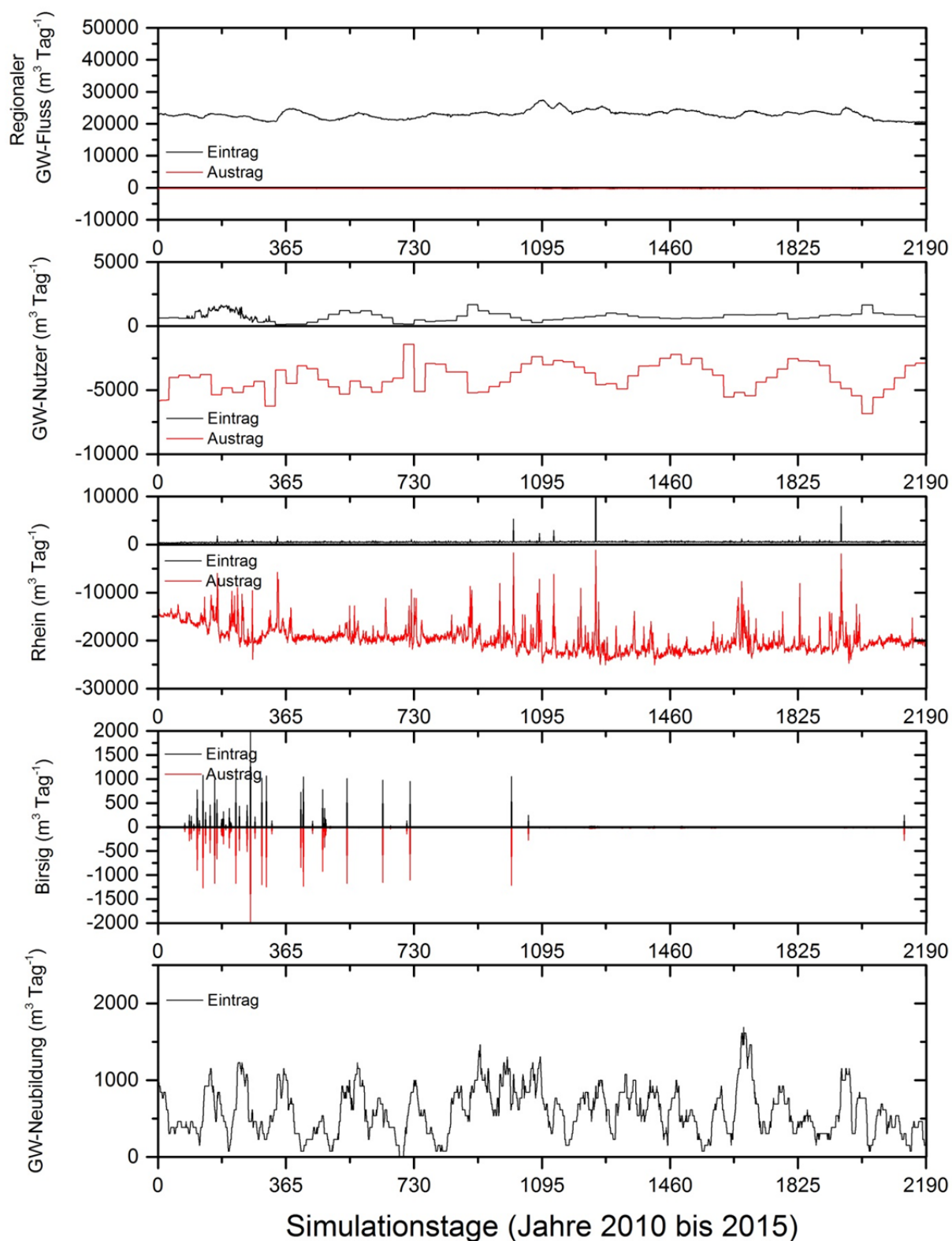


Abbildung 2.16: Wasserbilanz im Teilgebiet A Grossbasel Nord-West in den Jahren 2010 bis 2015. Von oben nach unten: Regionaler Grundwasserzu- und abstrom, Grundwassernutzer, Austausch mit dem Rhein, Austausch mit dem Birsig, Grundwasserneubildung.

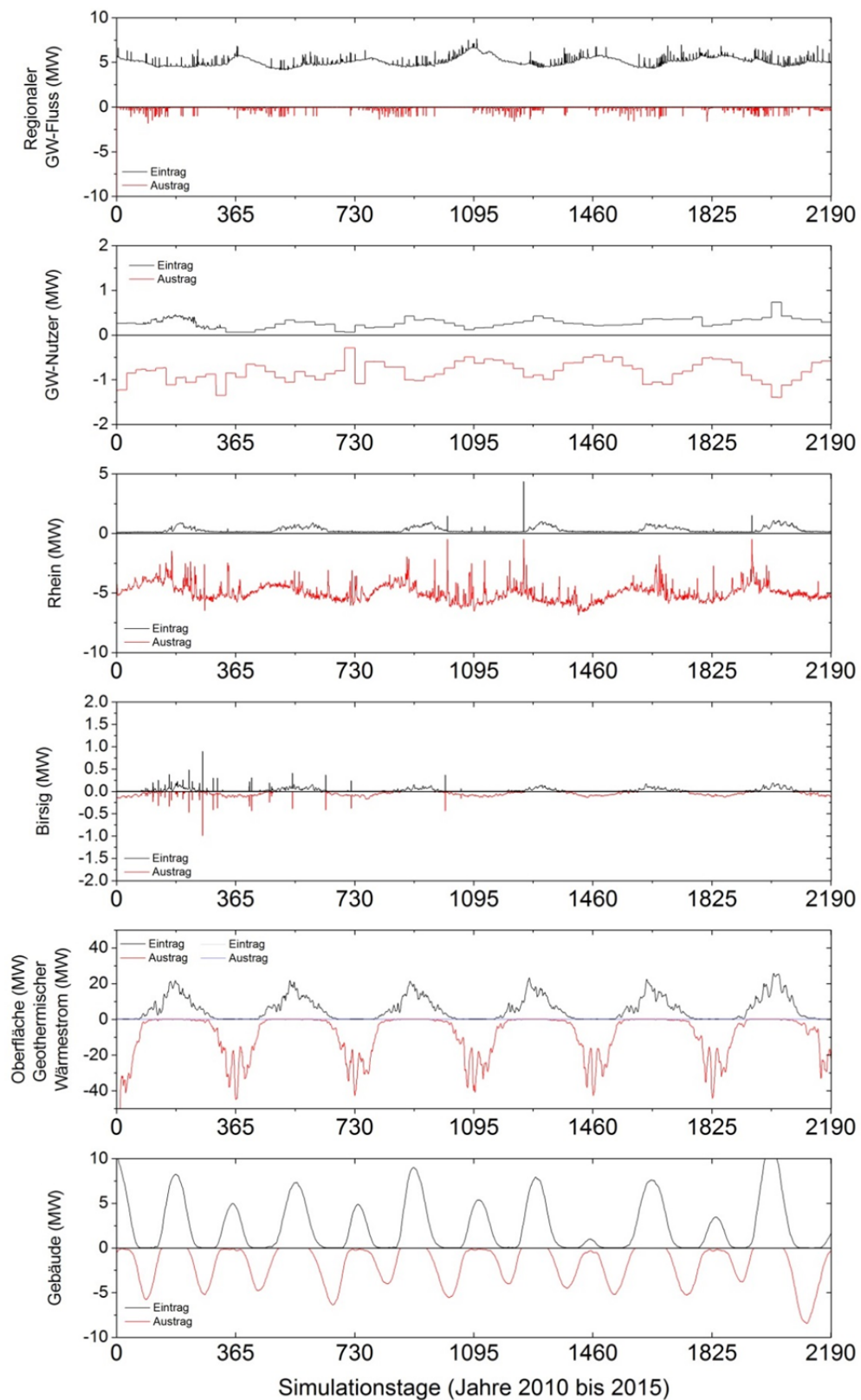


Abbildung 2.17: Wärmebilanz im Teilgebiet A Grossbasel Nord-West in den Jahren 2010 bis 2015. Von oben nach unten: Regionaler Wärmestrom, Grundwassernutzer, Austausch über das Rheinufer, Austausch mit dem Birsig, Austausch über die Oberfläche und geothermaler Wärmestrom, Wärmebilanz der tiefen und mittel-tiefen Gebäude.



Teilgebiet B: Grossbasel Süd-Ost

Die simulierten Grundwassertemperaturen betragen im Teilgebiet Grossbasel Süd-Ost im Mittel am 1. Januar 2014 ca. 14.5 ± 1.0 °C und am 1. Juli 2014 ca. 14.3 ± 1.0 °C (Abbildung 2.18). Die höchsten Temperaturen (ca. 16.5 °C) treten im westlichen Bereich auf, in dem Bauwerke bis in das Grundwasser oder den Grundwasserstauer reichen. In der ungesättigten Zone (Abbildung 2.19) betragen die Temperaturen am 1. Januar 2014 bei ca. 13.0 ± 1.5 °C und am 1. Juli 2014 ca. 16.4 ± 1.0 °C. Im Bereich der Grünflächen und der Gleisareale betragen die Temperaturen etwa 3 bis 5 K weniger als unter versiegelten Flächen. Die saisonalen Unterschiede sind im Teilgebiet Grossbasel Süd-Ost in der ungesättigten Zone wie zu erwarten grösser als im Grundwasser. Die mittleren Temperaturen liegen über dem Jahresmittel der Lufttemperatur der Station Basel-Binningen von etwa 11.9 °C im Jahr 2014. Dadurch ergibt sich eine durch thermische Nutzung bedingte, theoretische Temperaturreduktion von etwa 2.4 Kelvin gegenüber der Lufttemperatur, wenn diese als potenziell natürliche Referenztemperatur betrachtet wird.

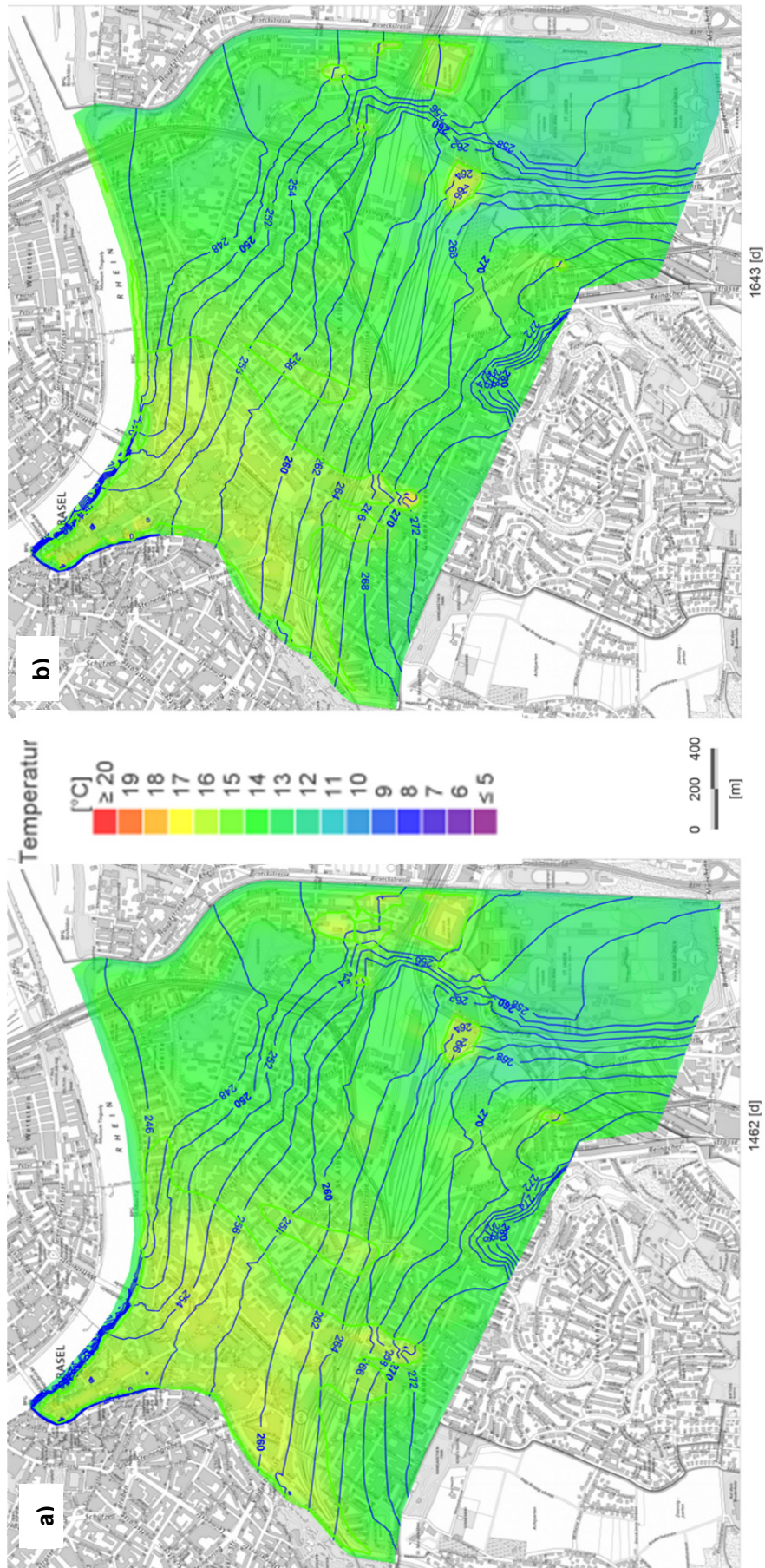


Abbildung 2.18: Simulierte Grundwasserisohypsen und –temperaturen im Teilgebiet B Grossbasel Süd-Ost für a) den 1. Januar 2014 und b) den 1. Juli 2014.

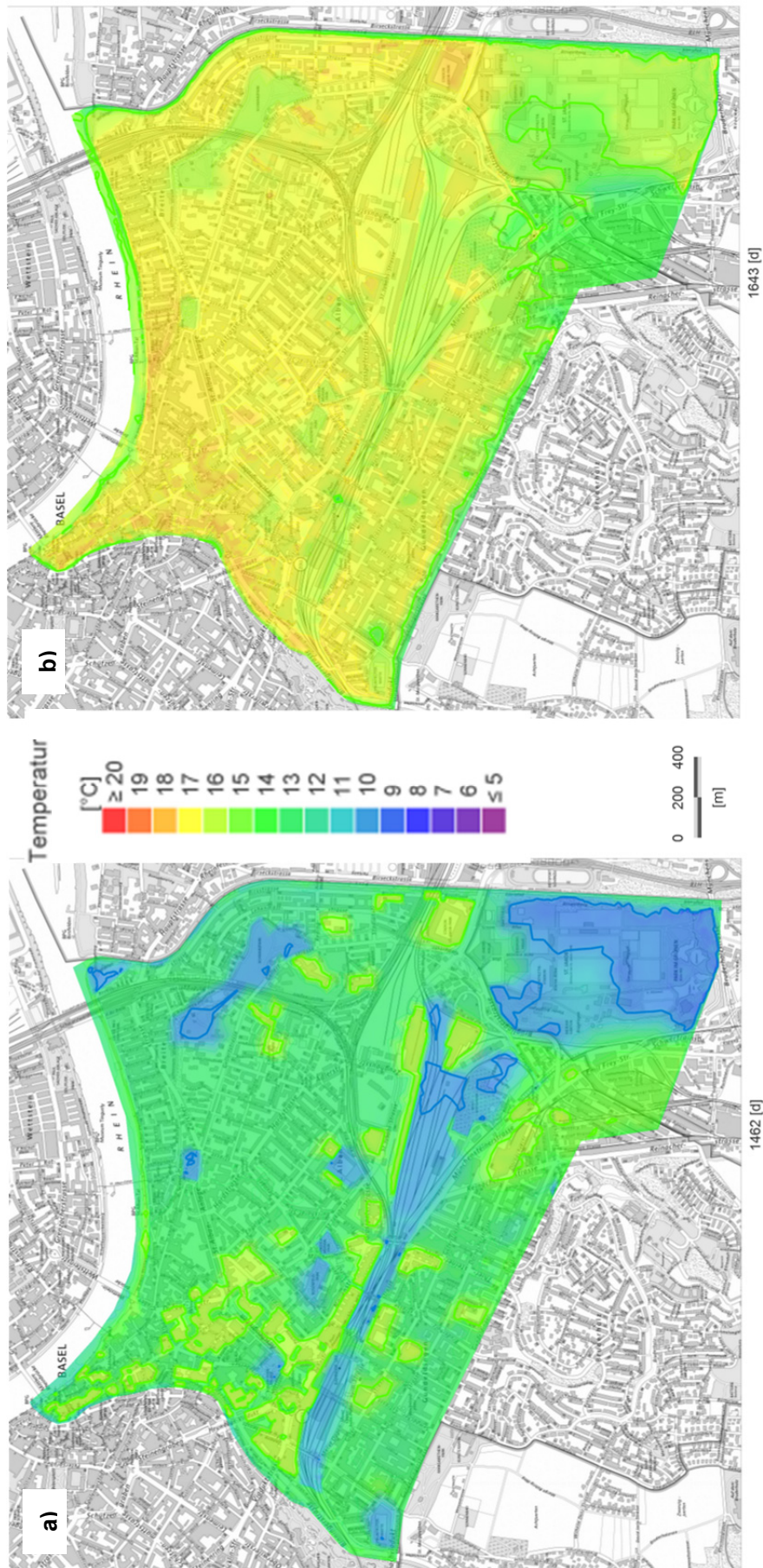


Abbildung 2.19: Simulierte Temperaturen in der ungesättigten Zone im Teilgebiet Grossbasel B Süd-Ost für a) den 1. Januar 2014 und b) den 1. Juli 2014.



Dem Teilgebiet B Grossbasel Süd-Ost strömen pro Tag während den Jahren 2010 bis 2015 etwa 15'000 m³ über den regionalen Grundwasserstrom zu (Abbildung 2.20). Die Fliessgewässer Rhein und Birs sind Vorfluter des Gebiets und der Grundwasseraustausch beträgt jeweils etwa 5'000 bis 10'000 m³ pro Tag. Der Austausch mit dem stark verbauten Birsig ist erwartungsgemäss sehr klein. Die Grundwasserentnahmen erreichen Entnahmeraten von bis zu 4'000 m³ pro Tag (im Mittel etwa 2000 m³ pro Tag), während keine Wasserrückgabe in den Aquifer stattfindet. Die Grundwasserentnahme beträgt somit im Mittel etwa 13 % des regional zuströmenden Grundwassers. Die Grundwasserneubildung durch flächig versickerndes Niederschlagswasser ist, im Vergleich zu den anderen Randbedingungen, vernachlässigbar.

Durch den regionalen Grundwasserstrom wird dem Gebiet Grossbasel Süd-Ost etwa 2.5 MW zugeführt (Abbildung 2.21). Durch Grundwasserentnahmen werden (gerechnet auf eine Referenztemperatur von 10 °C) etwa 0.25 bis 0.75 MW entnommen und über die Fliessgewässer etwa 1 bis 2 MW ausgetauscht. Der Austausch über den stark verbauten Birsig (bis etwa 0.25 MW) ist deutlich geringer als der Austausch über den Rhein und die Birs mit Werten bis 2 MW. Der Wärmeeintrag über die Oberfläche beträgt 30 MW, der Wärmeaustrag bis zu 30 MW. Der Energieeintrag durch die im Modell berücksichtigten Gebäude beträgt in den Heizperioden und im Sommer etwa bis zu 10 MW, während im Frühjahr und Herbst dem Untergrund bis zu 5 MW entzogen werden.

Der anthropogen verursachte Wärmestrom über die Gebäude und die versiegelten Oberflächen ist teilweise grösser als die natürlichen Wärmeströme (z.B. über die Fliessgewässer), wodurch sich für dieses Teilgebiet ein vergleichsweise grosses thermisches Nutzungspotenzial des oberflächennahen Untergrundes ergibt. So könnte z.B. das erwärmte Grundwasser im Grundwasserabstrom von tieferreichenden Gebäuden direkt über Grundwasserwärmepumpen oder die ungesättigte Zone mit Hilfe von Wärmekörpern, Energiepfählen oder anderen thermoaktiven Elementen für eine Wärmegewinnung genutzt werden.

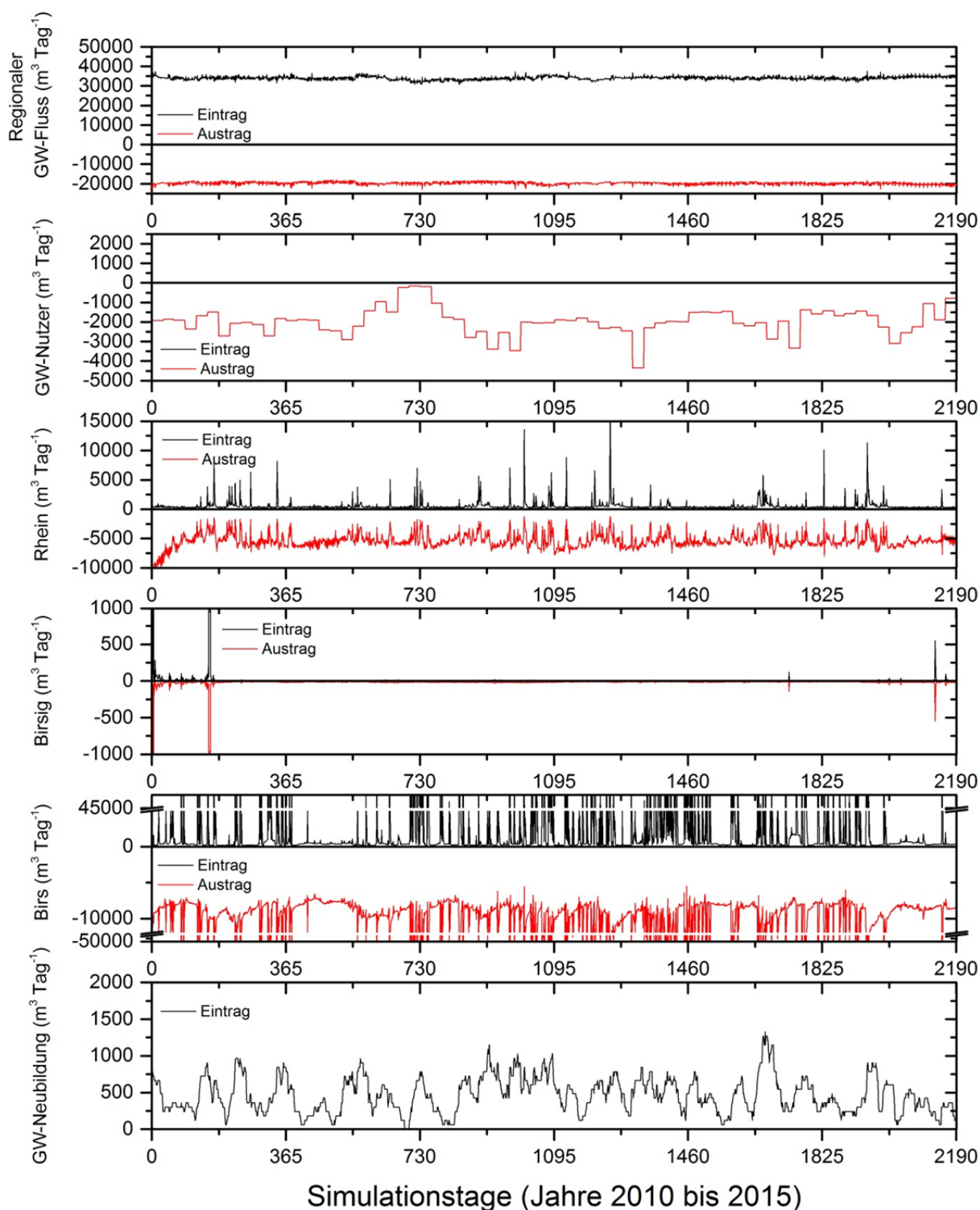


Abbildung 2.20: Wasserbilanz im Teilgebiet Grossbasel B Süd-Ost in den Jahren 2010 bis 2015. Von oben nach unten: Regionaler Grundwasserzu- und abstrom, Grundwassernutzer, Austausch mit dem Rhein, Austausch mit dem Birsig, Austausch mit der Birs, Grundwasserneubildung.

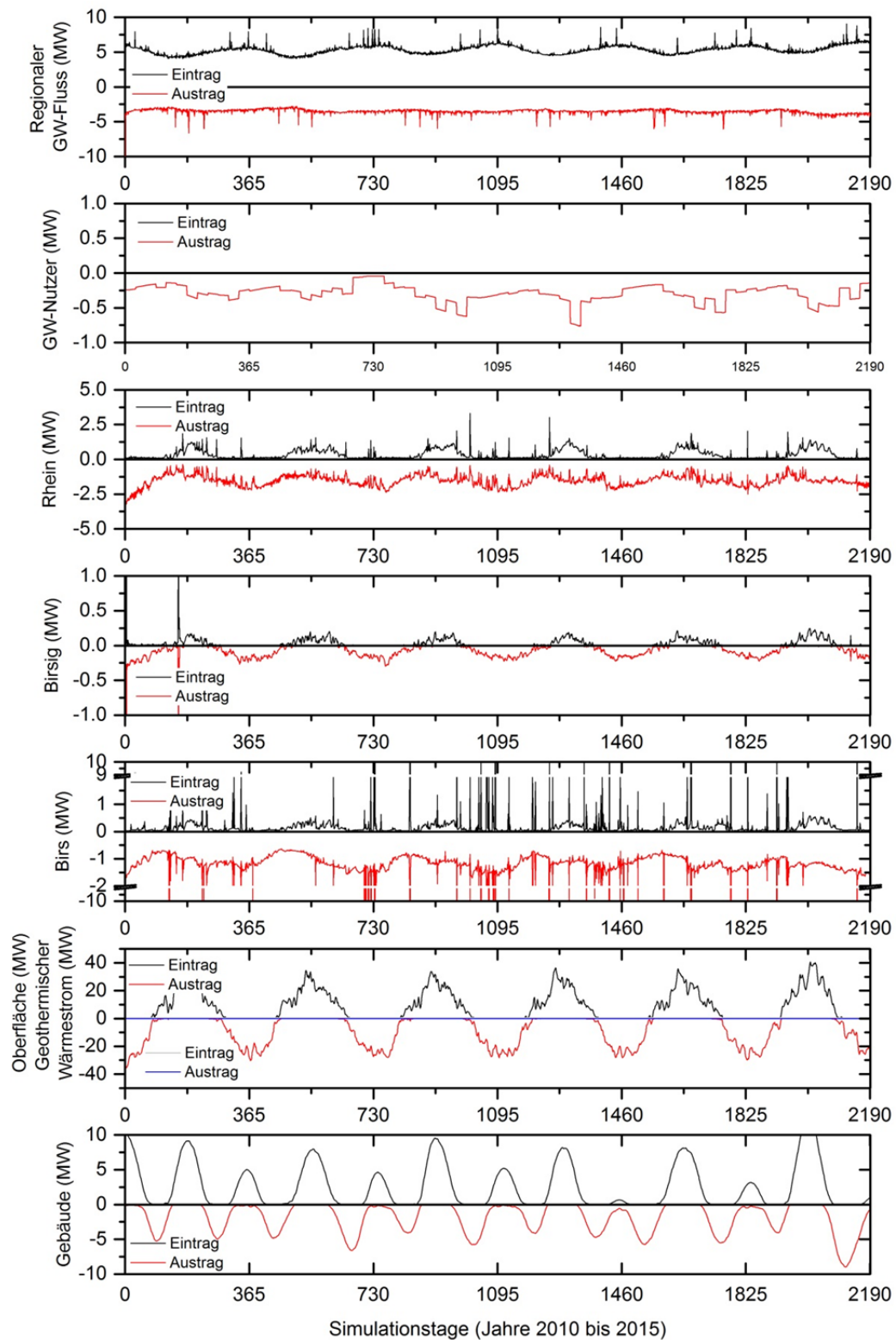


Abbildung 2.21: Wärmebilanz im Teilgebiet B Grossbasel Süd-Ost in den Jahren 2010 bis 2015. Von oben nach unten: Regionaler Wärmestrom, Grundwassernutzer, Austausch mit dem Rhein, Austausch mit dem Birsig, Austausch mit der Birs, Austausch über die Oberfläche und geothermaler Wärmestrom, Wärmebilanz der tiefen und mittel-tiefen Gebäude.



Teilgebiet C: Kleinbasel

Die simulierten Grundwassertemperaturen betragen im Mittel am 1. Januar 2014 ca. 14.4 ± 1.8 °C und am 1. Juli 2014 ca. 14.3 ± 1.7 °C (Abbildung 2.22). Die höchsten Temperaturen (ca. 19.6 °C) treten im Westen nahe dem Rhein auf. Vergleichsweise niedrige Temperaturen werden im Bereich einer Grundwasserrückgabe und nahe des Flusses Wiese simuliert. In der ungesättigten Zone (Abbildung 2.23) betragen die Temperaturen am 1. Januar 2014 ca. 14.1 ± 1.9 °C und am 1. Juli 2014 ca. 16.1 ± 2.4 °C. Die Unterschiede sind somit im Teilgebiet Kleinbasel in der ungesättigten Zone grösser als im Grundwasser, d.h. die saisonalen Temperaturschwankungen nehmen erwartungsgemäss mit der Tiefe ab. In der ungesättigten Zone ist der thermische Einfluss (kühlender Effekt) von Grünflächen im Sommer deutlich zu erkennen (beispielsweise im nord-östlichen Bereich im Tierpark „Lange Erlen“, Abbildung 2.23b). Städtische Parkanlagen (z.B. Horburgpark) weisen im Vergleich zu versiegelten Flächen etwas geringere Temperaturen auf. Eine Versiegelung von Flächen führt zu einer starken Temperaturerhöhung des oberflächennahen Untergrundes.

Die mittleren Grundwassertemperaturen liegen über dem Jahresmittel der Lufttemperatur der Station Basel-Binningen von etwa 11.9 °C im Jahr 2014. Dadurch ergibt sich eine durch thermische Nutzung bedingte, theoretische Temperaturreduktion von etwa 2.4 Kelvin gegenüber der Lufttemperatur, wenn diese als potenziell natürliche Referenztemperatur betrachtet wird.

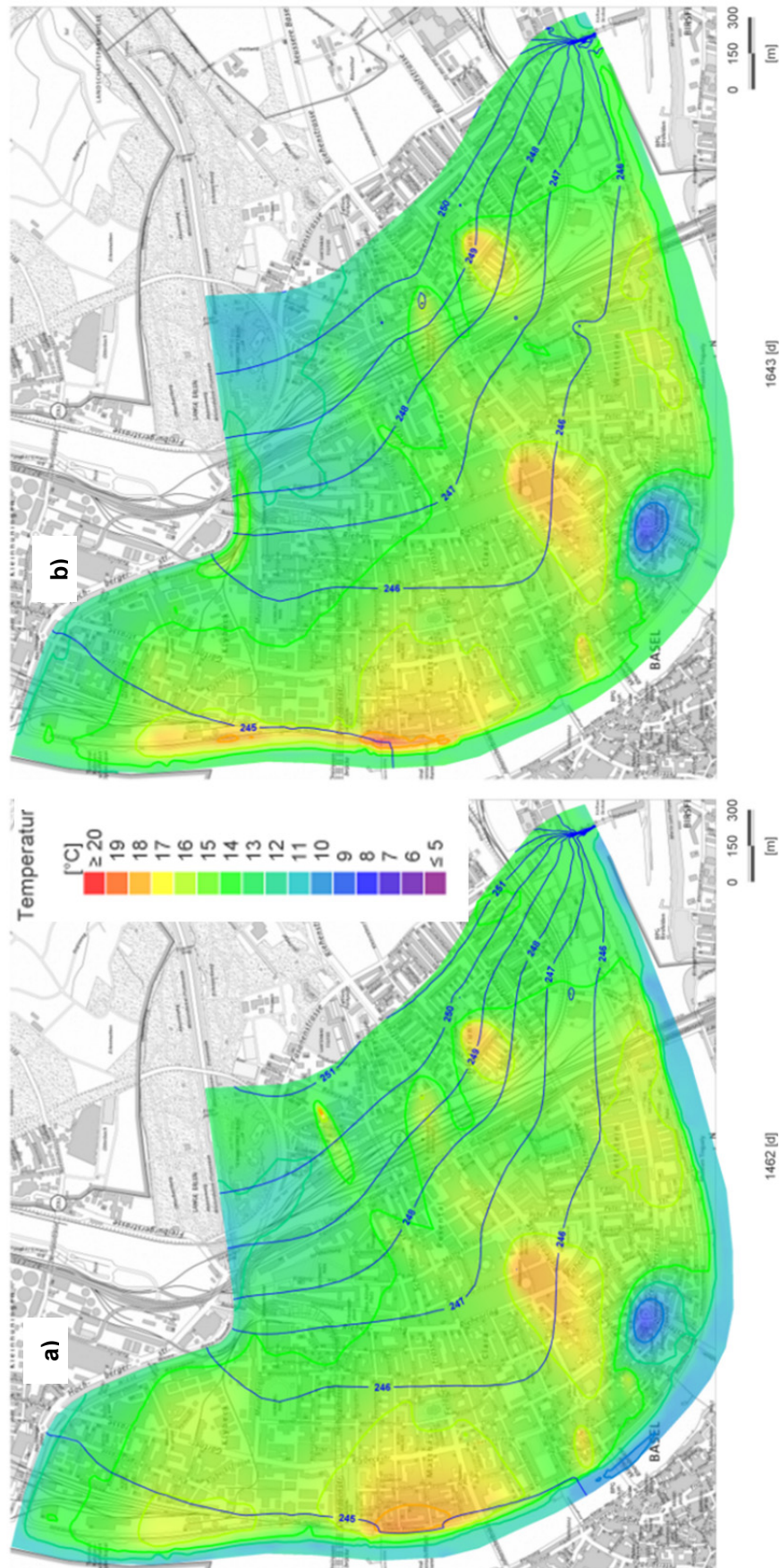


Abbildung 2.22: Simulierte Grundwasserisohypsen und -temperaturen im Teilgebiet C Kleinbasel für a) den 1. Januar 2014 und b) den 1. Juli 2014.

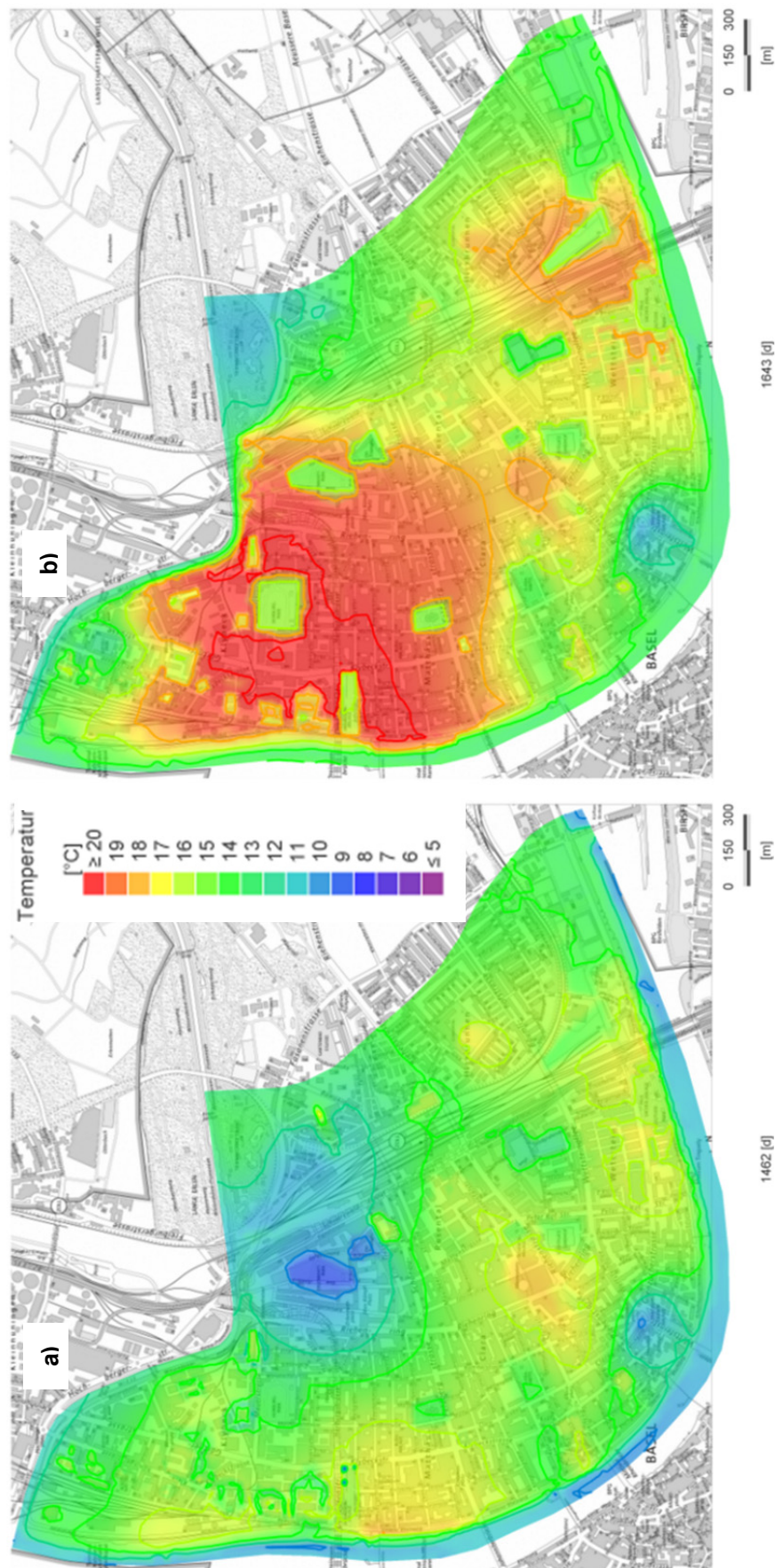


Abbildung 2.23: Simulierte Temperaturen in der ungesättigten Zone im Teilgebiet C Kleinbasel für a) den 1. Januar 2014 und b) den 1. Juli 2014.



Dem Teilgebiet C Kleinbasel strömen pro Tag während den Jahren 2010 bis 2015 etwa 50'000 m³ über den regionalen Grundwasserstrom zu (Abbildung 2.24). Der Rhein ist Vorfluter des Gebiets und der Grundwasseraustausch beträgt in der Bilanz (Eintrag minus Austrag) etwa 75'000 m³ pro Tag. Im Bereich des Flusskraftwerkes Birsfelden wird der Rhein aufgestaut, wodurch sich ein starker Gradient ergibt und Flusswasser in den Aquifer infiltriert. Stromabwärts exfiltriert Grundwasser in den Rhein. Der Fluss Wiese infiltriert mit etwa 15'000 bis 20'000 m³ pro Tag in den Aquifer. Die Grundwasserentnahmen liegen im Bereich von 10'000 bis 20'000 m³ pro Tag, während die Wasserrückgaben in den Aquifer nur etwa 5'000 m³ pro Tag liegen. Die Grundwasserentnahme beträgt etwa 20 % des regional zuströmenden Grundwassers und spielt somit für die Grundwasserbilanz des Systems eine wichtige Rolle. Der Spielraum für weitere industrielle Grundwasserentnahmen ist im Teilgebiet Kleinbasel dadurch bereits stark eingeschränkt. Die Grundwasserneubildung durch flächig versickerndes Niederschlagswasser ist, im Vergleich zu den anderen Randbedingungen, vernachlässigbar.

Durch den regionalen Grundwasserstrom wird dem Gebiet Kleinbasel etwa 5 bis 15 MW zugeführt (Abbildung 2.25). Der Wärmestrom über die Oberfläche kann im Sommerhalbjahr bis auf 40 MW ansteigen, während im Winterhalbjahr der Wärmeaustrag bei etwa 20 MW liegt. Durch Grundwasserentnahmen werden zwischen 2.5 bis 5 MW entnommen, während durch Grundwasserrückgaben bis maximal 2.5 MW in den Aquifer zugeführt werden. Der Energieeintrag durch die im Modell berücksichtigten Gebäude beträgt in den Heizperioden und im Sommer etwa 5 MW, während im Frühjahr und Herbst dem Untergrund bis zu 2.5 MW entzogen werden.

Da die anthropogene Grundwasserentnahme die Grundwasserbilanz bereits stark beeinträchtigt und die Grundwassertemperaturen vergleichsweise hoch sind, muss bei Grundwasserentnahmen für Kühlzwecke (mit anschliessender Rückgabe des Kühlwassers ins Grundwasser) mit Einschränkungen aufgrund des Grundwasserschutzes gerechnet werden. Als mögliche thermische Nutzungsart bietet sich daher im Teilgebiet Kleinbasel eine verstärkte Wärmeengewinnung aus dem Untergrund an. Hierdurch könnten 2.5 bis 5 MW für eine Wärmeengewinnung genutzt werden.

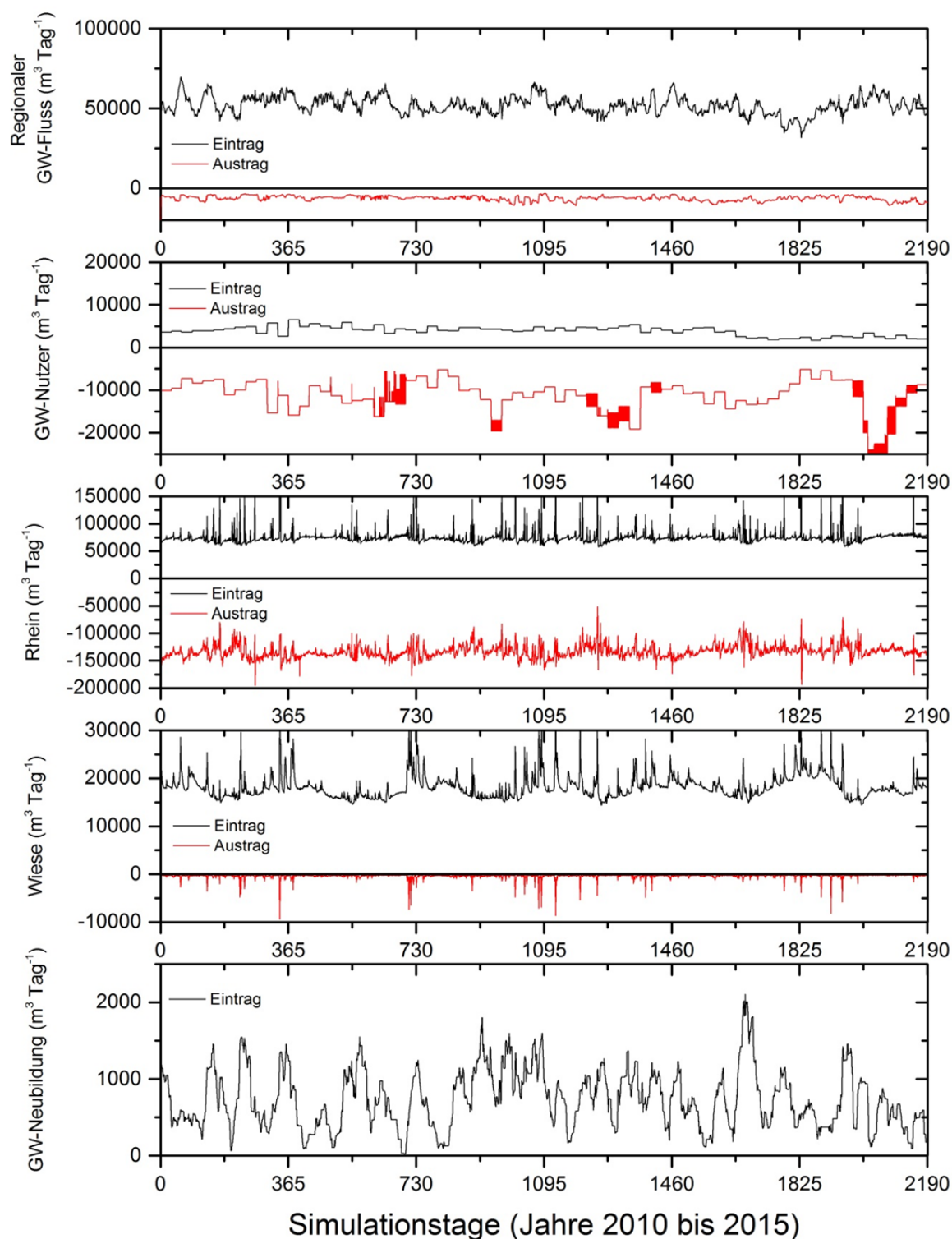


Abbildung 2.24: Wasserbilanz im Teilgebiet C Kleinbasel in den Jahren 2010 bis 2015. Von oben nach unten: Regionaler Grundwasserzu- und abstrom, Grundwassernutzer, Austausch mit dem Rhein, Austausch mit der Wiese, Grundwasserneubildung.

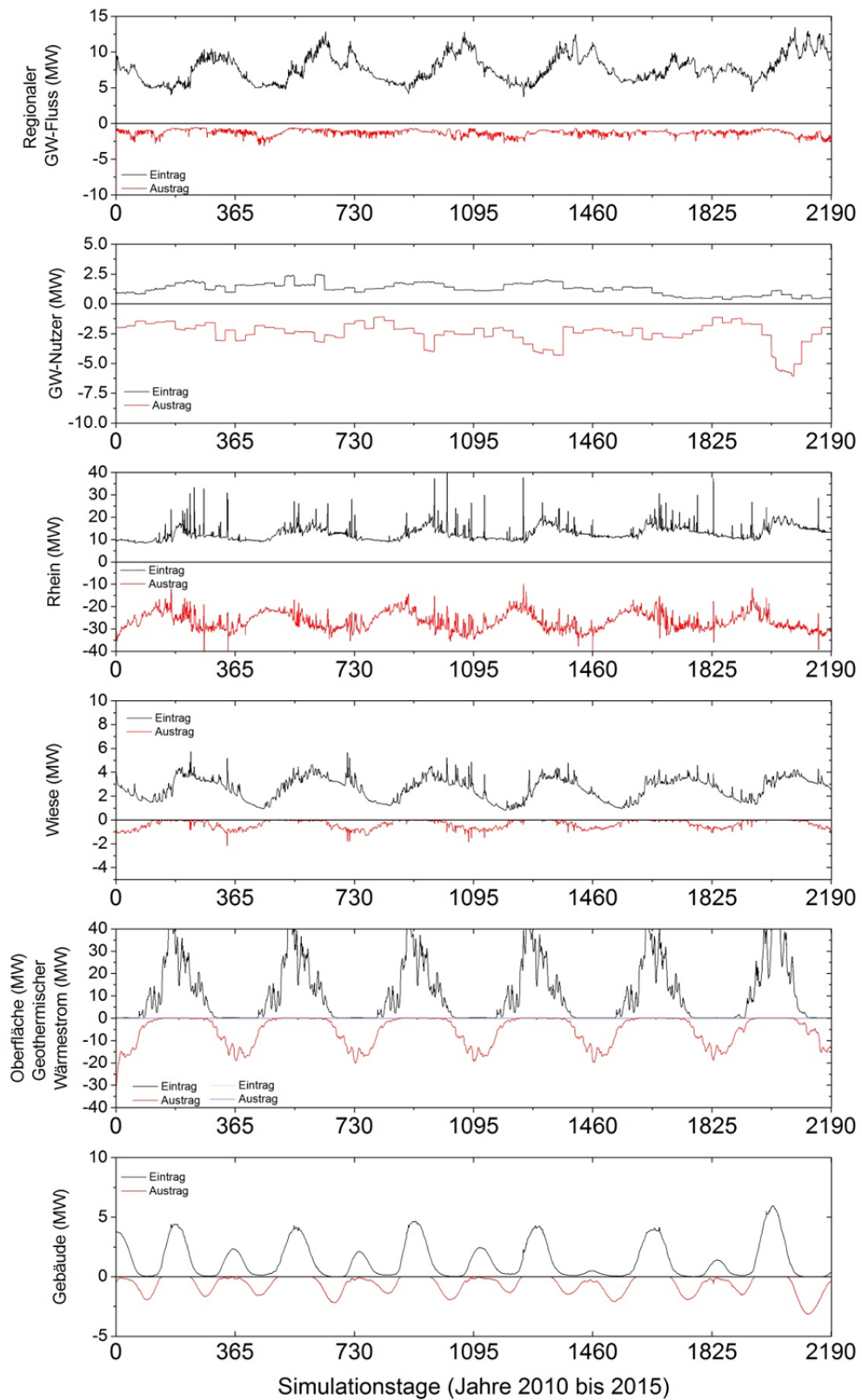


Abbildung 2.25: Wärmebilanz im Teilgebiet C Kleinbasel in den Jahren 2010 bis 2015. Von oben nach unten: Regionaler Wärmestrom, Grundwassernutzer, Austausch mit dem Rhein, Austausch mit der Wiese, Austausch über die Oberfläche und geothermaler Wärmestrom, Wärmebilanz der tiefen und mittel-tiefen Gebäude.



Teilgebiet D: Kleinhüningen

Die simulierten Grundwassertemperaturen betragen im Mittel am 1. Januar 2014 ca. 14.1 ± 1.1 °C und am 1. Juli 2014 ca. 13.7 ± 1.2 °C (Abbildung 2.26). In der ungesättigten Zone (Abbildung 2.27) betragen die Temperaturen am 1. Januar 2014 ca. 14.0 ± 1.6 °C und am 1. Juli 2014 ca. 15.8 ± 2.4 °C (Abbildung 2.27). Die saisonalen Unterschiede sind somit im Teilgebiet Kleinhüningen in der ungesättigten Zone erwartungsgemäss grösser als im Grundwasser. Durch die versiegelten Flächen und Bauwerke im Untergrund kommt es im Sommer zu einer relativ starken Temperaturerhöhung in der ungesättigten Zone.

Die mittleren Grundwassertemperaturen liegen über dem Jahresmittel der Lufttemperatur der Station Basel-Binningen von etwa 11.9 °C im Jahr 2014. Dadurch ergibt sich eine durch thermische Nutzung bedingte, theoretische Temperaturreduktion von etwa 1.8 bis 2.2 Kelvin gegenüber der Lufttemperatur, wenn diese als potenziell natürliche Referenztemperatur betrachtet wird.

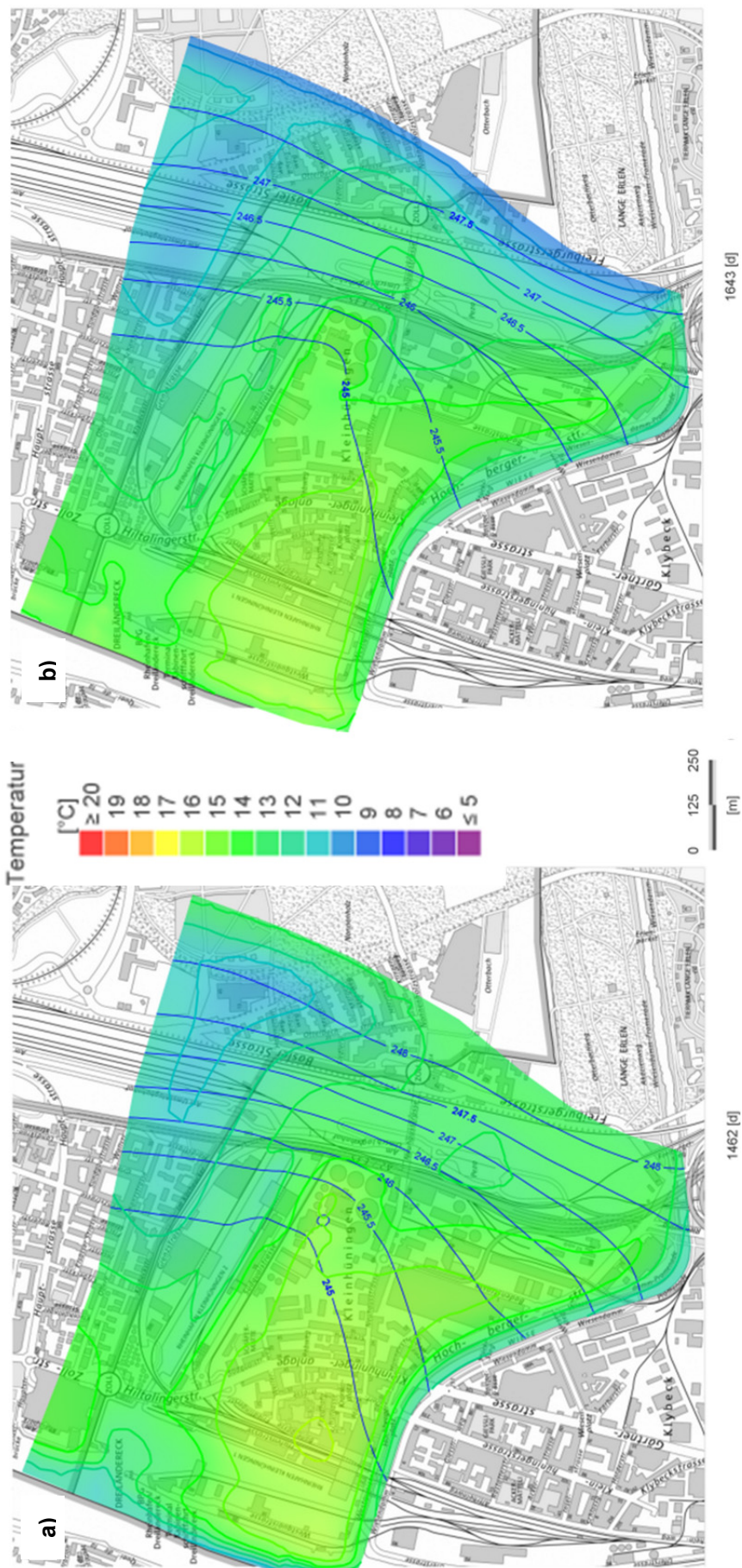


Abbildung 2.26: Simulierte Grundwasserisohypsen und -temperaturen im Teilgebiet D Kleinmünchen für a) den 1. Januar 2014 und b) den 1. Juli 2014.

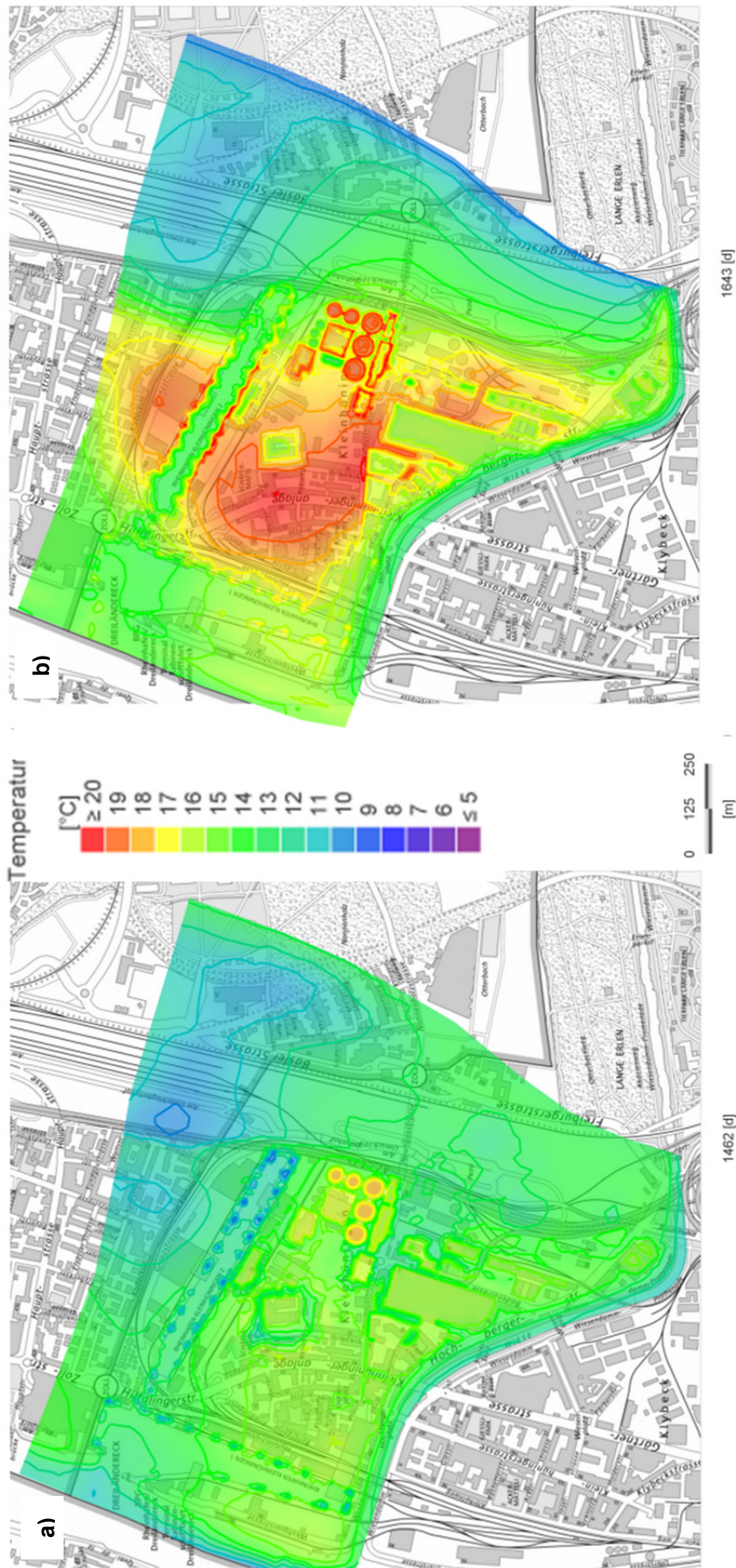


Abbildung 2.27: : Simulierte Temperaturen in der ungesättigten Zone im Teilgebiet D Kleinmünchen für a) den 1. Januar 2014 und b) den 1. Juli 2014.



Dem Teilgebiet Kleinhüningen strömen pro Tag während den Jahren 2010 bis 2015 etwa 12'000 bis 20'000 m³ zu (Abbildung 2.28). Über den Rhein exfiltriert 10'000 bis 15'000 m³ Grundwasser pro Tag aus dem Aquifer. Der Fluss Wiese infiltriert mit etwa 2'500 bis 5'000 m³ pro Tag in den Aquifer. Die Grundwasserentnahmen liegen im Bereich zwischen 5'000 bis fast 10'000 m³ pro Tag, während die Wasserrückgaben in den Aquifer vernachlässigbar sind. Die Grundwasserentnahme beträgt damit zeitweise fast 50 % des aus dem Nord-Osten regional zuströmenden Grundwassers. Die Grundwasserentnahme spielt für die Grundwasserbilanz des Teilgebiets Kleinhüningen damit eine wesentliche Rolle. Die Grundwasserneubildung durch flächig versickerndes Niederschlagswasser ist, im Vergleich zu den anderen Randbedingungen, vernachlässigbar.

Der regionale Wärmestrom über die nord-östliche Grenze des Teilgebiets Kleinhüningen schwankt saisonal mit einem Maximum im Spätherbst und beträgt bis zu etwa 5 MW (Abbildung 2.29). Der Austausch über die Fliessgewässer Rhein und Wiese variiert saisonal zwischen etwa 0.5 bis 4 MW. Über die Grundwasserentnahmen werden zwischen 1 bis 2 MW entzogen. Über die Gebäude werden dem Gebiet 1 bis 2 MW zugeführt. Die anthropogenen Wärmeströme sind damit vergleichbar hoch, wie die natürlichen Wärmeströme. Über die meist versiegelten Oberflächen werden dem Gebiet im Sommer ausserdem bis zu 15 MW zugeführt, während der Austrag im Winter bis zu 5 MW beträgt.

Durch Wärmegewinnung aus dem entnommenen Grundwasser liesse sich (bezogen auf den thermischen Istzustand der Jahre 2010 bis 2015) etwa 1 bis 2 MW entziehen, ohne das Grundwasser weiter quantitativ oder thermisch zu beeinträchtigen. Würde das dadurch abgekühlte Grundwasser in den Aquifer zurückgegeben, liessen sich ferner die Grundwassertemperaturen etwas senken.

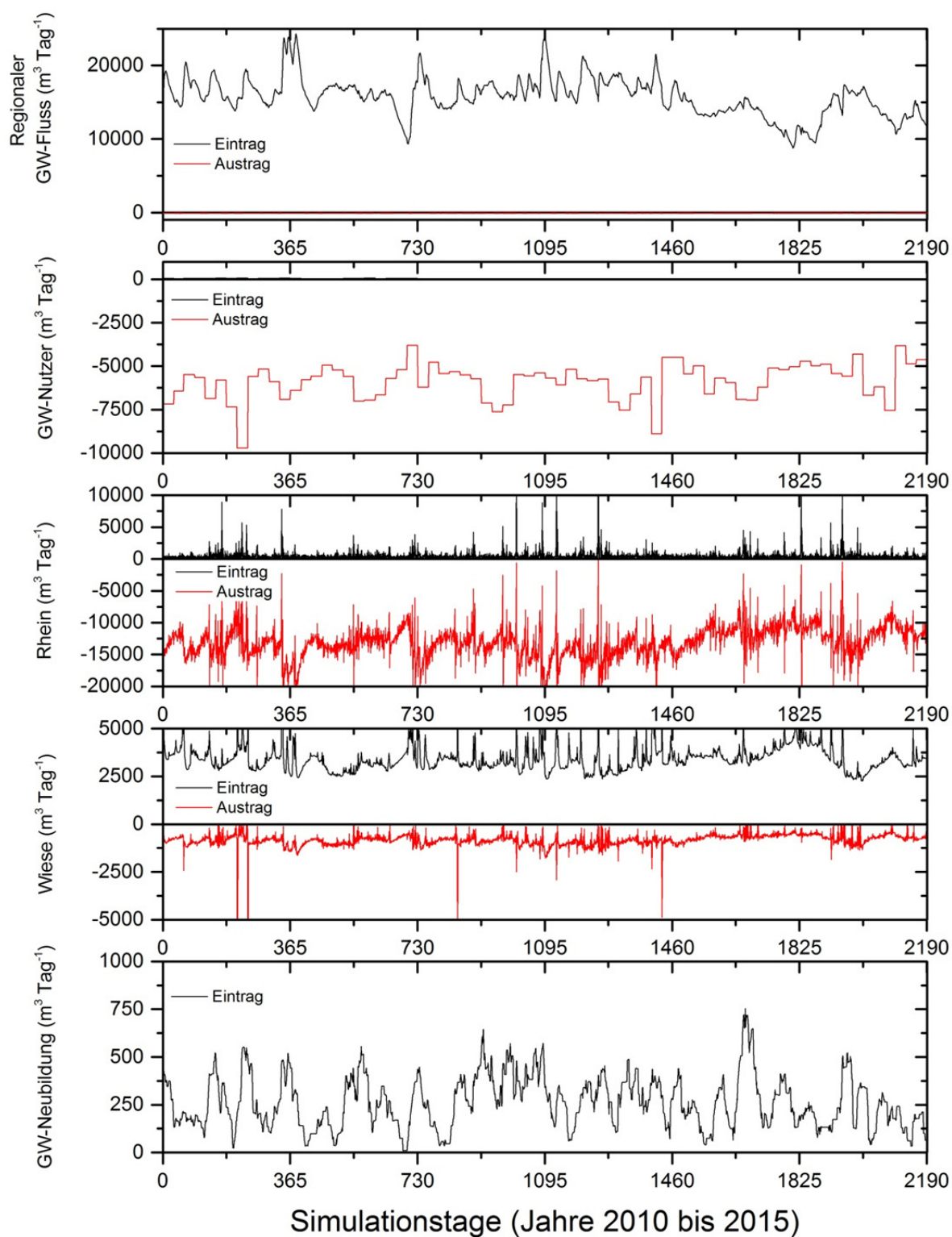


Abbildung 2.28: Wasserbilanz im Teilgebiet D Kleinhüningen in den Jahren 2010 bis 2015. Von oben nach unten: Regionaler Grundwasserzu- und abstrom, Grundwassernutzer, Austausch mit dem Rhein, Austausch mit der Wiese, Grundwasserneubildung.

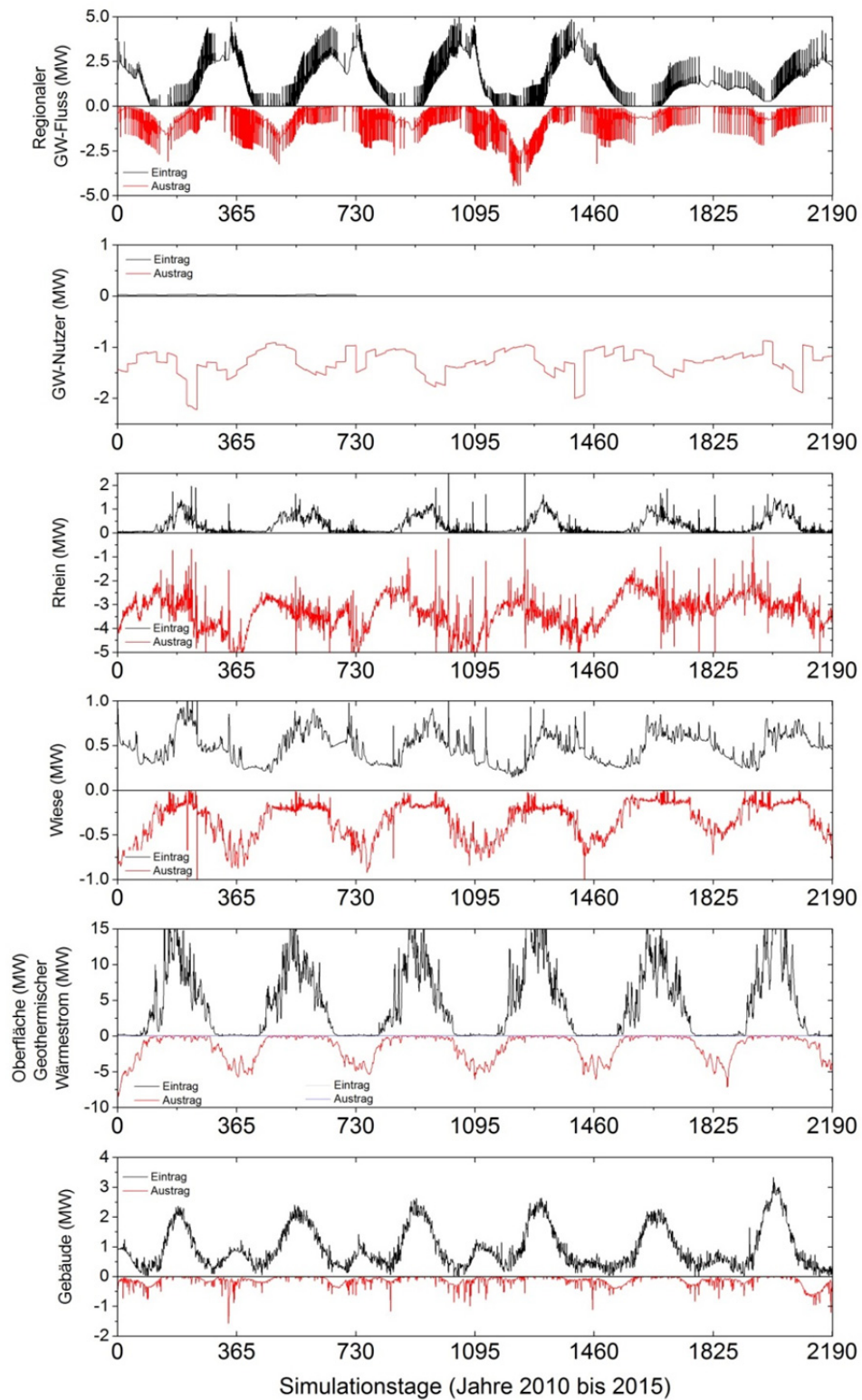


Abbildung 2.29: Wärmebilanz im Teilgebiet Kleinhüningen in den Jahren 2010 bis 2015. Von oben nach unten: Regionaler Wärmestrom, Grundwassernutzer, Austausch über das Rheinufer, Austausch über das Wieseufer, Austausch über die Oberfläche und geothermaler Wärmestrom, Wärmebilanz der tiefen und mittel-tiefen Gebäude.



Potenziell natürlicher thermischer Zustand am Beispiel Kleinbasel

Eine Ableitung von potenziell „natürlichen“ Grundwassertemperaturen im oberflächennahen Untergrund für urbane Gebiete erlaubt es abzuschätzen, wie stark das thermische Grundwasserregime bereits anthropogen beeinträchtigt ist. Gemäss der Wegleitung über die Grundwassernutzung des Kantons Basel-Stadt (Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt, 2014) liegt die Referenztemperatur derzeit bei 12 °C. Zur Evaluation eines potenziellen natürlichen Zustands wurden gemäss dem Vorgehen nach (Epting and Huggenberger, 2013b) alle anthropogenen Nutzungen und Randbedingungen (z.B. Grundwassernutzer, Gebäude) aus dem Wärmetransportmodell entfernt.

Am Beispiel des Teilgebietes Kleinbasel wird gezeigt, wie gross der Temperaturunterschied zwischen dem momentanen thermischen Istzustand und einem potenziell natürlichen Zustand ist. Im Vergleich zum thermischen Istzustand vom 1. Januar 2014 (Abbildung 2.30a) sind die Temperaturen des Grundwasser bei einem potenziellen natürlichen Zustand (Abbildung 2.30b) lokal um bis zu 9 K geringer (Abbildung 2.30c). In weiten Bereichen liegen die Abweichungen zum thermischen Istzustand bei etwa 1 bis 6 K.

Die potenziell natürliche Grundwassertemperatur im Teilgebiet Kleinbasel liegt im Mittel bei 12.7 ± 1.1 °C und damit um etwa 1.7 K unter der momentan berechneten mittleren Grundwassertemperatur von etwa 14.4 ± 1.8 °C (im Januar 2014). Eine thermische Nutzung (z.B. Wärmegewinnung) würde für weite Bereiche des Teilgebiets bei einer Abkühlung der Grundwassertemperatur auf die potenziell natürliche Temperatur von etwa 12.7 °C eine Temperaturreduktion um bis zu 6 K ermöglichen (Abbildung 2.30c).

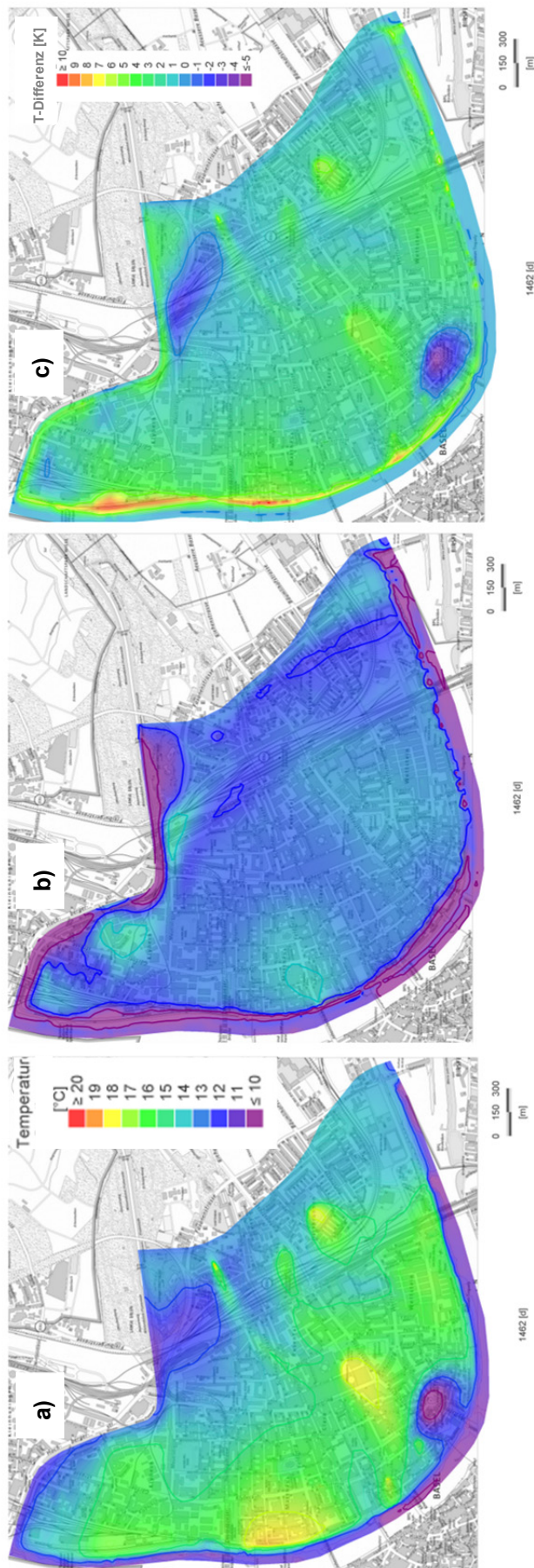


Abbildung 2.30: Teilgebiet Kleinbasel a) Thermischer Istzustand am 1. Januar 2014. b) Potenzieller natürlicher thermischer Zustand. c) Temperaturdifferenz zwischen dem thermischen Istzustand und dem potenziell natürlichen Zustand.



2.3 Fazit Kapitel 2: „Thermischer Istzustand“

Das Temperaturmonitoring in den konventionellen und tiefendifferenzierten Grundwassermessstellen stellen ein wichtiges Werkzeug zur Dokumentation des „thermischen Istzustands“ sowie der räumlichen und zeitlichen Dynamik der Temperaturen im oberflächennahen Untergrundes dar.

Die statistischen Auswertungen der Grundwassertemperaturen im Kantonsgebiet von Basel zeigen, dass in den Jahren 1994 bis 2015 die mittleren Temperaturen des Grundwassers im Stadtgebiet bei 13.5 bis 14.7 °C lagen. Sie waren um 3.0 ± 0.7 K höher als das Jahresmittel der Lufttemperatur der Station Basel-Binningen (MeteoSwiss). In den Jahren 1994 bis 2015 betrug der mittlere Anstieg der Grundwassertemperatur 0.05 K pro Jahr.

Auf Grundlage der tiefendifferenzierten Temperaturmessungen können die Temperaturentwicklung in der ungesättigten Zone oberhalb des Grundwasserspiegels und die vertikale Temperaturverteilung innerhalb des Grundwassers beschrieben werden. Diese Messstellen dokumentieren, dass die Temperaturen und die saisonalen Temperaturschwankungen in der ungesättigten Zone in einigen Messstellen grösser sind als es unter natürlichen Bedingungen in diesen Tiefenbereichen zu erwarten wäre. Dabei führen anthropogene Einflüsse, wie asphaltierte Oberflächen und Gebäudestrukturen im Untergrund, zu einem erhöhten Wärmeeintrag in den Untergrund. Darüber hinaus deuten Messresultate der tiefendifferenzierten Messsysteme darauf hin, dass der advective Wärmetransport im Untergrund eine grosse Rolle spielt und vor allem in den hochdurchlässigen Bereichen der Lockergesteinsablagerungen stattfindet. Die eingesetzten tiefendifferenzierten Messstellen können gezielt für Prozessuntersuchungen verwendet werden, um zum Beispiel thermische Auswirkungen anthropogener Eingriffe im Untergrund zu quantifizieren und langfristig zu dokumentieren.

Die Ursachen für die räumliche Temperaturverteilung und deren zeitliche Dynamik lassen sich nicht direkt aus der statistischen Auswertung oder den räumlich interpolierten Temperaturverteilungen zufriedenstellend ableiten. Für ein erweitertes Prozessverständnis werden deshalb Strömungs- und Wärmetransportmodelle benötigt. Erst diese geben Auskunft über die relevanten hydraulischen und thermischen Prozesse, so können Wärmebilanzen und thermische Nutzungspotenziale berechnet und thermische Auswirkungen der zukünftigen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes quantifiziert werden.

Für eine nachhaltige thermische Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes bedarf es weiterer Information über die relevanten Prozesse (z.B. advectiver Wärmetransport durch das Grundwasser, Wärmeeintrag durch Gebäude oder thermische Prozesse bei der Fluss-Grundwasser Interaktion). Die erarbeiteten numerischen Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodelle für den Kanton Basel-Stadt konnten als Werkzeuge eingesetzt werden, um das thermische Nutzungspotential unter zeitlich variablen Randbedingungen zu evaluieren. Dabei lieferten, die zusätzlich zum kantonalen Grundwassermesssystem, installierten tiefendifferenzierten Temperaturmessstellen Informationen für den Aufbau der Wärmetransportmodelle und dem Temperaturverlauf in der ungesättigten Zone.

Weiterhin können die Wärmetransportmodelle dazu genutzt werden, die einzelnen Einflussgrößen zu quantifizieren. In allen vier Teilgebieten liegen die simulierten Temperaturen im Grundwasser im Mittel etwa 3 K über dem Jahresmittel der Lufttemperatur der Station Basel-Binningen von etwa 11.1 ± 0.7 °C (Mittelwert der Jahre 2010 bis 2015). Dies deutet darauf hin, dass dem oberflächennahen Untergrund durch anthropogene Aktivitäten mehr Wärme zugeführt wird, als über die natürlichen Einflussfaktoren. Die Temperaturen im Untergrund variieren räumlich durch Unterschiede im Versiegelungs- und Bebauungsgrad sowie durch Entnahmen und Rückgaben thermischer Grundwassernutzungen. Ein hoher zusätzlicher Eintrag an Wärme findet meist über die versiegelten Flächen und Gebäudestrukturen, welche in den Untergrund reichen, statt, so dass die Grundwassertemperaturen in manchen Bereichen des Stadtgebiets, zum Beispiel im Teilgebiet C Kleinbasel, um 4 bis 5 K über dem potenziellen natürlichen thermischen Zustand liegen. Mit den nun vorhandenen Werkzeugen können somit für verschiedene Gebiete des Stadtgebietes Temperaturveränderungen differenziert beschrieben werden.



Durch die Vorgabe einer Referenztemperatur von 12 °C im Kanton Basel-Stadt (Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt, 2014) und einer gesetzlich erlaubten Veränderung der Grundwassertemperatur von 3 K kann es in weiten Bereichen des Stadtgebiets bereits zu Einschränkung von thermischen Grundwassernutzungen für Kühlzwecke kommen. Hingegen könnte durch Wärmegewinnung aus dem bereits entnommenen Grundwasser in den vier Teilgebieten bis zu 5.5 MW bereitgestellt werden, ohne das Grundwasser gegenüber dem aktuellen Istzustand thermisch und quantitativ weiter zu beeinträchtigen. Ferner ist der Wärmeeintrag durch neue, bis ins Grundwasser reichende Bauwerke lokal zu prüfen.

Neben den thermischen Beschränkungen bestehen bereits aktuell Einschränkungen der Grundwasserentnahmen aufgrund des Grundwasserdargebots. Kombinierte Nutzungen des Grundwassers zum Beispiel zur Wärmegewinnung aus Kühlwasser und eine anschliessende Rückversickerung in den Grundwasserleiter können zur nachhaltigen thermischen Entwicklung des oberflächennahen Untergrundes beitragen.

2.4 Referenzen Kapitel 2

Amt für Umwelt und Energie (AUE). Hydrologisches Jahrbuch 2015, Basel, Schweiz, 2016.

Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt. Wegleitung über die Grundwassernutzung im Kanton Basel-Stadt. In: Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt, Switzerland, 2014.

Baehr HD, Stephan K. Heat and Mass Transfer: Springer Berlin Heidelberg, 2006.

de Marsily, G. Quantitative Hydrogeology. San Diego, California: Academic Press, 1986.

Diersch HJ. FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media: Springer Berlin Heidelberg, 2013.

Doherty J. Ground Water Model Calibration Using Pilot Points and Regularization. Ground Water 2003; 41: 170-177.

Doherty J. PEST: Model-Independent Parameter Estimation User Manual: Watermark Numerical Computing, 2004.

Domenico, PA., und Schwartz, FW. Physical and Chemical Hydrogeology, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons Inc., 1998.

Epting J, Händel F, Huggenberger P. Thermal management of an unconsolidated shallow urban groundwater body. Hydrology and Earth System Sciences 2013; 17: 1851-1869.

Epting J, Huggenberger P. Unraveling the heat island effect observed in urban groundwater bodies - Definition of a potential natural state. Journal of Hydrology 2013a; 501: 193-204.

Epting J, Huggenberger P. Unraveling the heat island effect observed in urban groundwater bodies – Definition of a potential natural state. Journal of Hydrology 2013b; 501: 193-204.

Huggenberger P, Epting J. Thermische Grundwassernutzung im Kanton Basel-Stadt - Konzept für die thermische Grundwasserbewirtschaftung Pilotprojektgebiet Nordwest Basel. BGA 126. Angewandte & Umweltgeologie, Basel, Schweiz, 2011.

Köhler M, Händel F, Epting J, Binder M, Mueller MH, Huggenberger P, et al. Numerical Evaluation and Optimization of Depth-oriented Temperature Measurement for the Investigation of Thermal Influences on Groundwater Resources. Energy Procedia 2015; 76: 371-380.



3 Szenarienberechnungen

3.1 Thermische Auswirkung neuer Grundwassernutzungen

Als Grundlage für neue Grundwassernutzungen wurden Anlagen im Erlenmattareal berücksichtigt, die für das Jahr 2016 bzw. 2017 projektiert waren (Datengrundlage AUE BS). Die simulierten neuen Grundwassernutzungen wurden sukzessiv im Ausgangsmodell integriert. Das bedeutet, dass bei der Evaluation von bestehenden und neuen Nutzungen jeweils die Summe der bereits simulierten Veränderungen berücksichtigt wird.

Beispielhaft wird eine bereits im zweiten Halbjahr 2016 in Betrieb gegangene Grundwasserentnahme (Rückgabe in Oberflächengewässer) vorgestellt (schwarze Markierung in Abbildung 3.1). Die Grundwassertemperatur liegt im Bereich der Entnahmefunnen dieser Anlagen bei ca. 12 bis 14 °C. Es wird eine Entnahmerate von 6'900 m³ pro Tag über vier Brunnen für den Zeitraum von 55 Tagen im Jahr 2015 angenommene. Der berechnete Wärmestrom beträgt bei einer Wärmegewinnung aus dem gepumpten Grundwasser etwa 1 MW. Die Grundwasserentnahme führt lokal zu einer Grundwasserabsenkung, was durch die lokal veränderten Grundwasserisohypsen erkennbar ist (Abbildung 3.1). Eine direkt thermische Auswirkung auf das Grundwasser ist lokal nicht zu erkennen, da bei der geplanten Nutzung das geförderte Wasser nach Gebrauch in den Rhein eingeleitet wird.

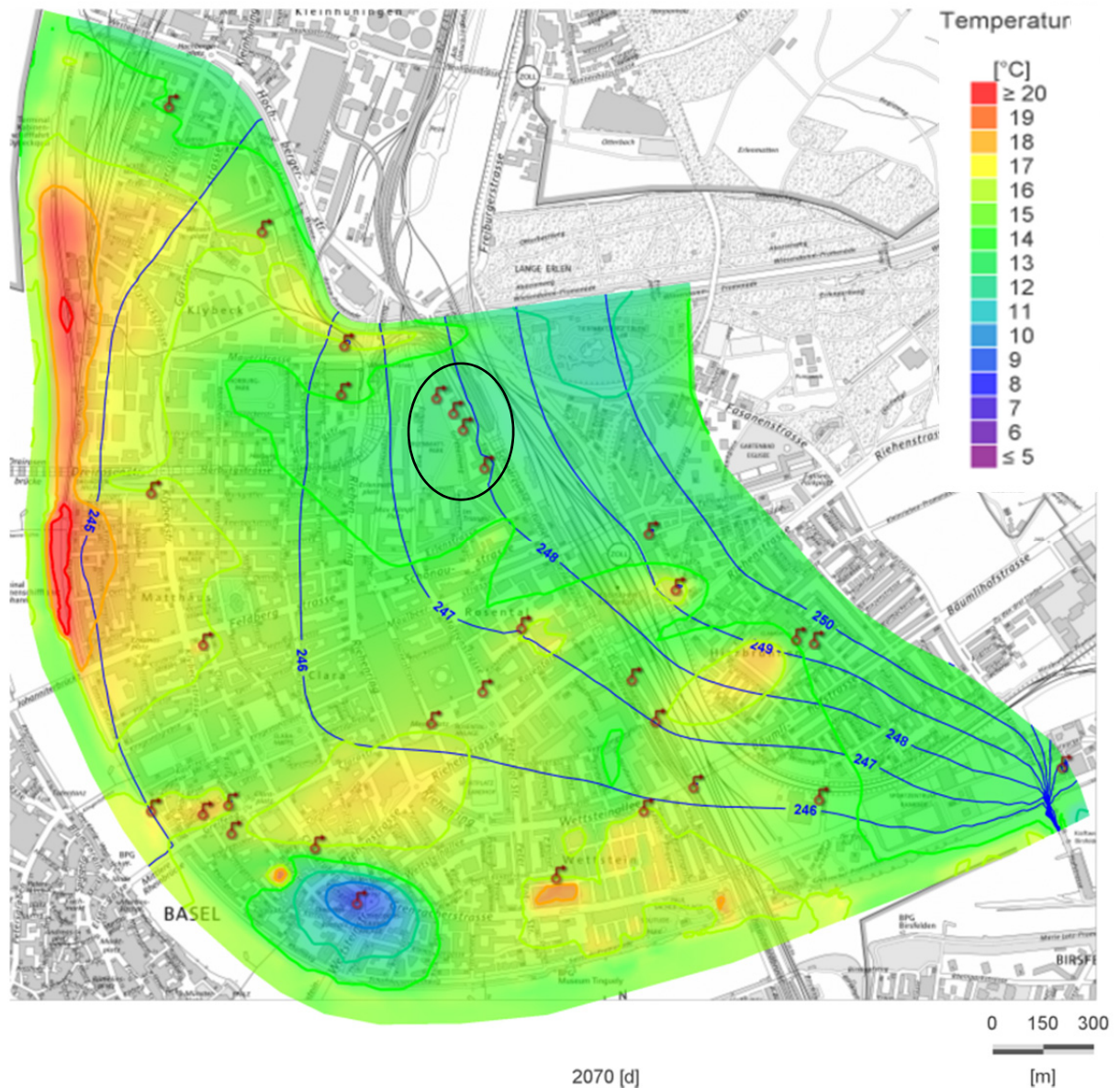


Abbildung 3.1: Simulierte Grundwasserisohypsen und -temperaturen für den 1. September 2015 im Teilgebiet Kleinbasel. Die roten Markierungen repräsentieren die Grundwassernutzungen (Entnahmen und Rückgaben). Der schwarze Kreis markiert die Lage der geplanten Grundwassernutzungen (Stand: Juni 2016; Datengrundlage: AUE BS, die Anlage ging in der zweiten Jahreshälfte 2016 in Betrieb).

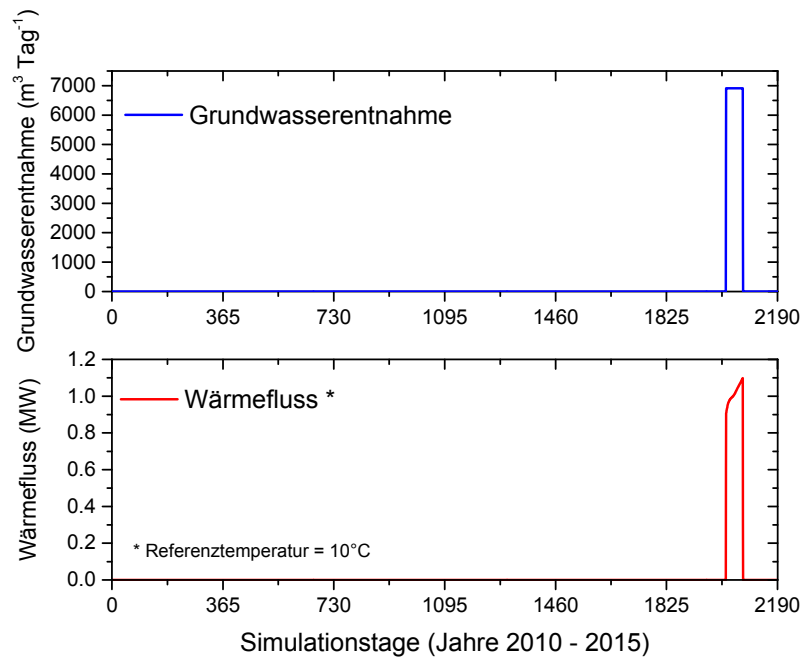


Abbildung 3.2: Entnommenes Grundwasservolumen und Wärmestrom einer neuen Grundwassernutzung im Gebiet "Erlenmatt" im Teilgebiet Kleinbasel (vgl. Abbildung 3.1).

Wird eine Rückgabe des genutzten Wassers aus einer Wärmegewinnung in das Grundwasser und nicht in das Oberflächenwasser berücksichtigt, ergibt sich im Abstrom der Rückgabe eine Abkühlung des Grundwassers (Abbildung 3.3). Bei einer Rückgabetemperatur von 10 °C (Abbildung 3.3a) ist diese Abkühlung weniger stark ausgeprägt als bei einer Rückgabetemperatur von 4 °C (Abbildung 3.3b, im Kanton Basel-Stadt existieren vereinzelt Bewilligungen mit einer Rückgabetemperatur von mindestens 4 °C, jedoch entspricht die Bewilligung von so tiefen Rückgabetemperaturen nicht mehr der aktuellen Vollzugspraxis im Kanton Basel-Stadt). Durch eine Rückgabe von Nutzwasser aus Wärmegewinnungsanlagen könnten erhöhte Grundwassertemperaturen in diesem Bereich des Stadtgebiets gesenkt werden.

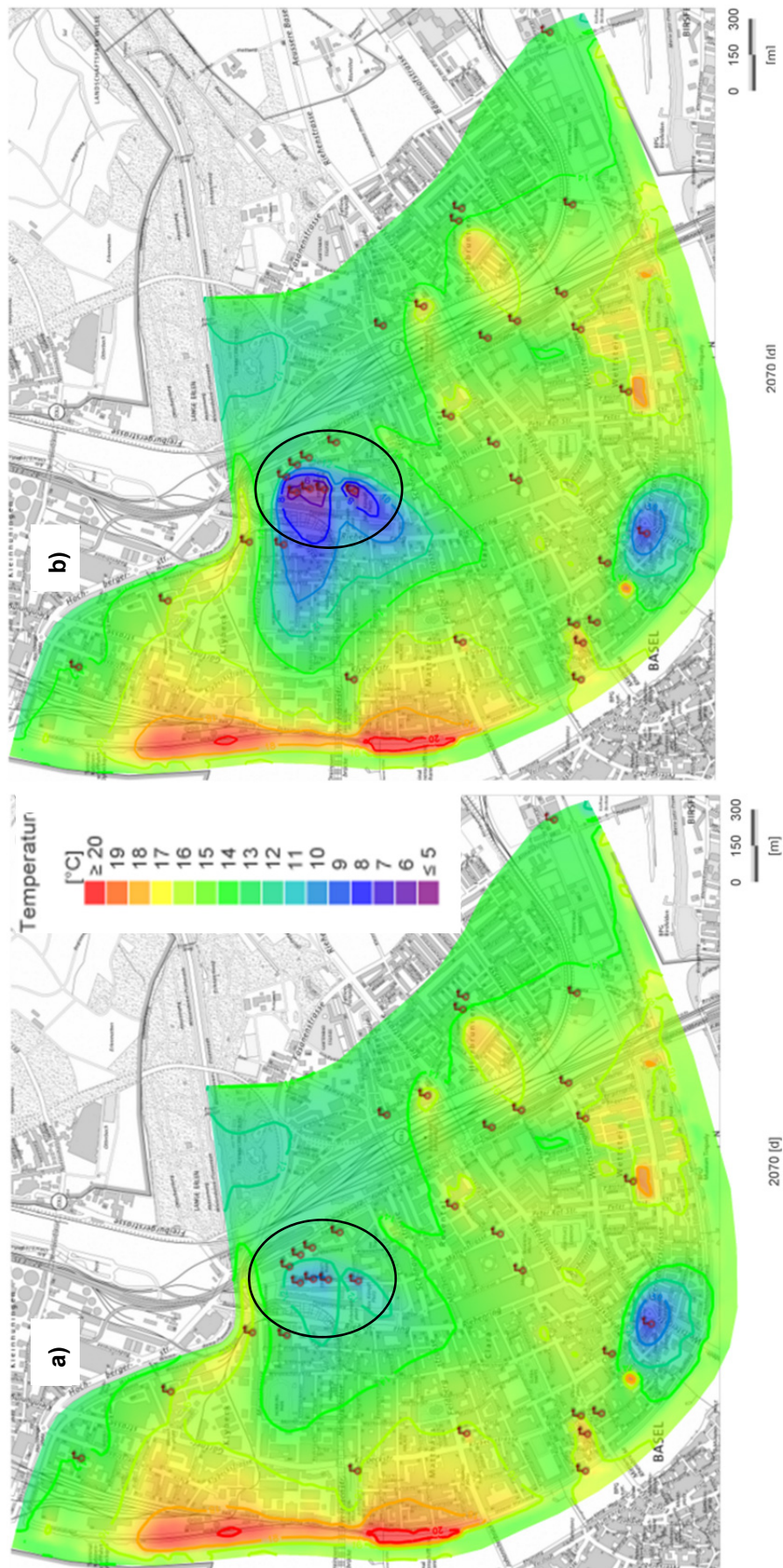


Abbildung 3.3: Simulierte Grundwassertemperaturen bei einer neuen Grundwassernutzung im Bereich „Erlenmatt“ (schwarze Markierung) für den 1. September 2015 im Teilgebiet Kleinbasel bei a) einer Rückgabetemperatur von 10 °C und b) einer Rückgabetemperatur von 4 °C. Die roten Markierungen repräsentieren die Grundwassernutzungen (Entnahmen und Rückgaben).



3.2 Evaluation der Quartiersentwicklung – potenziell nutzbare Energie

Im Zusammenhang mit der Quartierplanung wird im Folgenden illustriert, wie die Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodelle eingesetzt werden können, um die potenziell nutzbare Energie aus dem oberflächennahen Untergrund zu evaluieren. Die erarbeiteten Wärmebilanzen können bei der Raumplanung und den im Jahr 2018 ausstehenden Energierichtplan Berücksichtigung finden.

So können die Wärmetransportmodelle als Werkzeug während der Planungsphase bei der Quartiersentwicklung genutzt werden, um die Temperaturentwicklung im oberflächennahen Untergrund und Wärmeströme durch veränderte Nutzungen abzuschätzen. So stellt sich für einzelne Quartiere die Frage, ob Wärme aus dem Untergrund und dem Grundwasser genutzt werden kann.

Im Kanton Basel-Stadt werden in mehreren Quartieren in Zukunft neue Nutzungen entstehen, bei denen auch energietechnische Fragestellungen berücksichtigt werden. Dies betrifft zum Beispiel das Industrieareal „Klybeck“ in Kleinbasel oder das Areal „Volta Nord“ in Grossbasel (Abbildung 3.4). Das Areal „Erlenmatt Ost“, das derzeit entsteht, befindet sich auf dem ehemaligen Güterbahnhof der Deutschen Bahn. Im Hinblick auf die energietechnische Planung sollen hierbei die Ziele der 2000-Watt-Gesellschaft berücksichtigt werden.

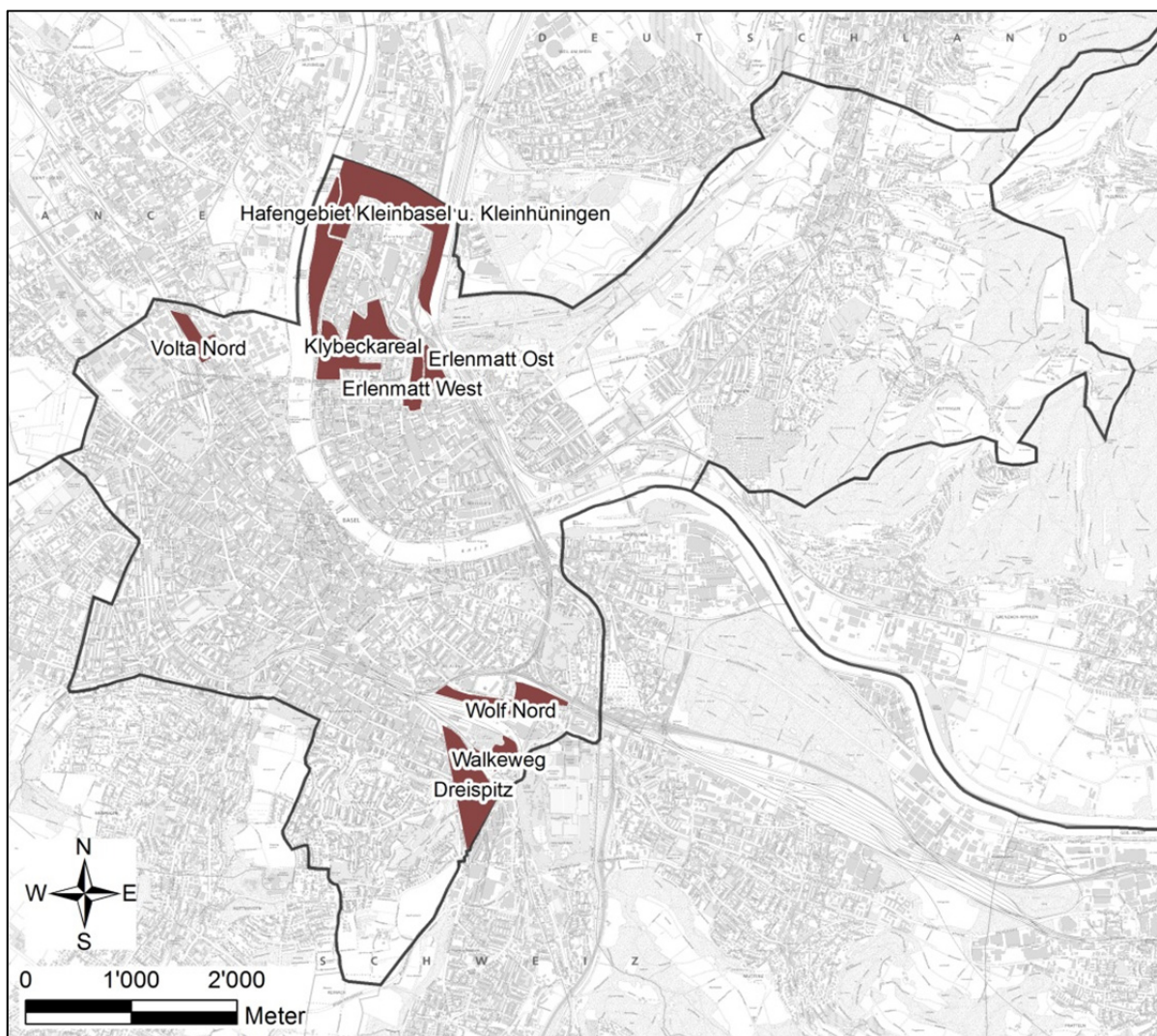


Abbildung 3.4: Areale, in denen Nutzungsänderungen stattfinden (Datengrundlage: www.planungsamt.bs.ch/arealentwicklung, Stand 22. Mai 2017).

Kleinbasel: KlybeckPlus

Im Industrieareal „Klybeck“, das in Kleinbasel im Bereich zwischen den Flüssen Wiese und Rhein liegt (Abbildung 3.5), sind in Zukunft neue Nutzungen geplant (www.klybeckplus). Die in diesem Bericht vorgestellten Werkzeuge können die dem gesamten Areal oder einzelnen Bereichen des Areals zuströmende thermische Energie quantifizieren.

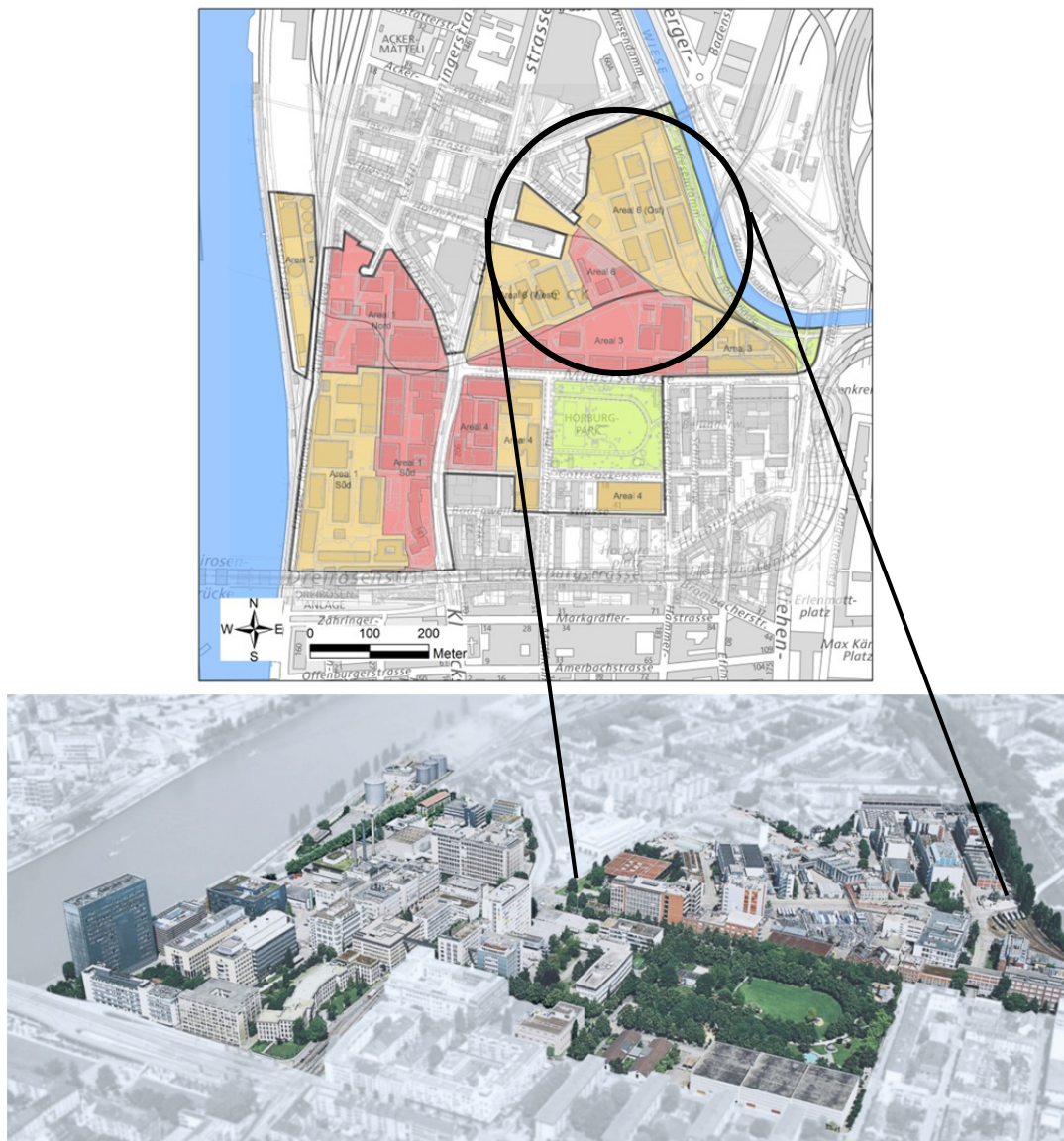


Abbildung 3.5: Planungsperimeter des Klybeck-Areals, auf dem unter dem Begriff „klybeckplus“ neue Nutzungen entstehen sollen. Der schwarze Kreis markiert das Areal, für das die Grundwasser- und Wärmebilanz berechnet wurden. (Quelle: „klybeckplus – ein Stadtquartier entsteht“. Vortrag zur Medienkonferenz am 24.06.2016. Kanton Basel-Stadt, BASF, Novartis. Foto: <http://klybeckplus.ch/>).

Das in Abbildung 3.5 markierte Areal wird über den Grundwasserstrom von Osten her von etwa 10'000 bis 15'000 m³ Grundwasser pro Tag durchströmt. Der gesamte Wärmestrom in das Areal (ungesättigte Zone und Grundwasserbereich) beträgt etwa 1 bis 5 MW, während der Austrag etwa 2 bis 4 MW beträgt (Abbildung 3.6). Über eine Wärmergewinnung aus dem Grundwasser oder beispielsweise über Wärmekörbe in der ungesättigten Zone könnte diese potenziell nutzbare Energie bei den bevorstehenden Nutzungsänderungen im Klybeck-Areal berücksichtigt und in energietechnische Planungen miteinbezogen werden. Bei Grundwassernutzungen in diesem Areal könnten sich jedoch aufgrund von Altlasten Einschränkungen der Grundwassernutzung ergeben.

Gemäss der vom Amt für Umwelt und Energie (BS) in Auftrag gegebenen Studie „Basel auf dem Weg zur 2000-Watt-Gesellschaft“ (Genske et al., 2011) beträgt der Wärmebedarf im Jahr 2050 bei einem 2000-Watt-Szenario im Bereich des Klybeckareals etwa 1 bis 2 GWh pro Jahr und Hektar (etwa 0.1 bis 0.2 MW pro Hektar). Die momentane verfügbare Wärmestromdichte von ca. 0.1 MW pro Hektar



könnte demnach einen grossen Beitrag zum zukünftigen Wärmebedarf im untersuchten Bereich des Klybeckareals abdecken.

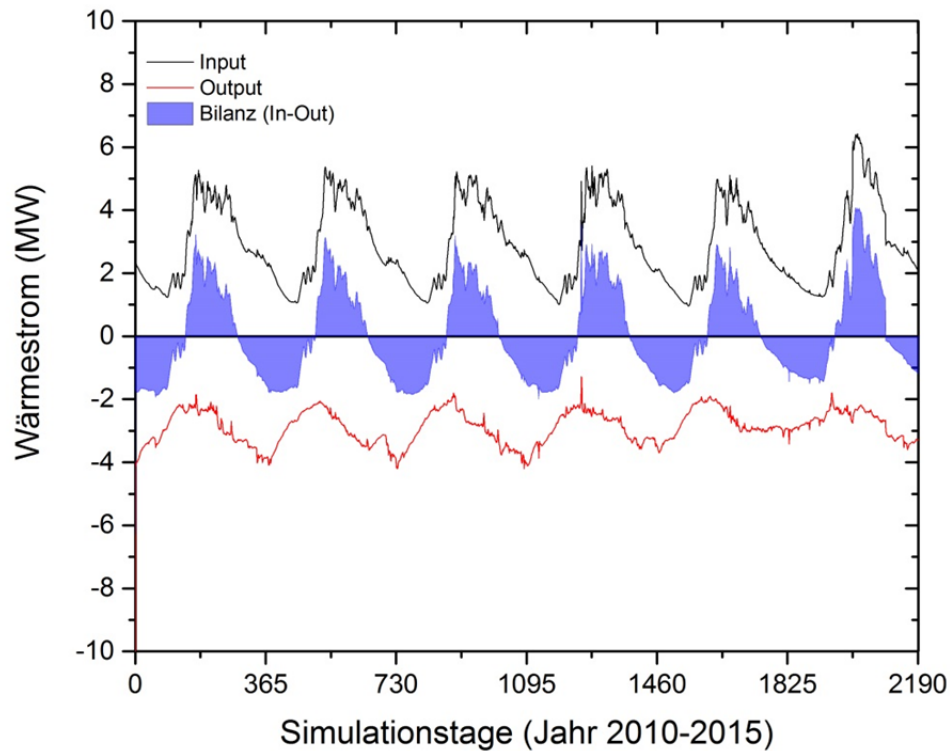


Abbildung 3.6: Simulierter Wärmestrom während der Jahre 2010-2015 in einem ausgewählten Bereich des Klybeck-Areals.

Grossbasel Nord-West: Volta-Nord

Im Areal „Volta Nord“ im Gebiet Grossbasel-West (Abbildung 3.4 und Abbildung 3.7) sollen durch eine Umstrukturierung des Areals in den kommenden Jahren neue Arbeitsplätze und Wohnraum entstehen (Planungsamt Basel-Stadt. Städtebau & Architektur, 2016). Ziel in diesem Quartier ist, dass der „Wärmebezug und Stromlieferung [...] aus Energieträgern von hoher ökologischer Qualität“ (erneuerbare Energiequellen) erfolgen sollen (Planungsamt Basel-Stadt. Städtebau & Architektur, 2016). Das vorliegende Wärmetransportmodell wird für eine Abschätzung der potenziell nutzbaren oberflächennahen Energie eingesetzt. Es liefert unter Berücksichtigung der aktuellen Nutzungen Daten zu den Wärmeströmen im Areal.

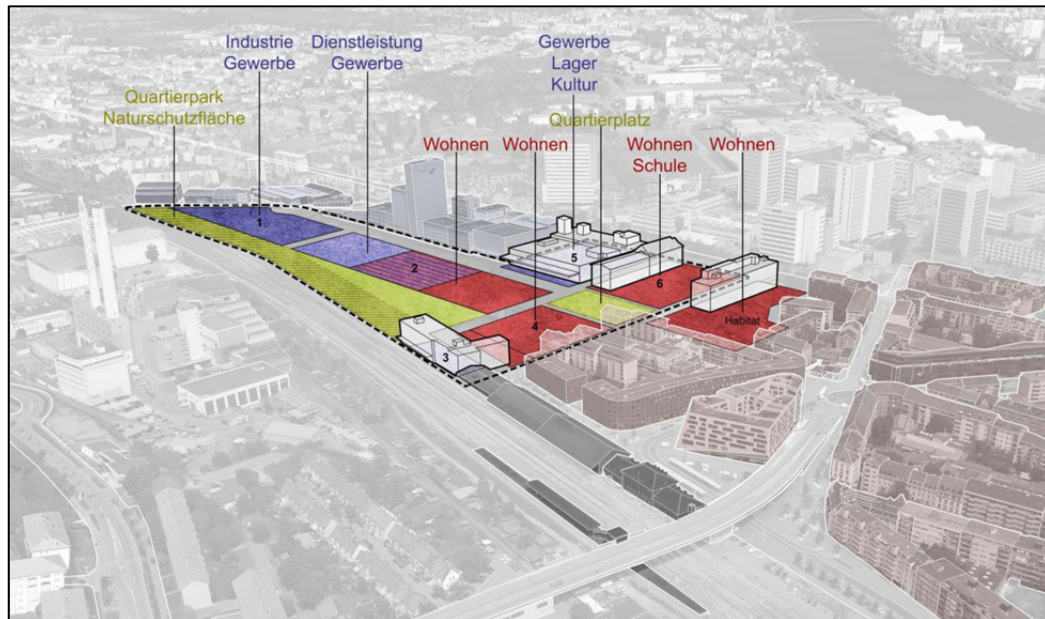


Abbildung 3.7: Raumnutzung im Areal "Volta Nord" im Teilgebiet Grossbasel (Quelle: Planungsamt Basel-Stadt. Städtebau & Architektur (2016)).

Insgesamt ist der Wärmestrom aus dem betrachteten Areal „Volta Nord“ mit etwa 0.5 bis 0.75 MW grösser als der Wärmestrom in das Areal hinein (0.5 bis 0.65 MW, Abbildung 3.8). Im Winterhalbjahr findet ein Wärmeaustrag z.B. über die Gleisanlagen statt. Die Temperaturverteilung des Untergrundes ist in diesem Areal durch die derzeitige Bebauung kleinräumig sehr variabel und beträgt im Sommer 2014 etwa 10 bis 18 °C (im Mittel 14.6 ± 1.7 °C) und im Winter 8 bis 16 °C (im Mittel 14.2 ± 1.7 °C). Die Grundwassertemperaturen liegen in dem betrachteten Areal sowohl im Sommer als auch im Winter etwa bei 14.2 °C.

Der projizierte Wärmebedarf in diesem Areal liegt unter Annahme eines 2000-Watt-Szenarios im Jahr 2050 bei etwa 1 bis 2 GWh pro Jahr und Hektar (etwa 0.1 bis 0.2 MW pro Hektar) (Genske et al., 2011). Die berechnete Wärmestromdichte beträgt etwa 0.06 MW pro Hektar und deckt damit etwa 30 bis 50 % des projizierten Wärmebedarfs bei einem 2000-Watt-Szenario.

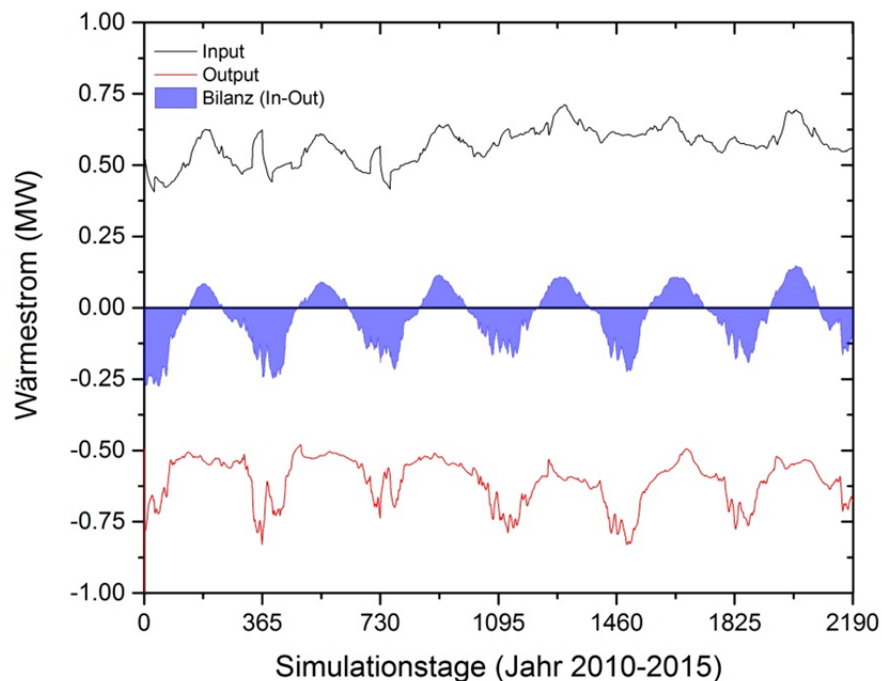


Abbildung 3.8: Simulierter Wärmestrom während der Jahre 2010-2015 Areal „Volta Nord“.

Kleinbasel: Wettsteinquartier

Weitere Anwendungsmöglichkeiten, in denen die oberflächennahe Energie genutzt werden könnte, sind Areale in denen bisher keine Fernwärme aus dem ansonsten dicht ausgebauten Fernwärmenetz in Basel zur Verfügung steht, wie zum Beispiel das Wettsteinquartier in Kleinbasel (schwarze Markierung in Abbildung 3.9). In einer Studie zur thermischen Nutzung des Rheins schlagen die Autoren eine Nutzung des Rheinwassers zur Wärmegewinnung für rheinnahe Bereiche des Wettsteinquartiers vor (Sres, 2016). Das Wärmetransportmodell der vorliegenden Studie wird daher verwendet, um zu berechnen, welche Energie aus dem oberflächennahen Untergrund in diesem Quartier potenziell genutzt werden könnte.

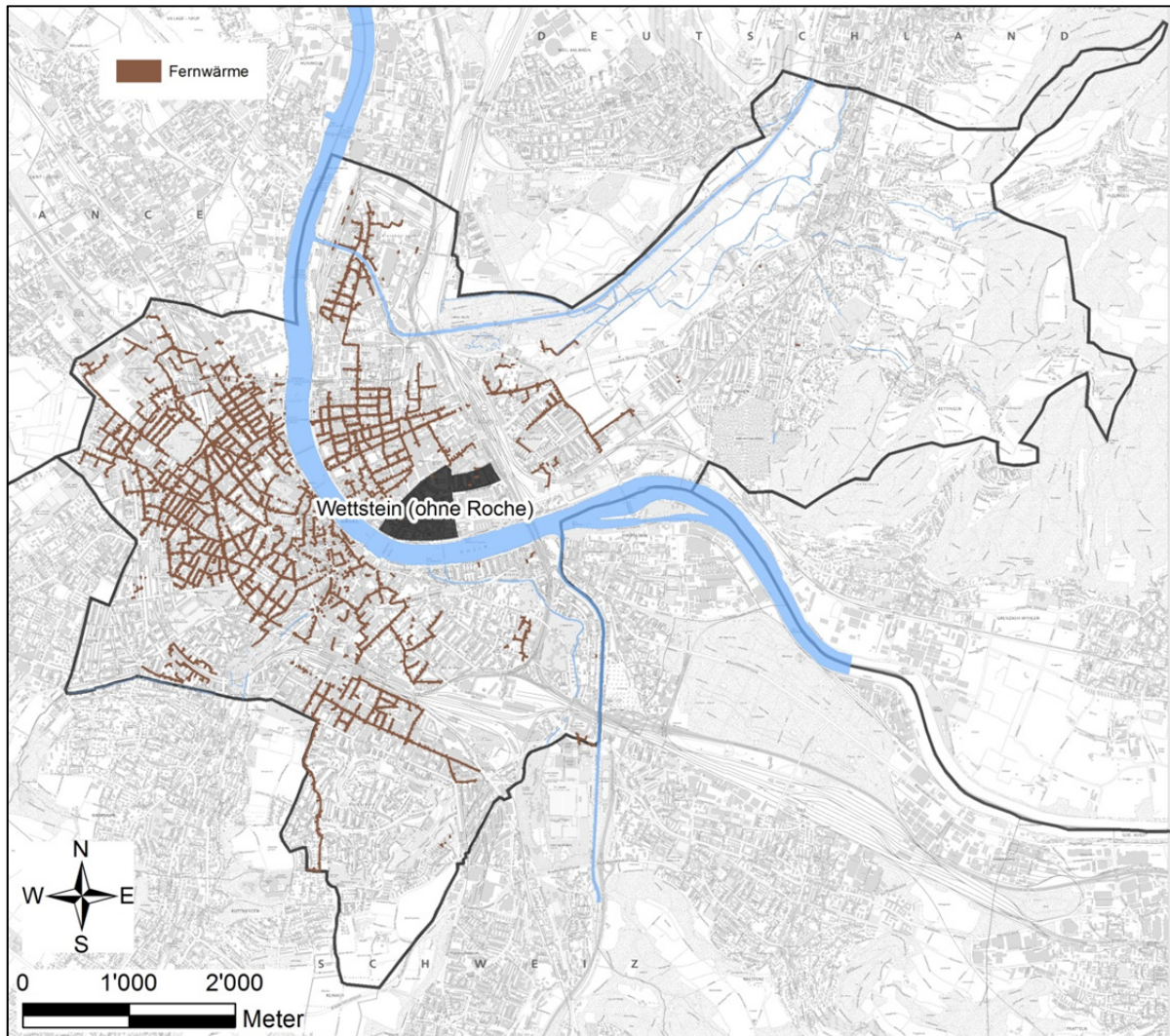


Abbildung 3.9: Fernwärmenetz im Kanton Basel-Stadt (Quelle: GVA Basel-Stadt. Stand: November 2014). Der schwarz markierte Bereich umfasst einen Teil des Wettstein-Quartiers, in dem das Fernwärmenetz kaum ausgebaut ist (ohne das Industrieareal „Roche“).

Die Grundwassertemperaturen erreichen im betrachteten Areal bis zu 17 °C und liegen deutlich über dem Jahresmittelwert der Lufttemperatur von etwa 10 bis 12 °C (Jahre 2010 bis 2015, Abbildung 2.2 und Abbildung 2.22). In diesem Areal existieren somit vergleichsweise hohe Grundwassertemperaturen, was eine Wärmegegewinnung aus dem Grundwasser begünstigt. Im südwestlichen Bereich des Wettsteinquartiers befindet sich bereits eine Rückspeisung von vergleichsweise kühlem Wasser aus einer Wärmegegewinnung (Abbildung 2.22), was lokal zu einer „Abkühlung“ der Grundwassertemperaturen auf ca. 10 °C führt. Der Wärmestrom in das betrachtete Wettsteinquartier beträgt im Sommer bis etwa 2 MW, während im Winterhalbjahr der Wärmestrom aus dem Areal hinaus etwa 1.5 bis 2 MW beträgt (Abbildung 3.10). Vor allem im Sommerhalbjahr ist der Wärmeeintrag höher als der -austrag, was zu einer positiven Bilanz führt, d.h. dem Areal wird Wärme zugeführt. Dieser Überschuss an Wärme könnte im Wettsteinquartier potenziell genutzt werden. Laut der Studie zur 2000-Watt-Gesellschaft (Genske et al., 2011) beläuft sich der Wärmebedarf im 2000-Watt-Szenario im Jahr 2050 im Bereich des Wettsteinquartiers auf etwa 1 bis 4 GWh pro Jahr und Hektar (etwa 0.1 bis 0.4 MW pro Hektar). Wird von einem mittleren Wärmestrom von 1.5 MW ausgegangen, so beträgt die berechnete Wärmestromdichte im betrachteten Bereich etwa 0.04 MW

pro Hektar, wobei hier der Bereich mit den vergleichsweise niedrigen Grundwassertemperaturen von ca. 10 °C bei der Berechnung mitberücksichtigt ist. Für eine Wärmeengewinnung aus dem Grundwasser werden die Bereiche mit den vergleichsweise hohen Grundwassertemperaturen von ca. 15 bis 17 °C empfohlen.

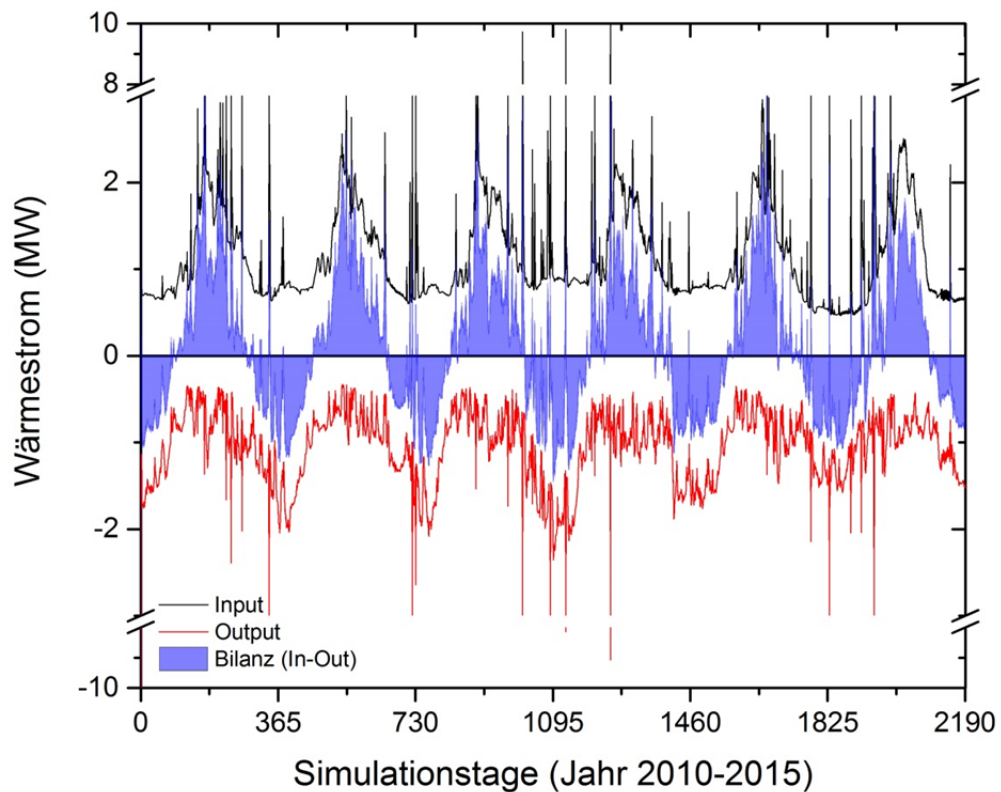


Abbildung 3.10: Simulierter Wärmestrom während der Jahre 2010-2015 in einem ausgewählten Bereich des Wettsteinquartiers.

3.3 Fazit Kapitel 3: Szenarienberechnungen

Die entwickelten Wärmetransportmodelle können eingesetzt werden, um die zeitliche und räumliche Entwicklung des thermischen Istzustandes unter sich ändernden Randbedingungen zu evaluieren. Es ist möglich den Einfluss neuer Grundwassernutzungen auf das thermische Regime des oberflächennahen Untergrundes, unter Berücksichtigung der schon bestehenden Nutzungen, zu quantifizieren. Des Weiteren können die Werkzeuge genutzt werden, um die Wärmeströme in bestimmten Stadtgebieten zu untersuchen, in denen städtebauliche Veränderungen geplant sind. Auf diese Weise können energetische Nutzungspotenziale des oberflächennahen Untergrundes abgeschätzt werden.

Die ermittelten thermischen Nutzungspotenziale könnten in den betrachteten Arealen 10 bis 50 % des Wärmebedarfs unter der Annahme eines 2000-Watt-Szenarios (Genske et al., 2011) im Jahr 2050 decken. Eine Studie zum thermischen Nutzungspotenzial des Rheinwassers (Sres, 2016) kommt zu dem Schluss, dass eine Grundwassernutzung gegenüber der Rheinwassernutzung zu bevorzugen sei, da die saisonalen Temperaturschwankungen im Grundwasser geringer sind, als im Oberflächenwasser. Ausserdem ist das Grundwasser häufig, durch eine zeitliche Verzögerung, im Winterhalbjahr etwas wärmer als im Sommerhalbjahr, was eine Wärmeengewinnung im Winter in Quartieren mit vergleichsweise hohen Grundwassertemperaturen zusätzlich begünstigt.



3.4 Referenzen Kapitel 3

Genske DD, Berger T, Hüsler L, Jödecke T, Menn A, Ruff A. Basel auf dem Weg zur 2000-Watt-Gesellschaft - Eine Studie zu den energetischen Potentialen des Kantons Basel-Stadt, Basel, Schweiz, 2011, <http://www.aue.bs.ch/dms/aue/download/publikationen/genske-studie.pdf>

Planungsamt Basel-Stadt. Städtebau & Architektur. „VoltaNord“. Öffentliche Planaufgabe vom 29.06.2016 – 30.08.2016. Orientierende Informationen, Basel, Schweiz, 2016, http://www.planungsamt.bs.ch/dms/planungsamt/download/Planaufgaben/VoltaNord_OrientierendeInhalt.pdf

Sres A. Thermische Nutzung Rhein - Schlussbericht Potentialstudie. eicher+pauli, Planer für Energie- und Gebäudetechnik, Basel, Schweiz, 2016.



4 Grundlagen und Werkzeuge für die Erarbeitung von Nutzungskonzepten für die thermische Bewirtschaftung des oberflächennahen urbanen Untergrundes

4.1 Planungsinstrumente/Vollzugshilfen des Bundes

Die Vollzugshilfe „Wärmenutzung aus Boden und Untergrund“ des Bundesamts für Umwelt (BAFU) „befasst sich mit den Anforderungen des Gewässerschutzes an Anlagen, welche Wärme aus dem Boden und dem Untergrund nutzen“ (Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2009). Darin werden Kriterien für die Dimensionierung geplanter Anlagen zur thermischen Grundwassernutzung, ihres Standorts und ihrer Anzahl (bzw. Dichte) definiert. In der Wegleitung Grundwasserschutz (Bundesamt für Umwelt; Wald und Landschaft (BUWAL), 2004) werden ebenfalls Aspekte des Gewässerschutzes bei einer Wärmenutzung aus dem Untergrund dargelegt. Die technischen Aspekte für Planung, Ausführung und Betrieb verschiedener Typen von Grundwasserwärmenutzungen sind in der SIA Norm 384/7:2015 zur Grundwasserwärmenutzung aufgeführt (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 2015). Auf Basis der Gewässerschutzverordnung der Schweiz (GSchV, 2015) wird in den Planungshilfen ein Grenzwert für die Änderung der Grundwassertemperatur durch eine thermische Nutzung (Wärmeeintrag oder -entzug) um höchstens 3 K im Vergleich zum „natürlichen Zustand“ angegeben. Lokal begrenzt im Bereich bis 100 m im Abstrom eines Rückgabestandortes sind grössere Abweichungen erlaubt.

Eine Vielzahl von Einzeleingriffen in urbanen Gebieten, wie zum Beispiel thermische Grundwassernutzungen und Energieeinträge über tiefe Gebäude, führt zu einer Veränderung des natürlichen thermischen Grundwasserregimes. Aufgrund der interagierenden Prozesse, die auf urbane Grundwasserbereiche und das thermische Grundwasserregime wirken, ist für eine differenzierte Beurteilung und nachhaltige Nutzung des Grundwassers und der thermischen Energie des oberflächennahen Untergrundes die Entwicklung von Nutzungskonzepten notwendig. Diese sollen es ermöglichen, thermische Nutzungspotentiale des oberflächennahen Untergrundes bei energietechnischen Planungen in einzelnen Quartieren unter Berücksichtigung der Vorgaben zum Grundwasserschutz und qualitativer Aspekte urbaner Grundwasservorkommen mit zu berücksichtigen.

4.2 Vergleich von Nutzungsstrategien in verschiedenen Regionen

Das BAFU hat in einer Umfrage im Jahr 2014 festgestellt, dass 11 Kantone angaben, über eine Strategie zur energetischen Nutzung des Grundwassers zu verfügen (Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2014). Allerdings wurde der „Begriff Strategie (...) zum Teil sehr breit verstanden. Bei manchen Kantonen besteht die Strategie aus einer Karte, andere haben eine ausformulierte Strategie (analog zur Strategie Wasserversorgung)“ (Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2014, S. 18). Für einige Gebiete existieren Wärmetransportmodelle wie z.B. in Baar (Kanton Zug), dem Limmattal (Kanton Zürich) oder in den Gemeinden Ober- und Unterfelden (Kanton Aargau) (Abteilung für Umwelt Kanton Aargau, 2013; Amt für Umweltschutz Kanton Zug, 2013). In anderen Gebieten werden mögliche thermische Nutzungen in (Erd)Wärmenutzungskarten festgehalten, die meist über ein online Geoinformationssystem verfügbar sind, wie z.B. in den Kantonen Basel-Landschaft, Bern oder Graubünden (und weiteren Kantonen). In einigen Kantonen existieren ausformulierte Wasserversorgungsstrategien und/oder Energiekonzepte (gesamte Strom- und Wärmeversorgung). Gemäss der Einschätzung des BAFU (Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2014) sind diese beiden Strategien meist nicht miteinander verknüpft und manche Kantone verfügen nur über je eine Strategie. Auch einzelne Städte verfügen über Energiepläne, die die thermische Nutzung des Grundwassers mit



einschliessen. Die Stadt Winterthur beispielsweise verfügt über einen „Kommunalen Energieplan“, in dem Grundwasser explizit als potenzielle Wärmequelle in Betracht gezogen wird (Planar AG für Raumentwicklung, 2011).

Im Kanton Basel-Stadt wird die energetische Nutzung des Untergrundes über verschiedene Instrumente koordiniert. Kartenwerke wie die Grundwasserschutz- und die Erdwärmesondenkarte weisen mögliche Nutzungsgebiete aus. Die „Wegleitung über die Grundwassernutzung im Kanton Basel-Stadt“ (Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt, 2014) gibt weitere Vorgaben zur Einrichtung von Grundwassernutzungsanlagen. In zwei vom Amt für Umwelt und Energie in Auftrag gegebenen Studien werden die Nutzung von Grund- und Oberflächenwasser (Rhein) zur Wärmegewinnung als ein Baustein der erneuerbaren Energien genannt (Genske et al., 2011; Sres, 2016). Eine übergreifende Strategie und Planungsinstrumente (z.B. Energierichtplan Kanton Basel-Stadt) sollen eine Gesamtplanung der thermischen Nutzung des oberflächennahen Untergrundes in urbanen Gebieten wie z.B. dem Kanton Basel-Stadt erlauben.

4.3 Nachhaltige thermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes in urbanen Gebieten

Eine nachhaltige thermische Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes in urbanen Gebieten erfordert eine Bereitstellung der notwendigen Grundlagen und Werkzeugen für entsprechende Nutzungskonzepte.

In Abbildung 4.1 wird ein solches Nutzungskonzept skizziert, welches die folgenden drei Aspekte umfasst. Es werden 1) Werkzeuge erstellt, die den thermischen Zustand im Untergrund erfassen (Temperaturmonitoringsysteme) und die thermischen Prozesse adäquat abbilden (Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodelle), 2) Nutzungsstrategien festgelegt, die sowohl die energetischen Bedürfnisse als auch die Grundwasserressourcen einer Region berücksichtigen und 3) Massnahmen definiert, um die Zielvorgaben der Nutzungsstrategie zu erreichen.

Zur Beschreibung des thermischen Istzustandes und um die räumliche und zeitliche Dynamik der Temperaturentwicklung erfassen zu können, werden geeignete Werkzeuge erstellt (Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2). Die Datenanalysen aus den Temperaturmonitoringsystemen werden verwendet, um Kartenwerke beispielsweise zum thermischen Istzustandes des Grundwassers und zur Grundwassernutzung (Grundwasservorkommen, Mächtigkeit der wassergesättigten Zone) zu erstellen. Diese geben erste Hinweise zu möglichen thermischen Grundwassernutzungspotenzialen. Der Aufbau von Grundwasserströmungs- und Wärmetransportmodellen für einzelne Teilgebiete, ermöglicht eine Bewirtschaftung der Grundwasser- und Energieressourcen im urbanen Kontext unter Betrachtung der sich gegenseitig beeinflussenden Nutzungen und zeitlich variabler Randbedingungen. Im Gegensatz zu einer Einzelbetrachtung von Nutzungsänderungen können auf diese Weise die Änderungen in den Grundwasserbereichen gesamthaft ausgewertet werden. In Kombination mit dem bestehenden Grundwassermonitoring und zusätzlichen Temperaturmesssystemen, die Auskunft über die vertikale Temperaturverteilung geben, steht ein Werkzeug zur Bewirtschaftung sowohl des Grundwassers als auch der thermischen Energie des oberflächennahen Untergrunds zur Verfügung.

Unter Berücksichtigung der für eine Region (Kanton, Gemeinde, Stadt, Quartier) festgelegten Nutzungsstrategie können durch Szenarienberechnungen Wärmebilanzen für zukünftige Nutzungen in den untersuchten Gebieten evaluiert werden. Die Nutzungsstrategien sollten sowohl die energetische Ziele des betrachteten Gebietes (effiziente Energieversorgung) als auch Fragen der nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung (Einhaltung des Grundwasserschutzes, z.B. Grundwassertemperatur) gekoppelt betrachten.

Um die Ziele der Nutzungsstrategie zu erreichen, werden geeignete Massnahmen formuliert, die jeweils an die entsprechenden Bedürfnisse eines Gebietes (Kanton, Gemeinde, Stadt, Quartier) angepasst sein müssen. Solche Massnahmen können zum Beispiel die finanzielle Förderung von Grundwasserwärmepumpen zur Wärmeversorgung eines Quartiers beinhalten. Auch kombinierte



Nutzungen von Kühl- und Wärmegewinnungssystemen können hierbei genutzt werden. Die Wirkung der entsprechenden Massnahmen können mit geeigneten Temperaturmonitoringsystemen überwacht und den Wärmetransportmodellen quantifiziert und überprüft werden.

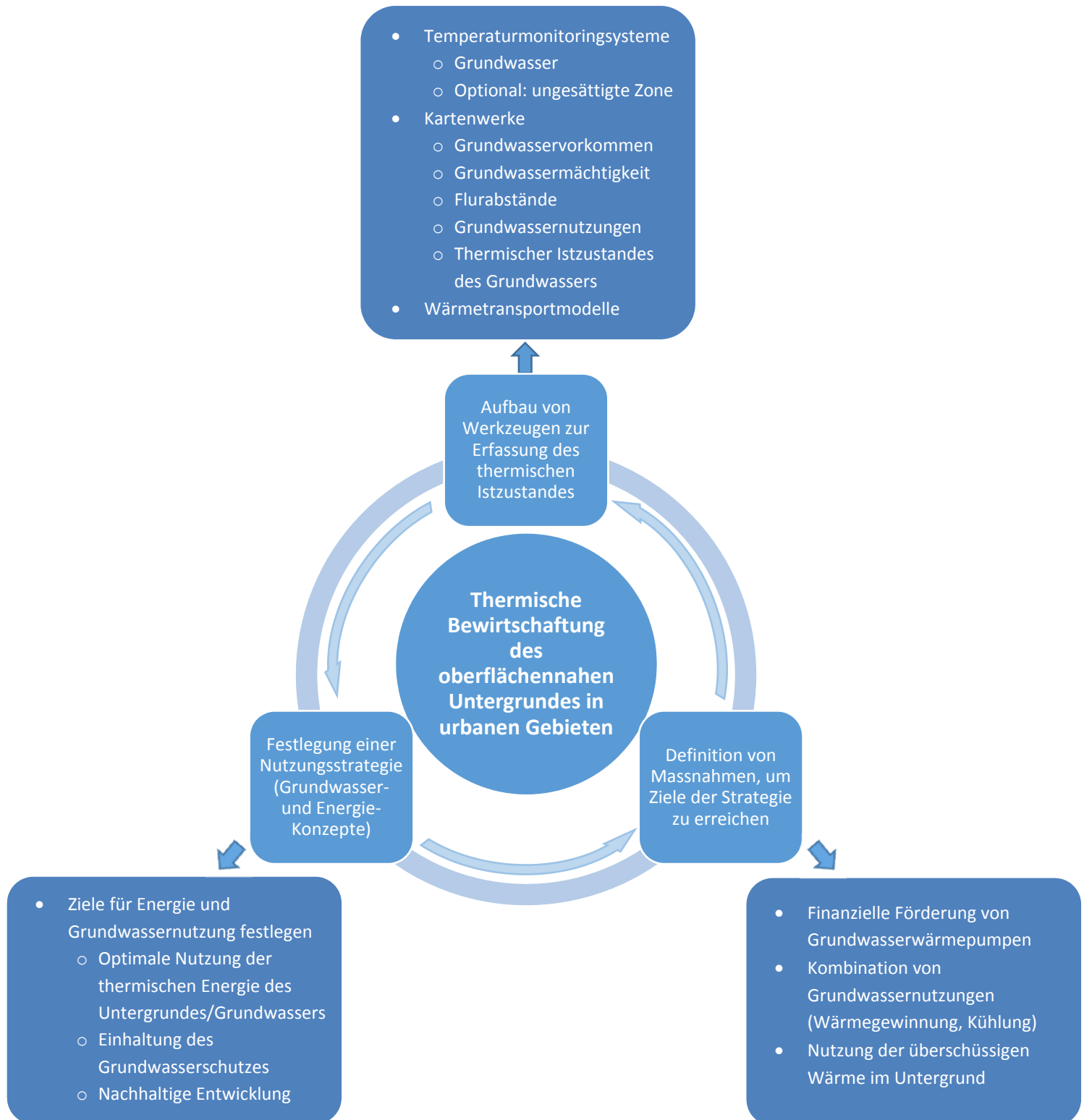


Abbildung 4.1: Nutzungskonzept zur thermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes in urbanen Gebieten.

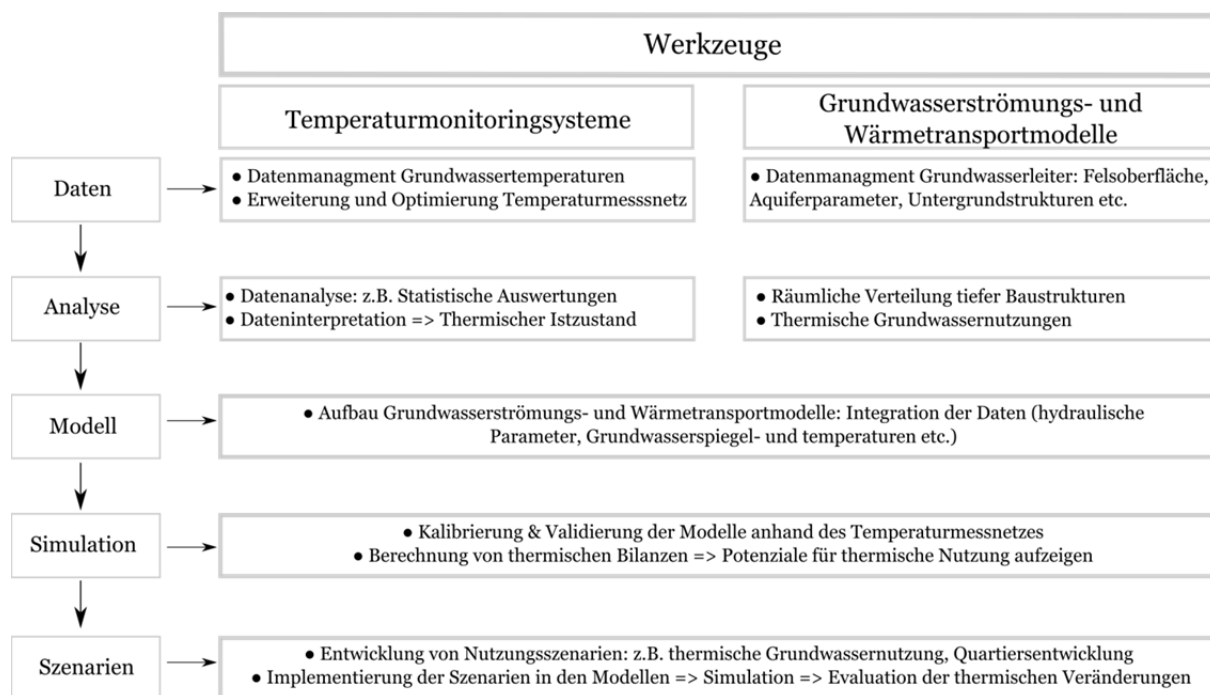


Abbildung 4.2: Werkzeuge und Vorgehen zur thermischen Bewirtschaftung des oberflächennahen Untergrundes in urbanen Gebieten. Temperaturmonitoringsysteme und Wärmetransportmodelle werden zur Evaluation des thermischen Istzustandes und der thermischen Nutzungspotenziale eingesetzt.

4.4 Referenzen Kapitel 4

Abteilung für Umwelt Kanton Aargau. Umwelt Aargau: Wie intensiv kann Grundwasser thermisch genutzt werden? Umwelt Aargau. Nr. 60 Mai 2013, Switzerland, 2013.

Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt. Wegleitung über die Grundwassernutzung im Kanton Basel-Stadt. In: Amt für Umwelt und Energie (AUE) Basel-Stadt, Schweiz, 2014, www.aue.bs.ch/wegleitung-grundwassernutzung.pdf

Amt für Umweltschutz Kanton Zug. Umwelt Zug: Thermische 3D-Grundwassermodellierung von Baar/Zug, Schweiz, 2013, <https://www.zg.ch/behoerden/audirektion/amt-fuer-umweltschutz/umwelt-zug/archiv-umwelt-zug/downloads/umwelt-zug-13-2-web.pdf/download>

Bundesamt für Umwelt (BAFU). Wärmenutzung aus Boden und Untergrund. Vollzugshilfe für Behörden und Fachleute im Bereich Erdwärmennutzung. Umwelt-Vollzug Nr. 0910, Bern, Schweiz, 2009.

Bundesamt für Umwelt (BAFU). Grundlagen für die Wasserversorgung 2025. Risiken, Herausforderungen und Empfehlungen. In: Umwelt-Wissen, Bern, Schweiz, 2014.

Bundesamt für Umwelt; Wald und Landschaft (BUWAL). Wegleitung Grundwasserschutz. Vollzug Umwelt, Bern, Schweiz, 2004.

Genske DD, Berger T, Hüsler L, Jödecke T, Menn A, Ruff A. Basel auf dem Weg zur 2000-Watt-Gesellschaft - Eine Studie zu den energetischen Potentialen des Kantons Basel-Stadt, Basel, Schweiz, 2011, <http://www.aue.bs.ch/dms/aue/download/publikationen/genske-studie.pdf>



GSchV. Gewässerschutzverordnung Schweiz, Bern, Schweiz, 2015.

Planar AG für Raumentwicklung. Kommunalen Energieplan Winterthur. Stadt Winterthur, Schweiz, 2011, http://stadtplan.winterthur.ch/system/docs/Energieplan/Energieplan_Bericht.pdf

Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein. Grundwasserwärmenutzung. In: SIA, editor. SIA 384/7:2015. Schweizer Norm, Zürich, Schweiz, 2015.

Sres A. Thermische Nutzung Rhein - Schlussbericht Potentialstudie. eicher+pauli, Planer für Energie- und Gebäudetechnik, Basel, Schweiz, 2016.



5 Danksagung

Wir danken Rita Kobler und Céline Weber vom Bundesamt für Energie (BFE) für die Kooperation und die finanzielle Unterstützung im Rahmen dieses Projektes. Vielen Dank auch an Thomas Fisch, Paul Svoboda und Paul Borer vom Amt für Umwelt und Energie Basel-Stadt (AUE BS) für ihre Unterstützung. Wir danken ausserdem den folgenden Institutionen für die Bereitstellung von Daten, die in diese Studie eingeflossen sind: dem Amt für Umweltschutz und Energie Basel-Landschaft (AUE BL), den Industriellen Werken Basel (IWB), dem Tiefbauamt Basel-Stadt, dem Grundbuch- und Vermessungsamt der Stadt Basel, MeteoSchweiz und dem Bundesamt für Umwelt (BAFU).