



Christoph Buchegger, BSc

Grundwasserströmungsmodell für den Raum Peggau:
Auswirkungen hydrologischer Änderungen auf den
Grundwasserkörper

Masterarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science (MSc)

Masterstudium Erdwissenschaften

Eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Steffen Birk

Steyr, 10.08.2021

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen, als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

Mein Dank gilt zunächst Univ.-Prof. Dr.rer.nat. Steffen Birk für die Betreuung und die schnelle Korrektur dieser Arbeit.

Für die Bereitstellung einiger wesentlicher Daten für den Aufbau dieses Grundwasserströmungsmodell möchte ich mich bei der Abteilung 14 der steiermärkischen Landesregierung sowie der Holding Graz Wasserwirtschaft danken.

Insbesondere möchte ich mich bei meiner Freundin Barbara für ihr Ermutigungen, sowie das Verständnis und die Rücksicht bedanken.

Kurzfassung

Eine der wichtigsten Wasserressourcen der Welt bildet das Grundwasser. Um die Variabilität des Grundwassers zu verstehen wird in dieser Arbeit ein numerisches Grundwassermodell erstellt. Am Beispiel eines Gebietes im Murdurchbruchstal nördlich von Graz, im größeren Umkreis der Gemeinde Peggau sollen die Auswirkungen der hydrogeologischen Parameter auf die Strömungsdynamik sowie den hydrologischen Kreislauf gezeigt werden. Zu diesem Zweck wurden die verfügbaren hydrometeorologischen, hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Daten in einem konzeptionellen hydrogeologischen Modell zusammengeführt und ein numerisches Grundwasserströmungsmodell mit MODFLOW-96 erstellt. Das Grundwasserströmungsmodell zeigt, dass die Mur bis zum Staubereich des Kraftwerk Deutschfreistritz stark mit dem Grundwasserkörper kommuniziert. Die Tiefenrinne weist eine höhere Durchlässigkeit auf als das restliche Modellgebiet. Generell ist die Unsicherheit der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte als gering anzusehen. Der Grundwasserabstrom findet neben der Mur zu einem großen Teil im Bereich des Staubereichs des Kraftwerks Deutschfreistritz statt. Der Abfluss findet vermutlich durch Unterströmung des Staubereichs statt, wobei die Ergebnisse des südlichen Gebiets eher als unsicher einzustufen sind. Ein zuvor vermuteter unterirdischer Zufluss aus dem Tannebenstock scheint nicht vorhanden zu sein oder zumindest vernachlässigbar gering.

Abstract

Groundwater forms one of the most important water resources in the world. In order to understand the variability of groundwater, a numerical groundwater model is created in this work. Using the example of an area in the Mur breakthrough valley north of Graz, in the larger vicinity of the municipality of Peggau, the effects of hydrogeological parameters on the flow dynamics as well as the hydrological cycle will be shown. For this purpose, the available hydrometeorological, hydrogeological and water management data were combined in a conceptual hydrogeological model and a numerical groundwater flow model was built using MODFLOW-96. The groundwater flow model shows that the Mur River communicates strongly with the groundwater body up to the backwater area of the Deutschfreistritz power plant. The deep channel shows a higher permeability than the rest of the model area. In general the uncertainty of the obtained permeability values can be considered as low. Groundwater discharge is into the Mur and to a large extent as underflow in the backwater area of the Deutschfreistritz power plant yet, the results for the southern area are to be classified as rather uncertain. A previously suspected subsurface inflow from the Tannebenstock seems does not appear to be present or at least negligible.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	9
2	Konzeptionelles hydrogeologisches Modell	11
2.1	Topografische Lage und allgemeine Standortbeschreibung	12
2.2	Geologischer Überblick.....	13
2.2.1	Grundgebirge (Schöckldecke)	13
2.2.2	Lockergesteine	14
2.3	Hydrogeologie und Hydrologie.....	15
2.3.1	Abgrenzung des Grundwasserleiters	15
2.3.2	Hydraulische Eigenschaften des Grundwasserleiter	16
2.3.3	Klimatische Bedingungen	16
2.3.4	Oberflächengewässer.....	17
2.3.5	Grundwasser	17
2.3.6	Grundwasserentnahme und anthropogene Beeinflussung des Grundwasserleiters.....	20
2.3.7	Messstellen, Daten.....	21
2.4	Wasserrechte und wasserrechtlich genehmigte Anlagen.....	22
2.4.1	Entnahmebrunnen	22
2.4.2	Fließgewässeranlagen	24
2.4.3	Grundwasseranlagen.....	24
2.4.4	Quellen, Deponieverfüllung, Sonderbauwerke, stehende Gewässer und Wasserbehälter.....	24
2.5	Unsicherheiten des Konzeptionellen Modells.....	25
3	Mathematisches Modell	26
3.1	Strömungsmodellierung	26
3.1.1	Piezometerhöhe	26
3.1.2	Gesetz von Darcy.....	26
3.1.3	Kontinuitätsgleichung.....	26
3.1.4	Instationäre Strömungsgleichung	28
3.1.5	Numerische Lösung der Strömungsgleichung.....	29
3.2	Berechnung von ETP, ETR und Grundwasserneubildung	30

4	Modellaufbau.....	32
4.1	Modflow – PMWIN	33
4.2	Stationäres Strömungsmodell	34
4.2.1	Abgrenzung des Modellgebiets.....	34
4.2.2	Aufbau des Modellgitters.....	35
4.2.3	Definition der Randbedingungen	35
4.2.4	Tiefe des Grundwasserstauers (BOL) und Geländeoberkante (GOK)	36
4.2.5	Wechselwirkung Oberflächengewässer (river-package)	38
	39
4.2.6	Grundwasserabstrom.....	39
4.2.7	Entnahmebrunnen	40
4.2.8	Festpotential	40
4.2.9	GW Neubildung durch Niederschlag.....	41
4.2.10	Randzuflüsse und Abflüsse.....	41
4.2.11	Aquiferkenngrößen – Durchlässigkeitsbeiwert.....	41
4.3	Instationäres Modell.....	43
4.3.1	Wechselwirkung Oberflächengewässer	43
4.3.2	Grundwasserabstrom (general head boundary).....	43
4.3.3	Grundwasserneubildung	44
4.3.4	Entnahmebrunnen	44
4.3.5	Observationsbrunnen.....	44
4.3.6	Speichernutzbare Porosität.....	45
5	Kalibrierung.....	46
5.1	Modellkalibrierung	46
5.2	Stationäres Modell – Kalibrierung, Wasserbilanz, Sensitivitätsanalyse	47
5.2.1	Sensitivitätsanalyse und Unsicherheiten	55
5.2.2	Wasserbilanz des Modellgebiets.....	57
5.3	Instationäres Modell– Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse, Wasserbilanz	59
5.3.1	Sensitivitätsanalyse und Unsicherheiten	62
5.3.2	Wasserbilanz des instationären Modells	64
6	Diskussion	65
7	Schlussfolgerung	69

C. Buchegger

8	Abbildungsverzeichnis:	70
9	Tabellenverzeichnis:.....	71
10	Abkürzungsverzeichnis bzw. Symbolverzeichnis:	71
11	Literaturverzeichnis	72

1 Einleitung

In Österreich werden rund 2,5 Mrd. m³/a Wasser, das entspricht etwa 3% des jährlichen Dargebots, zu wirtschaftliche Zwecke genutzt. Der beanspruchte Bedarf aus dem Grundwasser liegt bei 6% des gesamten Grundwasserdargebots, wovon 40% zur Deckung des Trinkwasserbedarfs herangezogen werden. Die Bedarfsdeckung der Trinkwasserversorgung erfolgt zu 51% aus Grundwasser und zu 48% aus Quellwasser (Schönbäck et al. 2003). Grundwasser ist global gesehen der wichtigste Frischwasserspeicher im hydrologischen Kreislauf, er liefert Wasser für die Landwirtschaft und Industrie, zusätzlich deckt er den Bedarf für private Haushalte. Aquifere spiegeln den steigenden Druck durch Wasserentnahmen und Klimaveränderungen wieder, dies wird durch veränderte Muster in den Grundwasserständen deutlich (Kløve et al. 2014). Der Klimawandel wirkt auf den hydrologischen Kreislauf in allen Bereichen, die Änderungen betreffen die Mengen und die Dauer der Grundwasserneubildung, des Abflusses und der Speicherung. Um eine Vorhersage der Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrologie und die Wasserressourcen zu treffen, ist es entscheidend zuerst die Mechanismen der natürlichen Variabilität in einem regionalen hydrologischen Kreislauf zu verstehen. Dies ist von Bedeutung, da die Zukunft durch mehr hydrometeorologischen Extremereignisse wie Niederschlagsmangel, beziehungsweise überdurchschnittlich viel Niederschlag gekennzeichnet sein wird (Eltahir und Yeh 1999; Haas und Birk 2017). Die Auswirkungen des Klimawandels zeigen sich bereits global, durch eine Häufung der Wetter- und Klimaextreme. Seit 2014 (AR5) zeigt sich eine Intensivierung bei Extremereignissen wie Starkniederschlägen, Dürren, Hitzewellen und tropischen Wirbelstürmen. Seit den 1950er Jahren besteht ein Aufwärtstrend hinsichtlich Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlagsereignissen, zudem ist ein Anstieg an Dürrperioden zu verzeichnen (MassonDelmotte V. et al. 2021).

Grundwasser bildet in Österreich als auch weltweit in vielen Ländern eine der wichtigsten Wasserressourcen, hierfür ist es unter anderem wichtig die Variabilität im Grundwasser zu verstehen. Dafür ist es von großer Wichtigkeit den Zu- und Abfluss, sowie die Strömungsdynamik und deren Auswirkungen auf den Grundwasserkörper zu betrachten. Die Erschließung bzw. Förderung des Grundwassers wird meist über Brunnen in Porengrundwasserleitern (z.B.: alluvialen Sedimenten) vollzogen. Porengrundwasserleiter aus alluvialen Sedimenten finden sich in Flusstälern wie etwa im Murtaal. Um ein genaueres

C. Buchegger

Verständnis hinsichtlich der Prozesse und Einflussfaktoren im Grundwasser zu erhalten, wurde ein Grundwasserströmungsmodell erstellt. Dazu wurde ein Teilbereich des Murtals als Untersuchungsgebiet ausgewählt. Der Grundwasserleiter wird im Untersuchungsgebiet durch alluviale Sedimente aufgebaut. Das Untersuchungsgebiet ist durch den Talrand (Schöckldecke, Grünschieferzone) begrenzt, eine weitere natürliche Grenze bildet die Mur.

Die Durchlässigkeit sowie das Speicherverhalten eines Grundwasserleiters ist maßgebend für die Geschwindigkeit der Ausbreitung von Hoch- oder Niedrigwasserständen sowie von Dürren und Starkregenereignissen. Zudem kann die hydraulische Anbindung (Leakage-Faktor) der Oberflächenwässer maßgeblich an der Grundwasserneubildung und dem Grundwasserabfluss beteiligt sein. Für das Modellgebiet sollen daher die verfügbaren hydrometeorologischen, hydrogeologischen und wasserwirtschaftlichen Daten in einem konzeptionellen hydrogeologischen Modell zusammengeführt und die unzureichend bekannten hydrogeologischen Parameter und Randbedingungen durch Kalibrierung des numerischen Strömungsmodells bestimmt werden. Anhand des kalibrierten Modells soll die Grundwasserdynamik untersucht und die Bedeutung der unterschiedlichen Wasserbilanzkomponenten bewertet werden. Insbesondere soll der in der Literatur (Benischke und Harum 1994; Behrens et al. 1992) erwähnte unterirdische Zustrom in den alluvialen Aquifer bestimmt werden. Dieser soll im „Nahbereich des Hammerbachquellaustritts über diffuse kleinere Risse“ austreten und „ist auf max. 50 l/s begrenzt“ (Benischke und Harum 1994).

2 Konzeptionelles hydrogeologisches Modell

Das konzeptionelle Modell dient als Grundlage für den Aufbau des numerischen Modells. Ein konzeptionelles hydrogeologisches Modell stellt mittels Text, Diagrammen, Profilen und Tabellen die Hydrogeologie des Untersuchungsgebiets vereinfacht dar. In diesem Kapitel werden die gesammelten Daten über das Untersuchungsgebiet dargestellt, es werden die Lage, die Geologie, die Hydrogeologie, die Hydrologie und die anthropogene Bebauung beschrieben. Abbildung 1 zeigt ein Orthofoto des Modellgebiets und des Umlands.

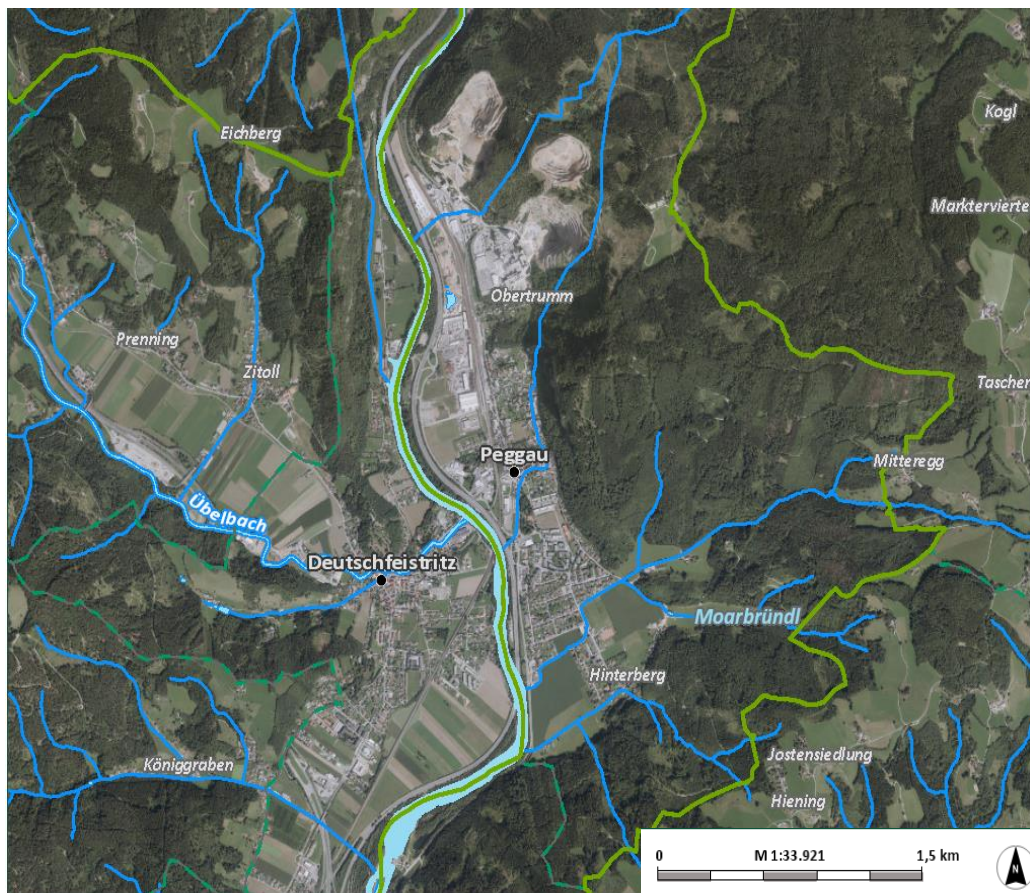


Abbildung 1: Orthofoto Untersuchungsgebiet (GIS-Steiermark, 2018)

2.1 Topografische Lage und allgemeine Standortbeschreibung

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in Österreich, im Bundesland Steiermark, ca. 15 km nördlich von Graz, im Bezirk Graz-Umgebung. Im Genaueren umfasst das Untersuchungsgebiet das Umland der Gemeinde Peggau. Auf Abbildung 2 ist ein Ausschnitt aus der steiermärkischen Basemap dargestellt. Zur besseren Abgrenzung gegenüber dem Umland, wird das Modellgebiet als rotumrandete, schraffierte Fläche angedeutet. Das Modellgebiet wird im Westen, durch die von Nord nach Süd verlaufende Mur begrenzt. Im Norden wird es durch die natürliche Talenge begrenzt, der östliche Rand wird im Norden durch den Tannebenstock beschränkt. Im Bereich Hinterberg wird der Untergrund durch einen Schwemmkegel definiert, hier wurden die Grenzen aufgrund der Steigung in den Seitentälern (Mitterbach und Moarbründl) festgelegt. Der Süden des Modellgebiets wird ebenfalls durch Festgestein begrenzt, zudem verläuft die Mur im Süden des Gebiets scharf nach Westen (Murknie Hinterberg) dies bedingt eine natürliche Begrenzung des Grundwasserkörpers. Diese Begrenzungen umschließen eine Fläche von ungefähr 2 km².

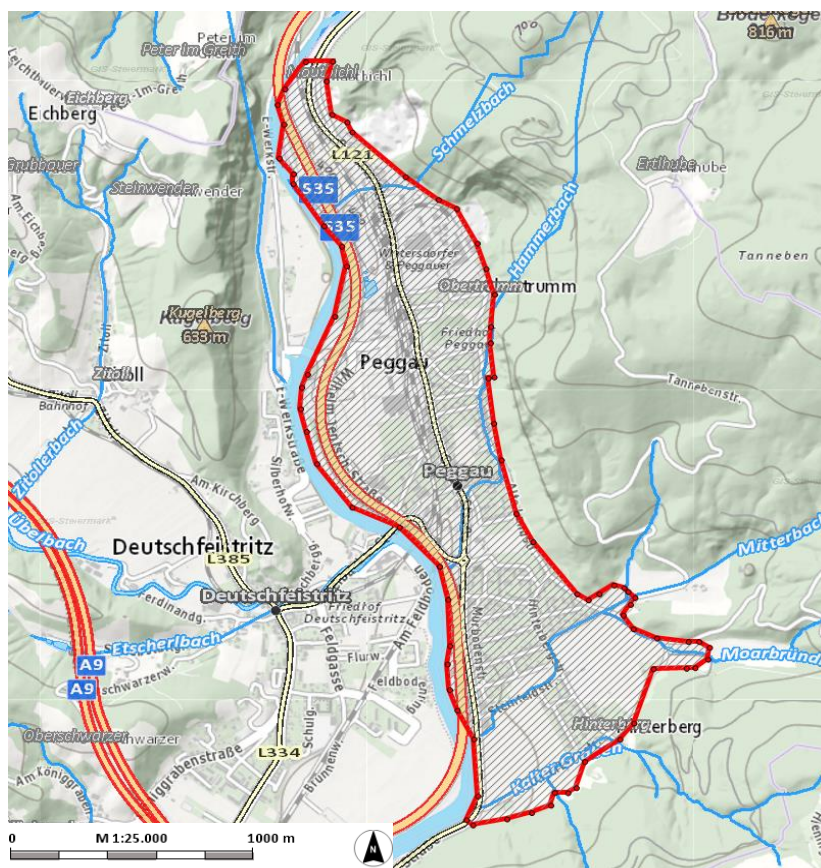


Abbildung 2: Das Untersuchungsgebiet und die Abgrenzung des Modellgebiets (GIS-Steiermark, 2018)

2.2 Geologischer Überblick

Das Modellgebiet befindet sich im Muredurchbruchstal, genauer umfasst es den Talboden östlich der Mur. Die geologischen Verhältnisse im Raum des Untersuchungsgebiets, lassen sich in einen paläozoischen Festgesteinsrahmen, sowie in quartäre Lockergesteine unterteilen. Der Festgesteinsrahmen bzw. der Untergrund, der quartären Talfüllung, besteht aus paläozoischen, teilweise metamorph überprägten, Sedimenten der großtektonischen Einheit der Schöckldecke (Geotechnisches Institut AG 1983; Maurin 1954; Flügel 1975).

2.2.1 Grundgebirge (Schöckldecke)

Die Schöckldecke kann in zwei verschiedene Faziesbereiche eingeteilt werden, in den niedrig metamorphen Schöcklkalk und die Tonschieferserie (Geotechnisches Institut AG 1983). Der Schöcklkalk, in Abbildung 3 blau dargestellt, tritt im Bereich des Tannebenstocks vielfach als massiger, makroskopisch gleichmäßig, blaugrauer Kalkstein oder Kalkstein mit deutlicher Bänderung auf. Im nördlichen Teil (Lurgrotte) des Tannebenstocks herrschen gebankte Partien mit Mächtigkeiten von 0,5 - 1,5 Meter vor (Maurin 1954). Der Schöcklkalk ist stark verkarstungsfähig und daher hydrogeologisch von Bedeutung (Geotechnisches Institut AG 1983).

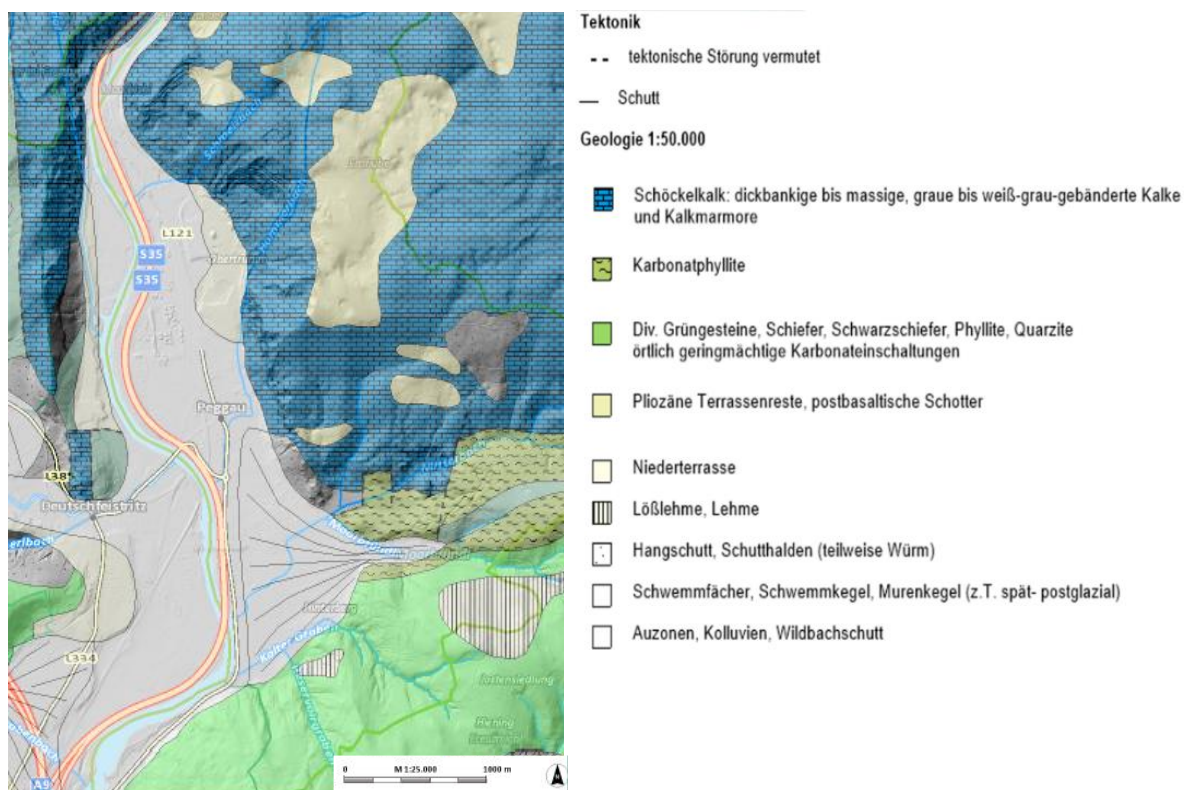


Abbildung 3: Geologische Karte des Untersuchungsgebiets 1:50.000, Ausschnitt aus GIS-Steiermark

Die Tonschieferserie, in Abbildung 3 grün dargestellt, besteht im Modellgebiet vorwiegend aus Phylliten und Grünschiefer. Die Tonschieferserie weist eine tektonisch bedingte, starke mechanische Überprägung auf, dies führt zu Myloniten und Ruschelzonen (Riedmüller 1983).

2.2.2 Lockergesteine

Der Durchbruch der Mur, durch die Gesteine des Grazer Paläozoikums, im Norden des Gebiets zwischen Kugelstein und Tannebenstock, ist durch die Störungsrichtung (vor allem meridional) vorgezeichnet worden (Geotechnisches Institut AG 1983). Daraufhin kam es zu einer rückschreitenden Erodierung und Eintiefung des Flusses in das Grundgebirge. Diese Eintiefung wurde im Pleistozän durch Lockergesteine, der von den Seiten zufließenden Nebenflüsse und den Hängen, zyklisch aufgefüllt. Der heutige Fluss (Mur) tiefte sich wiederum in diese Sedimente ein (Geotechnisches Institut AG 1983; Amt der Steiermärkischen Landesregierung - Landesbaudirektion Wasserbau 1966).

Als Zeugen der Kaltzeit sind im nordöstlichen Teil des Modellgebiets, an den Hängen des Tannebenstocks, Reste der wärmzeitlichen Niederterasse erhalten geblieben. Diese sind in der geologischen Karte (Abb.3) hellgelb dargestellt. Der sedimentologische Aufbau der wärmzeitlichen Niederterasse gleicht im Wesentlichen dem Aufbau der holozänen Flussablagerungen. Aufgebaut sind diese aus feinkörnigen Deckschichten und den Terrassenschottern die aus sandigem Kies bestehen, Einschaltungen von Grobgeschiebehorizonten und feinsandigen bis schluffigen Lagen sind ebenfalls möglich (Riedmüller 1983).

Die Informationen zum Aufbau der Talfüllung wurden den Bohrungen RB19/P-RB22/P und RB25/P aus dem geotechnischen Gutachten (Geotechnisches Institut AG 1983) entnommen, diese wurden im Zuge des Kraftwerkbaus Deutschfreistritz bis zum Grundgebirge abgeteuft.

Die quartären Sedimente der Talfüllung (Abb. 3) lassen sich grob in drei Schichten einteilen. Die oberflächennahe Schicht ist aus feinkörnigen Sedimenten aufgebaut, im Genaueren handelt es sich dabei um Schluffe und Sande mit vereinzelt Blöcken (z.T.: Grünschieferkomponenten) und feinkiesigen bis kiesigen Lagen. Dieser obersten Sedimentschicht liegen unterschiedliche Ablagerungsmilieus zugrunde, am Talrand ist mit Hangschutt und Hanglehmen, am Talboden hingegen mit fluviatilen Ablagerungen der Mur und Aueböden zu rechnen. Die Mächtigkeiten der Sedimentschichten schwanken zum Teil

C. Buchegger

sehr stark, so beträgt die oberste Schicht im Süden (RB22/P) 6 m und auf der Höhe von Peggau (RB19/P) nur 2,3 m.

Darunter befinden sich die Flussablagerungen der Mur bzw. der Urmur. Diese Schotter bestehen aus sandigen Kiesen mit vereinzelt Blöcken, diese fluviatilen Sedimente schwanken in der Mächtigkeit ebenfalls sehr stark. Im Süden (RB22/P) wurde eine Mächtigkeit von 18 m (24 m unter GOK) und bei der Bohrung RB19/P eine Mächtigkeit von 3,3 m (5,6 m unter GOK) erbohrt.

Unter den fluviatilen Ablagerungen wurden in den Bohrungen eine Verwitterungsschicht des Grundgebirges angetroffen, diese schwankt ebenfalls in der Mächtigkeit von 6 m im Süden (Bereich Hinterberg) bis 1,6 m auf Höhe Peggau. Dieser Übergang zum Grundgebirge besitzt ein großes Korngrößenspektrum, in der Bohrung RB22/P wurden schluffige bis tonige Sande und Blöcke angetroffen, wobei hingegen in RB19/P Lehme und Blöcke dominieren. Auf diese Verwitterungsschicht folgt das Grundgebirge aus Grünschiefer und Tonschiefer der tlw. kalkführend ist.

2.3 Hydrogeologie und Hydrologie

2.3.1 Abgrenzung des Grundwasserleiters

Die Basis des Grundwasserleiters wurde, aufgrund der Erkundungsbohrungen des Kraftwerksbaus Deutschfreistritz, als Unterkante der quartären Kiese festgelegt. Somit fungiert das anstehende Gestein als Grundwasserstauer.

Das Relief des Grundgebirges zeigt eine deutlich ausgeprägte Tiefenrinne, die hinsichtlich Grad des Einfallens, als auch der Breite, beträchtliche Unterschiede über die Länge des Untersuchungsgebiets aufweist. Im nördlichen Abschnitt zwischen dem Zementwerk und dem Ortskern Peggau streicht die Tiefenrinne Nordnordwest. Südlich der Gemeinde Peggau verschmälert sich die Tiefenrinne, dies dürfte auf einen Felsdorn zurückzuführen sein. Auf diese Verschmälerung der Rinne folgt eine beträchtliche Weitung und Verflachung, hier werden Tiefen bis zu ca. 30 m unter GOK erreicht. Im Anschluss ändert sich die Richtung der Tiefenrinne, die in eine südwestliche Richtung umbiegt (Weber 1969).

2.3.2 Hydraulische Eigenschaften des Grundwasserleiter

Der Grundwasserleiter ist, aufgrund der Bohrungen und des geotechnischen Berichts des Kraftwerkbaus Deutschfreistritz (1983), als ungespannter Grundwasserleiter zu klassifizieren. Für das konzeptionelle Modell wurde die Annahme getroffen, dass makroskopisch keine vertikale Inhomogenität im Grundwasserleiter besteht. In der Literatur sowie aus den Kernbohrungen der Datenrecherche ist kein Stockwerksbau im Grundwasserkörper beschrieben, somit sind keine vertikalen Gradienten zu erwarten. Aufgrund des fluviatilen Ablagerungsmilieus können mikroskopisch lokale Unterschiede im Strömungsverhalten auftreten, jedoch ist der Einfluss auf das Modellgebiet eher als gering einzustufen.

2.3.2.1 Durchlässigkeit

Die folgenden Durchlässigkeitsbeiwerte (K_f) wurden aus Auszügen des Steirischen Wasserinformationssystem (WIS) entnommen. Für die Errichtung der drei Vertikalfilterbrunnen, der Holding Graz, wurden im Jahre 2010 Pumpversuche zur Ermittlung der Durchlässigkeitsbeiwerte durchgeführt. Von 2012 bis 2015 wurden ebenfalls mehrere Pumpversuche, für unterschiedliche Projekte, durchgeführt. Die durch die Pumpversuche ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte befinden sich alle im Bereich von 10^{-3} m/s bis 10^{-4} m/s, somit bestätigen die Durchlässigkeitsbeiwerte die in den Kernbohrungen angetroffenen Sedimente (Sande und Kiese). Die Durchlässigkeitsbeiwerte sind laut Hölting und Coldewey als stark durchlässig zu klassifizieren (Hölting und Coldewey 2009).

2.3.3 Klimatische Bedingungen

Das gegenständliche Untersuchungsgebiet befindet sich in der Klimaregion Murdurchbruchstal, diese Region ist vom Nordföhn und starker Durchlüftung geprägt. Die starke Durchlüftung wirkt sich günstig auf das thermische Verhalten der Region aus, so werden im Murdurchbruchstal weniger Frosttage und weniger Tage mit Nebel gemessen als in den umliegenden Regionen. Das Jahresmittel der Temperatur von 2010 bis 2014 beläuft sich auf $9,51^{\circ}\text{C}$. Die Niederschlagsverhältnisse besitzen einen kontinental geprägten Jahresgang mit gewitterreichen Sommern und schneearmen Wintern (Land Steiermark - Amt der Steiermärkischen Landesregierung). Der berechnete Jahresmittel (2010-2014) des Niederschlags, der Wetterstation Eichberg, beläuft sich auf 865 mm/a .

2.3.4 Oberflächengewässer

Im Raum Peggau befinden sich neben der Mur noch drei kleinere Fließgewässer. Die Mur fließt von Nord nach Süd am westlichen Rand des Untersuchungsgebietes. Sie weist in diesem Bereich laut dem Bericht des Geotechnischen Instituts AG, 1983 ein Gefälle von etwa 2,1% auf. Bei den drei kleineren Fließgewässern handelt es sich um den Schmelzbach, Hammerbach und Mitterbach. Die Gefälle der einzelnen Bäche sind sehr unterschiedlich, generell jedoch steiler als das Gefälle der Mur (Geotechnisches Institut AG 1983). Der mittlere Jahresabfluss des Schmelzbachs ist 79 l/s und jener des Hammerbachs beträgt 193 l/s (Behrens et al. 1992). Der südlich von Peggau gelegene Mitterbach hat einen mittleren Jahresabfluss von 50 l/s (Ingenieurbüro BM Ing. Gerhard Moik GMBH 2010).

2.3.5 Grundwasser

Die Grundwasserbewegung findet im Untersuchungsgebiet parallel zur Mur statt, die Grundwasserströmung ist nach Süden gerichtet. Das Gefälle des Grundwasserspiegels von Peggau in Richtung Süden (Hinterberg) ergab bei mittlerem Wasserstand 2,1% (Geotechnisches Institut AG 1983).

Die Grundwasserstände verzeichnen im Allgemeinen einen Anstieg im Frühjahr und im Herbst. Dieses Phänomen wird auf die Schneeschmelze im Frühjahr und dem Niederschlagsanstieg im Herbst zurückzuführen sein, die Tiefstände sind mit dem Niederschlagsrückgang im Sommer und dem Schneefall im Winter zu begründen. Die Grundwasserstandsganglinien für den Zeitraum von 2010-2014, für die im Untersuchungsgebiet befindlichen Pegel, sind in Abbildung 4 dargestellt. Die Grundwasserstandsganglinien zeigen eine Schwankungsamplitude von etwa 1 m und Extremwerte von rund 2 m.

Die Grundwasserneubildung des Murdurchbruchstals erfolgt nicht nur aus dem Niederschlag, Murinfiltration und dem Zufluss der Seitenzubringer, sondern auch durch unterirdisch zufließendes Karstwasser aus dem umliegenden Bergland (Amt der Steiermärkischen Landesregierung 1989).

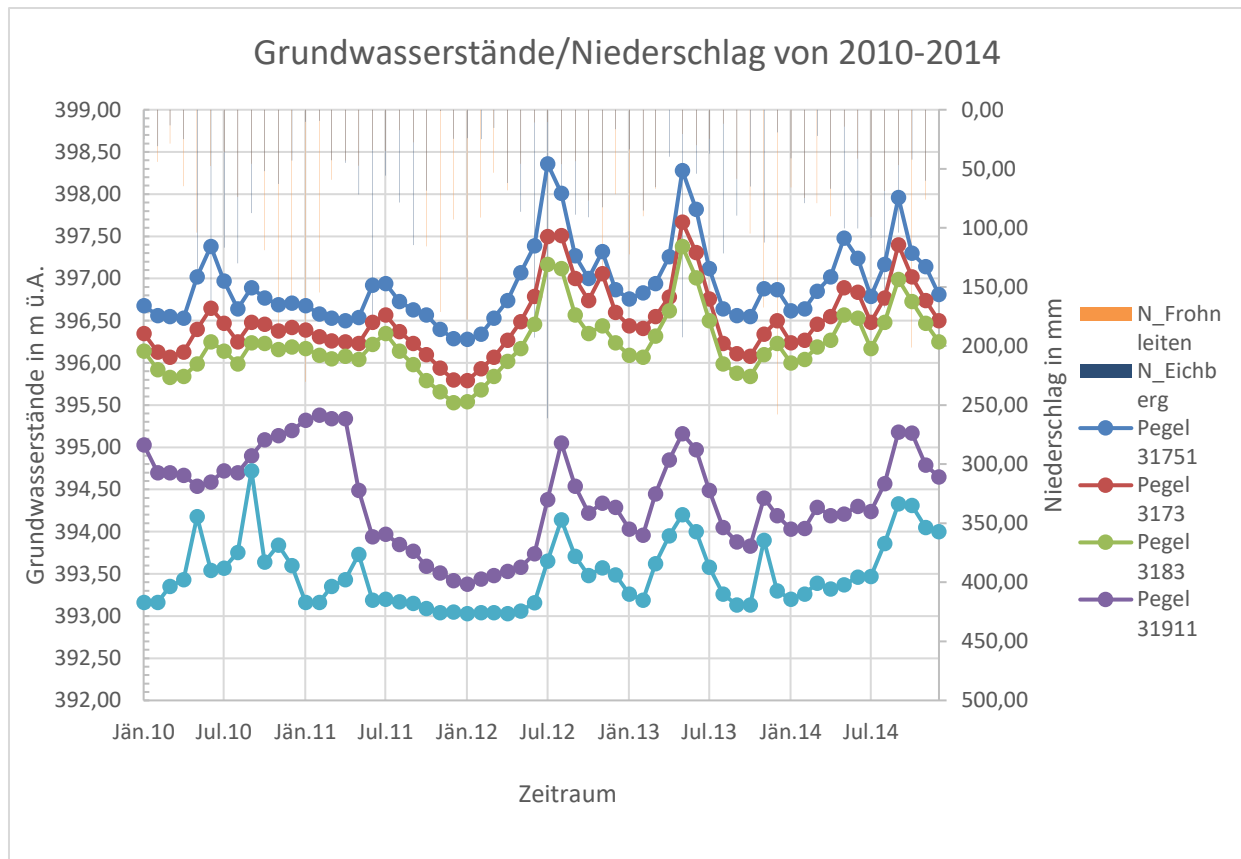


Abbildung 4: Gegenüberstellung des zeitlichen Verlaufs der Grundwasserstände gegenüber dem Niederschlag

2.3.5.1 Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Im Zuge der Datenrecherche wurde aufgrund der vorhandenen Daten (Tagesmittel der Temperatur) entschieden, dass die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration (ETP) nach Oudin et al. (Oudin et al. 2005) erfolgt. Darauf wurde mittels eines Bodenwasserbilanzmodells die tatsächliche Evapotranspiration (ETR) berechnet, wodurch sie die Grundwasserneubildungsraten aus Niederschlag ergeben. Diese Methoden wurden aufgrund der direkt zur Verfügung stehenden Daten des Niederschlags und der Lufttemperatur gewählt. Eine Erläuterung der Methodik erfolgt im Kapitel 3.

Für die Berechnung wurden die Tagestemperatur- und Tagesniederschlagsmessung der Klimastation Eichberg herangezogen. Die folgenden Jahresmittelwerte wurden für den Zeitraum 2010-2014 berechnet. Das Temperaturjahresmittel beträgt für die Messstation Eichberg 9,47 °C, der Niederschlagsmittelwert beträgt 865,02 mm/y.

Für die Berechnung der ETR wurden die Tagesniederschläge und Tagesmitteltemperaturen herangezogen. Die nutzbare Feldkapazität in alpinen Flusstälern liegt im mittleren Bereich

(140-220 mm) (Wahlhütter 2011). Für das Untersuchungsgebiet wurde aufgrund der Bebauung im Bereich der Gemeinde Peggau und der hohen nutzbaren Feldkapazität, im Bereich der Ackerflächen im Süden des Gebiets, eine nutzbare Feldkapazität von 180 mm angenommen.

In der Abbildung 4 ist die Gegenüberstellung des zeitlichen Verlaufs, der gemessenen Grundwasserstände für die Pegel 31751, 3173, 3183, 31911, 3195 gegenüber dem zeitlichen Verlauf des Niederschlags für die Messstellen Frohnleiten und Eichberg. Die Niederschlagsspitzen der Messstelle Eichberg werden in den Grundwasserständen besser wiedergespiegelt als die Niederschlagsspitzen der Messstelle Frohnleiten.

2.3.5.2 Grundwasserneubildung aus Oberflächengewässer

Die Grundwasserneubildung aus der Mur wird durch die Pegelstände, die Geometrie des Flusses, die Mächtigkeit und der Durchlässigkeit der Sedimente im Flussbett bestimmt. Entlang des Untersuchungsgebiets kann von einer Infiltration oder Exfiltration von Wasser in bzw. aus den Aquifer angenommen werden, dies lässt sich mit der raschen Reaktion des Grundwasserspiegels auf Schwankungen des Murwasserspiegels erklären (Geotechnisches Institut AG 1983).

Zur Grundwasserneubildung aus den drei Bächen liegen keine Daten vor. In einer Geländebegehung wurden die Geometrien der drei Bäche und die Wasserstände gemessen. Um Annahmen über die Mächtigkeit der kolmatierten Sedimentschicht und über die Durchlässigkeit zu treffen, wurden die Sedimente der Bachsohle untersucht.

2.3.5.3 Unterirdische Zuflüsse vom Gebirgsrand

Die östliche Grenze des Untersuchungsgebiets wird durch den Tannebenstock gebildet, der Tannebenstock besteht aus Schöcklkalken. Da der Schöcklkalk stark verkarstungsfähig ist, könnte ein unterirdischer Hangzufluss gerechtfertigt werden. Im Bericht der Untersuchungen zum Kraftwerksbau Deutschfreistritz/Friesach der Geotechnischen Instituts AG wird ebenfalls mit Hangwasserzutritt in den Porengrundwasserleiter gerechnet (Geotechnisches Institut AG 1983). Nach Behrens et al. (1992) wird ein möglicher unterirdischer Zufluss in den Porengrundwasserleiter am ehesten im Nahbereich der Hammerbachquelle vermutet. Wahrscheinlich erfolgt dieser diffus über kleinere Risse und nicht punktuell durch einen Karsthohlraum. Dieser mögliche unterirdischer Zufluss beläuft sich auf maximal 50 l/s, dieser

Wert wurde anhand eines Tracerversuchs im Tannebenstocks von Behrens et al. (1992) abgeschätzt. Eine Grundwasserneubildung nahe des Schmelzbachaustritts ist unwahrscheinlich. Der unterirdische Bach (Schmelzbach) weist keinen Wasserverlust in der gesamten unteren Lurgrotte auf, dies zeigt, dass keine tiefere Verkarstung vorhanden ist (Behrens et al. 1992).

2.3.6 Grundwasserentnahme und anthropogene Beeinflussung des Grundwasserleiters

Der Grundwasserleiter im Bereich des Modells wird auf unterschiedlichste Weise genutzt. Im Modellgebiet befinden sich drei Vertikalfilterbrunnen der Holding Graz, das entnommene Grundwasser wird zur Anreicherung in der Anlage Friesach genutzt. Die Förderraten der drei Vertikalfilterbrunnen zeigen keine kontinuierliche Nutzung, laut Holding Graz (Anfrage 2017) werden die Brunnen nur in Betrieb genommen, wenn die Grundwasseranreicherung aus dem Stübingbach nicht mehr ausreicht. Anhand der Daten wurden Spitzen bis 46,5 l/s von allen drei Brunnen gemeinsam erreicht. Entsprechend des Wasserbuchauszugs (Graz-Umgebung Postzahl 6/2851) ist eine Dauerentnahme von 40 l/s und eine kurzfristige zusätzliche Entnahme von 50 l/s genehmigt (Amt der Steiermärkischen Landesregierung - Umwelt und Raumordnung 2014).

Zudem befinden sich die Entnahmebrunnen der Wasserversorgung der Gemeinde Peggau und des Schotterwerks Sager Schotter GmbH in dem Untersuchungsgebiet. Für die Wasserversorgung der Gemeinde Peggau wurden in den Jahren 2014-2016 durchschnittlich 4,11 l/s entnommen, die Spitzenentnahme beläuft sich auf 5,24 l/s. Der durchschnittliche Wasserbedarf des Schotterwerks beläuft sich auf 4,5 l/s.

Neben den angeführten Entnahmen gibt es ebenfalls private Brunnen deren Entnahmemengen jedoch so gering sind, dass sie für das Modell nicht von Relevanz sind (Geotechnisches Institut AG 1983).

In dem Modellgebiet befinden sich neben Entnahmebrunnen, auch Regenwasserversickerungsanlagen und Wärmepumpenanlagen. Es wurde die Annahme getroffen, dass die Versickerungsanlagen mit einem abgeschätzten Flächenanteil von knapp 5% aus makroskopischer Sicht keine Auswirkungen auf die Strömung des Grundwassers haben. Die thermischen Grundwassernutzungen im Bereich des Modellgebiets wurden ebenfalls als nicht relevant für das Modell eingestuft. Da sich die Entnahmestellen im

Nahbereich der Einspeisungen befinden, sind sie aus makroskopischer Sicht für das Modell nicht von Relevanz.

Die Mur weist im Bereich des Modellgebiets eine gewisse anthropogene Beeinflussung auf, so wird durch das Kraftwerk Peggau ein Seitenkanal erzeugt (orographisch rechts der Mur) der im Bereich des Untersuchungsgebiets auf Höhe Peggau wieder der Mur zugefügt wird. Zudem erstreckt sich die Staustufe des Kraftwerks Friesach (Deutschfreistritz), das sich südlich des Untersuchungsgebiets befindet, bis in den Bereich Hinterberg zurück. Im Bericht der Geotechnisches Institut AG, zur Voruntersuchung des Kraftwerksbaus Friesach (Deutschfreistritz), wird empfohlen die Mur im Bereich der Staustufe gegenüber dem Grundwasserleiter abzudichten, dies wurde als Annahme in das konzeptionelle Model übernommen. Diese Annahme wird durch die höheren Wasserstände der Mur gegenüber den Grundwasserständen im Bereich Hinterberg bestätigt.

2.3.7 Messstellen, Daten

Innerhalb des Modellgebiets befanden sich insgesamt 9 Grundwassermessstellen, jedoch wurden davon vier wieder aufgelassen. Da die Überschneidung der gesammelten Messdaten sich auf den Zeitraum von 2010-2014 beschränkt, sollten ursprünglich nur Pegel mit Daten aus diesem Zeitraum berücksichtigt werden. Um jedoch eine bessere Abdeckung des Gebiets zu erreichen, wurden die Langzeitmittelwerte der Grundwasserstände der aufgelassenen Pegel mit den Grundwasserständen der aktiven Pegel verglichen. Da die Abweichungen kleiner $\pm 0,30$ m betragen, wurden die langjährigen Mittelwerte der aufgelassenen Pegel miteinbezogen.

2.4 Wasserrechte und wasserrechtlich genehmigte Anlagen

Für das Untersuchungsgebiet bestehen 67 Wasserechte bzw. wasserrechtlich genehmigte Anlagen, diese werden wie folgt aufgeteilt:

Tabelle 1: Wasserrechte im Untersuchungsgebiet

Wasserrechte und wasserrechtlich genehmigte Anlagen	
Art der Anlage/des Rechts	Anzahl
Entnahmebrunnen	13
Fließgewässeranlagen	18
Grundwasseranlagen	18
Quellen	5
Deponieverfüllung	1
Sonderbauwerke	5
Stehende Gewässer	2
Wasserbehälter	5

Es werden nur die für das Grundwassermodell relevanten Wasserrechte näher angeführt.

2.4.1 Entnahmebrunnen

Es sind 13 Wasserrechte bezüglich der Entnahme für das Untersuchungsgebiet erfasst. In den 13 Wasserbuchauszügen sind 16 Entnahmebrunnen eingetragen, jedoch sind nicht alle von Relevanz bzw. teilweise wurden die Brunnen aufgelassen oder sind nicht mehr in dauerhaftem Gebrauch. Im Zuge der Datenrecherche wurde bei den im Untersuchungsgebiet ansässigen Firmen die Entnahmeraten angefragt.

Die Firma W&P Zement besitzt fünf Entnahmebrunnen auf zwei Grundstücken, seitens des Unternehmens wurde mitgeteilt, dass seit dem Anschluss des Unternehmens an das öffentliche Wassernetz die Brunnen nur im Brandfall herangezogen werden.

Das Wasserrecht für die Sager Transportbeton GmbH & Co KG bezieht sich auf einen Entnahmebrunnen. Zu den Entnahmen dieser Brunnen sind keine Aufzeichnungen vorhanden, der Höchstkonsens des Schotterwerks liegt laut Wasserbuchauszug (Graz-Umgebung Postzahl 6/3875) bei 4 l/s.

Die Trinkwasserversorgung der Gemeinde Peggau erfolgt zu einem Großteil mit dem Grundwasser des Untersuchungsgebiets, es wurden Entnahmedaten mit einer monatlichen Auflösung der Jahre 2014-2016 zur Verfügung gestellt.

C. Buchegger

Dies ergibt einen durchschnittlichen Konsens von 4,11 l/s und erreicht eine Spitzenentnahme von 5,24 l/s. Der Wasserbuchauszug (Graz-Umgebung Postzahl 6/1145) sieht einen maximalen Konsens von 27,5 l/s vor.

Die PS Projektentwicklung GmbH hat im Bereich des Modellgebiets zwei Grundwasserwärmepumpen auf unterschiedlichen Grundstücken, der damit verbundene Wasserbedarf wird über Entnahmebrunnen gedeckt. Das entnommene Grundwasser wird im Nahbereich der Entnahmebrunnen wieder über Sickerschächte in den Grundwasserleiter eingebracht. Es wurde die Annahme getroffen, dass die Wärmepumpenanlagen keine makroskopischen Auswirkungen auf das Strömungsmodell haben. Begründet mit der Tatsache, dass die Entnahmepunkte und Versickerungspunkte nicht weit voneinander entfernt sind.

Die Hochhuber Immobilien GmbH (Graz-Umgebung Postzahl 6/4746) betreibt ebenfalls eine Grundwasserwärmepumpe, es wurden die gleichen Annahmen getroffen wie bei den anderen Grundwasserwärmepumpen.

Laut Wasserbuchauszug (Graz-Umgebung Postzahl 6/975) besitzt die Brüder Reininghaus Brauerei AG einen Entnahmebrunnen innerhalb der Grenzen des Untersuchungsgebiets, das Wasserrecht stammt aus dem Jahre 1928. Die darauffolgende Recherche ergab, dass in diesem Bereich keine aktive Brauerei der Gebrüder Reininghaus AG existiert, somit wurde auch dieser Entnahmebrunnen als nicht existent bzw. aktiv gesehen.

Im Modellgebiet befinden sich drei Vertikalfilterbrunnen der Holding Graz, das entnommene Grundwasser wird zur Anreicherung in der Anlage Friesach genutzt. Die Förderraten der drei Vertikalfilterbrunnen zeigen keine kontinuierliche Nutzung, laut Auskunft der Holding Graz werden die Brunnen nur in Betrieb genommen, wenn die Grundwasseranreicherung aus dem Stübingbach nicht mehr ausreichend Wasser bereitstellt. Anhand der Daten wurden Spitzen aller drei Brunnen gemeinsam bis 46,5 l/s erreicht. Entsprechend des Wasserbuchauszugs (Graz-Umgebung Postzahl 6/2851) ist eine Dauerentnahme von 40 l/s und eine kurzfristige zusätzliche Entnahme von 50 l/s genehmigt. (Amt der Steiermärkischen Landesregierung - Umwelt und Raumordnung 2014)

Neben den angeführten Entnahmen gibt es ebenfalls private Brunnen deren Entnahmemengen jedoch so gering sind, dass die Annahme getroffen wurde das sie nicht von Relevanz für das Grundwassermodell sind. In dem Gutachten zum Bau des unterstromigen Kraftwerks wurde dies ebenfalls bestätigt (Geotechnisches Institut AG 1983).

2.4.2 Fließgewässeranlagen

Bei den Fließgewässeranlagen handelt es sich um wasserrechtlich genehmigte Einleitungen bzw. Entnahmen der vorhandenen Fließgewässer im Untersuchungsgebiet. Es befinden sich 16 Anlagen dieser Art im Untersuchungsgebiet. Hierzu zählen ebenfalls die Mur und die drei Bäche Hammerbach, Schmelzbach, Mitterbach.

Bei den Einleitungen handelt sich sowohl um retentierete Einleitung von Niederschlägen als auch um Einleitung von Abwasser von Gewerbebetrieben und häuslichen Kläranlagen. Die einzelnen Wasserrechte werden hier nicht näher erläutert, da sie für die Modellierung kaum bzw. keine Auswirkungen haben.

2.4.3 Grundwasseranlagen

Bei den 17 Wasserrechten der Grundwasseranlagen handelt es sich um Versickerungsanlagen, hierbei handelt es sich hauptsächlich um Versickerungsanlagen von Niederschlagswässern, sowie um drei Versickerungsanlagen von Grundwasserwärmenutzung und einer Kläranlage. Die einzelnen Wasserrechte der Versickerungsanlagen für Niederschlag, Kläranlagen und Grundwasserwärmenutzung wurden in das Modell nicht miteinbezogen. Bei den Grundwasserwärmepumpen lässt sich dies durch die geringen Entnahmen, sowie auch durch die geringe Entfernung zwischen Entnahme- und Rückführungsstelle begründen. Die Grundwasserneubildung wurde aufgrund der geringen Ausdehnung des Untersuchungsgebietes als homogen angenommen, die Einleitung der Niederschlagswässer durch die Versickerungsanlagen wurde aufgrund der geringen Mengen nicht berücksichtigt.

2.4.4 Quellen, Deponieverfüllung, Sonderbauwerke, stehende Gewässer und Wasserbehälter

Die Wasserrechte der Quellen regeln die Entnahme aus Quellen. Die Wasserrechte der Sonderbauwerke regeln zum Großteil Einleitungen in die Kanalisation, sowie in die Oberflächengewässer.

Die Wasserrechte der stehenden Gewässer, als auch der Wasserbehälter werden nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Die zuvor genannten Anlagen bzw. Wasserrechte wurden für das Grundwassermodell nicht berücksichtigt.

2.5 Unsicherheiten des Konzeptionellen Modells

Alle konzeptionellen Modelle sind qualitativ und weisen eine gewisse Unsicherheit auf, dies ist auf den Versuch zurückzuführen, die an sich komplexe Natur in einem vereinfachten Modell darzustellen. Außerdem sind die Felddaten, auf dem das konzeptionelle Modell aufgebaut ist, immer unvollständig und geben dadurch nur eine ungefähre Beschreibung der tatsächlichen hydrologischen Bedingungen ab. Um die Unsicherheiten im konzeptionellen Modell klein zu halten, wird das konzeptionelle Modell immer wieder aktualisiert, sobald neue Informationen verfügbar werden (Anderson et al. 2015). Die Unsicherheiten werden im Kapitel 5.1 Modellkalibrierung entsprechend diskutiert.

3 Mathematisches Modell

Alle prozessbasierten Grundwasserströmungsmodelle beruhen auf zwei Grundprinzipien, auf dem Massenerhaltungsgesetz und dem Gesetz von Darcy. Das Massenerhaltungsgesetz besagt, in unserem speziellen Fall, das Wasser nicht erzeugt oder zerstört wird. Das Gesetz von Darcy besagt, dass das Grundwasser vom höheren Potential zum niedrigeren Potential fließt (Anderson et al. 2015).

3.1 Strömungsmodellierung

3.1.1 Piezometerhöhe

Die Strömung von Wasser in einem porösen Medium ist ein mechanischer Prozess. Damit es zu einer Strömung kommt müssen die Reibungskräfte zwischen den Körnern des porösen Mediums und dem Wasser überwunden werden. Bei diesem Prozess wird mechanische Energie irreversible zu Wärmeenergie umgewandelt. Die Piezometerhöhe beschreibt den Energiezustand von Wasser an einem definierten Punkt. Damit es zur Strömung kommt muss ein Unterschied im Energieniveau vorhanden sein. Die Strömung ist immer von Regionen mit höherem Energieniveau zum niedrigeren Energieniveau gerichtet (Freeze und Cherry 1979; Hölting und Coldewey 2009).

3.1.2 Gesetz von Darcy

Henry Darcy stellte eine Beziehung zwischen der Piezometerhöhe h , dem Durchfluss Q und den geometrischen Abmessungen des Filters her. Das Ergebnis zeigt, dass sich der Durchfluss Q proportional zur Differenz der Piezometerhöhen Δh und zum Querschnitt A , sowie umgekehrt proportional zur Länge L verhält (Holzbecher 2013).

$$\frac{Q}{A} = k_f \frac{\Delta h}{L} \quad (3.1)$$

3.1.3 Kontinuitätsgleichung

Die Massenerhaltung im System wird durch die Kontinuitätsgleichung beschrieben. Die Kontinuitätsgleichung besagt, dass die Summe aller Zu- und Abflüsse über die Grenzen eines Kontrollvolumens (z.B. Modellzelle) gleich der Wasserspeicherung und der externen Flüsse in diesem Kontrollvolumen sein muss. Dies kann für Wasser mit konstanter Dichte durch folgende Differenzialgleichung ausgedrückt werden (Kinzelbach und Rausch 1995):

$$\operatorname{div} q = -\frac{\partial n_e}{\partial t} + w \quad (3.2)$$

$$\operatorname{div} q = \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = \nabla q \quad (3.3)$$

mit

Div = Divergenz

∇ = Nabla-Operator

∂ = partielles Differential

q = Vektor der Darcy- bzw. Filtergeschwindigkeit (v_f) [$L T^{-1}$]

q_x, q_y, q_z = Komponenten von q in x, y und z – Richtung [$L T^{-1}$]

n_e = nutzbare Porosität [-]

w = externer Zufluss (+) oder Abfluss (-) bezogen auf das Kontrollvolumen [$1 T^{-1}$]

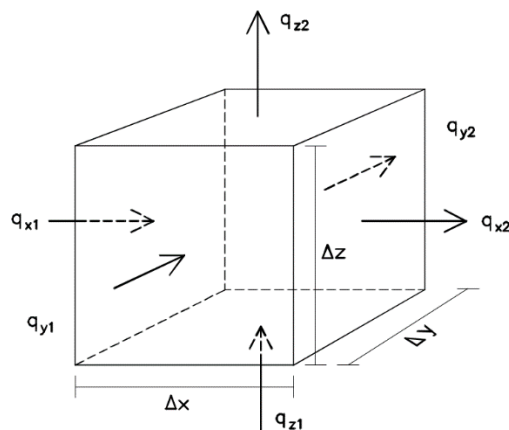


Abbildung 5: Zu- und Abflüsse in x, y , und z - Richtung eines Kontrollvolumens (Hanstein 2018)

3.1.4 Instationäre Strömungsgleichung

Die Kombination der beiden oben genannten Gleichungen ergibt die instationäre Strömungsgleichung für eine nicht kompressible Flüssigkeit mit konstanter Dichte und Viskosität:

$$\nabla(k_f \nabla h) = -S_0 \frac{\partial h}{\partial t} + w \quad (3.4)$$

mit

S_0 = spezifischer Speicherkoeffizient [L^{-1}]

V = Änderung des gesättigten Aquifervolumens

W = externer Zufluss (+) oder Abfluss (-) bezogen auf das Kontrollvolumen [$1 T^{-1}$]

Im freien Aquifer ist der spezifische Speicherkoeffizient (S_0) meist vernachlässigbar gegenüber der speicherwirksamer Porosität (n_e). Der spezifische Speicherkoeffizient (S_0) kann direkt aus der nutzbaren Porosität (n_e) berechnet werden (Schäfer 2010; Kinzelbach und Rausch 1995). Die Lösung der Strömungsgleichung (=partiellen Differentialgleichung) erfordert Anfangs- und Randbedingungen (instationär) bzw. Randbedingungen (stationär)

Es werden drei Arten von Randbedingungen unterschieden.

Randbedingung 1. Art: Vorgegebene Piezometerhöhe (Dirichlet Bedingung), hierbei wird der Wasserstand entlang der Grenze vordefiniert. Die Wasserstände entlang der Grenze können über die Entfernung variieren. Ein Spezialfall der Randbedingung erster Art ist die Festpotentialgrenze, hierbei wird der Wasserstand entlang der Grenzen auf den gleichen Wert gesetzt.

Randbedingung 2. Art: Vorgegebene Strömung (Neumann Bedingung), diese Randbedingung wird durch einen Zu- bzw. Abstrom definiert, der von einem hydraulischen Potential abgeleitet wurde. Ein undurchlässiger Rand (z.B.: Grundwasserstauer) ist ein Spezialfall der Randbedingung zweiter Art, wobei die Strömung entlang der Grenze null ist.

Typ 3: Piezometerhöhe abhängige Strömung (Cauchy Bedingung), hierbei wird die Strömung entlang der Grenze mit dem Darcy-Gesetz berechnet. Hierfür wird ein hydraulischer Gradient zwischen dem Wasserstand samt Modellrand und dem vom Modell kalkulierten Wasserstand berechnet. Diese Art von Randbedingungen wird manchmal auch als gemischte Randbedingung bezeichnet, da sie ein Randpotential mit einem Randstrom in Beziehung setzt.

3.1.5 Numerische Lösung der Strömungsgleichung

Numerische Methoden benötigen eine räumliche und zeitliche Diskretisierung. Im hier verwendeten Finite-Differenzen (FD) Verfahren erfolgt eine Annäherung an die Differentialgleichung, zur Beschreibung der Grundwasserströmung durch Differenzenquotienten in Raum und Zeit.

$$\frac{\partial h}{\partial x} \approx \frac{\Delta h}{\Delta x} = \frac{h_2 - h_1}{x_2 - x_1} \quad (3.5.)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} \approx \frac{\Delta h}{\Delta t} = \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1} \quad (3.6)$$

mit

h = Potentialhöhe

x = zurückgelegte Fließstrecke

t = Zeitschritt

Aufgrund der Verwendung von Differenzen anstelle von Differentialen wird das Modellgebiet durch kein räumliches Kontinuum mehr dargestellt, es muss auf einem Modellgitter diskretisiert sein. Die Piezometerhöhen und damit die Geschwindigkeiten werden nicht im gesamten Modellgebiet berechnet, sondern nur an diskreten Gitterpunkten (bzw. Knoten). Es werden zwei Arten von Modellgittern unterschieden, diese sind blockzentrierte und gitterzentrierte Modellverfahren.

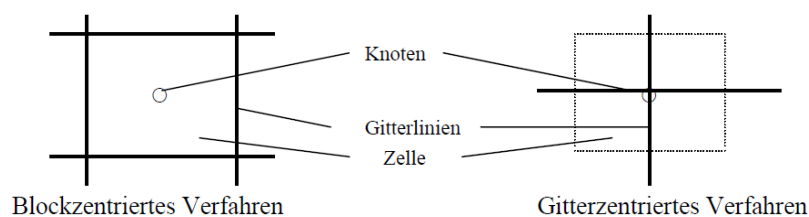


Abbildung 6: Finite-Differenzen Verfahren (Lühr 2003)

Bei dem hier verwendeten blockzentrierten Modellgitter liegt der Knoten, an dem die Piezometerhöhe gemessen wird, im Zentrum der Zelle, während er beim gitterzentrierten Verfahren mit dem Schnittpunkt der Gitterlinien zusammenfällt (Abb. 6) (Schäfer 2010; Lühr 2003).

Die Wasserbilanz für einen Knotenpunkt im Zeitintervall Δt basiert auf anschließender Gleichung:

$$\Delta Q_x + \Delta Q_y = -S \frac{\Delta V}{\Delta t} + Q_{ex} \quad (3.7)$$

mit

ΔQ_x = Änderung des Wasserflusses in x-Richtung [L^3T^{-1}]

ΔQ_y = Änderung des Wasserflusses in y-Richtung [L^3T^{-1}]

Q_{ex} = externe Entnahme (negativ) oder Zugaben (positiv) [L^3T^{-1}]

S = Speicherkoeffizient [-]

ΔV = Änderung des gesättigten Aquifervolumens [L^3]

Δt = Zeitschritt, innerhalb dessen die Änderung ablaufen [T]

Bei der instationären Berechnung wird das zeitliche Kontinuum durch diskrete Zeitpunkte ersetzt, an denen die neuen Piezometerhöhen berechnet werden.

Zusätzlich sei erwähnt, dass neben der Finite-Differenzen Methode (FD) noch die Finite-Elemente Methode (FE) verbreitet ist. Es lassen sich mithilfe der Finite-Elemente Methode zwar räumliche Strukturen besser nachbilden als mit der Finite-Differenzen Methode, jedoch gibt es keine grundlegende Überlegenheit bzw. führt keines der beiden Verfahren zu besseren Ergebnissen (Schäfer 2010).

3.2 Berechnung von ETP, ETR und Grundwasserneubildung

Wie im Kapitel 2.4.3.1 angegeben, wurde die Grundwasserneubildung aus einer Kombination der potentiellen Evapotranspiration (ETP) nach Oudin et al. (2005) und der realen Evapotranspiration (ETR) nach einem Bodenwasserbilanzmodell berechnet. Die potentielle Evapotranspiration gibt Auskunft über die maximal mögliche Evapotranspiration, die reelle Evapotranspiration hingegen berücksichtigt die Wassersättigung des Bodens. Es kann nur zur Evapotranspiration kommen, wenn Wasser im Boden verfügbar ist.

Die Berechnung der ETP nach Oudin et al (2005) bezieht neben dem Tagesmittel der Temperatur (T_a in $^{\circ}C$) ebenfalls die extraterrestrische Strahlung (R_e in $MJ\ m^{-2}day^{-1}$) in Abhängigkeit von Breitengrad und Jahreszeit mit ein, zudem werden die Verdunstungswärme

C. Buchegger

des Wassers (λ) und die Dichte des Wassers (ρ) miteinbezogen. Wobei $\frac{R_e}{\lambda\rho}$ die, der extraterrestrischen Strahlung entsprechende, tägliche Verdunstungshöhe (mm day^{-1}) angibt.

$$ETP = \frac{R_e T_a + 5}{\lambda\rho 100} \quad (3.8)$$

Für die Bestimmung der reellen Evapotranspiration bei Wasserdefizit, wird eine stückweise lineare Reduktionsfunktion angewandt. Die nutzbare Feldkapazität bildet die Differenz des Wassergehalts bei Feldkapazität und dem permanenten Welkepunkt. Wobei die Feldkapazität der maximale Wassergehalt eines Bodens ist, der längere Zeit gegen die Schwerkraft gehalten werden kann. Der permanente Welkepunkt beschreibt den Wassergehalt bei dem Pflanzen irreversibel welken (Schachtschabel et al. 2010). Die nutzbare Feldkapazität beträgt in schmalen Alpentälern zwischen 140 mm und 220 mm, das Mittel von 180 mm wurde für das Untersuchungsgebiet gewählt (Wahlhütter 2011). Es kommt nur zur Grundwasserneubildung, wenn der Bodenwasserspeicher gefüllt ist. Ab einer volumetrischen Bodenfeuchte von 70% der nutzbaren Feldkapazität, nimmt die reelle Evapotranspiration linear bis zum permanenten Welkepunkte ab. Hierfür wurde mit einer täglichen Auflösung des Niederschlags und der potentiellen Evapotranspiration gerechnet.

Aus empirischer Sicht:

Wenn $S_B < 126 \text{ mm}$ dann

$$ETR = f \cdot ETP \quad (3.9)$$

$$f = S_B / 126 \text{ mm} \quad (3.10)$$

Wenn $S_B > 126 \text{ mm}$ dann

$$ETR = ETP \quad (3.11)$$

mit

ETR = reelle Evapotranspiration

ETP = potentielle Evapotranspiration

S_B = Bodenspeicher

C. Buchegger

θ = volumetrische Bodenfeuchte

FK = Feldkapazität

WP = Welkepunkt

S = Sättigung

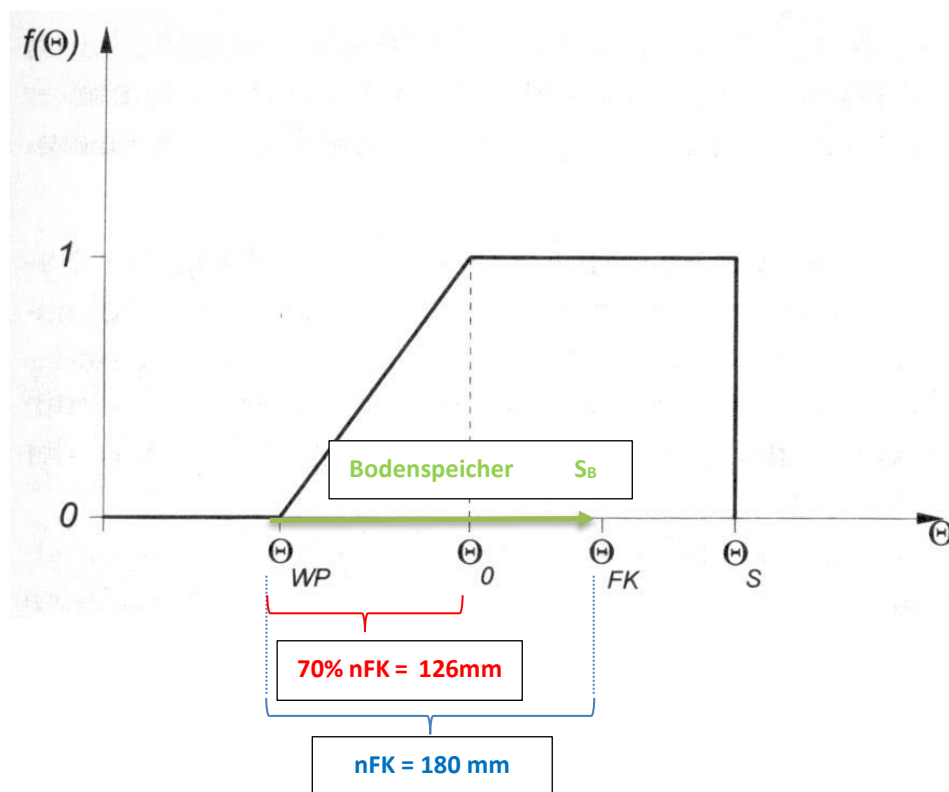


Abbildung 7: Bodenwassermodell (Dyck und Peschke 1995)

4 Modellaufbau

Da für die Wahl des Modelltyps nicht nur die Problemstellung, sondern auch die Verfügbarkeit der Daten von Bedeutung ist, muss die Wahl des Modelltyps in Hinblick auf diese beiden Punkte entschieden werden. Für diese Problemstellung ist ein instationäres Modell repräsentativer, der begrenzende Faktor ist dadurch die Datenlage. Im Zuge der Datenrecherche wurde entschieden, dass ein stationäres Strömungsmodell aufgebaut wird und darauf die Möglichkeit auf ein instationäres Modell geprüft wird.

Im Zuge der Datenrecherche wurde ersichtlich, dass sich der Grundwasserleiter im Allgemeinen aus sandigen Kiesen aufbaut, Linsen von feinkörnigen und grobgeschiebe Sedimenten sind jedoch nicht auszuschließen (Riedmüller 1983). Da der Grundwasserleiter im Wesentlichen homogen aufgebaut ist und keine Daten zur vertikalen Heterogenität der Durchlässigkeit bekannt sind, wurde ein zweidimensionales Modell für ausreichend befunden.

Die Entscheidung für ein Rechenprogramm soll aufgrund folgender Gesichtspunkte getroffen werden. Das verwendete Programm soll weit verbreitet sein, außerdem soll die Möglichkeit zur Berechnung einer Wasserbilanz und eine Verifizierung durch Vergleich mit analytischen Lösungen bestehen (Anderson et al. 2015).

Für diese Arbeit wurde das Programm PMWIN (Processing Modflow für Windows, Version 5.3.1) (Chiang und Kinzelbach 2001) gewählt, PMWIN basiert auf dem Finite-Differenzen-Grundwassermodell MODFLOW. Für MODFLOW treffen die oben angeführten Kriterien zu.

4.1 Modflow – PMWIN

MODFLOW ist ein Finite-Differenzen Grundwassermodell, die Simulation der Grundwasserströmung verwendet einen blockzentrierten Finite-Differenzen Ansatz. MODFLOW ist in der Lage sowohl drei- als auch zweidimensionale Grundwassermodelle für gespannte und ungespannte Grundwasserleiter zu erstellen. Zudem können die Wechselwirkungen mit externen Einflüssen, wie Brunnen, flächiger Grundwasserneubildung, Evapotranspiration, Entnahmen und Flüssen simuliert werden (Harbaugh 2005). Als grafische Nutzerschnittstelle wurde das von Chiang und Kinzelbach entwickelte Programm Processing Modflow for Windows (PMWIN) in der Version 5.3.1 verwendet. PMWIN arbeitet mit dem Hauptpaket MODFLOW-96 und bietet eine Schnittstelle zwischen weiteren enthaltenen Paketen z.B.: PMPATH, MT3D, MT3DMS, MOC3D, PEST and UCODE. Mittels PMWIN können DXF- und Rasterdateien importiert werden, es können Modelle mit 1000 stress periods, 80 layers, 250.000 cells in jedem Modellayer erstellt werden. Abbildung 9 zeigt eine grafische darstellung der räumlichen Diskretisierung eines Aquifersystems in Reihen, Spalten und Layer (Chiang und Kinzelbach 1998).

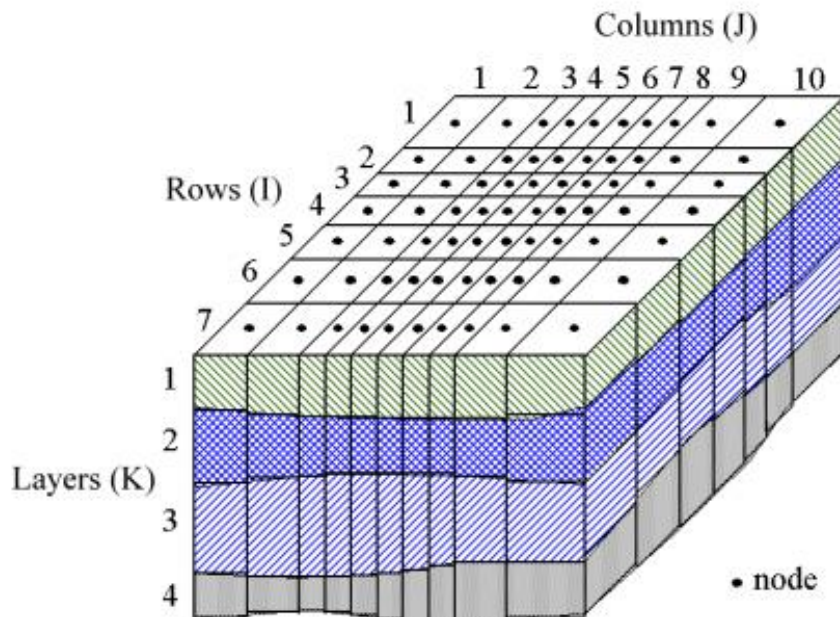


Abbildung 8: Räumliche Diskretisierung eines Grundwasserleiters (Chiang und Kinzelbach 2001)

4.2 Stationäres Strömungsmodell

4.2.1 Abgrenzung des Modellgebiets

Die Abgrenzung des Modellgebiets ergab sich aufgrund der Morphologie und der Lage des Gebietes. Im Osten wird der Aquifer durch den Festgesteinsrahmen des umliegenden Berglands begrenzt. Im Osten geht ein Zustrom aus dem verkarsteten Tannebenstock in das Modell als Randbedingung ein. Der südliche Talrand hingegen besteht aus Gesteinen der Tonschieferserie, diese Schiefer gelten als nicht durchlässig, mit Ausnahme von Kluftflächen und Kontaktflächen (Geotechnisches Institut AG 1983).

Die übrigen Modellgebietsgrenzen wurden aufgrund der hydrogeologischen Gegebenheiten definiert. Im Nordwesten wurde die Mur als natürliche Begrenzung des regionalen Grundwasserströmungssystems verwendet und, als Randbedingung der dritten Art, im Modell repräsentiert.

Im südlichen Bereich der Mur, ab der Hammerbacheinmündung, wurde im Zuge des Kraftwerksbaus die Rückstauzone des Kraftwerks Friesach/Deutschfreistritz hydraulisch vom Grundwasserleiter getrennt.

C. Buchegger

Dies wird durch die Grundwasserstände im Bereich Hinterberg untermauert. Die Grundwasserstände sind in diesem Bereich höher als die Murpegelstände. Hierfür wurde die general head boundary (GHB) als Randbedingung dritter Art herangezogen. Die general head boundary repräsentiert in diesem Modell einen weit entfernten Rand.

Als Modellgrenze im Norden wurde aufgrund der Talenge und der Mur ein Festpotentialrand angenommen. Dies begründet sich in der Annahme, dass die Mur in einem derart engen Tal der dominierende Parameter ist. Die Abgrenzung des Modellgebiets ist in Abbildung 2 (Abschnitt 2.1) dargestellt.

4.2.2 Aufbau des Modellgitters

Über das Untersuchungsgebiet wurde ein Raster mit 550 Zeilen (rows) und 300 Spalten (columns) gelegt. Als Bezugssystem wurde das Web Mercator Koordinatensystem gewählt. Um den Talrand des Tannebenstock parallel zum Modellgitter zu setzen, wurde das Modellgitter um 8° gegen den Uhrzeigersinn, gegenüber dem Koordinatensystem gedreht. Die Koordinaten der linken oberen Ecke (Rechtswert 1706800, Hochwert 5978280) und der Winkel der Drehung ergeben die genaue Lage des Modellgitters.

Da bei dieser Zellenanzahl die Hardware nicht der beschränkende Faktor ist und die Ausdehnung des Untersuchungsgebiets überschaubar ist, wurde die Zellweite mit 10 m x 10 m gewählt. Somit war keine Verfeinerung der Diskretisierung notwendig, da dies mit einer numerischen Ungenauigkeit an den Zellenübergängen verbunden ist.

Aufgrund der Bohrungen des Kraftwerkbaus Deutschfreistritz (1983) und der refraktionsseismischen Untersuchungen von Weber (1969), kann von einem vertikal homogenen Grundwasserleiter über die gesamte Aquifermächtigkeit ausgegangen werden. Der Grundwasserleiter ist über die gesamte Mächtigkeit aus sandigen Kiesen aufgebaut.

4.2.3 Definition der Randbedingungen

Nach Festlegung der Art der Randbedingungen müssen die jeweiligen Parameter an den Modellrändern ermittelt und in das Modell übertragen werden. Für den Aufbau des stationären Strömungsmodells werden folgende Daten benötigt:

C. Buchegger

- Tiefe des Grundwasserstauers (BOL)
- Süd- und Ostgrenze (Undurchlässiger Rand)
- Grundwasserneubildung aus Niederschlag
- Wasseraustausch mit Oberflächengewässer
- Entnahmen durch Brunnen
- Randzuflüsse bzw. Abflüsse
- weit entfernter Rand (GHB)
- Festpotential Rand im Norden

Die Schnittmenge der gesammelten Daten liegt im Zeitraum von 2010-2014, für den Aufbau des stationären Modells wurden Mittelwerte des gewählten Zeitraums berechnet und in das Modell eingegeben. Die zuvor genannten Parameter müssen für viele im Untersuchungsgebiet gelegenen Zellen bestimmt werden. Dies ist problemlos möglich, wenn die Daten für alle Zellen des Modells identisch sind, etwa bei der Grundwasserneubildung aus Niederschlag. Ebenso unproblematisch sind punktuelle Daten wie Entnahmen durch Brunnen oder Randzufluss. Aufwendiger hingegen ist die Eingabe von räumlich differenzierten Daten wie z.B. die Tiefe des Grundwasserstauers.

4.2.4 Tiefe des Grundwasserstauers (BOL) und Geländeoberkante (GOK)

Zur Übertragung der punktuellen Daten der Tiefe des Grundwasserstauers auf das Raster, wurden die Datenpunkte interpoliert. Das im PMWIN integrierte Programm PMDIS wurde zur Interpolation der punktuellen Daten verwendet. Der FieldInterpolator (PMDIS) stellt unterschiedliche Interpolationsmethoden zur Verfügung.

Es wurde während des Modellaufbaus die Interpolationsmethode nach Shepard (Shepard's inverse distance) und Kriging zur Reproduktion des Grundwasserstauers getestet. Beide lieferten plausible, nur marginal unterschiedliche Ergebnisse. Da beide Verfahren plausible Werte lieferten, Kriging hingegen gebräuchlicher und erprobter ist, wurde es für die Interpolationen verwendet. Neben dem verwendeten Krigingverfahren stehen weiters Verfahren von Shepard, Akima und Renka zur Verfügung. Zur Beurteilung von Interpolationsmethoden werden die Genauigkeit der Methode eine bekannte Oberfläche wiederzugeben, sowie visuelle Aspekte als bedeutendste Kriterien gesehen.

Die Subjektivität der Begutachtung des Interpolationsergebnisses, steht oftmals in Relation zur Genauigkeit der Methodik (Birk 1998).

Im nördlichen Bereich des Modellgebiets waren nur wenige Datenpunkte hinsichtlich der Tiefe des Stauers bekannt, dahingehend musste die Oberfläche des Grundwasserstauers (BOL) in diesem Bereich genau geprüft werden und daraufhin manuell korrigiert werden. Zur Korrektur in diesem Bereich wurden die in der Literatur (Weber 1969) erwähnte und in den interpolierten Daten ersichtliche Tiefenrinne Richtung Talenge bzw. Norden verlängert.

Die Korrektur des Talrands erfolgte mit zusätzlichen Punkten außerhalb des Modellgebiets jedoch im Nahbereich der berechneten Zellen. Für diese zusätzlichen Datenpunkte wurde die Annahme getroffen bzw. auch teilweise durch die Geologie bestätigt, dass in diesen Bereichen der Grundwasserstauer (Festgestein) an die Oberfläche tritt. Diese zusätzlichen Punkte wurden benötigt, um eine Abflachung des Grundwasserkörpers in Richtung Talrand darzustellen. Abbildung 9 zeigt die manuell korrigierte Grundwasserstauerkarte (BOL).

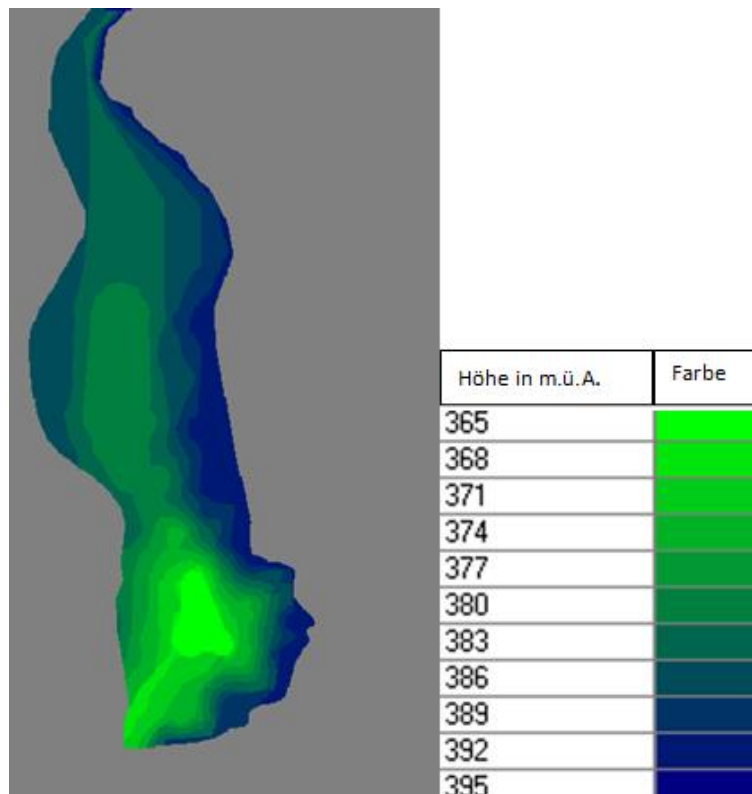


Abbildung 9: Abbildung des korrigierten Grundwasserstauers BOL, mit Höhen m.ü.A

Neben dem Grundwasserstauer wurde ebenfalls die Geländeoberkante interpoliert. Die Beurteilung der Genauigkeit der interpolierten Geländeoberkante wurde vernachlässigt. Die Beurteilung konnte unterbleiben, da es sich um einen ungespannten Grundwasserleiter handelt und die Grundwasserneubildung aus Niederschlag (Recharge) direkt eingegeben wird.

4.2.5 Wechselwirkung Oberflächengewässer (river-package)

Die Mur agiert ab der Talenge im nördlichen Bereich des Untersuchungsgebietes bis zur Einmündung des Hammerbaches als Randbedingung. In Abbildung 10 ist die Mur hellblau am linken Rand (westlich) des Untersuchungsgebiets dargestellt. Da an der Mur, im Bereich des Untersuchungsgebietes, nur Pegelmessstellen im Ober- und Unterstrombereich der Kraftwerke vorhanden sind, wurde der Mittelwert der Wasserstände des Kraftwerk Peggau für den Zeitraum 2010-2014 als Datengrundlage für das stationäre Modell herangezogen. Im nördlichen Bereich wurden die Pegelstände anhand der durchschnittlichen Steigung der Mur im Bereich des Untersuchungsgebiets korreliert. Daraufhin wurden diese Höhen mit den Höhen des digitalen Geländemodells des Digitalen Atlas Steiermark verglichen. Da die Höhen im Bereich des Kraftwerk Peggau mit den gemessenen Pegelständen übereinstimmen, wurde die Annahme getroffen, dass dies im nördlichen Bereich ebenfalls zutrifft.

Weiters wurden die im Untersuchungsgebiet befindlichen drei Bäche, von Norden beginnend Schmelzbach, Hammerbach und Mitterbach in das Modell integriert (Abb.:10). Es wurden die mittleren Abflüsse für die Berechnung der Wasserstände herangezogen.

Die Abdichtung der Mur, sowie der Bäche gegenüber dem Grundwasserleiter wird durch den Leakagefaktor angegeben. Der Leakagefaktor beschreibt den Zusammenhang zwischen den Durchlässigkeiten und Mächtigkeiten der kolmatierten Schicht des Gerinnes, sowie des Aquifers. Da keine Daten der Mächtigkeiten bzw. Durchlässigkeiten der kolmatierten Schichten vorhanden sind, wurden Werte aus der Literatur als Initialwerte übernommen.

Die Leakagefaktoren haben einen großen Wertebereich vergleichbar mit denen der Durchlässigkeitsbeiwerte. Zur Orientierung ist eine Spannweite von $1 \cdot 10^{-4}$ bis $5 \cdot 10^{-8}$ m²/s angegeben (Höiting und Coldewey 2009), die Spannweite kann auch unter- oder überschritten werden. Als Initialwert wurde ein Leakagefaktor von $1,00 \cdot 10^{-3}$ m²/s angenommen.

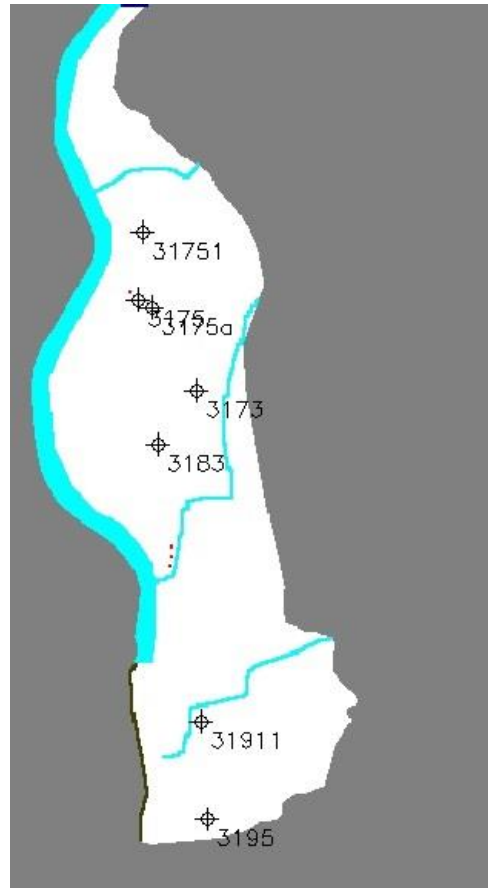


Abbildung 10: Modellaufbau Positionen der Observationsbrunnen, Fluss, GHB, Brunnen

4.2.6 Grundwasserabstrom

Im Bericht der Voruntersuchung des Kraftwerkbaus Deutschfeistritz (Geotechnisches Institut AG 1983) wurde empfohlen die Mur im Oberlauf des Kraftwerks gegenüber dem Grundwasserkörper abzudichten. Dies wird ebenfalls durch die Tatsache gestützt, dass die Murwasserstände im Oberlauf des Kraftwerks höher sind als die Grundwasserstände im Nahbereich des Oberlaufs des Kraftwerks. Die Abdichtung der Mur sollte bis kurz vor die Mündung des Hammerbachs erfolgen (Geotechnisches Institut AG 1983), aus diesem Grund wurde die Mur im Modellaufbau nur bis zum Hammerbach implementiert (siehe Abb.: 10). Aufgrund der Abdichtung der Mur unterströmt das Grundwasser die abgedichtete Mur und fließt im Unterlauf des Kraftwerks wieder in die Mur.

Dieser „weit entfernte“ Rand wird durch die General Head Boundary repräsentiert, die General Head Boundary ist in der Abbildung 10 grünlich-braun dargestellt. Der Wasserstand dieses weit entfernten Randes muss genau bekannt sein. Die hydraulische Leitfähigkeit zwischen der Modellgrenze (perimeter boundary) und der physikalischen Grenze

C. Buchegger

(unterstromig Kraftwerk Deutschfreistritz/Friesach) wird im Zuge der Kalibrierung angepasst. Die Grenze ist durch den Wasserstand an ein physikalisches Merkmal gebunden, ohne dass das Modellgitter bis zur physikalischen Grenze ausgeweitet werden muss.

Für das stationäre Modell wurde der Wasserstand wie folgt definiert, es wurde der Mittelwert des Murpegels Kraftwerk Deutschfreistritz/Friesach Unterlauf für die zuvor definierte Zeitspanne von 2010-2014 gebildet.

4.2.7 Entnahmebrunnen

Im Bereich des Untersuchungsgebiets befinden sich mehrere Grundwasserentnahmebrunnen, in das Modell wurden nur die Entnahmebrunnen implementiert, die für das Modell relevant sind. Die Entnahmebrunnen sind mit roten Zellen (Abb.: 10) dargestellt. Die privaten Kleinbrunnen wurden nicht berücksichtigt, die Datenbeschaffung der Privatbrunnen ist nur bedingt möglich bzw. ist die Aufzeichnung der Entnahmen mangelhaft. Die Entnahmemengen der Privatbrunnen ist zudem so gering, dass sie nicht von Relevanz für das Modell sind (Geotechnisches Institut AG 1983). Für das stationäre Modell wurden die durchschnittlichen Pumpraten der Grundwasserentnahmebrunnen (siehe Tabelle 2) angenommen.

Tabelle 2: Pumpraten der Grundwasserentnahmebrunnen

Grundwasserentnahmebrunnen		
ID	durchschn. Pumprate [l/s]	Gesamtkonsens [l/s]
Wasserversorgung der Marktgemeinde Peggau	4,11	27,5
Holding Graz Br.1	2,71	Gesamtkonsens der Brunnen 40 l/s und vierteljährlich eine Woche zusätzlich 50 l/s
Holding Graz Br.2	2,35	
Holding Graz Br.3	2,96	
Sager Transportbeton GmbH	-	4,50

4.2.8 Festpotential

Das Modellgebiet wird im Norden im Bereich einer Talenge durch ein Festpotential begrenzt. Da sich in diesem Bereich des Modellgebiets keine Grundwassermessstellen befinden und somit kein Grundwasserstand für das Festpotential herangezogen werden kann, wird die Annahme getroffen, dass in einem engen Tal der Fluss der dominierende Einflussfaktor ist, somit wird der Grundwasserstand dem Murwasserstand gleichgesetzt. Der Festpotentialrand ist im nördlichen Bereich des Modellgebiets als dunkelblaue Zellen dargestellt (Abb.: 10).

4.2.9 GW Neubildung durch Niederschlag

Die Grundwasserneubildung des Modellgebiets wurde aufgrund der einheitlichen Tallage und der geringen Ausdehnung des Untersuchungsgebietes als homogen angenommen. Es werden für die Berechnung der Grundwasserneubildung die Niederschlagsmengen der Messstelle Eichberg herangezogen. Der jährliche gemittelte Niederschlag der Jahre 2010-2014 beträgt 865 mm/y, abzüglich der ETR von 595mm/y ergibt dies eine Grundwasserneubildung für das stationäre Modell von 258mm/y.

4.2.10 Randzuflüsse und Abflüsse

Im Nahbereich des Ursprungs des Hammerbach wurde ein Randzufluss implementiert, diese Annahme stützt sich auf den, von Benischke und Harum (1994) und Behrens et al. (1992) erwähnten, möglichen unterirdischen Zufluss vom Tannebenstock in den alluvialen Aquifer. Dieser mögliche Zufluss ist laut diesen Autoren auf maximal 50 l/s begrenzt.

4.2.11 Aquiferkenngrößen – Durchlässigkeitsbeiwert

Im Bereich des Untersuchungsgebiets wurden im Rahmen des Kraftwerksbaus, sowie weiteren später realisierten Projekten (hydrothermale Nutzung bzw. Trinkwasserbrunnen), Pumpversuche ausgeführt. Die Bandbreite der Durchlässigkeitsbeiwerte reicht von $4,02 \cdot 10^{-3}$ m/s bis $4,31 \cdot 10^{-4}$ m/s (Tabelle. 3).

Tabelle 3: Grundwasserentnahmestellen und Pumpraten

Pumpversuche	
ID	Kf-Wert [m/s]
Holding Graz Br.1	$5,78 \cdot 10^{-4}$
Holding Graz Br.2	$4,31 \cdot 10^{-4}$
Holding Graz Br.3	$1,06 \cdot 10^{-4}$
Hochhuber Immo	$4,02 \cdot 10^{-3}$
PS Projektentw. (4833)	$1,60 \cdot 10^{-3}$
PS Projektentw. (4911)	$4,60 \cdot 10^{-4}$
Sager Philipp	$2,70 \cdot 10^{-3}$
Brunnen Peggau	$8,60 \cdot 10^{-4}$

C. Buchegger

Für den Modellaufbau wurden drei Zonen mit unterschiedlichen Durchlässigkeitsbeiwerten fixiert, Abbildung 11 zeigt die Zonierung der Durchlässigkeitsbeiwerte. Diese wurden in drei unterschiedliche Zonen (blau, dunkelgrün und grün) eingeteilt, die Tiefenrinne wurde wie im Kapitel 2 beschrieben, berücksichtigt.

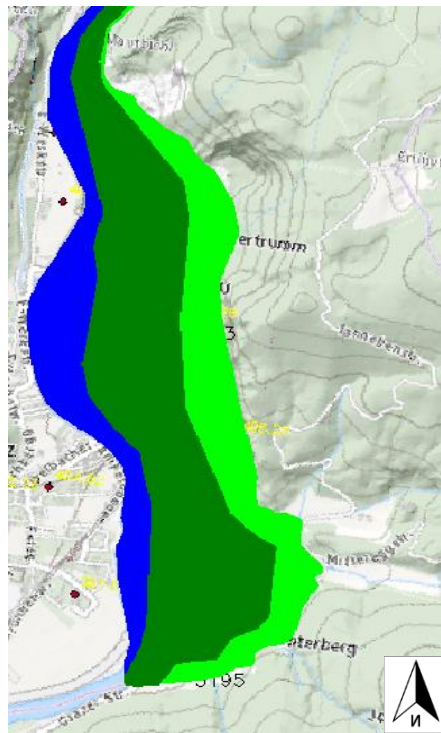


Abbildung 11: Einteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte in drei unterschiedliche Zonen

4.3 Instationäres Modell

Der wesentliche Unterschied zwischen dem stationären Modell und dem instationären Modell ist, dass das instationäre Modell nicht nur einen Zeitschritt besitzt für dem die Wasserstände berechnet werden, es werden zusätzlich die einzelnen Daten den jeweiligen Zeitschritten zugeordnet. Beim stationären Modell werden hingegen Mittelwerte für die Berechnung der Grundwasserstände herangezogen. Das instationäre Modell ist in mehr oder weniger viele Zeitschritte (je nach Auflösung) eingeteilt. In diesem Kapitel werden die durch den Faktor Zeit veränderlichen Parameter diskutiert.

Zudem müssen für das instationäre Modell die Anfangsbedingungen festgelegt werden, die Anfangsbedingungen des instationären Modells sind die berechneten Wasserspiegel des kalibrierten stationären Modells.

Das vorliegende instationäre Modell wurde in monatlichen Zeitschritten angelegt, die Zeitreihe startet mit Jänner 2010 und endet mit Dezember 2014, dies ergibt 60 Monate. Wobei jeder Monat fünf Zeitschritte (timesteps) besitzt.

4.3.1 Wechselwirkung Oberflächengewässer

Für das instationäre Modell wurden die monatlichen Mittelwerte der Jahre 2010-2014 verwendet. Es wurde für das instationäre Modell (wie bei dem stationären Modell) der Pegel Unterwasser Kraftwerk Peggau verwendet, um die Grundwasserstände zu berechnen. Die Wasserstände der Mur im nördlichen Bereich wurden, wie beim stationären Modell, mit den gemessenen Pegeldaten korreliert. Der Leakagefaktor wurde im instationären Modell nicht mehr kalibriert bzw. verändert, der Leakagefaktor entspricht in jedem Zeitschritt dem Wert des stationären Modells.

4.3.2 Grundwasserabstrom (general head boundary)

Für die general head boundary wurden die unterstromigen Murpegelstände des Kraftwerks Deutschfreistritz/Friesach für den Zeitabschnitt 2010-2014 verwendet. Hierfür wurden ebenfalls die Monatsmittelwerte der Pegel herangezogen, um das instationäre Modell abzubilden.

4.3.3 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildungsdaten des instationären Modells wurden mit einer monatlichen Auflösung von 2010-2014 eingegeben. Für das Bodenwasserbilanzmodell wurde das Jahr 2009 ebenfalls berechnet, um einen plausiblen Sättigungsgrad des Bodens zu Beginn des Modelllaufs zu erhalten.

4.3.4 Entnahmebrunnen

Für die Entnahmebrunnen der Holding Graz wurden die Pumpraten ab 2010 in einer täglichen Auflösung in monatliche Mittelwerte umgerechnet und in das instationäre Modell integriert. Da für die anderen Entnahmebrunnen keine zeitabhängigen Daten bzw. für den gewählten Zeitraum nur unvollständige Daten vorhanden waren, wurde bei dem Brunnen Sager Philipp (Schotterwerk) der maximale Konsens für das Modell angenommen. Für den Entnahmebrunnen der Wasserversorgung Peggau waren monatliche Pumpraten für die Jahre 2014-2016 vorhanden. Da das Bevölkerungswachstum der Gemeinde Peggau für den Zeitabschnitt von 2011-2016 nur 1,85 % (Quelle: Statistik Austria) betrug wurde die Annahme getroffen, dass die vorhanden Pumpraten nahezu dem Bedarf von 2010-2014 entsprechen. Es wurden die Mittelwerte der monatlichen Entnahmen der Jahre 2014-2016 für das Modell herangezogen. Somit wurden für die Jahre 2010-2013 die Mittelwerte herangezogen, für das Jahr 2014 waren zeitbezogene Daten vorhanden.

Für die drei Vertikalfilterbrunnen der Holding Graz steht eine genaue Aufzeichnung der Pumpraten in einer täglichen Auflösung für den Zeitraum von 2010-2014 zur Verfügung. Diese wurden direkt in das instationäre Modell implementiert.

4.3.5 Observationsbrunnen

Im Bereich des Modellgebiets befinden bzw. befanden sich insgesamt 9 Grundwassermessstellen, davon wurden jedoch einige wieder aufgelassen bzw. wurden erst nach 2010 errichtet. Dadurch ergeben sich lückenlose detaillierte Grundwassermessungen für den Zeitraum Jänner 2010 bis Dezember 2014 für vier Grundwasserpegel. Diese lauten wie folgt, Pegel 31751, 3173, 3183, 31911 und befinden sich verteilt über das gesamte Untersuchungsgebiet. Diese Pegel sind in Abbildung 10 als schwarzer Kreis mit einem Kreuz dargestellt. Für den südlichsten Pegel 3195 existieren lückenlose Daten ab Mai 2011 und zwei einzelne Messungen für Mai und Sept 2010. Für eine bessere Abdeckung des mittleren Bereichs des Untersuchungsgebiets wurden die Grundwasserpegel 3175 und 3175a

C. Buchegger

implementiert, die Datenreihen dieser beiden Pegel reichen bis 1986 bzw. 2003. Im Vergleich zu den Grundwasserpegel mit den lückenlosen Grundwasserständen weichen die langjährigen Mittelwerte um maximal 0,30 m ab. Die Grundwasserpegel 3191 und 3195a sind die aufgelassenen Pegel, der nahezu an der gleichen Stelle errichteten, Nachfolger Pegel 31911 und 3195. Zudem sind Daten der Vorgängergrundwasserpegel nicht in dem gewählten Zeitabschnitt.

Tabelle 4: Grundwassermessstellen

Grundwassermessstellen im Untersuchungsgebiet			
ID	Bezeichnung	MSD stat. Modell [m.ü.A.]	Bemerkung Datensatz
1	3195	393,73	2010 – Werte angepasst
2	31911	394,40	lückenlos
3	3183	395,98	lückenlos
4	3173	396,11	lückenlos
5	31751	396,77	lückenlos
6	3175	396,49	langjähriges monatliches Mittel
7	3175a	396,49	langjähriges monatliches Mittel

4.3.6 Speichernutzbare Porosität

Die speichernutzbare Porosität ist das Verhältnis des Wasservolumens eines gesättigten Mediums, welches durch Gravitation entleert werden kann, und dem Gesamtvolumen des Mediums. Der Speicherkoeffizient entspricht in einem ungespannten Grundwasserleiter der speichernutzbaren Porosität (Hölting und Coldewey 2009; Fetter 2018).

Die speichernutzbare Porosität des instationären Modells wurde nicht zониert, es wurde ein Wert für das gesamte Modellgebiet gewählt. Als Initialwert wurde die ungefähre Mitte der Werte zwischen dem Minimum von feinem Sand (10%) und dem Maximum von kiesigem Sand (35%) laut Johnson (Johnson 1967) gewählt, es wurden 20% als Initialwert angenommen.

5 Kalibrierung

5.1 Modellkalibrierung

Die Modellkalibrierung hat das Ziel unbekannte bzw. nur lückenhaft bekannte Modellparameter wie unter anderem Leakagefaktor, hydraulische Durchlässigkeit und die Durchlässigkeit der GHB in Erfahrung zu bringen. Vor allem die Datenlage im Bereich der Aquiferparameter ist meistens lückenhaft, da die Erkundungen nur lokal bzw. punktuell erfolgen und mit einem hohen Kostenaufwand verbunden sind. Somit verbleibt immer eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich der Verteilung der Aquiferparameter (Schäfer 2010). Durch die Modellkalibrierung soll die, zuvor erwähnte, ungenügende Datenlage im Bereich der Aquiferparameter verbessert werden. Hierfür werden im Zuge des Kalibrierungsvorgangs die gemessenen Piezometerhöhen mit den berechneten Piezometerhöhen verglichen und die Parameter innerhalb plausibler Grenzen variiert. Eine möglichst geringe Varianz zwischen gemessenen und berechneten Piezometerhöhen zeigt, dass das Modell mit dem natürlichen hydrologischen System so gut wie möglich übereinstimmt. Die Modellkalibrierung wurde mit dem Programm PEST vollzogen.

Die Qualität eines kalibrierten Modells wird als gut erachtet, wenn die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung zwischen den berechneten und gemessenen Piezometerhöhen im Verhältnis zum Gesamtgrundwassergefälle möglichst gering gehalten wird (Anderson et al. 2015). Da es bis heute keinen Standard für die Beurteilung der Modellkalibrierung gibt, ist es zuletzt eine subjektive Entscheidung. Die Varianz der berechneten und gemessenen Werte wird unter Anwendung der gängigen Formel bestimmt (Kinzelbach und Rausch 1995):

$$MQA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_i^g - h_i^b)^2 \quad (5.1)$$

mit

MQA = mittlere quadratische Abweichungssumme

n = Anzahl der Messwerte

h^b = berechnete Piezometerhöhe

h^g = gemessene Piezometerhöhe

Bei der Eichung eines numerischen Grundwasserströmungsmodells besteht die grundlegende Problematik in der Mehrdeutigkeit der Lösung. Wie oben erwähnt sind die Parameter in einem hydrologischen System oft nur unzureichend bekannt. Im Sinne einer möglichst genauen Kalibrierung soll die Anzahl der zu eichenden Parameter auf ein Minimum reduziert werden. Jedenfalls soll die Anzahl der zu kalibrierenden Parameter kleiner sein, als die Anzahl der verwendeten Messtellen (Kinzelbach und Rausch 1995).

Der Ablauf der Modellierung war wie folgt, auf den stationären Modellaufbau folgte eine Kalibrierung der Parameter nach dem das, subjektiv gesehen, beste Ergebnis erreicht wurde. Im Anschluss wurde mit dem instationären Modellaufbau anhand der stationären Kalibrierung begonnen, daraufhin folgte die instationäre Kalibrierung. Zur Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells wurden sieben Observationsbrunnen herangezogen (Tabelle 4).

5.2 Stationäres Modell – Kalibrierung, Wasserbilanz, Sensitivitätsanalyse

Nach dem Aufbau des stationären Modells wurden die unzureichend bekannten Parameter kalibriert, naturgemäß handelt es sich bei den unbekannt Parametern um Kenngrößen des Untergrunds zum Beispiel Aquiferkenngrößen, unterirdische Randzuflüsse und so weiter.

Das stationäre Modell wurde zu Beginn ohne die drei Bäche Schmelzbach, Hammerbach und Mitterbach aufgebaut. Der zuvor erwähnte Randzufluss wurde daraufhin über fünf Zellen verteilt im Nahbereich des Hammerbachs eingefügt. Im Laufe der Kalibrierung zeigte sich, dass das Modell im Nahbereich des Hammerbachs schlecht angepasst ist, sprich die Grundwasserstände der Observationsbrunnen zu hoch waren. Daraufhin wurde der Randzufluss kalibriert, es zeigte sich, dass der Randzufluss sehr gering oder nicht vorhanden ist. Generell ist zu erwähnen, dass die Unsicherheiten bezüglich unterirdischen Randzuflüssen nur schwer zu belegen bzw. zu widerlegen sind. Da sich am Rand des Untersuchungsgebiets keine Grundwassermessstellen befinden, neigt der Rand generell dazu ungenau zu werden. Daraufhin wurde die Entscheidung getroffen, dass der Randzufluss, aufgrund der geringen Schüttung, nicht in das Modell integriert wird.

Es wurden die General Head Boundary (weit entfernter Rand), sowie die drei Zonen der Durchlässigkeitsbeiwerte und der Leakagefaktor der Mur, des Schmelzbachs, Hammerbachs und Mitterbachs kalibriert. Die Variation des Leakagefaktors des Mitterbachs und des

C. Buchegger

Hammerbachs zeigte, dass diese keine Auswirkung auf das Strömungsmodell hat. Daraufhin wurden diese beiden Parameter aus der darauffolgenden Kalibrierung entfernt. Die Durchlässigkeitsbeiwerte des Grundwasserleiters sind durch punktuelle Messungen mittels Pumpversuchen annähernd bekannt, jedoch ist mit einer gewissen Schwankungsbreite zu rechnen. Zu den Durchlässigkeiten der Bäche und Flüsse liegen keine Messdaten vor. Jedoch wurde in der zuvor erwähnten Geländebegehung die Durchlässigkeit der Sedimentschicht abgeschätzt, um einen Initialwert für die Kalibrierung zu erhalten. Da es sich bei der GHB um eine Annahme bzw. Vereinfachung des Modells handelt, gibt es auch hier keine Messungen bezüglich des Leakagefaktors.

Tabelle 5: Liste der Kalibrierungsparameter

Kalibrierung des stationären Grundwassermodells (mittels PEST)				
ID (Nr.)	Parameter	Initialwert	Untere Grenze	Obere Grenze
7	Durchlässigkeit Zone 1 (blau)	$1,00 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	$1,00 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	$1,00 \cdot 10^{-1} \text{ m/s}$
8	Durchlässigkeit Zone 2 (dunkelgrün)	$1,00 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	$1,00 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	$1,00 \cdot 10^{-1} \text{ m/s}$
9	Durchlässigkeit Zone 3 (hellgrün)	$1,00 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$	$1,00 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	$1,00 \cdot 10^{-1} \text{ m/s}$
10	Mur Leakage Nord	$1,00 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,00 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,00 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
11	GHB	$1,00 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,00 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,00 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
12	Schmelzbach	$1,00 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,00 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,00 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$
13	Hammerbach	$1,00 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,00 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$	$1,00 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

C. Buchegger

Tabelle 6: Entnahmebrunnen Kf-Werte Gegenüberstellung mit kalibrierten Werten

Gegenüberstellung Kf-Werte Pumpversuche vs. Kalibrierparameter				
Nr. (Abb.: 13)	ID	Kf-Wert [m/s]	Zone (Abb. 9)	Kf-Wert kalibriert [m/s]
1	Holding Graz Br.1	$5,78 \cdot 10^{-4}$	dunkelgrün	$8,67 \cdot 10^{-4}$
2	Holding Graz Br.2	$4,31 \cdot 10^{-4}$	dunkelgrün	$8,67 \cdot 10^{-4}$
3	Holding Graz Br.3	$1,06 \cdot 10^{-3}$	dunkelgrün	$8,67 \cdot 10^{-4}$
4	Hochhuber Immo	$4,02 \cdot 10^{-3}$	blau	$3,02 \cdot 10^{-4}$
5	PS Projektentw. (4833)	$1,60 \cdot 10^{-3}$	dunkelgrün	$8,67 \cdot 10^{-4}$
6	PS Projektentw. (4911)	$4,60 \cdot 10^{-4}$	hellgrün	$3,13 \cdot 10^{-4}$
7	Sager Philipp	$2,70 \cdot 10^{-3}$	blau	$3,02 \cdot 10^{-4}$
8	Brunnen Peggau	$8,60 \cdot 10^{-4}$	blau/hellgrün	$3,02 \cdot 10^{-4}$ & $3,13 \cdot 10^{-4}$

Beim Vergleich der Durchlässigkeitswerte der Pumpversuche mit den kalibrierten Werten (Tabelle: 4), zeigten sich leichte Abweichungen. Da ein Kurzpumpversuch nur eine punktuelle Momentaufnahme ist, ist mit Heterogenität und Abweichungen zu rechnen, damit lässt sich auch die Kalibrierung dieser Werte begründen. Generell weisen die Durchlässigkeitswerte der Pumpversuche eine Schwankungsbreite von $1,60 \cdot 10^{-3}$ m/s bis $8,60 \cdot 10^{-4}$ m/s auf. Die drei Zonen (Abb.: 13) weisen Werte von Zone 1 (blau): $3,02 \cdot 10^{-4}$ m/s, Zone 2 (dunkelgrün): $8,67 \cdot 10^{-4}$ m/s und Zone 3 (hellgrün): $3,13 \cdot 10^{-4}$ m/s auf. Die drei Pumpversuche der Holding Graz wurden im Zuge der Anfertigung der Vertikalfilterbrunnen durchgeführt. Hierbei zeigt sich, dass sich die Durchlässigkeitsbeiwerte der drei Pumpversuche trotz ihrer Nähe zueinander (Umkreis von 100 m) stark unterscheiden. Generell sind die Durchlässigkeitswerte der Pumpversuche, als auch die Kalibrierung im Rahmen für Schwemmsande bis Kiese und entspricht somit der in der Literatur beschriebenen Korngrößenverteilung.

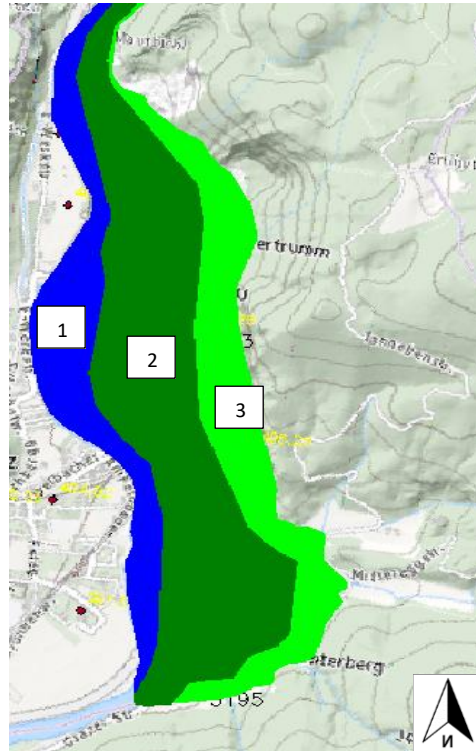


Abbildung 12: Zonierung der Kf-Werte, in Farben/Zahlen

Die Unterschiede der kalibrierten Werte und der Pumpversuche lässt sich durch die Größe des Untersuchungsgebiets und den wenigen punktuellen Pumpversuchen erklären. Ein weiterer Grund für die Abweichung der kalibrierten Werte kann auf die homogene Verteilung der Kurzpumpversuche zurückgeführt werden. Ein Großteil der Pumpversuche befindet sich im mittleren Abschnitt des Untersuchungsgebiets, genauer gesagt im stärker besiedelten Bereich der Gemeinde Peggau. Die Schwankungsbreite der Kf-Werte der Kurzpumpversuche liegt in diesem Bereich etwas über einer Zehnerpotenz. Im nördlichen Bereich, des Schotterwerks befinden sich nur zwei Brunnen 7 & 8 (Abb.: 14). Die Datenlage im südlichen Bereich des Untersuchungsgebiets ist dürftig, es stehen keine gemessenen Durchlässigkeitsbeiwerte in diesem Bereich zur Verfügung.

Die Möglichkeit die Durchlässigkeitsbeiwerte auf mehr als drei Zonen aufzuteilen, wurde aufgrund der wenigen Observationspegel (siehe Abbildung 10) als nicht zielführend angesehen. Laut (Kinzelbach und Rausch 1995) soll die Anzahl der zu eichenden Parameter auf ein Minimum reduziert werden. Zudem soll die Anzahl der zu eichenden Parameter die Anzahl der verwendeten Messtellen nicht überschreiten, daher wurde auf eine weitere Zonierung verzichtet.

C. Buchegger

Abschließend lässt sich sagen, dass die Schwankungsbereiche der Kf-Werte im typischen Bereich für die beschriebenen Lockergesteine liegen. Die beschriebenen Lockergesteine (Niederterrassenschotter) bestehen aus sandigen Kiesen. Die Orientierungswerte für Durchlässigkeitswerte liegen für Grobkies bei einer Schwankungsbreite von $5,00 \cdot 10^{-1}$ m/s bis $5,00 \cdot 10^{-3}$ m/s, für Feinsand $5,00 \cdot 10^{-4}$ m/s bis $5,00 \cdot 10^{-6}$ m/s (DIN 18130-1:1998-05; Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall 2012). Die kalibrierten Durchlässigkeitswerte unterliegen somit der natürlichen Spannweite der Korngrößen für Sande und Kiese und sind somit als plausibel zu erachten. Generell sind die Durchlässigkeitsbeiwerte als gut angepasst anzusehen.

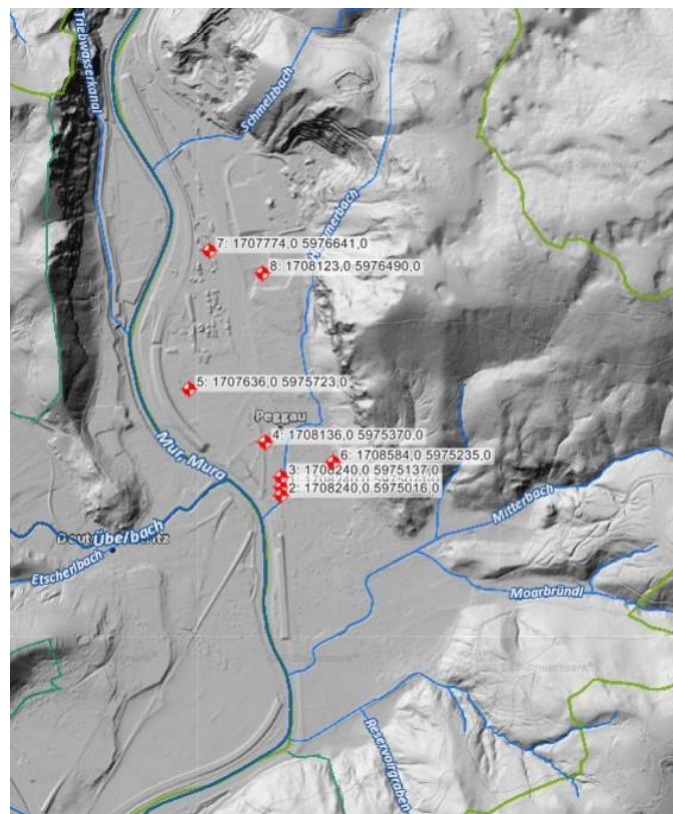


Abbildung 13: Positionen der Kurzpumpversuche mit Nummerierung

Die Interaktion der Mur mit dem Grundwasser wird durch den Leakagefaktor bestimmt. Da der Leakagefaktor durch Feldmessungen meist nur schlecht belegt ist, können sie selten auf ihre Richtigkeit geprüft werden (Himml et al. 2010). Als Initialwert wurde ein Leakagefaktor von $1,00 \cdot 10^{-4}$ m²/s angenommen. Die Mur wurde bis zur Einmündung des Hammerbachs in das Modell implementiert. Aufgrund der Abdichtung der Mur gegenüber dem Grundwasserleiter im Zuge des Kraftwerkbaus Deutschfreistritz/Friesach, diese Annahme

C. Buchegger

wird durch die Empfehlung des Berichtes von 1983 des (Geotechnisches Institut AG 1983) gestützt, zeigte sich im Laufe der Arbeit das die Grundwasserpegelstände im südlichen Bereich des Untersuchungsgebiets niedriger sind, als die Pegelstände der Mur. Dadurch wird die Annahme, dass die Mur gegenüber dem Grundwasserleiter abgedichtet ist zusätzlich untermauert. Bei der optimierten Anpassung ergab sich ein Leakagefaktor von $2,42 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Neben der Mur wurden zu Beginn ebenfalls die Leakagefaktoren der Bäche Schmelzbach, Hammerbach und Mitterbach kalibriert. Jedoch zeigte sich, dass die Variation des Leakagefaktors des Mitterbachs, keine Auswirkung auf das Modell hat, dies dürfte auf den geringen Abfluss des Baches und der anthropogenen Verbauung liegen. Daher wurde der Leakagefaktor des Mitterbachs in den darauffolgenden Kalibrierungen nicht mehr integriert, und der Leakagefaktor von $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ aus der vorangegangenen Kalibrierung als Wert implementiert. Aufgrund des hohen Leakagefaktors und des geringen Abflusses des Mitterbachs wird diesem Parameter in weiterer Sicht keine Aufmerksamkeit beigemessen.

Die Leakagefaktoren des Hammerbachs und des Schmelzbachs wurden ebenfalls kalibriert. Die vorangegangenen Kalibrierungsversuche zeigten, dass der Leakagefaktor für den Hammerbach bei $2,44 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ und für den Schmelzbach bei $2,66 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ liegt.

Für die General Head Boundary (GHB) wurde der unterstromige Pegel des Kraftwerks Friesachs, das sich südlich des Untersuchungsgebiets befindet, herangezogen. Da die GHB eine Vereinfachung bzw. eine Annahme des Modells ist und die untergrundspezifischen Parameter durch Feldversuche nur schwer nachweisbar sind, wurde der finale Wert des Leakagefaktors, wie bei den anderen Werten, mittels Trial-and-Error ermittelt. Der Initialwert des Leakagefaktors der GHB wurde durch den Wert $1,00 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ vordefiniert. Die obere Grenze wurde durch den Wert $1,00 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$, die untere Grenze durch den Wert $1,00 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ vordefiniert. Durch die Kalibrierung ergibt sich ein Wert von $6,51 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ für den Leakagefaktor der General Head Boundary.

Die Parameter der Grundwasserneubildung gelten mit der nahe gelegenen Niederschlagsmessstation (Eichberg) als gut belegt. Die Berechnung der Grundwasserneubildung erfolgte über die potentielle Evapotranspiration nach (Oudin et al. 2005) und die Berechnung der realen Evapotranspiration über ein Bodenwassermodell mittels stückweiser linearer Reduktionsfunktion. Die Entnahmemengen der im Modellgebiet

C. Buchegger

befindlichen und integrierten Brunnen wurden durch die Datenrecherche gut belegt und benötigten daher keine Kalibrierung. Ebenso gilt das Festpotential im Norden als sicher, da sich dieses an einer Talenge befindet und in engen Tälern der Vorfluter als prägender Parameter fungiert.

Die bestmögliche Anpassung der Parameter erreichte eine Standardabweichung von $8,3 \cdot 10^{-2}$ m. Die maximale Abweichung der berechneten von den gemessenen Grundwasserständen erreichte der Pegel 31911 mit einem Wert von +0,1354 m, die niedrigste Abweichung erreichten die Pegel 31751 und 3173 mit +0,036 m.

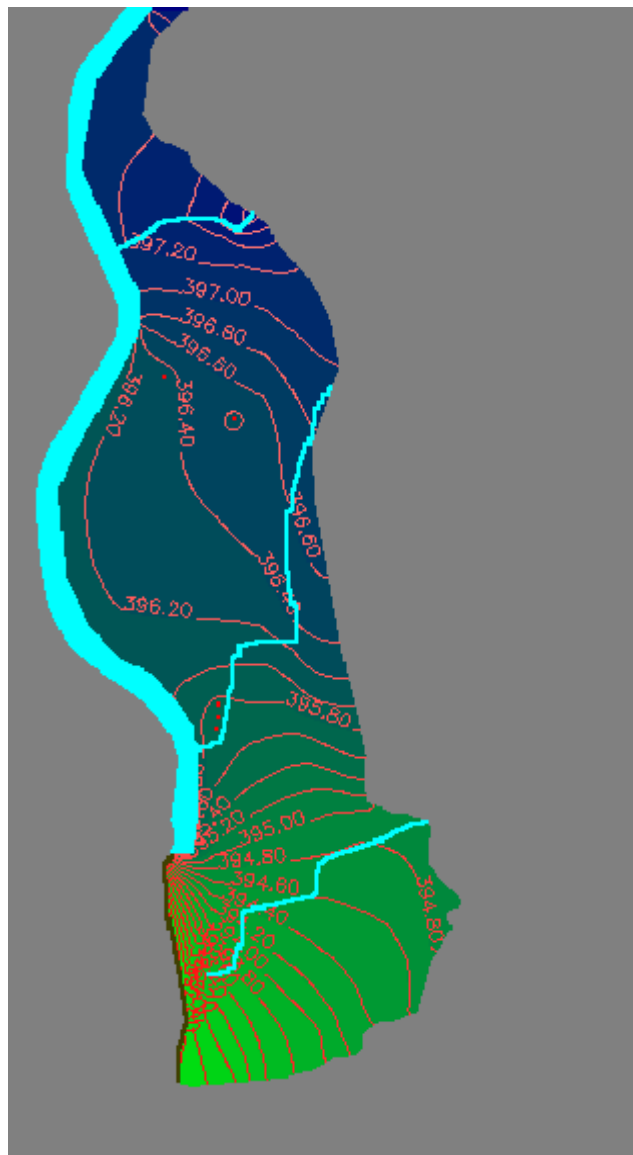


Abbildung 14: Grundwassergleichenplan der berechneten Grundwasserströmung in einer Abstufung von 0,2 m

Der Grundwassergleichenplan der berechneten Grundwasserstände wurde in Abbildung 14 dargestellt. Nördlich des Schmelzbach infiltriert die Mur in den Grundwasserkörper, das Strömungsverhältnis dreht sich unterhalb des Schmelzbaches um, es wird Wasser aus dem Grundwasserkörper exfiltriert. Kurz vor dem Hammerbach wird wieder Wasser aus der Mur in den Grundwasserkörper infiltriert. Zudem sind die infiltrierenden Bedingungen des Schmelzbachs in den Grundwasserkörper in dem Grundwassergleichenplan ersichtlich. Ebenso gut erkennbar sind die Absenktichter der Grundwasserentnahmestellen (rot dargestellt).

Um die Qualität des angepassten Grundwassermodells zu bewerten, wurde zusätzlich ein Streudiagramm erstellt (Abbildung 15). Aufgrund der kleinen Standardabweichung kann die Anpassung der Werte für das kalibrierte Modell, sowie der geringen Abweichung der Punkte von der Regressionsgeraden als gut beurteilt werden.

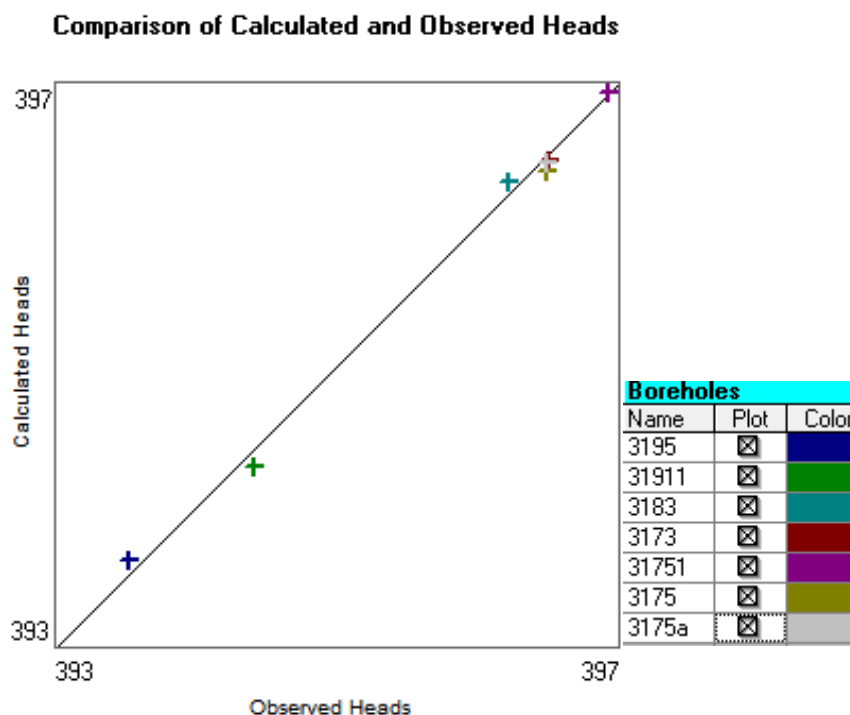


Abbildung 15: Streudiagramm (Head-Scatter diagramm) berechnete vs. gemessene Grundwasserstände

5.2.1 Sensitivitätsanalyse und Unsicherheiten

In diesem Kapitel sollen die bereits kalibrierten Parametergrößen und ihre Unsicherheit für das Modell veranschaulicht werden. Die Quantifizierung erfolgt mittels Variation der kalibrierten Parameter und Betrachtung der Auswirkungen auf die Ergebnisse. Im Kapitel 2.5 und 5.1 wurden schon gewisse Unsicherheiten erwähnt, diese Unsicherheiten müssen diskutiert werden.

Die ersten Unsicherheiten zeigten sich schon im konzeptionellen Modell, im Zuge der Datenrecherche wurden die Bohrungen im Modellgebiet ausgearbeitet, um Daten über die Tiefe des Grundwasserstauers und die Korngrößenverteilung bzw. Zusammensetzung des Untergrunds zu sammeln. Hierbei zeigte sich, dass vor allem der südliche Bereich des Modellgebiets gut durch die Bohrungen abgedeckt ist, die Datenlage jedoch in Richtung Norden immer schlechter wird. Zudem kann aus den Daten eine gewisse Heterogenität der Tiefe des Grundwasserstauers herausgelesen werden. Die Geometrie des Grundwasserstauers ist somit nicht genau definiert, sie wird nach geologisch plausiblen Maßstäben interpoliert und angepasst. Weitere Unsicherheiten werden über die Flussole bzw. die Flussgeometrie und die Murpegel eingebracht. Anhand der Bohrung zeigte sich eine annähernd homogene Zusammensetzung der Lockergesteine, jedoch ist aufgrund des fluviatilen Ablagerungsmilieus mit etwaigen Sand-, Schluff- oder Tonlagen und -linsen zu rechnen. Diese Heterogenitäten haben makroskopisch wenig Auswirkungen auf die Grundwasserströmung, mikroskopisch betrachtet sind die Auswirkungen jedoch von Bedeutung.

Bei einer Begehung wurde die Flussole gegenüber dem Wasserstand eingemessen, der Verlauf und die Breite wurde vom Orthofoto übernommen. Im Bereich des Modellgebiets existieren Murpegel nur ober- und unterstromig der Kraftwerke Peggau und Friesach/Deutschfreistritz, das entspricht drei nutzbaren Pegeln für das Modell. Die Wasserstände muraufwärts wurden anhand des Gefälles angepasst, dies verursacht ebenfalls eine gewisse Unsicherheit. Generell stellt ein Modell eine Vereinfachung der komplexen Natur dar, dahingehend müssen aufgrund der Vereinfachung dieser Komplexität Abweichungen in Kauf genommen werden.

C. Buchegger

Die eingehende Kalibrierung zeigte, dass der Durchlässigkeitsbeiwert ein einflussreicher Parameter ist, speziell die Zone 1 (blau) und Zone 2 (dunkelgrün) prägen die Grundwasserströmung des Modellgebiets. Die Variation der Durchlässigkeit der Zone 3 (hellgrün) zeigte kaum Einfluss auf das Modell, daher wird der Fokus auf die Zonen 1 und 2 gelegt. Eine Halbierung der Durchlässigkeitswerte in Zone 1 und 2 zeigte eine Verschlechterung der Standardabweichung von $0,0838 \cdot 10^{-2}$ m zu $3,587 \cdot 10^{-1}$ m. Diese ist verursacht durch ein Absinken der berechneten Grundwasserstände gegenüber den gemessenen Grundwasserständen im Süden (Pegel 3195 und 31911). Die Gegenüberstellung der Grundwasserstände der anderen Pegel zeigen hingegen einen Anstieg. Hier bewirkte eine Halbierung der Durchlässigkeitsbeiwerte einen Anstieg der berechneten Grundwasserstände gegenüber den gemessenen Grundwasserständen. Die Gegenüberstellung der gemessenen mit berechneten Werten des Pegels 3175 zeigt, dass die Halbierung des Durchlässigkeitsbeiwerts eine Verbesserung der Anpassung um den Faktor 7,5 bringt. Bei einer Erhöhung der Durchlässigkeitsbeiwerte um das Doppelte zeigte sich ein gegenteiliger Effekt. Die Verdopplung bewirkte eine Verschlechterung der Standardabweichung von $8,389 \cdot 10^{-2}$ m zu $4,005 \cdot 10^{-1}$ m. Die Grundwasserstände im Süden (Pegel 3195 und 31911) wiesen höhere Werte auf als die gemessenen, die restlichen Pegel hingegen wiesen niedrigere Grundwasserstände auf als die gemessenen. Bei der Verdopplung der Durchlässigkeit zeigt sich, eine bessere Anpassung um den Faktor 3,6 an den Pegel 3183.

Die größte Unsicherheit wird durch die Annahme des weitentfernten Rands (GHB) hervorgerufen, eine Variation der Durchlässigkeit der GHB um den Faktor 10 bewirkt eine Verschlechterung Standardabweichung von $8,389 \cdot 10^{-2}$ m zu 1,345 m. Eine Variation der Durchlässigkeit der GHB um den Faktor 10 bewirkt eine Verschlechterung der Standardabweichung von $8,389 \cdot 10^{-2}$ m zu 1,53 m. Generell zeigt sich, dass die südlichen Pegel wieder am sensitivsten auf die Variation reagieren. Diese große Sensitivität des Werts, ist der Tatsache zugrunde zu legen, dass die GHB einen großen Abfluss des Grundwassermodells darstellt.

Der Einfluss der Mur auf den Grundwasserkörper ist im Vergleich zu der GHB und dem Durchlässigkeitsbeiwert als relativ gering einzustufen. Eine Variation des Leakagefaktors um den Faktor 10, führt nur zu geringfügigen Veränderungen im Modell. Generell zeigt sich, dass sich ein kleinerer Wert stärker auf das Modell auswirkt als ein größerer. Die geringe

C. Buchegger

Wechselwirkung der Mur ist ebenfalls der Abdichtung der Mur im Rahmen des Kraftwerksbaus Friesach/Deutschfreistritz zuzuschreiben. Die Variation des Leakagefaktors des Schmelzbachs zeigt kaum Veränderungen des Grundwassermodells, der Leakagefaktor des Hammerbachs hat einen gewissen Einfluss für die Modellanpassung, dies könnte aber auch auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass er sich Nahbereich der meisten Grundwasserpegel befindet.

Die Grundwasserneubildungsrate wird aufgrund der Nähe der Niederschlagsmessstelle und der vorangegangenen Berechnungen als sicherer Parameter erachtet. Die Grundwasserneubildung, der Niederschlag, sowie Grundwasserpegelstände wurden in einem Diagramm (Abb.: 5) miteinander verglichen, der Zusammenhang ist gut erkennbar und plausibel. Dies wird ebenfalls als Untermauerung der Plausibilität der Daten gesehen.

Die Unsicherheit durch das Festpotential an der Nordgrenze des Untersuchungsgebiets ist als eher gering einzuschätzen. Das Festpotential wird im Bereich einer Engstelle im Norden des Modellgebiets implementiert, es wird die Annahme getroffen, dass an einer Engstelle wie dieser, der Fluss die maßgebliche Einflussgröße ist. Der Grundwasserstand am Festpotential wird mittels der Steigung und des Murpegels des Kraftwerks Peggau, in Richtung des Nordrands interpoliert.

Für den Aufbau des Modells wurde eine aufwendige Datenrecherche betrieben und Daten von staatlichen Institutionen, Unternehmen und Begehungen gesammelt. Einige Parameter müssen mittels Abschätzungen und Anpassungen implementiert werden, dies ist mit gewissen Unsicherheiten behaftet. Der Vergleich der berechneten, mit den gemessenen Grundwasserständen ergibt eine Standardabweichung von $8,389 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$. Der mittlere quadratische Fehler ist als gut zu erachten, dies zeigt, dass das kalibrierte, numerische Modell in der Lage ist die realen Strömungsverhältnisse angemessen zu beschreiben.

5.2.2 Wasserbilanz des Modellgebiets

Die berechnete Wasserbilanz dient der Abschätzung der Qualität des numerischen Modells. In der Tabelle 7 ist die Wasserbilanz des Modellgebiets für das stationäre Modell dargestellt. Die Überprüfung der berechneten Strömungsverhältnisse erfolgt durch den Vergleich der Zu- und Abflüsse im Modellraum. Der numerische Fehler in der Wasserbilanz liegt, wie in Tabelle 7 ersichtlich, bei 0,09 %, der Volumenstrom kann als ausgeglichen angesehen werden.

C. Buchegger

Tabelle 7: Wasserbilanz des Modellgebiets

Zu- und Abflüsse	Zufluss [m ³ /s]	Abfluss [m ³ /s]	Zufluss – Abfluss [m ³ /s]
Festpotential	$6,504 \cdot 10^{-3}$	-	$6,504 \cdot 10^{-3}$
Entnahmebrunnen	-	$1,663 \cdot 10^{-2}$	$-1,663 \cdot 10^{-2}$
Wechselwirkung mit den Flüssen und Bächen	$5,805 \cdot 10^{-2}$	$4,695 \cdot 10^{-2}$	$1,11 \cdot 10^{-2}$
Grundwasserneubildung aus Niederschlag	$4,467 \cdot 10^{-2}$	-	$4,467 \cdot 10^{-2}$
Grundwasserabfluss (GHB)	-	$4,554 \cdot 10^{-2}$	$-4,554 \cdot 10^{-2}$
Summe	$1,092 \cdot 10^{-1}$	$1,091 \cdot 10^{-1}$	$-9,801 \cdot 10^{-5}$
Diskrepanz [%]	0,09		

Der Abfluss aus dem Modellgebiet erfolgt über die Mur, die GHB, sowie durch die Entnahmen aus den Brunnen. Wobei der Abfluss über die GHB und der Oberflächenabfluss der Mur im ähnlichen Wertebereich liegen. In der Wasserbilanz (Tabelle Zeile 3) wird die gesamte Wechselwirkung des Grundwasserkörpers mit den Oberflächenwässern dargestellt, somit sind in dieser Zeile sowohl die Wechselwirkung der Mur mit dem Grundwasserkörper als auch die Wechselwirkungen mit den Bächen miteinberechnet. Jedoch ist, aufgrund des großen Grundwasserflurabstands und der seichten Sohlage der Bäche, eine Exfiltration (Abfluss) von Grundwasser in die Bäche rein physikalisch nicht möglich.

Die darauffolgende Zonierung der Wasserbilanz zeigte, dass wie zuvor angenommen die komplette Exfiltration aus dem Grundwasserkörper über die Mur geschieht. Die Entnahmebrunnen der Holding Graz, der Gemeinde Peggau, sowie die des Kieswerks weisen gemeinsam circa ein Drittel des Abflusses über die GHB bzw. in die Mur auf.

Tabelle 8: gerundete Wasserbilanz der Oberflächengewässer

Oberflächenwässer	Zufluss [m ³ /s]	Abfluss [m ³ /s]	Zufluss – Abfluss [m ³ /s]
Schmelzbach	$9,1363 \cdot 10^{-3}$	-	$9,1363 \cdot 10^{-3}$
Hammerbach	$3,2404 \cdot 10^{-4}$	-	$3,2404 \cdot 10^{-4}$
Mur	$4,8028 \cdot 10^{-2}$	$-4,6950 \cdot 10^{-2}$	$-1,110 \cdot 10^{-2}$

Das Modellgebiet wird nahezu gleichermaßen aus Niederschlag und der Infiltration von Oberflächenwasser aus der Mur und den Bächen gespeist. Wobei sich die Infiltration von Oberflächenwässern auf die drei Bäche, sowie die Mur aufteilt.

Der Hammerbach hat mit einem Zufluss von $3,24 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ kaum Auswirkungen auf die Wasserbilanz des Modells, die Infiltration vom Hammerbach in den Grundwasserkörper beläuft sich im Vergleich zur Infiltration des Schmelzbachs auf nur ca. ein achtundzwanzigstel, dies ist auch auf den niedrigen Leakagefaktor des Hammerbachs, sowie den geringe Abfluss zurückzuführen. Der Schmelzbach weist hingegen einen ausgeprägten Zufluss in den Grundwasserkörper auf. Die Auswirkungen des Zuflusses des Schmelzbachs zeigen sich nicht nur in der Wasserbilanz, sie sind ebenfalls im Grundwassergleichenplan (Abb. 14) des kalibrierten Modells ersichtlich.

5.3 Instationäres Modell– Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse, Wasserbilanz

Nach der Fertigstellung und Eichung des stationären Modells wurde ein instationäres Modell mit den vorhandenen Daten und kalibrierten Parametern aufgebaut. Wie zuvor erwähnt wurde die größte Datendichte im Zeitraum von 2010-2014 erreicht, somit wurde auch das instationäre Modell für diesen Zeitraum aufgebaut. Das instationäre Modell basiert auf dem stationären Modell, es wurde der für die instationäre Modell benötigte Parameter speicherwirksame Porosität in das Modell integriert.

Nach der Fertigstellung des instationären Modells wurde zuerst nur der Parameter Specific Yield kalibriert. Die Grenzen laut Literatur (Johnson 1967) wurden wie folgt festgelegt, die untere Grenze wurde mit 10% (feinen Sand), die obere Grenze mit 35% (kiesigen Sand) und der Initialwert mit 20% festgelegt. Die erste Kalibrierung ergab einen Wert von 35% für den Specific Yield und erreichte somit die obere Grenze.

Folgend wurden die drei Zonen der Durchlässigkeitsbeiwerte und der Specific Yield gemeinsam kalibriert.

Tabelle 9: Ergebnisse der Kalibrierung des instationären Modells und Vergleich mit dem stationären Modell

Parameter Kalibrierung instationäres Modell		
Parameter	Stationär	Instationär
Kf-Wert Zone 1 (blau)	$3,02 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$4,08 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
Kf-Wert Zone 2 (dunkelgrün)	$8,67 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$5,90 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
Kf-Wert Zone 3 (hellgrün)	$3,13 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	$5,08 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$
Speicherwirksame Porosität	-	19,51 %

C. Buchegger

Die Kalibrierung der drei Zonen der Durchlässigkeitswerte gemeinsam mit dem Specific Yield (Tabelle.: 9) zeigte, dass vor allem am Talrand der Durchlässigkeitsbeiwert (Zone 3) eine deutliche Anpassung benötigt. Der Kf-Wert wurde um nahezu eine 10er Potenz vergrößert.

Die Kalibrierung des Specific Yield ergab bei dem Versuch die Werte gemeinsam zu kalibrieren einen Wert von 19,51%, dies entspricht in der Literatur (Johnson 1967) den mittleren Werte für Kiese und Sanden.

Die bestmögliche Anpassung der Durchlässigkeitsbeiwerte, sowie der Speicherwirksamen Porosität erreichte eine Standardabweichung von 0,448 m. Die maximale Abweichung der berechneten, von den gemessenen Grundwasserständen erreichte der Pegel 31911 mit einem Wert von -1,3576 m beim Zeitschritt 41385600s (April 2011), die niedrigste Abweichung erreichte der Pegel 3195 mit $\pm 0,0001$ m beim Zeitschritt 52531200s (August 2011). Um die Qualität des angepassten Grundwassermodells zu bewerten, wurde ein Streudiagramm (Abbildung 16) mit den Wasserständen der Observationsbrunnen (berechnet vs. gemessen) erstellt, daraus ergeben sich Datenwolken mit Punktdaten der einzelnen Brunnen.

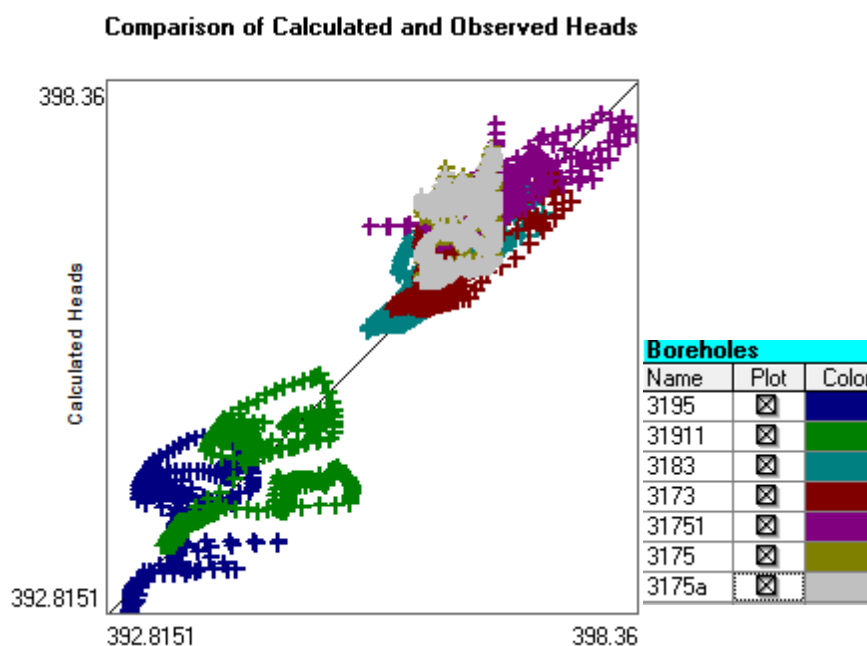


Abbildung 16: Streudiagramm mit Datenwolken der einzelnen Observationspegel für das instationäre Grundwassermodell

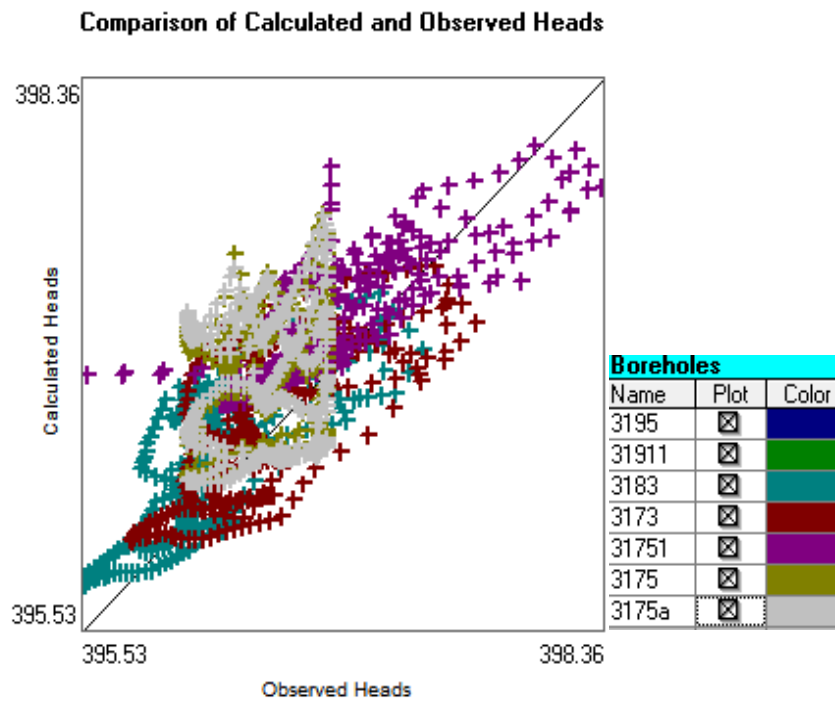


Abbildung 17: Streudiagramm der gemessenen vs. berechneten Pegel (nördliche Pegel)

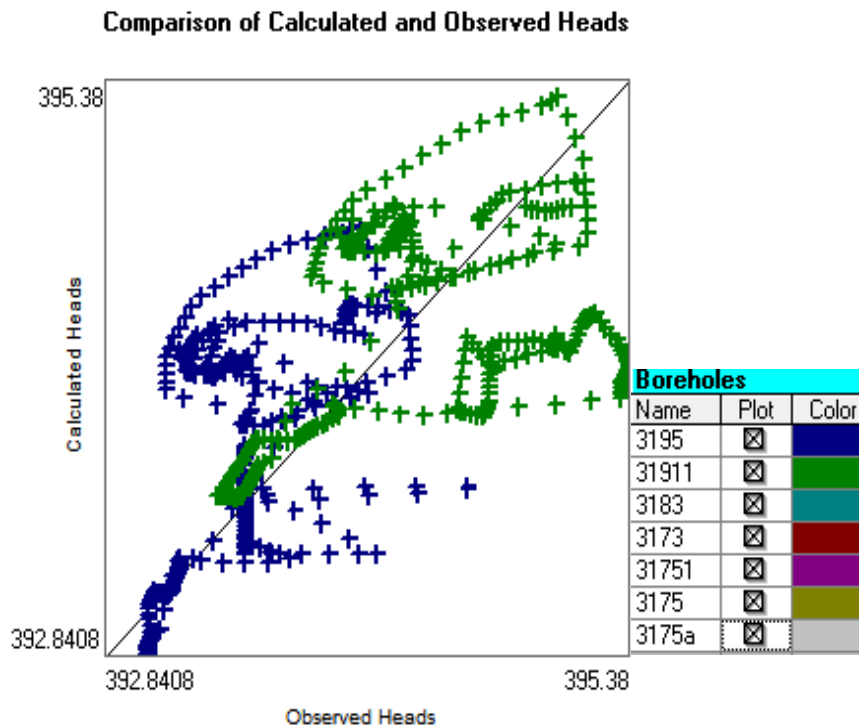


Abbildung 18: Streudiagramm der beiden südlichen Pegel 3195 und 31911

Die Abbildung 17 zeigt die Pegel 3183, 3173, 31751, 3175 und 3175a. Die Punktwolken der Pegel 3175 und 3175a zeigen nahezu das gleiche Bild, dies dürfte auf deren räumliche Nähe zueinander zurückzuführen sein. Ebenso ist ein ähnliches Verhalten der Pegel 3183 und 3173 zu beobachten. Es sind in Abbildung 17 zwei starke Abweichungen des Pegels 31751 (violett) ersichtlich, die Grundwasserpegeldaten des Pegels 31751 sind reelle Daten. Hierfür mussten keine langjährigen Mittelwerte herangezogen werden, somit könnte diese Anomalie auf eine Ungenauigkeit im nördlichen Bereich des Modells zurückzuführen sein. Die Abbildung 18 zeigt das Streudiagramm der Pegel 3195 und 31911 diese beiden Pegel weisen ein ähnliches Muster der Punktwolken auf.

5.3.1 Sensitivitätsanalyse und Unsicherheiten

Das instationäre Modell wird, wie das stationäre Modell, ebenfalls auf die Unsicherheit der kalibrierten Parameter geprüft. Die Quantifizierung der Sensitivität des Specific Yield erfolgt, wie beim stationären Modell, durch eine Variation des Wertes, hierfür wurde der Wert von 35% für den Speicherwirksame Porosität gewählt. Dieser Wert war die obere Grenze bei der Kalibrierung, sowie der Wert der ersten Kalibrierung des instationären Modell. Bei der ersten Kalibrierung wurde nur der Speicherwirksame Porosität ohne Durchlässigkeitsbeiwerte kalibriert. Die Erhöhung der Speicherwirksamen Porosität von 19,51% auf 35% hatte eine Verschlechterung der Standardabweichung zufolge. Die Verschlechterung der Standardabweichung, für die Variation des Parameters der Speicherwirksame Porosität ist in Tabelle 10 dargestellt. Die Verschlechterung um 0,108 m zeigt, dass das Modell mittelmäßig stark reagiert. Das stationäre Modell hat auf die Parametervariation der GHB, sowie auf die Variation der Durchlässigkeiten wesentlich stärker reagiert.

Tabelle 10: Sensitivitätsanalyse des instationären Modells, für den Parameter Speicherwirksame Porosität

Speicherwirksame Porosität	Standardabweichung
19,51%	0,448 m
35%	0,556 m

Da die Speicherwirksame Porosität wie zuvor erwähnt das Speicherverhalten eines Aquifers beschreibt, bewirkte seine Erhöhung eine Abplattung des Verlaufs (Abb.:19), positive sowie negative Spitzenwerte fielen geringer aus. Abbildung 19 zeigt den zeitabhängigen Verlauf der Grundwasserstände im instationären Modell, wobei die helleren bzw. dünneren Linien die

C. Buchegger

gemessenen Grundwasserstände darstellen und die dunkleren bzw. dickeren Linien die berechneten Grundwasserstände. Die maximale Abweichung der berechneten, von den gemessenen Grundwasserständen erreichte der Pegel 3183 mit einem Wert von +1,448 m beim Zeitschritt 65214720s (Jänner 2012), die niedrigste Abweichung erreichte der Pegel 3173 mit $\pm 0,0$ m beim Zeitschritt 120061400s (Oktober 2013).

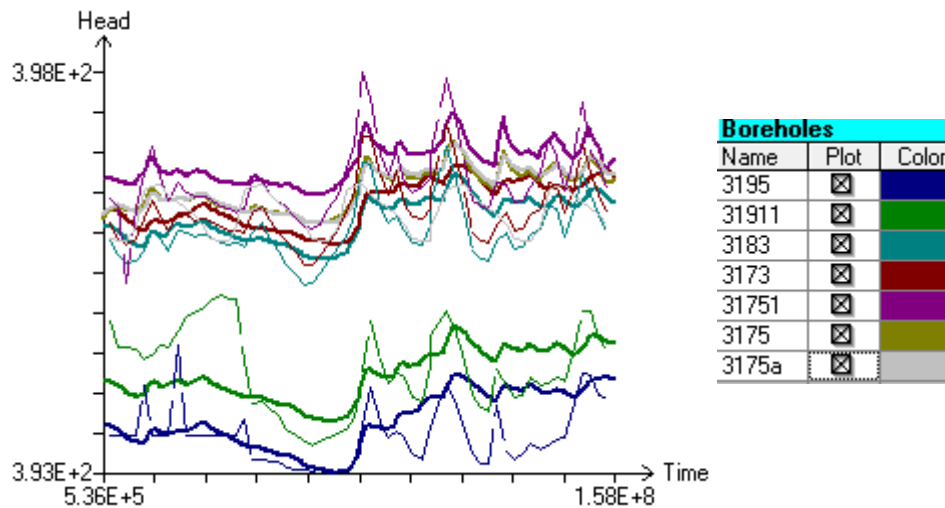


Abbildung 19: zeigt den zeitabhängigen Verlauf der Grundwasserstände für das instationäre Modell, bei einer speicherwirksamen Porosität von 39%, die dünneren Linien sind die gemessenen die dickeren die berechneten Verläufe

5.3.2 Wasserbilanz des instationären Modells

Die Wasserbilanz dient der Abschätzung der Qualität des numerischen Modells. Um die Wasserbilanz des instationären Modells darzustellen, wurden einige Ereignisse ausgewählt und die Wasserbilanz einzelner Monate und Zeitschritte ausgelesen.

Tabelle 11: Wasserbilanz des instationären Modells bei niedrigem Niederschlag/GWN

Wasserbilanz Monat -Timestep	Zufluss [m ³ /s]	Abfluss [m ³ /s]	Zufluss – Abfluss [m ³ /s]	Wasserbilanz- fehler [%]
November 2011 - 3	$1,4259 \cdot 10^{-1}$	$1,4284 \cdot 10^{-1}$	$-2,5528 \cdot 10^{-4}$	-0,18
Juli 2012 - 3	$3,5857 \cdot 10^{-1}$	$3,5833 \cdot 10^{-1}$	$2,4092 \cdot 10^{-4}$	0,07
April 2011 - 4	$1,0588 \cdot 10^{-1}$	$1,0587 \cdot 10^{-1}$	$3,3379 \cdot 10^{-6}$	<0,01
August 2011 -5	$9,8844 \cdot 10^{-2}$	$9,8859 \cdot 10^{-2}$	$-1,514 \cdot 10^{-5}$	-0,02

Um die Wasserbilanz des instationären Modells zu bewerten, wurden vier Szenarien ausgewählt. Es wurden zwei Extremereignisse zur Bewertung des Modells mittels Wasserbilanz herangezogen, sowie die beiden Zeitpunkte, an denen die berechneten Pegelstände die maximale und die geringste Abweichung von den gemessenen Pegelständen aufweisen. Im November 2011 wurde ein Niederschlag von 1,1 mm/Monat an der Niederschlagsstelle Eichberg gemessen, im Juli 2012 wurde ein Niederschlag (Eichberg) von 261,30 mm/Monat gemessen. Beim Zeitschritt 41385600s (April 2011), weist der Pegel 31911 mit einem Wert von -1,3576 m die größte Abweichung auf, die geringste Abweichung hingegen weist der Pegel 3195 mit $\pm 0,0001$ m beim Zeitschritt 52531200s (August 2011) auf.

Die in der Tabelle 11 dargestellten Daten zeigen, dass die Diskrepanz zwischen Zu- und Abfluss bei Extremereignissen höher ist als bei durchschnittlichen Werten. Zudem zeigt sich, dass ein höherer Zufluss auch einen höheren Abfluss mit sich bringt. Der höhere Wasserbilanzfehler bei Extremereignissen (niedriger/hoher Niederschlag bzw. GWN) lässt auf eine schlechtere Anpassung für diese Ereignisse schließen, der Wasserbilanzfehler für April und August 2011 ist als sehr gering einzustufen. Die Wasserbilanz des Aprils 2011 wurde aufgrund der großen Abweichung des Pegels 31911 gewählt, jedoch spiegelt sich die schlechte Anpassung in der Wasserbilanz nicht wider, das Modell hat für diesen Zeitschritt einem Fehler von <0,01%, das Modell ist als gut angepasst zu beurteilen.

6 Diskussion

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Gemeinde Peggau nördlich von Graz. Die Abgrenzungen des Modellgebiets wurden im konzeptionellen Modell definiert. Mit den vorhandenen Daten wurde für den Standort Peggau ein numerisches Grundwasserströmungsmodell aufgebaut. Das numerische Strömungsmodell beruht auf dem Finite Differenzenverfahren. Zuerst wurde ein stationäres Modell konstruiert, dem folgte ein instationäres Modell. Für die numerische Lösung der Gleichung wurde der Programmcode MODFLOW96 verwendet. Für die Konzipierung und Auswertung des Modells wurde das Programm Processing Modflow for Windows (PMWIN) Version 5.3.1 verwendet.

Die Anpassung des Modells an die am Untersuchungsstandort durch Grundwasserspiegelmessungen bestimmte Grundwasserströmung, ist als passend einzustufen, dies wird durch die Ergebnisse der Kalibrierung belegt. Die bei der Datenrecherche erhobenen Parameter können nach entsprechender Konvertierung, sowie nach Prüfung auf ihre Plausibilität in das Modell übernommen werden. Teilweise mussten unbekannte bzw. nicht ausreichend belegte Parameter wie z.B.: die Flussgeometrie (Sohllage) sowie der Leakagefaktor der Mur und der Bäche, Durchlässigkeitsbeiwerte und General Head Boundary (weit entfernter Rand) kalibriert und in das Modell implementiert werden. Zudem musste die Höhenlage des Grundwasserstauers aus den vorhandenen Punktdaten der Bohrungen interpoliert werden.

Im Laufe der Konzipierung des stationären Modells zeigte sich, dass der in der Literatur (Behrens et al. 1992; Benischke und Harum 1994) erwähnte und in das Modell implementierte, mögliche unterirdische Randzufluss von bis zu ca. 50 l/s einen negativen Effekt auf die Kalibrierung der Parameter hatte. Die Wasserstände im Nahbereich der Hammerbachquelle waren zu hoch, dahingehend versuchte das Modell bei der Kalibrierung der Parameter mit einer Verringerung des Durchlässigkeitsbeiwerts Zone 3 (hellgrün) auf die zu hoch berechneten Grundwasserpegelstände zu reagieren. Daraufhin wurde der Randzufluss mittels PEST kalibriert, die Kalibrierung ergab, dass der Randzufluss nahezu null ist. Daraufhin wurde der Randzufluss aus dem Strömungsmodell entfernt.

Das instationäre Modell zeigt eine höhere Standardabweichung als das stationäre Modell. Dies spiegelt sich auch in der Streuung der Datenpunkte in den Diagrammen wider (Abb. 16-18). Die Anfangsbedingungen werden zu einen Teil der Abweichung des instationären Modells

C. Buchegger

verantwortlich sein, da der tatsächliche Wasserspiegelverlauf zu Beginn der Simulationsperiode nicht dem berechneten stationären Wasserspiegel entspricht, der als Anfangsbedingung vorgegeben wurde. Dies spiegelt sich in den Abweichungen der berechneten Pegelstände von den gemessenen Pegelständen (Abb.: 20) am Beginn des instationären Modelllaufs wider. Das Diagramm (Abb.: 20) zeigt den zeitlichen Verlauf der gemessenen Pegelstände gegenüber den berechneten Pegelständen. Die gemessenen Pegelstände sind durch eine hellere Farbe abgebildet, die berechneten durch stärkere Farben. Bei der Gegenüberstellung der simulierten und der gemessenen Wasserspiegel zeigt sich, dass das instationäre Modell die Dynamik der gemessenen Wasserspiegel gut simuliert, die Spitzen werden sehr gut in der Simulation abgebildet.

Generell zeigt sich, dass die Parameter der Durchlässigkeitsbeiwerte der Zonen 1 und 2 (Abb.: 12) und der Leakagefaktor der Mur in direkter Wechselwirkung zueinanderstehen, dies ist auf den parallelen Verlauf der Zone 1 zur Mur zurückzuführen. Zudem zeigt sich, dass der Zustrom aus den Oberflächengewässern in den Grundwasserkörper bei stationären Bedingungen knapp 60% in Anspruch nimmt. Die Grundwasserneubildung ist mit ca. 44% der zweitgrößte Zufluss, die restlichen ca. 6% werden durch das Festpotential im Norden des Untersuchungsgebiets gedeckt.

Eine bessere Anpassung des Modells an die Grundwasserströmung, dürfte durch eine feinere Zonierung der Durchlässigkeitsbeiwerte erreicht werden. Es zeigte sich in den Durchlässigkeitsbeiwerten der Kurzpumpversuchen (Tab. 6) eine Bandbreite von Werten im Bereich von 10^{-3} - 10^{-4} m/s. Zudem zeigte sich im Zuge der Sensitivitätsanalyse des stationären Modells, dass gewisse Pegel (z.B.: 3183) auf eine Erhöhung des Kf-Werts mit einer besseren Anpassung reagieren. Dahingegen reagiert zum Beispiel der Pegel 3175 auf eine Verringerung der Kf-Werte mit einer besseren Anpassung an die gemessenen Grundwasserpegelstände.

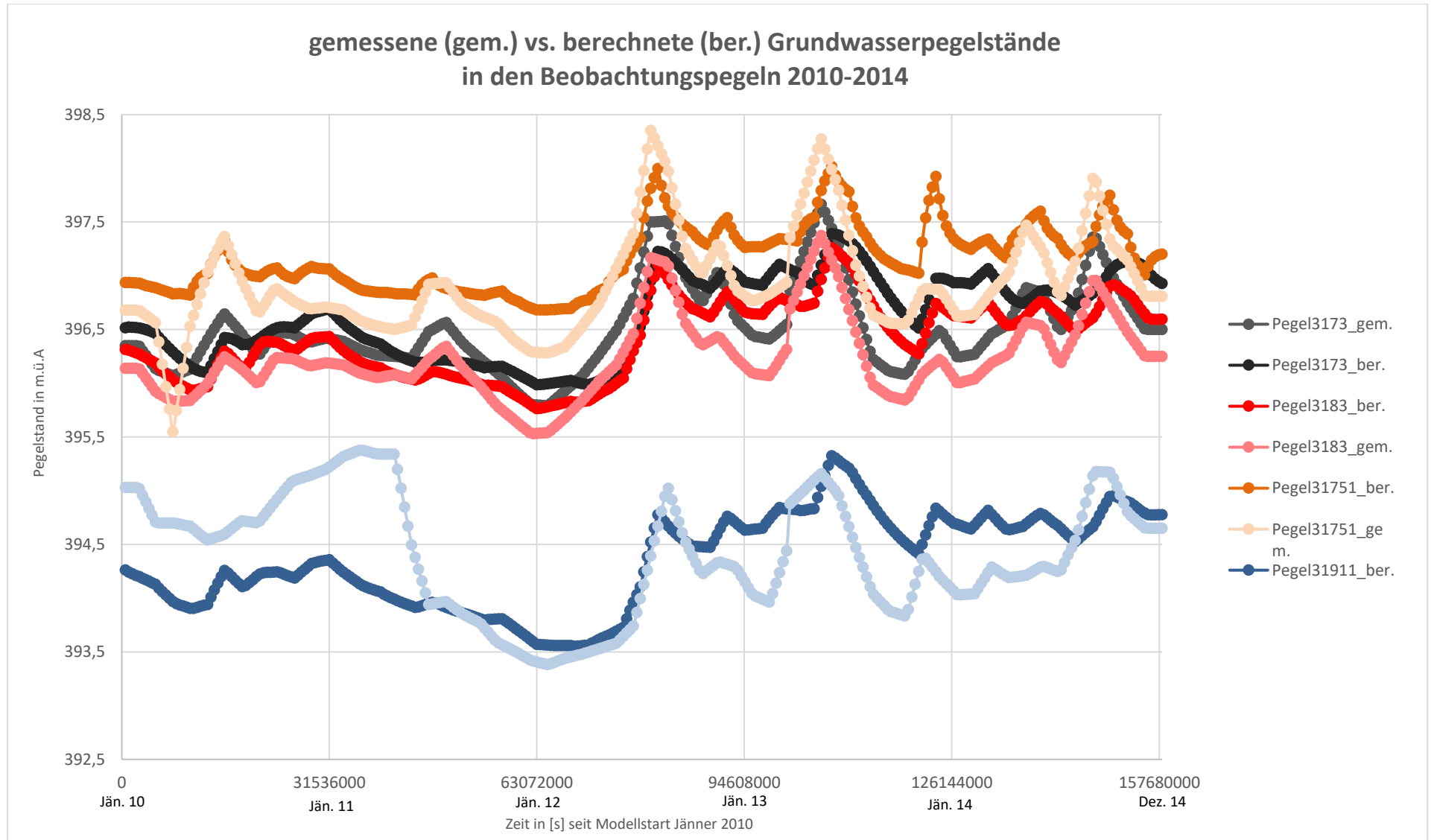


Abbildung 20: Gegenüberstellung ausgewählter, gemessener und berechneter Grundwasserpegelstände (2010-2014) an den Beobachtungspegeln, für das instationären Modell

C. Buchegger

Dem Streudiagramm (Abb.:18) der beiden südlichen Pegel 31911 (grün) und 3195 (blau) ist zu entnehmen, dass diese beiden Pegel am stärksten von der Regressionsgerade abweichen. Zudem weisen beide Punktwolken ein nahezu identes Muster auf, dies lässt auf eine mäßig gute Anpassung des Modells im südlichen Bereich schließen. Der einflussreichste Faktor dürfte im südlichen Bereich die General Head Boundary, die einen weit entfernten Rand darstellen soll, sein. Dies lässt sich auch dadurch begründen, dass nahezu die Hälfte des Abflusses aus dem Untersuchungsgebiet über die GHB geschieht. Die General Head Boundary steht wie der Leakagefaktor der Mur in direkter Abhängigkeit zu den Durchlässigkeitsbeiwerten. Die GHB wurde zur Vereinfachung in das Modell implementiert, ein möglicher Ansatz zur genaueren Anpassung wäre eine Vergrößerung des Untersuchungsgebiets in diesem Bereich gewesen, jedoch wäre dafür eine weitere Datenrecherche notwendig gewesen. Auf den ersten Blick zeigten sich im Bereich südlich von Deutschfreistritz ebenfalls wenige Grundwassermessstellen, somit wurde eine Vergrößerung des Modells als nicht zielführend für dieses Grundwasserströmungsmodell erachtet.

Die instationäre Wasserbilanz für vier ausgewählte Szenarien zeigte, dass das Modell in Hinsicht auf die Wasserbilanz bei einem Extremereignissen mit hohen Niederschlägen und hohem Murpegelstand den höchsten Wasserbilanzfehler von 0,18% aufweist. Der Wasserbilanzfehler für ein Extremereignis mit niedrigem Niederschlag und niedrigen Murpegelständen liegt bei 0,07% und liegt somit im Nahbereich der Abweichung der Wasserbilanz des stationären Modells. Für die in dieser Arbeit durchgeführte Strömungsmodellierung, die eine Quantifizierung von Aquifer- und Wasserbilanzkomponenten zum Ziel hat, ist dieser Fehler akzeptabel. Des Weiteren wurden die Wasserbilanzen, für die höchste und die niedrigste Abweichung der berechneten Grundwasserpegelstände von den gemessenen Grundwasserständen herangezogen und verglichen (Tab.:11). Beim Zeitschritt 41385600s (April 2011), weist der Pegel 31911 mit einem Wert von -1,3576 m die größte Abweichung auf, die geringste Abweichung hingegen weist der Pegel 3195 mit $\pm 0,0001$ m beim Zeitschritt 52531200s (August 2011) auf. Es stellte sich heraus, dass bei der größten als auch bei der kleinsten Abweichung der gemessenen Grundwasserpegelstände von den gemessenen Grundwasserpegelständen eine sehr gute Wasserbilanz entstehen kann (Tab.:11). Weder die MQA, die Wasserbilanz noch das Streudiagramm allein geben Aufschluss über die Qualität des numerischen Grundwasserströmungsmodells.

7 Schlussfolgerung

Das vorliegende Grundwassermodell zeigt, dass der Grundwasserkörper hauptsächlich aus der Mur und dem Niederschlag gespeist wird. Einen geringen Anteil der Grundwasserneubildung ist dem Grundwasserzustrom über den nördlichen Modellrand und den Bächen zuzuschreiben. Die Ergebnisse der Modellierung legen nahe, dass der Randzufluss des Tannebenstocks vernachlässigbar ist. Der Abfluss des Modells erfolgt zum größten Teil über die Exfiltration in die Mur und vermutlich durch Unterströmung der Mur im Bereich des Staubereichs des Kraftwerks, ein geringer Teil des Abflusses fließt über die Entnahmebrunnen ab. Die Einflüsse des Kraftwerks im Süden des Untersuchungsgebietes, konnten mittels dieses Modells nicht gut erörtert werden und gehören noch genauer untersucht.

Die kalibrierten Durchlässigkeitsbeiwerte weisen eine Größenordnung von ca. $4 \cdot 10^{-4}$ bis $6 \cdot 10^{-4}$ m/s auf, sind gut an die Daten aus den Kurzpumpversuchen angepasst. Generell zeigt sich, dass die in der Literatur erwähnte Tiefenrinne sich auch in den Kf-Werten gut widerspiegeln, mit einem Kf-Wert von $5,9 \cdot 10^{-4}$ m/s weist die Tiefenrinne eine höhere Durchlässigkeit auf als der Rest des Modellgebiets. Zu erwähnen ist, dass sich die Durchlässigkeitswerte für das instationäre Modell geringfügig von denen des stationären Modells unterscheiden. Aufgrund der Lage Grundwassermessstellen nehmen die Unsicherheiten in Richtung Rand zu.

8 Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Orthofoto Untersuchungsgebiet (GIS-Steiermark, 2018).....	11
Abbildung 2: Das Untersuchungsgebiet und die Abgrenzung des Modellgebiets (GIS-Steiermark, 2018).....	12
Abbildung 3: Geologische Karte des Untersuchungsgebiets 1:50.000, Ausschnitt aus GIS-Steiermark	13
Abbildung 4: Gegenüberstellung des zeitlichen Verlaufs der Grundwasserstände gegenüber dem Niederschlag.....	18
Abbildung 5: Zu- und Abflüsse in x,y, und z - Richtung eines Kontrollvolumens (Hanstein 2018)	27
Abbildung 6:Finite-Differenzen Verfahren (Lühr 2003)	29
Abbildung 7: Bodenwassermodell (Dyck und Peschke 1995)	32
Abbildung 8: Räumliche Diskretisierung eines Grundwasserleiters (Chiang und Kinzelbach 2001).....	34
Abbildung 9: Abbildung des korrigierten Grundwasserstauers BOL, mit Höhen m.ü.A	37
Abbildung 10: Modellaufbau Positionen der Observationsbrunnen, Fluss, GHB, Brunnen	39
Abbildung 11: Einteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte in drei unterschiedliche Zonen	42
Abbildung 12: Zonierung der Kf-Werte, in Farben/Zahlen	50
Abbildung 13: Positionen der Kurzpumpversuche mit Nummerierung.....	51
Abbildung 14: Grundwassergleichenplan der berechneten Grundwasserströmung in einer Abstufung von 0,2 m	53
Abbildung 15: Streudiagramm (Head-Scatter diagramm) berechnete vs. gemessene Grundwasserstände	54
Abbildung 16: Streudiagramm mit Datenwolken der einzelnen Observationspegel für das instationäre Grundwassermodell.....	60
Abbildung 17: Streudiagramm der gemessenen vs. berechneten Pegel (nördliche Pegel)	61
Abbildung 18: Streudiagramm der beiden südlichen Pegel 3195 und 31911	61
Abbildung 19: zeigt den zeitabhängigen Verlauf der Grundwasserstände für das instationäre Modell, bei einer speicherwirksamen Porosität von 39%, die dünneren Linien sind die gemessenen die dickeren die berechneten Verläufe	63
Abbildung 20: Gegenüberstellung ausgewählter, gemessener und berechneter Grundwasserpegelstände (2010-2014) an den Beobachtungspiegeln, für das instationären Modell	67

9 Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Wasserrechte im Untersuchungsgebiet	22
Tabelle 2: Pumpraten der Grundwasserentnahmebrunnen.....	40
Tabelle 3: Grundwasserentnahmestellen und Pumpraten	41
Tabelle 4: Grundwassermessstellen.....	45
Tabelle 5: Liste der Kalibrierungsparameter	48
Tabelle 6: Entnahmebrunnen Kf-Werte Gegenüberstellung mit kalibrierten Werten.....	49
Tabelle 7: Wasserbilanz des Modellgebiets	58
Tabelle 8: gerundete Wasserbilanz der Oberflächengewässer	58
Tabelle 9: Ergebnisse der Kalibrierung des instationären Modells und Vergleich mit dem stationären Modell.....	59
Tabelle 10: Sensitivitätsanalyse des instationären Modells, für den Parameter Speicherwirksame Porosität.....	62
Tabelle 11: Wasserbilanz des instationären Modells bei niedrigem Niederschlag/GWN	64

10 Abkürzungsverzeichnis:

BOL	Bottom of Layers, Stauer
GOK	Geländeoberkante
GHB	General Head Boundary
WIS	Wasserinformationssystem
ETP	Potentielle Evapotranspiration
ETR	Reelle Evapotranspiration
m.ü.A.	Meter über Adria
MQA	mittlerer quadratische Abweichungssumme
Kf	Durchlässigkeitsbeiwert
AR5	Fünfter Bewertungsreport der IPCC

11 Literaturverzeichnis

Amt der Steiermärkischen Landesregierung (1989): Die Grundwasserverhältnisse in der Steiermark, 168 S: Graz.

Amt der Steiermärkischen Landesregierung - Landesbaudirektion Wasserbau (Hg.) (1966): Seismische Untersuchung im Grundwasserfeld Friesach nördlich von Graz. Berichte der wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung. Amt der Steiermärkischen Landesregierung - Landesbaudirektion Wasserbau. 7 Bände. Graz.

Amt der Steiermärkischen Landesregierung - Umwelt und Raumordnung (2014): Auszug WIS - Bescheid - Postzahl 2851. Aktenzeichen: Postzahl 2851. Bescheid.

Anderson, Mary P.; Woessner, William W.; Hunt, Randall J. (2015): Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport: Academic press.

DIN 18130-1:1998-05, 1988-05: Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts.

Behrens, H.; Benischke, Ralf; Bricelj, M.; Harum, T.; Käss, W.; Kosi, G. et al. (1992): Investigations with natural and artificial tracers in the karst aquifer of the Lurbach system (Peggau-Tanneben-Semriach, Austria). In: *Beiträge zur Hydrogeologie* 43, S. 9–158.

Benischke, Ralf; Harum, Till (1994): Zur Hydrologie und Hydrogeologie des Gebietes Peggau-Tanneben-Semriach. In: Landesverein für Höhlenkunde in der Steiermark (Hg.): Festschrift Lurgrotte 1894-1994 anlässlich des hundertsten Jahrestages der Einschließung von Höhlenforschern und ihrer Errettung: Landesverein für Höhlenkunde in der Steiermark.

Birk, Steffen (1998): Grundwassermodell für den Raum Lahr. Strömungs- und Transportverhältnisse im Bereich des ehemaligen NATO-Flugplatzes. Universität Karlsruhe, Karlsruhe. Angewandte Geologie.

Chiang, Wen-Hsing; Kinzelbach, Wolfgang (1998): Processing Modflow. In: *A simulation program for modelling groundwater flow and pollution. User manual.*

Chiang, Wen-Hsing; Kinzelbach, Wolfgang (2001): 3D-groundwater modeling with PMWIN: Springer.

Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (Hg.) (2012): DWA-Taschenbuch. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. Hennef: DWA (Arbeitsblatt, A 138).

Eltahir, Elfatih A. B.; Yeh, Pat J-F (1999): On the asymmetric response of aquifer water level to floods and droughts in Illinois. In: *Water Resources Research* 35 (4), S. 1199–1217.

Fetter, Charles Willard (2018): Applied hydrogeology: Waveland Press.

Flügel, Helmut W. (1975): DIE GEOLOGIE DES GRAZER BERGLANDES.

Freeze, R. A.; Cherry, John A. (1979): Groundwater. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall. Online verfügbar unter <https://permalink.obvsg.at/AC00566279>.

Geotechnisches Institut AG (1983): STEWEAG Kraftwerk Deutschfreistritz. Hydrogeologie 1, Bericht. Unter Mitarbeit von A. Hagen, T. Küpfer, G. Schickor. Bern.

Haas, Johannes Christoph; Birk, Steffen (2017): Characterizing the spatiotemporal variability of groundwater levels of alluvial aquifers in different settings using drought indices. In: *Hydrology and Earth System Sciences* 21 (5), S. 2421–2448.

Harbaugh, Arlen W. (2005): MODFLOW-2005, the US Geological Survey modular ground-water model: the ground-water flow process: US Department of the Interior, US Geological Survey Reston, VA.

Himml, M.; Schäfer, W.; Nordrhein-Westfalen. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (2010): Hinweise zur Erstellung und Beurteilung von Grundwassermodellen im Altlastenbereich: LANUV NRW. Online verfügbar unter <https://books.google.at/books?id=KZBqygAACAAJ>.

Höltling, Bernward; Coldewey, Wilhelm Georg (2009): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. 7. Aufl.: Spektrum.

Holzbecher, Ekkehard (2013): Modellierung dynamischer Prozesse in der Hydrologie: Grundwasser und ungesättigte Zone: Springer-Verlag.

Ingenieurbüro BM Ing. Gerhard Moik GMBH (2010): Hydrologisches Gutachten. für: Einleitung von Regenwässer. Unter Mitarbeit von Stephan Schrotter. AMT DER STEIERMÄRKISCHEN LANDESREGIERUNG - Abteilung 19 Wasserwirtschaft und Abfallwirtschaft (Gz: FA19A18Mi-2010/23).

Johnson, Arnold Ivan (1967): Specific yield: compilation of specific yields for various materials: US Government Printing Office (1662).

Kinzelbach, Wolfgang; Rausch, Randolph (1995): Grundwassermodellierung.

Kløve, Bjørn; Ala-Aho, Pertti; Bertrand, Guillaume; Gurdak, Jason J.; Kupfersberger, Hans; Kværner, Jens et al. (2014): Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. In: *Journal of Hydrology* 518, S. 250–266.

Land Steiermark - Amt der Steiermärkischen Landesregierung: Klimaregion Murdurchbruchstal. B.1 Murdurchbruchstal mit Seitentälern. Online verfügbar unter <http://www.umwelt.steiermark.at/cms/beitrag/10023526/25206/>, zuletzt geprüft am 04.10.2018.

Lühr, H. P. (Hg.) (2003): Die Entwicklung der Grundwasserberechnungen der letzten Jahrzehnte–vom elektrischen Papier zum numerischen Grundwassermodell. BAW-Kolloquium" Wechselwirkung Bauwerk-Grundwasser", Karlsruhe.

MassonDelmotte V., P. Zhai A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. (2021): IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University. Online

verfügbar unter
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf, zuletzt
geprüft am 10.08.2021.

Maurin, V. (1954): Das Paläozoikum im Raum zwischen Deutschfeistritz und Semriach. In: *Mitt. Nat. wiss. Ver. Steiermark* 84, S. 81–102.

Oudin, Ludovic; Michel, Claude; Anctil, François (2005): Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 1—Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs? In: *Journal of Hydrology* 303 (1-4), S. 275–289.

Riedmüller (1983): STEWEAG KW-Deutschfeistritz. Geologisch-Geotechnisches Gutachten. Institut für Technische Geologie, Petrographie un Mineralogie TU Graz. Graz.

Schachtschabel, Paul; Blume, Hans-Peter; Brümmer, G.; Hartge, K. H.; Schwertmann, U. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde: F. Enke.

Schäfer, W. (2010): Modellierung der Grundwasserströmung. Online verfügbar unter http://www.schaefer-gwm.de/downloads/mod_gws.pdf, zuletzt geprüft am 07.11.2019.

Schönbäck, Wilfried; Oppolzer, Gerlinde; Kraemer, Andreas; Hansen, Wenke; Herbke, Nadine (2003): Internationaler Vergleich der Siedlungswasserwirtschaft: Kammer für Arbeiter und Angestellte für Wien.

Wahlhütter, Sebastian (2011): Lokales Wissen über Boden zwischen Praxis und Theorie. Eine kulturanthropologische - ethnopedologische Studie im südlichen Burgenland und in der Weststeiermark. Dissertation. Karl-Franzens Universität, Graz. Volkskunde und Kulutranthropologie.

Weber (1969): Die refraktionsseismischen Messungen im Murtal zwischen Peggau und Deutschfeistritz und ihre Bedeutung für die hydrogeologische Erforschung der quartären Schotterbecken. Hg. v. Steir. Beiträge zur Hydrogeologie 21. Graz.