

Kanton St.Gallen
Amt für Wasser und Energie
Lämmli brunnenstrasse 54
9001 St.Gallen

St.Galler Stadtwerke
Direktion Technische Betriebe
St. Leonhard-Strasse 15
9001 St.Gallen

Stadtwerke Gossau
Bischofszellerstrasse 90
9201 Gossau

Stadtverwaltung Gossau
Tiefbauamt
Bahnhofstrasse 25
9201 Gossau

Hydraulisch-thermisches Grundwassermodell Gossau – St.Gallen (West)

VS-13.03.2019

Gefördert durch den Kanton St.Gallen



SIMULTEC AG, KraftWerk1, Hardturmstr. 261, CH-8005 Zürich

Tel: 044 563 86 20, Fax: 044 563 86 29, E-Mail: info@simultec.ch, <http://www.simultec.ch>

Zürich, 27.08.2018

Inhalt

Einleitung	1
Ausgangslage	1
Ziele	1
Grundlagen.....	2
Hydrogeologie.....	2
Hydrologie.....	4
Landnutzung	6
Grundwassernutzung	6
Grundwasserabsenkungen	7
Grundwasserspiegel	7
Grundwassertemperatur	9
Regionales Strömungsmodell.....	10
Modellkonzept.....	10
Geologisches Modell.....	10
Grundwasserneubildung aus Niederschlag	11
Oberflächengewässer	12
Grundwasserabsenkungen	13
Seitenzufluss	13
Grundwasserentnahmen.....	14
Modellcode und Diskretisierung	15
Kalibrierung.....	15
Resultierende Strömungsverhältnisse.....	18
Wärmetransportmodell.....	22
Grundlagen	22
Diskretisierung	22
Wärmeaustausch mit der Atmosphäre	23
Wärmeaustausch mit den Oberflächengewässern	24
Seitenzufluss	24
Kälte- und Wärmeeinleitung.....	24
Parameter der Wärmeausbreitung	25
Resultierende Temperaturverteilung	25
Literatur	27

Einleitung

Ausgangslage

Situation

Unter der Stadt Gossau und im Westen der Stadt St.Gallen befindet sich ein Grundwasserleiter, welcher sich über die gesamte Talebene zwischen dem St.Galler Breitfeld und dem Tal des Flusses Glatt bei Chressbrunnen erstreckt (vgl. Fig. 1). Der Grundwasserleiter wird an verschiedenen Stellen für die Trinkwassergewinnung genutzt. Dabei wird teilweise neben dem oberflächennahen Grundwasserstockwerk noch ein darunterliegendes zweites Stockwerk genutzt.

□ Bearbeitungsgebiet
□ Gemeindegrenzen

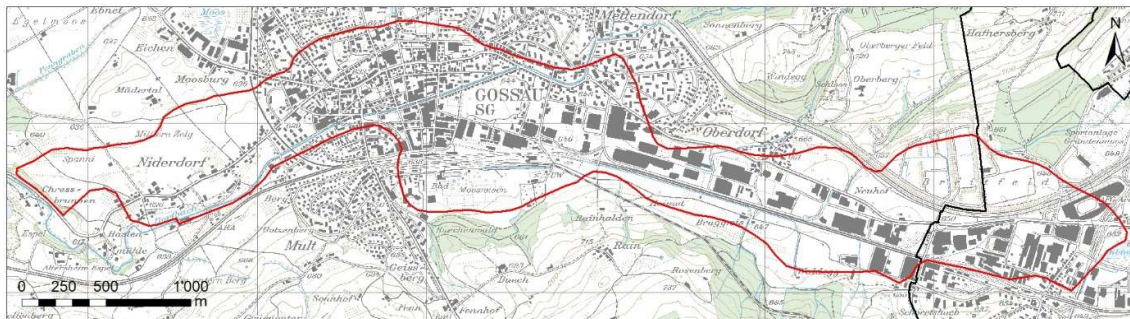


Fig. 1: Bearbeitungsgebiet und Gemeindegrenzen.

Abwasserleitungen

Der Grundwasserspiegel liegt stellenweise nahe an der Oberfläche. Die Stadt Gossau hat deshalb ihre Abwasserleitungen zum Teil mit drainierender Wirkung ausgeführt. Damit wird der Grundwasserspiegel künstlich kontrolliert und das Eindringen in Kellergeschosse verhindert.

Sanierung

Im Rahmen der Sanierung der Abwasserleitungen sollen diese abgedichtet werden. Ihre drainierende Wirkung wird damit aufgehoben und es kommt zu einem Anstieg der maximalen Grundwasserstände. Die Stadt Gossau hat deshalb ein Projekt ausgearbeitet, welches den Ersatz der drainierenden Abwasserleitungen durch Drainagen vorsieht.

Wärmenutzungen

Im Stadtgebiet von St.Gallen soll eine Nutzung des Grundwassers für Heiz- und Kühlzwecke auf deren Machbarkeit untersucht werden. Weitere Nutzungen im gesamten Modellbereich sind denkbar.

Ziele

Fragestellung

Mit Hilfe eines Grundwassermodells sollen verschiedene Fragestellungen untersucht werden, namentlich:

- Massnahmen zur Begrenzung des Grundwasserspiegels im Stadtzentrum von Gossau

- Erneuerung der Wasserrechtskonzession für die Grundwasserfassung Heimat der Wasserversorgung Gossau
- Machbarkeit eines Projekts der St.Galler Stadtwerke zur thermischen Nutzung des Grundwassers.

Genauigkeit

Das Grundwassermodell soll den gesamten Grundwasserleiter in einer Genauigkeit abbilden, welche einen Einsatz bei zukünftigen Projekten im Grundwasser erlaubt. Dies können zum Beispiel Tiefbauten, Grundwasserförderung oder Wärmenutzungen sein.

Vorgehen

In einem ersten Schritt werden geologische und hydrologische Grundlagedaten für das Bearbeitungsgebiet zusammengetragen und aufgearbeitet. Anschliessend wird ein hydrogeologisches Modellkonzept entwickelt. Das konzeptionelle Modell wird in den Computercode umgesetzt und instationär anhand von Grundwasserpegeldaten des Jahres 2013 kalibriert. Anhand von Pegeldaten des Jahres 2012 wird das Modell schlussendlich validiert und darauf basierend diverse Machbarkeiten (Fallstudien) untersucht.

Grundlagen

Hydrogeologie

Datengrundlage

Die wichtigste Datengrundlage bilden die Grundwasserkarte des Kantons St.Gallen sowie die hydrogeologische Datenbank, welche durch die Firma Grundbauberatung-Geoconsulting erarbeitet wurde. In der Datenbank sind insgesamt 686 Bohrungen enthalten. Fig. 2 zeigt die Ausdehnung des Grundwasserleiters gemäss der Grundwasserkarte des Kantons St.Gallen. Die räumliche Verteilung der Bohrdaten ist in Fig. 3 dargestellt.

GW-Mächtigkeit [m]

- 0 - 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20

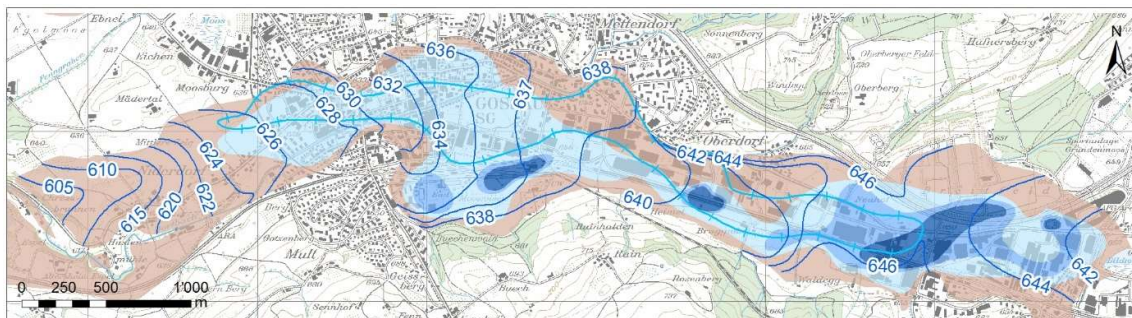


Fig. 2: Grundwasserkarte des Kantons St.Gallen.

Grundwasserleiter Gossauerfeld

Der Grundwasserleiter im Gossauerfeld erstreckt sich über die gesamte Talebene zwischen dem St.Galler Breitfeld im Osten und dem Bachtobel bei Chressbrunnen im Westen. Die geologischen Verhältnisse im Gossauerfeld sind generell durch einen komplexen Schichtaufbau charakterisiert. Über dem Molassefels liegen in unregelmässiger Wechselfolge Fluvioglazialschotter, Schliesande und Grundmoränen vor. Der Grundwasserleiter besteht aus den gut durchlässigen Fluvioglazialschottern, welcher bedingt durch die vertikale Gliederung nachweislich zwei Grundwasserstockwerke aufweist. Seitlich wird der Grundwasserleiter von Moränenablagerungen begrenzt.

Mächtigkeiten und hydraulische Durch- lässigkeit

Die Schottermächtigkeit sowie die hydraulische Durchlässigkeit variieren stark aufgrund des heterogenen Schichtaufbaus. Die Mächtigkeit beträgt rund 2 - 20 m. Der mittlere Durchlässigkeitsbeiwert über die gesamte Mächtigkeit des Grundwasserleiters ist mit rund $1 \cdot 10^{-3}$ m/s anzunehmen. Zu beachten ist, dass sich ein Grossteil des Grundwassers auf präferentiellen Fliesswegen in den gut durchlässigen Schichten bewegt, welche Durchlässigkeiten bis zu $1 \cdot 10^{-2}$ m/s aufweisen können.

GW-Strömung

Im Bereich des Wiesenbachs am östlichen Rand des Gossauer Industriegebiets (im Bereich der Gemeindegrenze zwischen der Stadt Gossau und der Stadt St.Gallen) befindet sich eine Wasserscheide, von wo das Grundwasser in Richtung Osten und Westen abströmt. Im Osten exfiltriert das Grundwasser im Breitfeld in den Bildweiher. Gegen Westen wird das Grundwasser in der Talenge bei Gossau infolge der Reduktion des Durchflussquerschnitts an die Terrainoberfläche gedrängt und tritt hier in Oberflächengewässern oder in Drainagen und undichten Kanalisationsleitungen aus. Der Rest des Grundwasserleiters exfiltriert schlussendlich in Form von ergiebigen Quellen im Taleinschnitt bei Chressbrunnen.

- Sondierbohrungen
- GW-Leiter Grundwasserkarte
- Modellrand

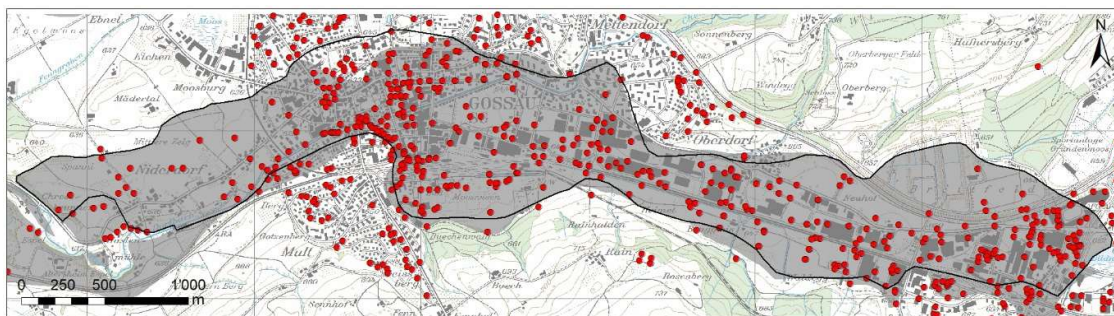


Fig. 3: Bohrdaten der hydrogeologischen Datenbank.

Hydrologie

Klimastationen

Für die Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag werden Daten zum lokalen Klima benötigt. Sämtliche Klimadaten (Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Globalstrahlung) wurden als Tagesmittelwerte von der SwissMetNet Bodenstation St.Gallen bezogen. Die Datensammlung umfasst den Zeitraum vom 1.1.2006 bis zum 31.12.2015.

Niederschlagsmenge

Die mittlere, jährliche Niederschlagsmenge über den Zeitraum von 2006 - 2015 betrug in St.Gallen 1348 mm. Am meisten Niederschlag wird in den Sommermonaten verzeichnet (siehe Fig. 5).

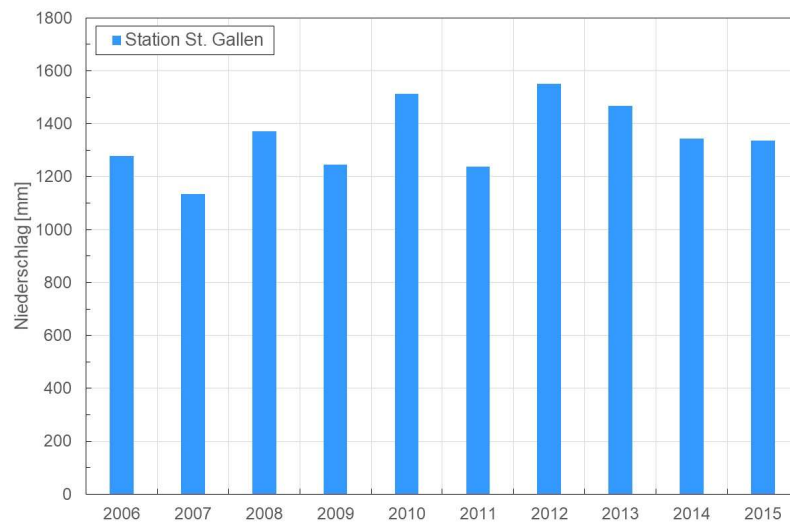


Fig. 4:

Mittlere, jährliche Niederschlagsmenge in der Periode 2006 - 2015 für die SwissMetNet Bodenstation St.Gallen.

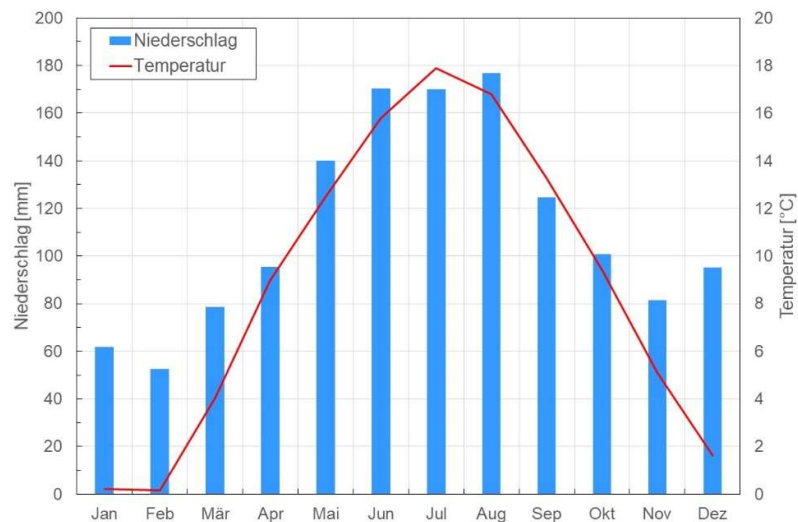


Fig. 5:

Mittlere, monatliche Niederschlagsmenge und Temperatur in der Periode 2006 - 2015 für die SwissMetNet Bodenstation St.Gallen.

Gewässer

Die wichtigsten Gewässer im Hinblick auf den Austausch mit dem Grundwasser sind der Dorfbach, der Oberdorfbach, der Hafnersbergbach und der Wiesenbach. Gemäss früheren Untersuchungen [7] konnten Infiltrationsgebiete entlang des Hafnersbergbachs, des Oberdorfbachs auf der Strecke von Bruggwis bis zum Ausgleichsbecken Mooswisen und entlang des Dorfbachs zwischen Mettendorf und dem Überfall bei der ehemaligen Maschinenfabrik Hoegger (Ringstrasse Nr. 4 - 20) identifiziert werden. Ein ausgeprägtes Exfiltrationsgebiet stellt der Oberdorfbachkanal zwischen dem Bahnhof Gossau und der ehemaligen Maschinenfabrik Hoegger dar.

Charakteristik

Für den Dorfbach sind kontinuierliche Abflussmessungen vorhanden. Die Abflussganglinie der Messstelle HO8716 Dorfbach - Gossau, Niderdorf für die Jahre 2006 - 2015 ist in Fig. 6 dargestellt. Das typisch mittelländische Abflussregime wird stark vom Niederschlag geprägt. Der mittlere Abfluss im Dorfbach betrug in der Periode von 2006 - 2015 ca. $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$. Nach Niederschlagsereignissen kann der Abfluss für eine kurze Zeitdauer stark anschwellen und so ein Mehrfaches des mittleren Abflusses erreichen (maximaler Tagesmittelwert 2006 - 2015: $7.0 \text{ m}^3/\text{s}$).

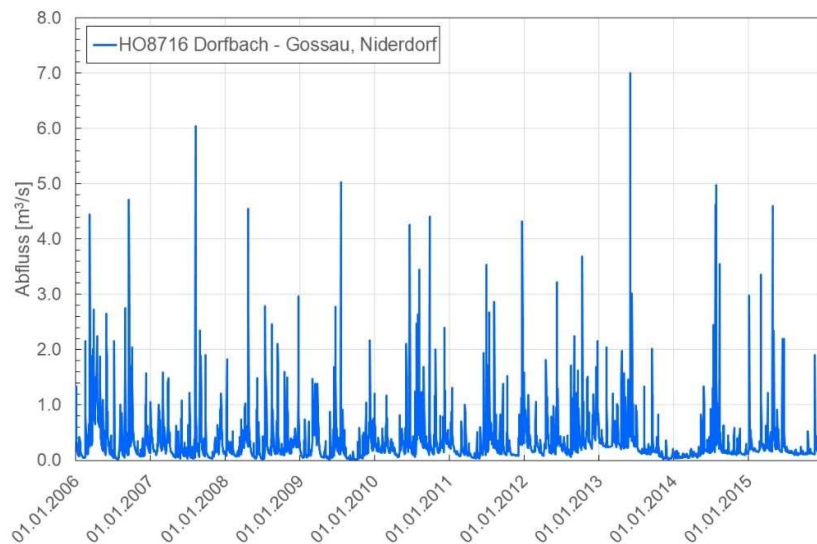


Fig. 6:

Abflussganglinie der Messstelle HO8716 Dorfbach – Gossau, Niderdorf, für die Jahre 2006 - 2015.

Wassertemperatur

Für den Dorfbach liegen Messwerte der Wassertemperatur ab dem 19.9.2014 vor.

Landnutzung

Versiegelung

Der Versiegelungsgrad ist vor allem im Zentrum von Gossau sowie im Industriegebiet hoch. Ausserhalb des Zentrums in Richtung Chressbrunnen, Mooswiesen und Breitfeld ist ein Grossteil der Flächen unversiegelt (z.B. landwirtschaftliche Nutzung, Sportplätze).

Grundwassernutzung

Datengrundlage

Falls vorhanden, wurden Messdaten zu den Grundwassernutzungen vom Kanton St.Gallen sowie vom Tiefbauamt Gossau zur Verfügung gestellt. Eine Übersichtskarte der vorhandenen Grundwassernutzungen ist in Fig. 7 dargestellt.

Trink- und Brauchwasser

In der Periode von 2006 - 2015 wurden jährlich im Mittel etwa 920'000 m³ Grundwasser für Trink- und rund 63'000 m³ für Brauchwasserzwecke entnommen. Eine weitere Grundwasserefassung befindet sich bei der Coop-Verteilzentrale in Gossau. Diese dient der Grundwasserspiegelbegrenzung.

Wärmenutzung

Insgesamt sind im Untersuchungsgebiet 7 Anlagen für die energetische Nutzung des Grundwassers zu Heiz- oder Kühlzwecken bewilligt (vgl. Fig. 7). Die konzessionierte Jahresentnahme sämtlicher Anlagen beträgt 592'700 m³.

Quellwasserfassung

Im Taleinschnitt bei Chressbrunnen ganz im Westen des Untersuchungsgebiets, befindet sich die Quellwasserefassung Chressbrunnen. Die mittlere jährliche Schüttmenge über die Periode von 2006 - 2015 betrug ca. 212'000 m³.

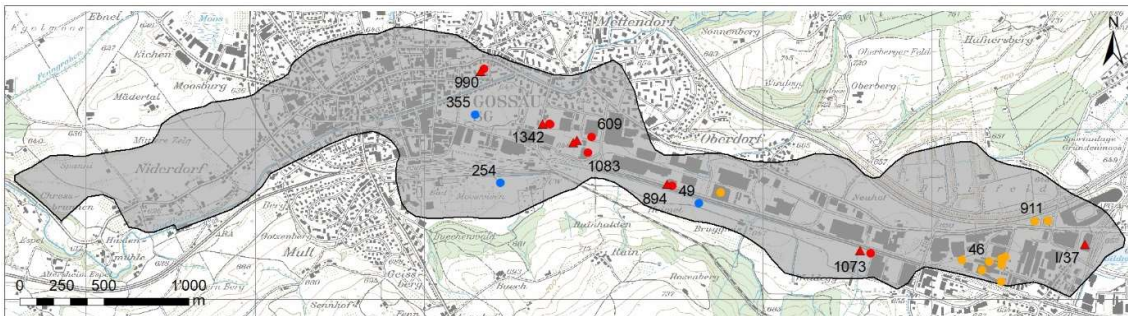
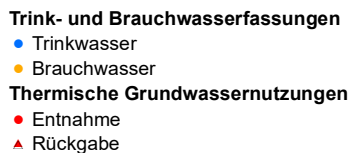


Fig. 7: Übersichtskarte der Grundwassernutzungen.

Grundwasserabsenkungen

GWAS Bachstrasse Im Jahr 2011 wurde an der Bachstrasse westlich des Stadtzentrums eine Drainage zur Grundwasserregulierung realisiert. Messdaten der Drainagemengen liegen ab dem 1.3.2011 vor. Der Grundwasserabfluss in der Drainage schwankt zwischen 0 und ca. 320 m³/d.

Kanalisation Der Anteil des in den Kanalisationsleitungen drainierten Grundwassers kann über den Fremdwasseranteil in der Kanalisation abgeschätzt werden. Anhand des im Rahmen der Generellen Entwässerungsplanung erstellten Zustandsberichts Fremdwasser [1] beträgt der Fremdwasseranteil für den Stadtteil Gossau rund 16.8 l/s.

Grundwasserspiegel

Datenlage Für die Kalibrierung des Modells stehen kontinuierliche Messungen des Grundwasserspiegels der beiden kantonalen Grundwassermessstationen HG8755, Hirschberg, und HG8758 Mooswisen, Schwimmbad, für die Periode von 2006 - 2015 zur Verfügung. Weitere 64 Messstellen mit monatlicher- / jährlicher Messung werden durch die Stadt Gossau betreut. Diese befinden sich hauptsächlich im Stadtzentrum von Gossau (vgl. Fig. 8). Im Ostteil des Modellgebiets liegen keine aktuellen kontinuierlichen Grundwasserspiegelmessungen vor. Für die Kalibrierung wurden dort historische Messreihen sowie Einzelmessungen verwendet.

Messstellen

- Kanton St. Gallen (Tageswerte)
- Stadt Gossau (monatliche Messung)
- Stadt Gossau (jährliche Messung)
- Einzelmessungen

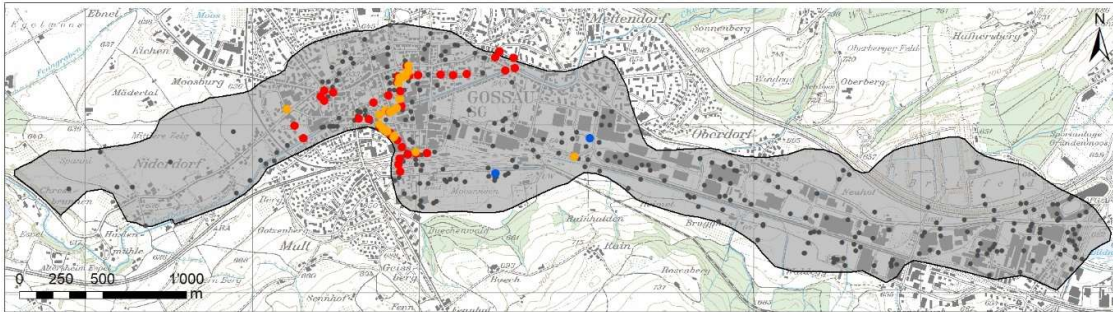


Fig. 8: Übersicht über die Grundwassermessstellen mit aktueller kontinuierlicher Beobachtung und deren Messrhythmus sowie die Einzelmessungen.

Jahresgang

Fig. 9 zeigt die gemessenen Grundwasserspiegel in den beiden kantonalen Messstationen. Das Grundwasser weist einen vom Niederschlag geprägten Jahresgang auf. Die jährlichen Schwankungen betragen rund 2 - 3 m.

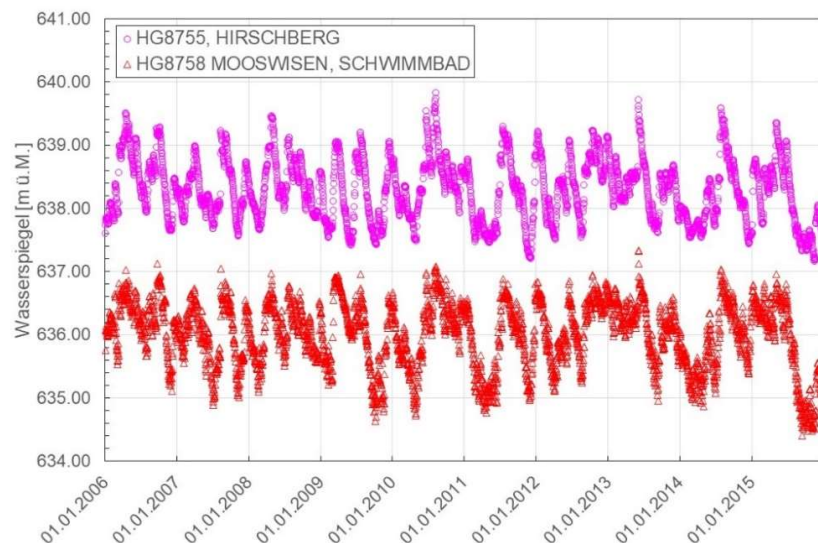


Fig. 9: Gemessener Grundwasserspiegel in den kantonalen Messstationen Hirschberg und Mooswien, Schwimmbad (2006 – 2015).

Grundwassertemperatur

Zur Überprüfung des Wärmemodells stehen die Temperaturmessdaten ab dem 31.3.2014 der kantonalen Messstation HG8755, Hirschberg (Fig. 10), sowie diverse in der hydrogeologischen Datenbank erfasste Einzelmessungen (Fig. 11) zur Verfügung. Zu beachten ist, dass sich die Einzelmessungen aus Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Jahr und über eine grosse Zeitspanne zusammensetzen.

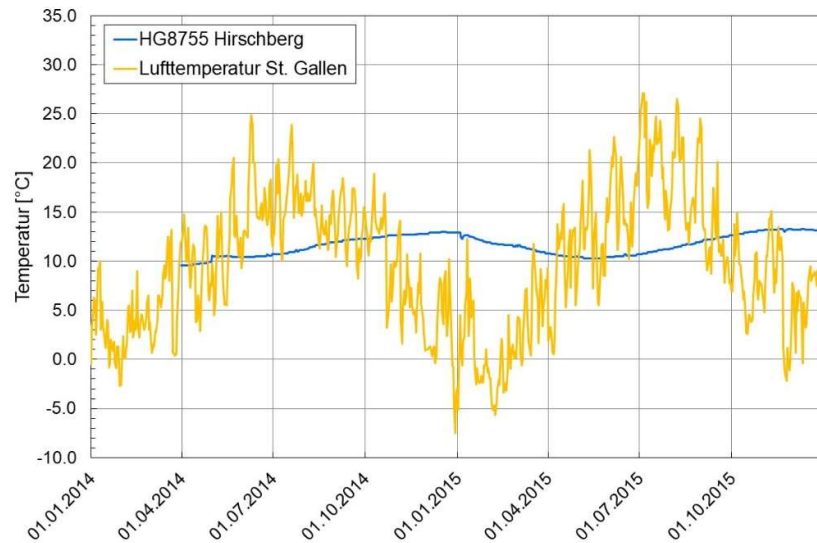


Fig. 10: Gemessene Grundwassertemperatur in der Messstation HG8755, Hirschberg, und Messwerte der Lufttemperatur der SwissMetNet Bodenstation St.Gallen.

Einzelmessungen [°C]

- 9.5 - 10.0
- 10.0 - 11.0
- 11.0 - 12.0
- 12.0 - 13.0
- 13.0 - 13.8

Tageswerte

- HG8755 Hirschberg

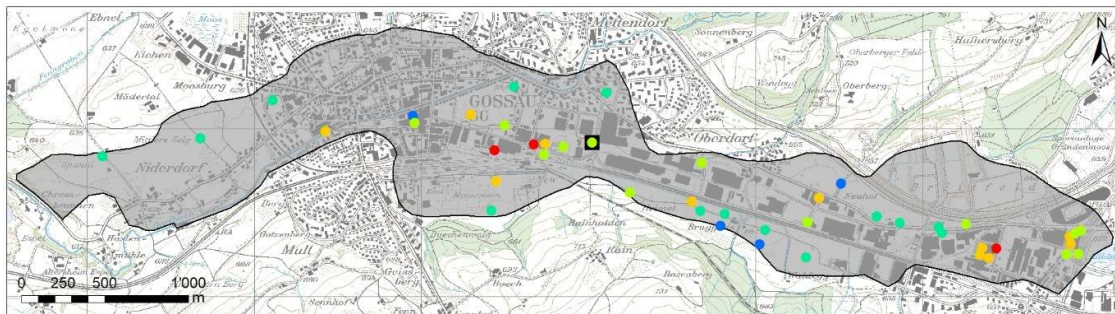


Fig. 11: Überblick über die Einzelmessungen der Grundwassertemperatur innerhalb des Modellgebiets.

Regionales Strömungsmodell

Modellkonzept

Modellgebiet	Das Grundwassermodell entspricht etwa dem Umriss gemäss der Grundwasserkarte des Kantons St.Gallen und umfasst den gesamten Grundwasserleiter zwischen dem St.Galler Breitfeld im Osten und dem Tal der Glatt bei Chressbrunnen im Westen. Seitlich reicht das Modell bis zum Talrand (siehe Fig. 12).
Modellaufbau	Die horizontale Ausdehnung des Schotters ist im Vergleich zur vertikalen Ausdehnung gross. Es liegen zwar Bereiche mit bekannten trennenden Schichten innerhalb der Fluvioglazialschotter vor. Ob diese jedoch durchgehend sind, ist nicht genau bekannt. Im regionalen Massstab kann der Grundwasserleiter mit einem horizontal– zweidimensionalen Modell mit freiem Grundwasserspiegel nachgebildet werden. Die unter der Schotterablagerung liegende Moräne und der Molassefels werden im numerischen Modell als Stauer betrachtet.
Modelltyp	Dem Modell werden zeitabhängige Randbedingungen vorgegeben.
Randbedingungen	Am östlichen Modellrand wurde der Bildweiher mit einer Wasserspiegelhöhe von 641 m ü.M. als Festpotential vorgegeben. Der Westrand bei den Quellaustritten Chressbrunnen wurde mit einem Festpotential auf Höhe der Topographie (604 m ü.M.) abgebildet. Entlang der Talhänge wurde ein Seitenzufluss ermittelt (vgl. Kapitel Seitenzufluss).

Geologisches Modell

Modellunterkante	Die untere Begrenzung des Modells wurde aus den Bohrungen der hydrogeologischen Datenbank interpoliert. Zur Identifizierung von Bereichen mit einer trennenden Schicht innerhalb des Schotters wurden die Bohrungen durch die Firma Grundbauberatung-Geoconsulting bezüglich Zwischenstauer (Trennschicht) und Endstauer interpretiert. Bei Vorliegen eines Zwischenstauers wurde für die Interpolation jeweils die Kote des Endstauers verwendet. In Randbereichen mit geringer Mächtigkeit kann der Grundwasserleiter bei tiefem Grundwasserstand trocken fallen. Die untere Begrenzung des Modells wurde von Hand so angepasst, dass an diesen Bereichen eine minimale Transmissivität aufrechterhalten wurde, damit keine numerischen Instabilitäten auftreten. Die resultierende untere Begrenzung des Grundwasserleiters ist in Fig. 12 dargestellt.
------------------	--

Modellunterkante [m ü.M]

590
 595
 600
 605
 610
 615
 620
 625
 630
 635
 640

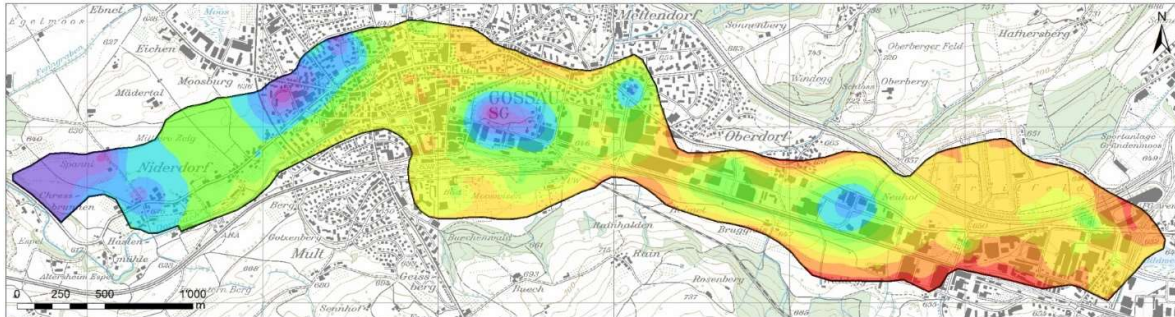


Fig. 12: Modellrand und Schotterunterkante.

Modelloberkante

Die Oberfläche des Modells wird durch die Topografie gebildet. Diese wurde dem digitalen Geländemodell (DTM-AV swisstopo) entnommen. Das Geländemodell weist eine Auflösung von 2 m auf. Die Genauigkeit in vertikaler Richtung beträgt 30 cm.

Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Methoden

Für die Bestimmung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag wurde zwischen den Landnutzungstypen „besiedeltes Gebiet“, „Landwirtschaftsgebiet“ und „Wald“ unterschieden (vgl. Fig. 13). Die Zuordnung der Landnutzungstypen erfolgte anhand der topografischen Karte. Als „besiedeltes Gebiet“ wurden Flächen mit dichter Bebauung betrachtet. Als Landwirtschaftsgebiet gelten Flächen mit landwirtschaftlicher Nutzung und geringer Bebauung. Pro Siedlungszone wurde im Modell ein einheitlicher Tageswert der Grundwasserneubildung vorgegeben. Die Grundwasserneubildung wurde aus der hydrologischen Wasserbilanz berechnet, wobei für die Evapotranspiration das Verfahren nach Penman-Monteith [2], für den Oberflächenabfluss die SCS curve number method [3] verwendet wurde.

Die resultierende Grundwasserneubildungsrate (Mittelwert der Jahre 2006 - 2015) beträgt im landwirtschaftlich genutzten Gebiet 464 mm, im bewaldeten Gebiet 304 mm und im besiedelten Gebiet 221 mm. Durchschnittlich entspricht die Grundwasserneubildung etwa 24% des Jahresniederschlages in St.Gallen (1348 mm).

Landnutzungstypen

Landwirtschaft

Siedlung

Wald

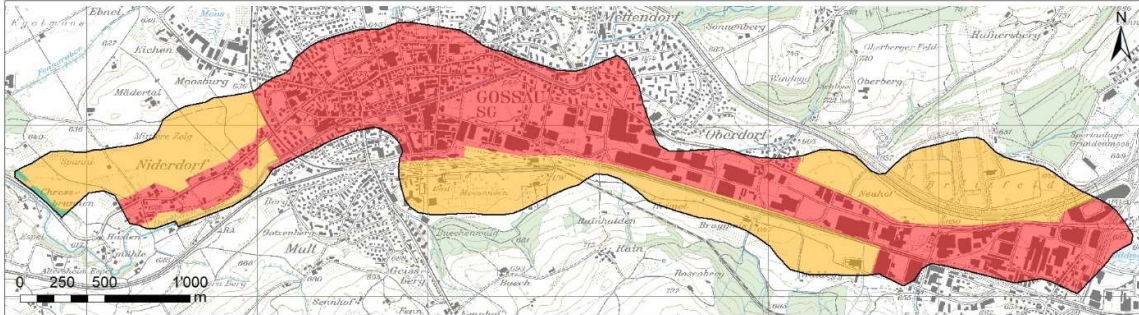


Fig. 13: Resultierende Zonierung der Landnutzung.

Oberflächengewässer

Die im Grundwassermodell berücksichtigten Oberflächengewässer Dorfbach, Oberdorfbach, Hafnersbergbach und Wiesenbach sind in Fig. 14 dargestellt.

Modellkonzept

Im Grundwassermodell werden die Oberflächengewässer als Linie entlang der Gerinnemitte modelliert. Dabei wird der Wasserspiegel entlang der ganzen Gewässerlänge vorgegeben. Der Wasseraustausch zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser wird einer Cauchy-Randbedingungen modelliert. Dies bedeutet, dass eine Infiltration oder Exfiltration in Abhängigkeit der Differenz zwischen Bachwasserspiegel und Grundwasserspiegel (resp. Bachsohle) und der Durchlässigkeit der Gerinnesohle (Leakage) erfolgt. Der Leakagewert bildet insbesondere die benetzte Fläche und die Durchlässigkeit der Gerinnesohle ab. Die Bäche sind im Grundwassermodell mit einer konstanten Wasserspiegellage berücksichtigt. Die Wasserspiegellage der Bäche wurde aus dem digitalen Geländemodell abgegriffen. Die Sohlenhöhe wurde auf 0.3 m unter dem Wasserspiegel geschätzt. Die Leakagewerte wurden abschnittsweise vorgegeben und als zeitlich konstant behandelt.

— Gewässer

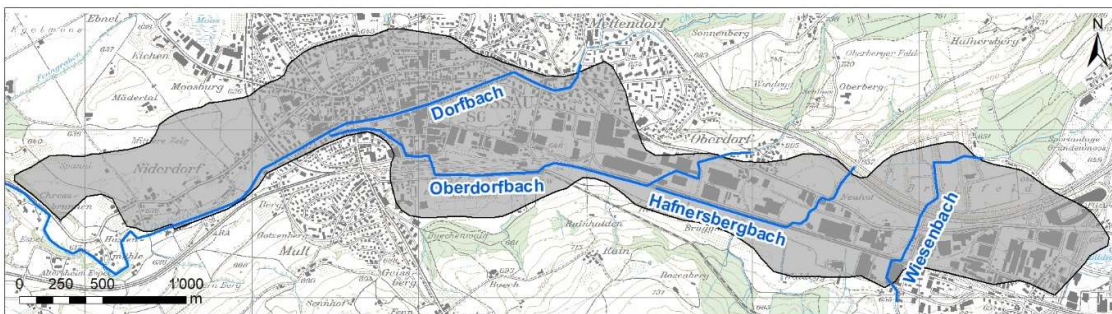


Fig. 14: Im Modell berücksichtigte Oberflächengewässer.

Grundwasserabsenkungen

Kanalisation und GWAS Bachstrasse

Die Kanalisationsleitungen und die Drainageleitung (GWAS Bachstrasse) werden im Modell analog zu den Oberflächengewässern mit einer Cauchy-Randbedingung abgebildet (Fig. 15). Die Höhenlage der Leitungen wurde aus der amtlichen Vermessung übernommen. In das Grundwassermodell wurden nur Leitungen übernommen, welche weniger als 1 m über dem mittleren Grundwasserspiegel liegen. Die Durchlässigkeit der Leitungen (Leakagewert) wurde über die Kalibrierung des Modells an den gemessenen Grundwasserspiegeln sowie anhand des geschätzten Fremdwasserabflusses in der Kanalisation bzw. der gemessenen Drainagemenge in der GWAS Bachstrasse bestimmt.

Grundwasserabsenkungen

- Kanalisation
- GWAS Bachstrasse

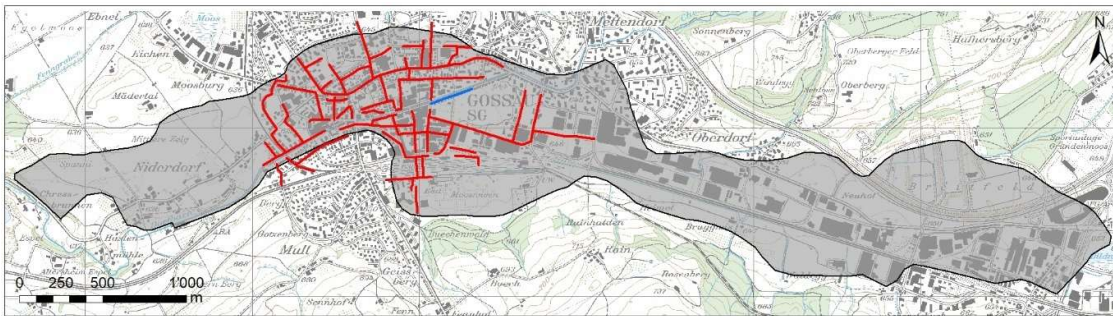


Fig. 15: Im Modell berücksichtigte Grundwasserabsenkungen.

Seitenzufluss

Modellkonzept

Für die Bestimmung des Seitenzuflusses aus angrenzenden Einzugsgebieten wurden am Nord- und Südrand des Modells die Bereiche ausgeschieden, aus welchen versickertes Niederschlagswasser direkt in das Modellgebiet gelangen kann (vgl. Fig. 16). Die Berechnung der Grundwasserneubildung erfolgt aus der hydrologischen Wasserbilanz nach Penman-Monteith [2]. Die Evapotranspiration ist dabei vegetationsabhängig. Zu deren Berücksichtigung wurde für jedes Einzugsgebiet aufgrund der topografischen Karte eine Aufteilung in Landwirtschaftsfläche, Wald und Siedlungsgebiet vorgenommen. Gebiete, aus welchen der infiltrierte Niederschlag zuerst in ein Oberflächengewässer und erst mit diesem in das Modellgebiet gelangt, wurden nicht berücksichtigt. Die resultierende Abflusskomponente wurde nach Döll & Fiedler [4] auf Direktabfluss und Grundwasserneubildung aufgeteilt. Dabei wird der Anteil der Grundwasserneubildung in Abhängigkeit der Bodenbeschaffenheit, der Hydrogeologie, des Frostbodens und der Hangneigung bestimmt. Maßgebend ist dabei die Hangneigung. Die Berechnung wurde in einem Gitternetz von 100 x 100 m durchgeführt und anschließend für das jeweilige Einzugsgebiet aufsummiert.

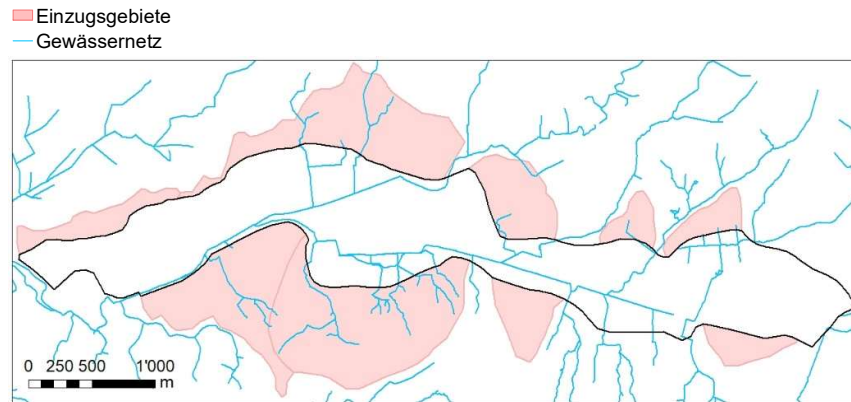


Fig. 16: Einzugsbereiche, aus welchen unterirdische Zuflüsse zum Modellgebiet zu erwarten sind.

Grundwasserentnahmen

Modellkonzept

Die im Modell berücksichtigten Grundwasserentnahmen sind in Fig. 17 dargestellt. Im Grundwassermodell werden die Fördermengen als Tageswerte vorgegeben. Liegen die Verbrauchsdaten weniger aufgelöst vor (Wochen-, Monats- oder Jahreswerte), werden diese auf Tageswerte umgerechnet. Für die Grundwasserentnahmen zu Wärme- oder Kühlzwecken wird die Fördermenge anhand der Heizgrad- resp. Kühlgradtage auf das Jahr verteilt. Für Trink- und Brauchwassernutzungen ohne Wasserverbrauchsdaten (Verteilzentrum Coop) wird ein Standardwert von 100'000 m³ pro Jahr als Jahresförderung eingesetzt. Bei einer Überarbeitung des Modells sollte diese Annahme überprüft werden.

Grundwassernutzungen

- Trinkwasser
- Brauchwasser
- Wärmenutzung

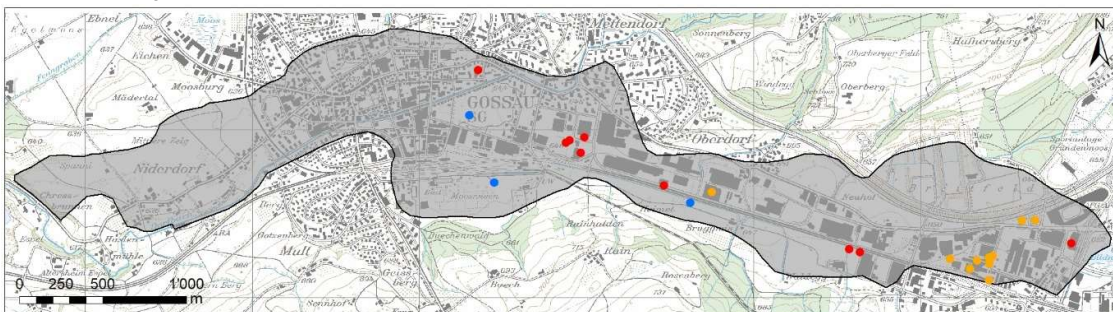


Fig. 17: Im Modell berücksichtigte Grundwassernutzungen.

Modellcode und Diskretisierung

Modellcode

Für die numerische Berechnung wurde FEFLOW in der Version 6.2 eingesetzt. FEFLOW ist ein Softwarepaket zur Berechnung von Wasserströmung, Massen- und Wärmetransport in porösen Medien. Die Numerik beruht auf der Methode der Finiten Elemente. Mit Finiten Elementen kann das Berechnungsnetz an natürliche Strukturen wie Flüsse, Brunnenstandorte oder unregelmässige Modellumrisse angepasst werden. Ein Nachteil der Finiten Elemente besteht darin, dass damit erstellte lokale Wasserbilanzen Ungenauigkeiten aufweisen. In FEFLOW können sowohl die Randbedingungen wie auch die Materialparameter zeitlich variabel vorgegeben werden. Im vorliegenden Modell wurden keine zeitlich variablen Materialparameter verwendet.

Diskretisierung

Das gesamte Modellgebiet wurde in 71'773 Dreieckselemente mit 36'430 Knoten unterteilt. Bei einer Modellfläche von etwa 4.06 km² bedeutet dies eine durchschnittliche Elementfläche von 56 m² oder eine charakteristische Seitenlänge von etwa 11 m. Das Modellnetz wurde entlang der Entnahmestellen und der Oberflächengewässer verfeinert. Fig. 18 zeigt einen Ausschnitt aus dem Finite-Elemente-Netz. Für die zeitliche Diskretisierung wurden Tagesschritte gewählt.



Fig. 18:

Finite-Elemente-Netz im Bereich des Stadtzentrums von Gossau.

Kalibrierung

Grundlagen

Das Strömungsmodell wurde instationär über das Jahr 2013 kalibriert. Als Grundlagen der Kalibrierung dienten folgende Messdaten:

- 2 kantonale Messstationen (Tageswerte)
- 64 Messstellen Stadt Gossau (monatliche- / jährliche Messungen)
- Abflussmessungen GWAS Bachstrasse (Tageswerte)
- Daten zur Wasserbilanz (Fremdwassermessung, Quellschüttung Chressbrunnen)

Die Grundwassermessstellen konzentrieren sich fast ausschliesslich auf den Bereich des Stadtzentrums von Gossau (vgl. Fig. 8). Im östlichen Modellgebiet (Heimat, Breitfeld) liegen keine aktuellen kontinuierlichen Grundwasserspiegelmessungen vor. In diesem Gebiet wurden daher, falls vorhanden, ältere Pump- und Markierversuche nachgebildet sowie historische Grundwasserganglinien für die Kalibrierung herangezogen. Folgende Unterlagen wurden dazu verwendet:

- Pumpversuche PW Heimat 1961/62 [5]
- Bericht «Grundwasserfassung und Pumpwerk Heimat», 1983 (Markierversuche und Schutzzonenausscheidung) [6]
- Bericht «Grundwasseruntersuchungen zwischen Wil und St. Margrethen, Grundwasserfeld Gossau», 1985 (Profile, GW-Ganglinien 1982/84) [7]
- Bericht «Grundwasseruntersuchung Breitfeld, Hydrogeologischer Bericht 88612», 1989 (Pump- und Markierversuch) [8]
- Berichte „Betriebserweiterungen Jowa AG“, 1993/94 (Markierversuche PW Heimat) [9][10]

Methode und
Parameter

Die Kalibrierung wurde manuell mit Hilfe von Sensitivitätsrechnungen durchgeführt. Die Modellparameter Durchlässigkeit (K-Werte) und Leakagewerte wurden dazu in ihren physikalisch plausiblen Grenzen variiert, bis eine ausreichende Übereinstimmung der berechneten Grundwasserspiegel und Bilanzgrössen mit den Messwerten erzielt werden konnte (vgl. Fig. 22 und Fig. 23).

Anfangswerte der
Parameter

Als Anfangsverteilung der Durchlässigkeit (K-Werte) wurde eine Interpolation der vorhandenen Mess- und Schätzwerte aus der hydrogeologischen Datenbank verwendet. Die Anfangswerte für die Leakage der Gewässer und der Grundwasserabsenkungen (GWAS Bachstrasse, Kanalisation) wurde anhand von Erfahrungswerten und der im kantonalen GIS-Browser veröffentlichten Karte des Natürlichkeitsgrades der Fliessgewässer bestimmt.

Resultierende
Durchlässigkeiten

In Fig. 19 und Fig. 20 sind die resultierende Durchlässigkeitsverteilung resp. die räumliche Verteilung der Transmissivität dargestellt. Die Bereiche mit eher hoher Durchlässigkeiten konzentrieren sich auf das Gebiet im Stadtzentrum bis westlich der Wasserscheide. Die hohen Durchlässigkeiten im Stadtzentrum könnten auf eine Unterschätzung der Schottermächtigkeit zurückzuführen sein. Die Lage der Stauer Oberfläche ist in diesem Bereich anhand der Bohrdaten nicht eindeutig identifizierbar. Gemäss der Interpretation der Bohrdaten steigt der Stauer im Stadtzentrum an (vgl. Fig. 12), was zu einer geringen Mächtigkeit führt. Damit die vorhandenen Grundwasserspiegelmessungen nachgebildet werden können, musste die Durchlässigkeit erhöht werden. Westlich und östlich der Wasserscheide zeigen die Grundwasserspiegelmessungen einen hohen Gradienten auf. Im Modell wurde daher in diesen Bereichen die Durchlässigkeit stark gesenkt.

K-Werte [10^{-3} m/s]

- < 0.25
- 0.25 - 0.5
- 0.5 - 1.0
- 1.0 - 2.0
- 2.0 - 4.0

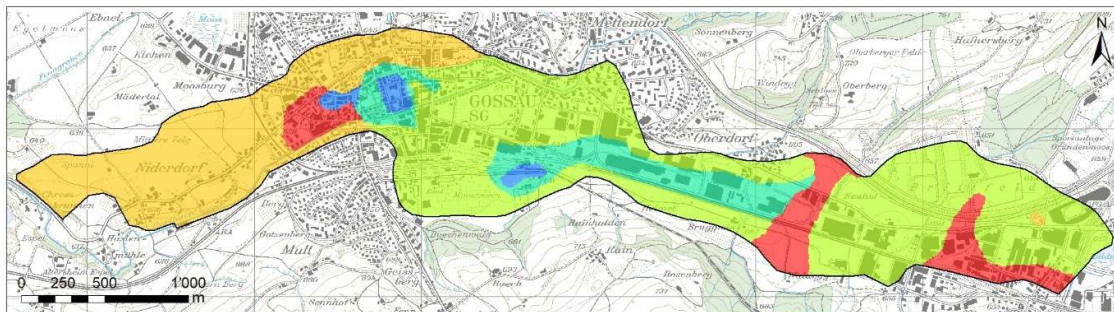


Fig. 19: Räumliche Verteilung der K-Werte.

Transmissivität [10^{-2} m²/s]

- < 0.5
- 0.5 - 1.0
- 1.0 - 2.0
- 2.0 - 4.0
- 4.0 - 8.0

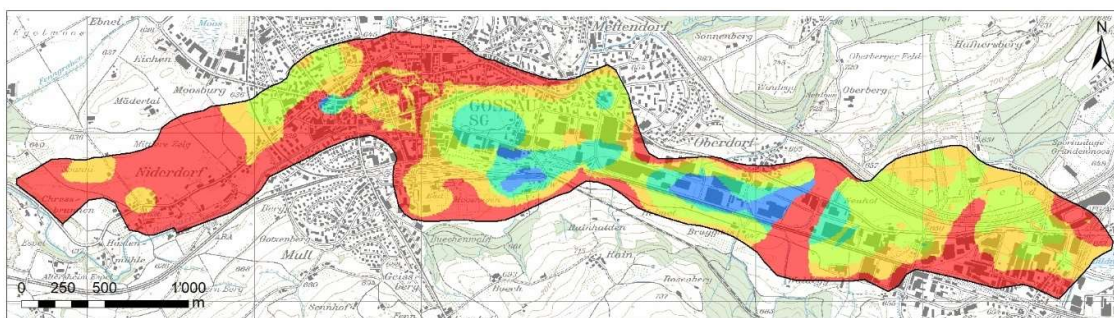


Fig. 20: Räumliche Verteilung der Transmissivität.

Resultierende
Leakagewerte

Die resultierenden Leakagewerte sind in Fig. 21 abgebildet. Der höchste Wert in den Gewässern resultierte im Bereich des Oberdorfbachkanals. Die Kanalisationsleitungen werden mit Ausnahme einzelner Stränge im Stadtzentrum als dicht modelliert.

Leakage [1/d]

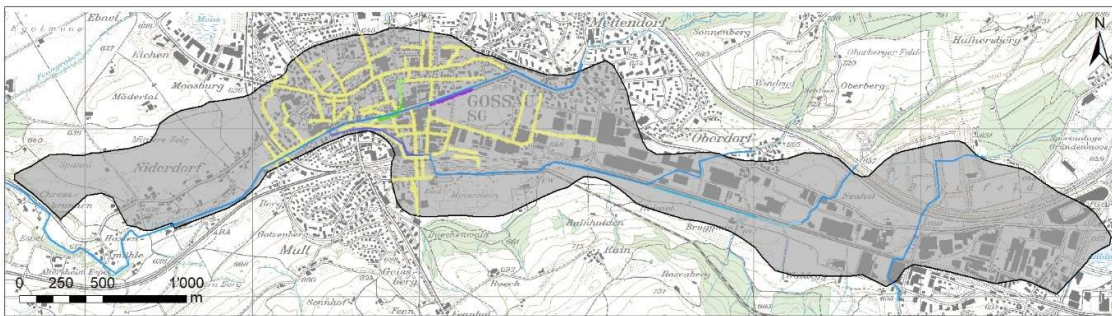


Fig. 21: Resultierende Leakage-Werte der Gewässer und Grundwasserabsenkungen.

Resultierende Strömungsverhältnisse

Ganglinien kantonale
Messstationen

Fig. 22 zeigt den Vergleich der berechneten Ganglinien des Grundwasserspiegels mit den Messwerten in den beiden kantonalen Messstationen Hirschberg und Mooswiesen. Die Messungen werden bei Mittelwasser mit dem Modell gut nachgebildet. Nieder- und Hochwasserstände werden vom Modell eher über- bzw. unterschätzt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Oberflächengewässer im Modell mit einem stationären Wasserspiegel abgebildet werden.

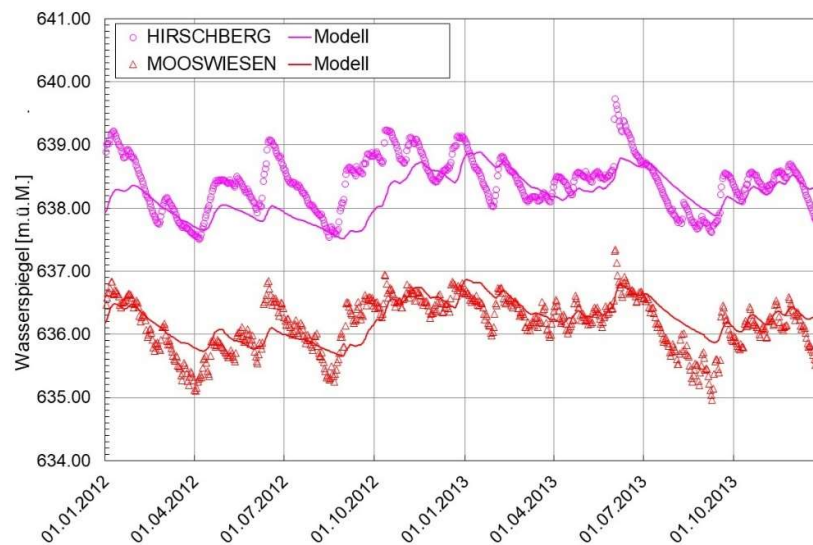


Fig. 22: Vergleich der modellierten (Linie) und gemessenen (Symbole) Grundwasserspiegel in den beiden kantonalen Grundwassermessstationen HG8755, Hirschberg und HG8758 Mooswiesen, Schwimmbad im Zeitraum 2012 - 2013.

Messstellen Stadt Gossau

In Fig. 23 ist die räumliche Verteilung der Abweichungen zwischen Modell und Messung in den Messstellen der Stadt Gossau am 5.11.2012 dargestellt. Grundsätzlich stimmen die modellierten Pegel gut mit den Messwerten überein. In einzelnen Piezometern sind jedoch auch grössere Abweichungen feststellbar. Diese können unterschiedlichen Ursprungs sein (z.B. Messfehler, Inhomogenitäten im Untergrund, Bauwasserhaltungen).

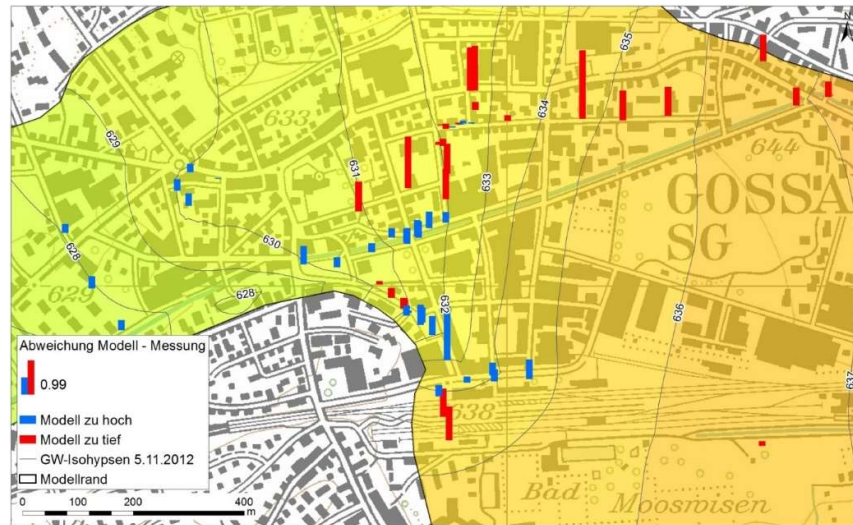


Fig. 23:

Räumliche Verteilung der Abweichungen zwischen Modell und Messung am 5.11.2012 in den Messstellen der Stadt Gossau.

GWAS Bachstrasse

Der modellierte Drainageabfluss in der GWAS Bachstrasse stimmt gut mit den Messwerten überein (Fig. 16). Die Abflussschwankungen werden im Jahr 2013 etwas unterschätzt. Zu beachten ist, dass im Modell der Drainageabfluss sehr sensitiv auf Veränderungen des Grundwasserspiegels reagiert.

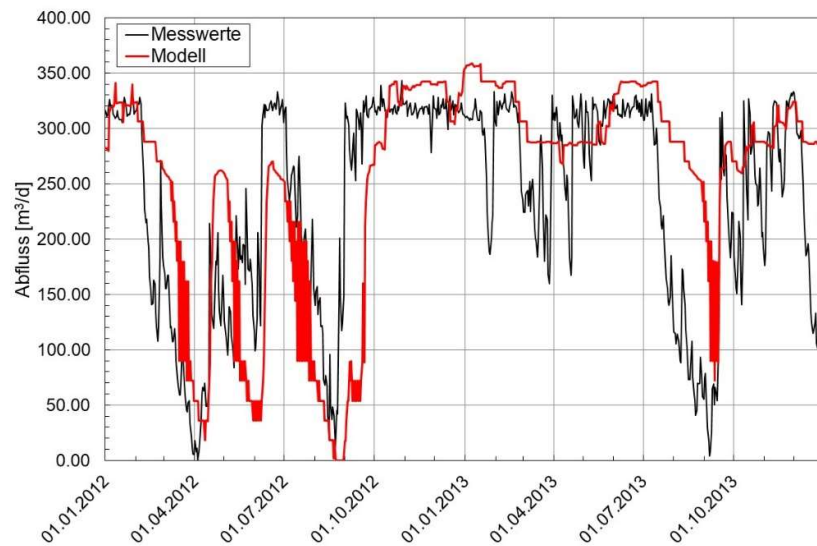


Fig. 24: Vergleich der im Modell drainierten Wassermenge mit dem gemessenen Abfluss in der GWAS Bachstrasse im Zeitraum 2012 - 2013.

Gesamtwasserbilanz Fig. 25 zeigt die Gesamtwasserbilanz des Grundwassermodells für das Jahr 2013. Der Grundwasserleiter wird hauptsächlich durch die Neubildung aus Niederschlag gespeisen. Die Infiltration aus den Gewässern ist im Modell deutlich grösser als der Zufluss vom seitlichen Talrand. Die im Modell durch die Kanalisation drainierte Wassermenge betrug 2013 rund 18.1 l/s. Dies entspricht etwa dem geschätzten Fremdwasseranteil der Stadt Gossau (16.8 l/s).

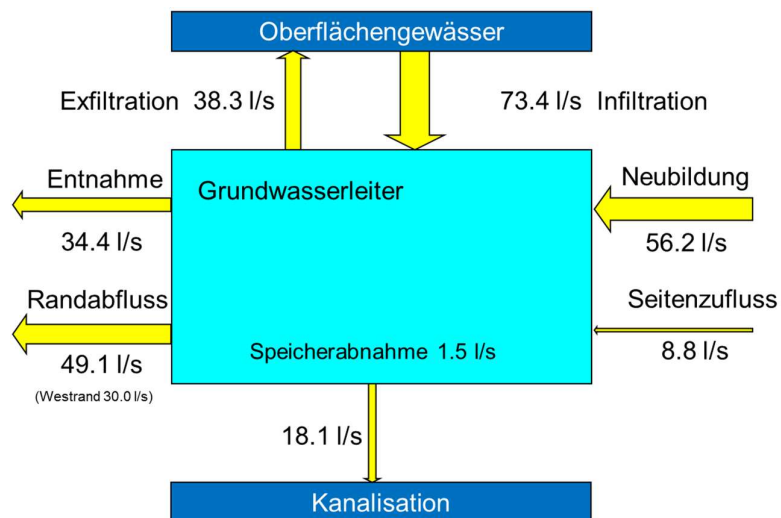


Fig. 25: Gesamtwasserbilanz für das Jahr 2013.

GW-Isohypsen und Strömungsrichtung

In Fig. 26 sind die berechneten Grundwasserisohypsen am 4.11.2013 dargestellt. Zur Visualisierung der Strömungsverhältnisse werden die Darcy-Geschwindigkeiten als Pfeile in Strömungsrichtung dargestellt (Fig. 27). Daraus sind sowohl die Fliessrichtung wie auch die Strömungsmenge ersichtlich. Die Darstellungen zeigen, dass das Grundwasser von der Wasserscheide ausgehend zu beiden Seiten abströmt. Die grössten Darcy-Geschwindigkeiten sind westlich der Wasserscheide bis in Stadtzentrum von Gossau zu erkennen.

— GW-Isohypsen 04.11.2013

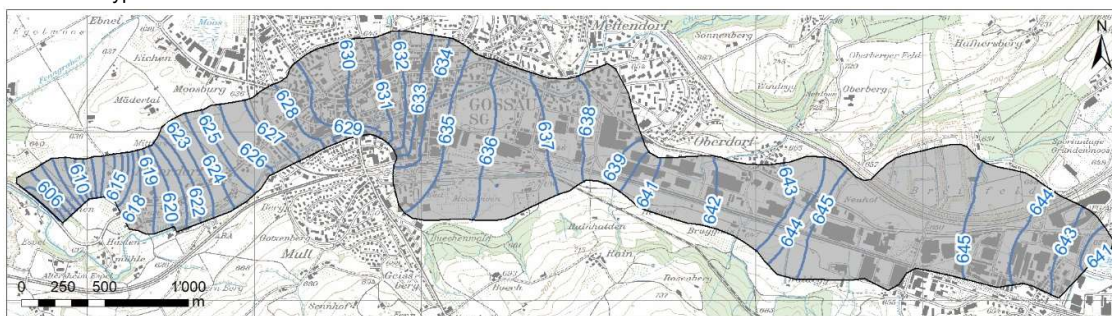


Fig. 26: Berechnete Grundwasserisohypsen am 4.11.2013.

■ Darcy-Geschwindigkeiten

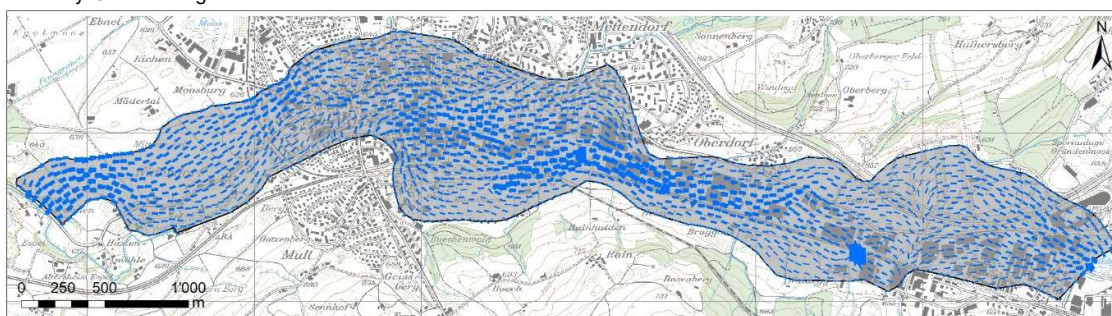


Fig. 27: Berechnete Darcy-Geschwindigkeit am 4.11.2013.

Wärmetransportmodell

Grundlagen

Strömungsmodell Das hier beschriebene Wärmetransportmodell baut auf dem vorgängig beschriebenen Strömungsmodell auf.

Diskretisierung

Modellcode Für die numerische Berechnung wurde FEFLOW in der Version 6.1 eingesetzt. FEFLOW ist ein Softwarepaket zur Berechnung von Wasserströmung, Massen- und Wärmetransport in porösen Medien. Die Numerik beruht auf der Methode der Finiten Elemente.

Wärmespeicherung im Korngerüst Die Wärmetransportmodellierung unterscheidet sich von einer Stofftransportmodellierung dadurch, dass das Korngerüst als Wärmespeicher wirkt und deswegen die Wärmeausbreitung gegenüber einer Stoffausbreitung etwa um den Faktor 3 verzögert wird.

Längenskala In der Transportmodellierung wird die durch die Inhomogenität des Untergrundes verursachte Makro-Dispersion mit Hilfe von longitudinalen und transversalen Dispersivitätswerten beschrieben. Die Dispersionswerte sind abhängig von der Längenskala des zu untersuchenden Phänomens. Bei der vorliegenden Aufgabenstellung beträgt die Längenskala etwa 100 m.

Dispersivität In der Literatur wird für eine Längenskala von 100 m eine aus Feldversuchen bestimmte longitudinale Dispersivität von etwa 5 m angegeben. Das Verhältnis von transversaler zu longitudinaler Dispersivität liegt im Bereich von 0.01 bis 0.3 [11]. Bei der durchgeführten Wärmetransportmodellierung wurden folgende Werte eingesetzt:

$$\begin{aligned}\alpha_L &: 5 \text{ m} \\ \alpha_T &: 0.5 \text{ m}\end{aligned}$$

Diskretisierung Für die Diskretisierung gelten folgende Bedingungen [11]:

Peclet-Kriterium zur Begrenzung der numerischen Dispersion:

$$Pe = \left| \frac{u \cdot \Delta x}{D} \right| \leq 2 \quad \text{mit} \quad D = u \cdot \alpha$$

Courant-Kriterium zur Begrenzung von Oszillationen:

$$Co = \left| \frac{\Delta t \cdot u}{\Delta x} \right| \leq 1$$

mit: Δx : Elementausdehnung
 Δt : Zeitschrittlänge

- u: Abstandsgeschwindigkeit
 α : Dispersivität (α_L : longitudinal, α_T : transversal)

Die Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers beträgt im Gossauerfeld etwa 1 - 10 m/Tag.

Aus dem Peclet-Kriterium ergeben sich erforderliche Elementgrössen von 10 m, aus dem Courant-Kriterium erforderliche Zeitschrittlängen von einem Tag. Das Finite-Elemente-Netz des regionalen Strömungsmodells (ca. 11 m) ist für den Wärmetransportmodellierung ausreichend fein diskretisiert.

Wärmeaustausch mit der Atmosphäre

Modellkonzept

Über die Landoberfläche wird Wärme zwischen der Umgebung (Atmosphäre) und dem Grundwasser ausgetauscht. Diese Wechselwirkung wird mit einer linearen 1D-Wärmeleitung quantifiziert. Dazu wurde der Bereich zwischen Modelloberfläche und der Mitte des gesättigten Grundwasserleiters in vertikaler Richtung in 1 m mächtige Abschnitte diskretisiert. Anschliessend wurde für jedes Finite Element und für jeden Zeitschritt der Wärmeaustausch zwischen den einzelnen Schichten berechnet. Die Implementierung in FEFLOW erfolgt durch ein von der Simultec AG entwickeltes Zusatzmodul zu FEFLOW. Der Wärmeeintrag durch den Niederschlag kann vernachlässigt werden.

Als Atmosphärentemperatur wurde die im Zeitraum vom 1.10.2014 bis 30.9.2015 in St.Gallen gemessene Lufttemperatur verwendet. Die Grundwassertemperatur und der Grundwasserspiegel resultieren aus dem vorausgehenden Modellzeitschritt. Die Wärmeleitfähigkeit des ungesättigten Bodens wird zu 1.5 W/mK angenommen. Die Topographie ist als Oberkante des Modells festgelegt.

Eine Untersuchung von F. Stauffer et al. [12] zeigt, dass die Bodentemperatur in unbesiedeltem, unbewaldetem Gebiet rund 1 - 2 °C höher ist, als die in 2 m Höhe gemessene Lufttemperatur. Die im Modell vorgegebene Umgebungstemperatur in landwirtschaftlich genutzten Gebieten wurde daher um 1.5 °C erhöht. In bewaldetem Gebiet entspricht die im Modell implementierte Umgebungstemperatur der gemessenen Lufttemperatur.

Zur Berücksichtigung der anthropogenen Einflüsse wurde die Atmosphärentemperatur im bebauten Gebiet erhöht. Für die Gebäudefläche wurde ganzjährig eine Temperatur von 20 °C vorgegeben. Der Flächenanteil wird zu 30 % geschätzt. Die räumliche Einteilung der Siedlungsgebiete ist identisch mit jener für die Grundwasserneubildung aus Niederschlag (vgl. Fig. 13). Die resultierenden Ganglinien sind in Fig. 28 dargestellt.

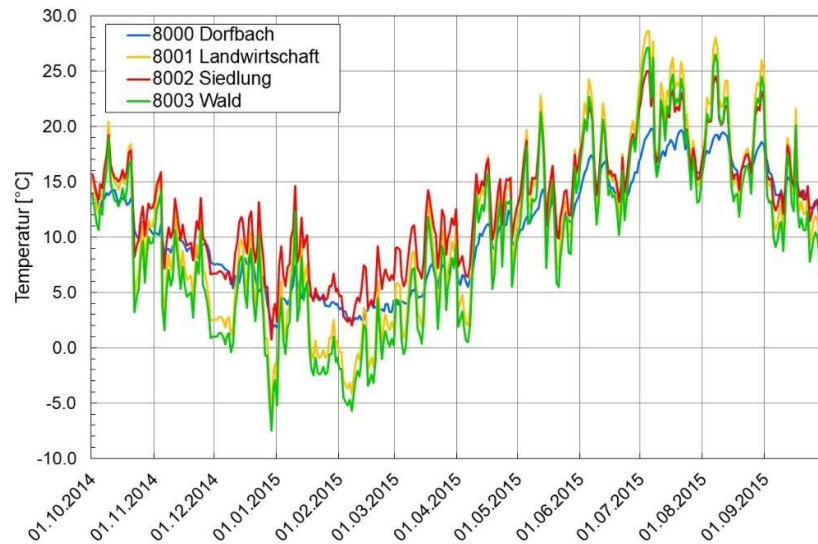


Fig. 28: Im Modell verwendete Ganglinien der drei Temperaturzonen und des Dorfbachs.

Wärmeaustausch mit den Oberflächengewässern

Modellkonzept

Beim Wasseraustausch zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser wird auch Wärme ausgetauscht. Infiltriert Wasser vom Gewässer ins Grundwasser, so besitzt es die Temperatur des Gewässers. Exfiltriert Wasser aus dem Grundwasser ins Oberflächengewässer, so besitzt es die Temperatur des Grundwassers. In FEFLOW existiert für 2D-Modelle keine Randbedingung, welche dieses Verhalten nachbildet. Es wurde deshalb ein Zusatzmodul zur Berechnung des Wärmeaustauschs mit den Oberflächengewässern entwickelt und im Modell eingesetzt. Als Gewässertemperatur werden im Modell die Tageswerte der im Zeitraum vom 1.10.2014 bis 30.9.2015 gemessene Wassertemperatur des Dorfbachs vorgegeben (siehe Fig. 28).

Seitenzufluss

Am seitlichen Modellrand fließt dem Grundwasserleiter aus den benachbarten Einzugsgebieten Grundwasser zu. Es kann angenommen werden, dass diese Zuflüsse die gleiche Temperatur aufweisen wie das Grundwasser im Grundwasserleiter.

Kälte- und Wärmeeinleitung

Modellvorstellung

Über die Rückgabeburgen von Wärmepumpenanlagen wird Wasser mit einer vom Grundwasser unterschiedlichen Temperatur eingeleitet. Die Rückgabetemperatur ist eine Funktion der Entnahmetemperatur und dem anlagenspezifischen Wärmeentzug respektive des Wärmeeintrags.

Im horizontal-zweidimensionalen Grundwassermodell wird angenommen, dass sich das eingeleitete Wasser im Grundwasserleiter vertikal vollständig durchmischt.

Modell

Für die Modellierung der Wärme- resp. Kälteeinleitung wird das bereits in FEFLOW enthaltene «OpenLoop» Programmmodul verwendet. Dieses Modul berechnet die Temperatur in den Rückversickerungsbrunnen aus der modellierten Entnahmetemperatur und der vorgegebenen anlagespezifischen Temperaturdifferenz. Die berechnete Temperatur wird dann als Dirichlet-Randbedingung vorgeschrieben, falls im Brunnen Wasser versickert wird. Wird zu einem Zeitpunkt kein Wasser versickert, wird auch keine Temperaturrandbedingung gesetzt.

Die rückversickerte Wassermenge wird im Modell als Tageswert vorgegeben. Falls Messwerte vorhanden sind, werden diese verwendet. Ansonsten werden die Tagesfördermengen anhand der Heiz- resp. Kühlgradtage festgelegt. Für Wärmepumpenanlagen zu Wärmezwecken wird eine Temperaturdifferenz von -4 °C , für Anlagen zu Kühlzwecken eine Differenz von $+3\text{ °C}$ vorgegeben.

Parameter der Wärmeausbreitung

Modellparameter

Für die Berechnung der Wärmeausbreitung wurden folgende Parameter verwendet, welche für eine Temperatur von 12 °C gelten [13]:

Volumetrische Wärmekapazität Wasser:	4.2	$[10^6\text{ J/Km}^3]$
Volumetrische Wärmekapazität Gestein:	2.52	$[10^6\text{ J/Km}^3]$
Wärmeleitfähigkeit Wasser:	0.58	$[\text{W/mK}]$
Wärmeleitfähigkeit Gestein:	3.0	$[\text{W/mK}]$
Gesamtporosität:	10	$[\%]$

Wärmekapazität Gestein

Bei der Wärmekapazität des Gesteins ist die Tatsache berücksichtigt, dass ein Anteil der Porosität im Schotter nicht zur durchflusswirksamen Porosität beiträgt. Da Wasser eine höhere Wärmekapazität als Gestein aufweist, wird dadurch die Wärmekapazität des feuchten Gesteins von 2 auf $2.52 \cdot 10^6\text{ J/Km}^3$ erhöht.

Resultierende Temperaturverteilung

Zeitraum

Zur Überprüfung der Plausibilität wurde mit dem kalibrierten Strömungsmodell und den oben beschriebenen Modellansätzen die Grundwassertemperatur im hydrologischen Jahr 2015 (1.10.2014 bis 30.9.2015) nachgebildet und mit den Messwerten verglichen. Als Anfangsbedingung wurde eine Temperaturverteilung von 11 °C angenommen. Anschliessend wurde das Modell 10-mal hintereinander laufen gelassen.

Resultate

In Fig. 29 ist beispielhaft die berechnete Temperaturverteilung für die Situation Ende März dargestellt. Die Wassertemperatur in den Oberflächengewässern ist im Vergleich zu der Grundwassertemperatur

Ende März noch tief. Im Bereich westlich der Wasserscheide und im Gebiet bei Hirschberg sind die Kältefahnen von Wärmenutzungen zu erkennen.

Der Mittelwert der modellierten Grundwassertemperatur über den Zeitraum vom 1.10.2014 bis 30.9.2015 in der Messstelle HG8755, Hirschberg, beträgt 11.4 °C, der Mittelwert der Messwerte beträgt 11.6 °C.

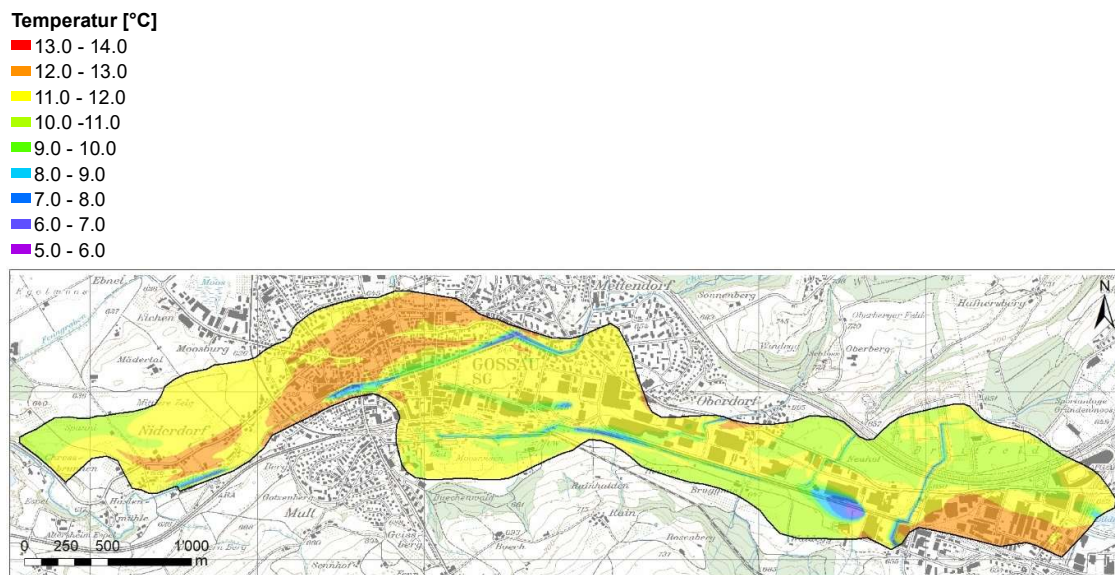


Fig. 29: Berechnete Temperaturverteilung Ende März 2015.

Literatur

- [1] Siedlungsentwässerung (2005): Genereller Entwässerungsplan (GEP), Zustandsbericht Fremdwasser, 26. April 2005.
- [2] Allen, R.G et al. (1998): Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and Drainage Paper – FAO –Food and Agriculture Organisation of United Nation 56.
- [3] Mockus V. (1972): Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. National Engineering Handbook, Section 4, Hydrology, Chapter 10.
- [4] P. Döll and K. Fiedler (2008): Global-scale modeling of groundwater recharge, Hydrol. Earth Syst. Sci., 12, 863–885, 2008.
- [5] PW Heimat (1961/62): Unterlagen zu durchgeführten Pumpversuchen im PW Heimat aus den Jahren 1961/62, Tiefbauamt Gossau.
- [6] Grundbauberatung AG (1983): Grundwasserfassung und Pumpwerk Heimat, Hydrogeologisches Gutachten betreffend die Ausscheidung der Grundwasserschutzzonen, 5. August 1983.
- [7] Grundbauberatung AG (1985): Grundwasseruntersuchungen zwischen Will und St. Margrethen, Grundwasserfeld Gossau, Schlussbericht vom März 1985.
- [8] Geotest (1989): Grundwasseruntersuchungen Breitfeld, St.Gallen – Winkeln, Hydrogeologischer Bericht Nr. 88612, 26. September 1989.
- [9] Grundbauberatung AG (Januar 1994): Betriebserweiterung Jowa AG, Gossau SG, Hydrogeologisches Gutachten, Grundwasser-Markierungsversuche vom 18.10. - 21.12.1993, 5. Januar 1994.
- [10] Grundbauberatung AG (April 1994): Betriebserweiterung Jowa AG, Gossau SG, Hydrogeologisches Gutachten, ergänzende Grundwasser-Markierungsversuche vom 26.01. - 24.03.1994, 13. April 1994
- [11] Wolfgang Kinzelbach (1992): Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser - 2. Auflage, R. Oldenbourg Verlag.
- [12] Stauffer F., Bayer P., Blum P., Molina-Giraldo N., Kinzelbach W. (2014): Thermal Use of Shallow Groundwater, CRC Press Taylor & Francis Group.
- [13] Helmut Kobus (1992): Schadstoffe im Grundwasser, Band 1, Wärme- und Schadstofftransport im Grundwasser - Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG, VCH Verlagsgesellschaft GmbH.
- [14] BAFU 2012: Grundwasserschutzzonen bei Lockergesteinen. Ein Modul der Vollzugshilfe Grundwasserschutz. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1207: 58 S.
- [15] Gmünder C. (2009): Modellgestützte Ermittlung der Einzugsbereiche von Grundwasserfassungen, Thurgauer Naturforschende Gesellschaft, Band 63.

- [16] Gmünder C. (2008): Modellgestützte Ermittlung der Einzugsbereiche von Grundwasserfassungen, Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft, Band 63.
- [17] Terence V. Gronowski (1992): Die natürliche Grundwasserneubildung in einem urban beeinflussten Einzugsgebiet im Voralpenraum; Zürcher Geographische Schriften, Heft 50; Verlag der Fachvereine an den schweizerischen Hochschulen und Techniken, Zürich.