



Wasser
Cluster
Lunz



universität
wien

Anhang O

Mittlere Verweilzeit des Seewassers und Grundwasserbilanz

Einfluss von Nassbaggerungen auf die Oberflächen- und
Grundwasserqualität

Auftragnehmer:

Universität Wien, Department für Umweltgeowissenschaften
Univ.-Prof. Dr. Thilo **Hofmann** und Mag. Christian **Müllegger**

in Zusammenarbeit mit:

WasserKluster Lunz – Biologische Station GmbH

BERG (Biofilm and Ecosystem Research Group)
Univ.-Prof. Dr. Tom J. **Battin**, Mag. Andreas **Weilhartner**

LIPTOX (Lipid and Toxicology Research Group)
Priv. Doz. Dr. Martin **Kainz**, Francine **Mathieu**, MSc

Wien, November 2011



vienna university
environmental geosciences

Inhaltsverzeichnis

1	Mittlere Verweilzeit des Seewassers und Grundwasserbilanz.....	1
1.1	Numerische Modellierung der hydraulischen Interaktion zwischen Grund- und Seewasser	2
1.2	Diskussion der Eingangsparameter für die numerische Grundwasserströmungsmodellierung .	3
1.2.1	Randbedingungen	3
1.2.2	Diskretisierung der Finite Elemente Netze	3
1.2.3	Dimension.....	4
1.2.4	Durchlässigkeitsbeiwerte und Grundwasserspiegelgefälle der Modellgebiete	4
1.2.5	Meteorologische Wasserbilanzglieder der Untersuchungsgebiete im langjährigen Mittel	5
1.2.6	Meteorologische Wasserbilanzglieder des Bezugsjahres 2009.....	5
1.3	Modellierung der hydraulischen Interaktion zwischen Grund- und Seewasser.....	7
1.4	Mittlere Verweilzeit des Seewassers	8
1.5	Güte der Modellierung	9
1.6	Alternative Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers mit Hilfe der Sauerstoffisotope $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$	10
2	Mittlere Verweilzeit des Seewassers des Baggersees in Hörsching	15
2.1	Numerische Modellierung der langjährigen mittleren meteorologischen und hydrologischen Bedingungen.....	15
2.1.1	Eingangsparameter	15
2.1.2	Güte und Ergebnis der Modellierung.....	18
2.1.3	Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers	20
2.1.4	Sensitivitätsanalyse	21
2.2	Numerische Modellierung des Bezugsjahres 2009	22
2.2.1	Meteorologische Bedingungen 2009 und Stichtag der Modellierung.....	22
2.2.2	Güte der Modellierung	23
2.2.3	Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009)	24
2.3	Isotopenauswertung zur Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers.....	25
2.3.1	Eingangsparameter	25
2.3.2	Ergebnis der Isotopenauswertung.....	26
3	Mittlere Verweilzeit des Seewassers des Baggersees in Tillmitsch	27
3.1	Numerische Modellierung der langjährigen mittleren meteorologischen und hydrologischen Bedingungen.....	27
3.1.1	Eingangsparameter	27
3.1.2	Güte und Ergebnis der Modellierung.....	29
3.1.3	Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers	31
3.1.4	Sensitivitätsanalyse	32
3.2	Numerische Modellierung des Bezugsjahres 2009	33
3.2.1	Meteorologische Bedingungen 2009 und Stichtag der Modellierung.....	33
3.2.2	Güte der Modellierung	34
3.2.3	Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009)	35

3.3	Isotopenauswertung zur Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers	36
3.3.1	Eingangsparameter	36
3.3.2	Ergebnis der Isotopenauswertung	37
4	Mittlere Verweilzeit des Seewassers des Baggersees in Pframa	38
4.1	Numerische Modellierung der langjährigen mittleren meteorologischen und hydrologischen Bedingungen	38
4.1.1	Eingangsparameter	38
4.1.2	Güte und Ergebnis der Modellierung	40
4.1.3	Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers	41
4.1.4	Sensitivitätsanalyse	42
4.2	Numerische Modellierung des Bezugsjahres 2009	43
4.2.1	Meteorologische Bedingungen 2009 und Stichtag der Modellierung	43
4.2.2	Güte der Modellierung	44
4.2.3	Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009)	44
4.3	Isotopenauswertung zur Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers	46
4.3.1	Eingangsparameter	46
4.3.2	Ergebnis der Isotopenauswertung	47
5	Mittlere Verweilzeit des Seewassers des Baggersees in Persenbeug	48
5.1	Numerische Modellierung der langjährigen mittleren meteorologischen und hydrologischen Bedingungen	48
5.1.1	Eingangsparameter	48
5.1.2	Güte und Ergebnis der Modellierung	50
5.1.3	Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers	52
5.1.4	Sensitivitätsanalyse	53
5.2	Numerische Modellierung des Bezugsjahres 2009	54
5.2.1	Meteorologische Bedingungen 2009 und Stichtag der Modellierung	54
5.2.2	Güte der Modellierung	55
5.2.3	Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009)	56
5.3	Isotopenauswertung zur Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers	57
5.3.1	Eingangsparameter	57
5.3.2	Ergebnis der Isotopenauswertung	58
6	Mittlere Verweilzeit des Seewassers des Baggersees in Grafenwörth	59
6.1	Numerische Modellierung der langjährigen mittleren meteorologischen und hydrologischen Bedingungen	59
6.1.1	Eingangsparameter	59
6.1.2	Güte und Ergebnis der Modellierung	61
6.1.3	Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers	64
6.1.4	Sensitivitätsanalyse	65
6.1.5	Modellierung der Grundwasserförderung bei Werksbetrieb (Kieswäsche)	65
6.1.6	Mittlere Verweilzeit des Wassers im Baggersee unter Berücksichtigung der Grundwasserförderung	67
6.2	Numerische Modellierung des Bezugsjahres 2009	68
6.2.1	Meteorologische Bedingungen 2009 und Stichtag der Modellierung	68
6.2.2	Güte der Modellierung	69

6.2.3 Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009)....	70
6.3 Isotopenauswertung zur Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers.....	71
6.3.1 Eingangparameter	71
6.3.2 Ergebnis der Isotopenauswertung.....	72
7 Zusammenfassung	73
8 Literatur	77
Abbildungsverzeichnis	79
Tabellenverzeichnis	80

1 Mittlere Verweilzeit des Seewassers und Grundwasserbilanz

Für die Bilanzierung der Stoffflüsse ist die Erfassung der hydraulischen Interaktion zwischen Grund- und Seewasser notwendig. Durch Sedimentation von organischem Material und dem Eintrag von Feinmaterial in die Seen, bzw. durch Ausfällung von gelösten Stoffen kommt es zu einer fortschreitenden Abdichtung gegenüber dem Grundwasser. Diese Sedimentation vollzieht sich nicht gleichmäßig und verändert sowohl Zu- und Abstrombereich als auch das Wasservolumen, das pro Zeiteinheit dem Baggersee zufließt. Die räumlich exakte Erfassung dieser Zu- und Abstrombereiche ist wegen der Heterogenität der Sedimentation und Größe der Seen nicht möglich. So zeigten Messungen mit Durchflussskammern (Fleckenstein et al., 2009, Simpkins, 2006) große räumliche Variabilität hinsichtlich der Wassermengen die in grundwassergespeiste Seen einfließen. Bevorzugte Fließpfade werden mit Durchflussskammern mitunter nicht erfasst.

Einer alternativen Methode zur Bestimmung der Wassermenge, die pro Zeiteinheit einem Grundwassersee zufließt, liegt das Gesetz von Darcy zu Grunde.

$$Q = kf * A * i$$

Q = Durchfluss [m³/s]

kf = Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]

i = Grundwasserspiegelgefälle [m/m, auch ‰]

A= durchflossene Fläche [m²]

Das Grundwasserspiegelgefälle [i] ergibt sich aus der Höhendifferenz zwischen Seewasserspiegel und Grundwasserspiegel eines im Nahbereich abgeteuften Peilrohres dividiert durch die horizontale Strecke zwischen den zwei Messpunkten. Das Grundwasserspiegelgefälle ist hierbei umgekehrt proportional zum Durchlässigkeitsbeiwert, d.h. je fortgeschrittener die Abdichtung (geringer Durchlässigkeitsbeiwert) desto größer ist das Grundwasserspiegelgefälle im Nahbereich des Baggersees.

Mit dieser Methode kann die mittlere Wassermenge [Q], die einem Baggersee pro Zeiteinheit und Fläche zuströmt, erfasst werden. Weniger geeignet ist diese Methode für die exakte Lokalisation der ein- und ausströmenden Bereiche. Bei der exakten Lokalisation müsste die Heterogenität der Sedimentation sehr kleinräumig erfasst werden, mit Hilfe der Darcy-Gleichung hingegen werden unterschiedlich durchlässige Bereiche gemittelt. Bei entsprechendem Messnetz kann auf die mittlere Verweilzeit des Seewassers geschlossen werden.

Zur Erfassung des Grundwasserspiegelgefälles im Nahbereich der Seen wurden vollkommene und unvollkommene Grundwassersonden abgeteuft sowie Seepegel errichtet. Diese wurden mit Drucksonden zur automatischen Aufzeichnung der Spiegelhöhen ausgestattet.

Neben dem Grundwasserspiegelgefälle im Nahbereich des Baggersees sind die Grundwassermächtigkeit, der Durchlässigkeitsbeiwert, die Grundwasserfließrichtung, sowie die Grundwasserneubildungsrate und Grundwasserentnahme, bzw. die Verdunstung über freien Wasserflächen (Baggersee) entscheidend. Die analytische Lösung der Grundwasser– Seewasser- Interaktion ist nicht möglich, dementsprechend wurden numerische Grundwasserströmungsmodelle erstellt.

1.1 Numerische Modellierung der hydraulischen Interaktion zwischen Grund- und Seewasser

Die numerische Grundwasserströmungsmodellierung wurde von der Gruppe Hofmann (Universität Wien, Department für Umweltgeowissenschaften) durchgeführt.

Ziel der Modellierung war die Erfassung der Grundwasser-Seewasser Interaktion der fünf zu untersuchenden Baggerseen sowohl bei langjährigen mittleren hydrologischen und meteorologischen Bedingungen, als auch bei jenen des Untersuchungsjahres 2009. Die Grundwasserströmungsmodelle wurden mit dem Softwarepaket Feflow® 5.2 (Wasy GmbH) umgesetzt, welches in den White Papers (2010 a) und im Referenz Manual (2010 b) von Feflow® beschrieben ist.

1.2 Diskussion der Eingangsparameter für die numerische Grundwasserströmungsmodellierung

1.2.1 Randbedingungen

Für die stationäre Modellierung wurden Festpotentiale als Randbedingung im Zu- und Abstrombereich festgelegt. Diese Annahme ist entgegen der üblichen Vorgehensweise für die Festlegung von Randbedingungen sinnvoll, weil der hydraulische Anschluss des Baggersees invers durch Variation des k_f -Wertes im ein- und ausströmenden Bereich der Seeböschungen modelliert wurde.

Der erste Modellansatz bezieht sich auf Randbedingungen, die jenen des **langjährigen mittleren Grundwasserspiegels** entsprechen. Diese Modellierung ermöglicht die Erfassung der Verweilzeit des Seewassers die charakteristisch für die im Mittel vorherrschende klimatische Bedingung ist.

Der zweite Modellansatz bezieht sich auf Randbedingungen, die dem **mittleren Grundwasserspiegel des Bezugsjahres 2009** entsprechen. Gegenüber dem langjährigen Durchschnitt (siehe Klimadiagramme bei den einzelnen Modellumsetzungen) war das Untersuchungsjahr 2009 in Österreich niederschlagsreicher. Dies führte gegenüber dem langjährigen Mittel zu einem Anstieg der Grundwasserspiegel in den Untersuchungsgebieten.

Die Randbedingungen wurden von den Grundwasserisohypsen abgeleitet. Bei den Baggerseen in Pframa (NÖ), Grafenwörth (NÖ) und Tillmitsch (Stmk) wurden die Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel aus bestehenden Grundwasserströmungsmodellen übernommen. In Persenbeug (NÖ) und Hörsching (OÖ) wurden die Randbedingungen von Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel abgeleitet die von den hydrographischen Diensten zur Verfügung gestellt wurden.

1.2.2 Diskretisierung der Finite Elemente Netze

Die Netzgenerierung erfolgte mit dreiknotigen Polygonen (zweidimensional), bzw. sechsknotigen, triangularen Prismen (dreidimensional). Im Nahbereich des Baggersees und bei Grundwassermessstellen wurde das Finite Elemente Netz

verfeinert. Tab. 1 zeigt die Anzahl der Knoten und Elemente der einzelnen Grundwasserströmungsmodelle.

Tab. 1: Anzahl der Elemente und Knoten des Finite Elemente Netzes

Baggersee	Elemente	Knoten
Hörsching	69.616	34.927
Tillmitsch	69.972	35.147
Grafenwörth	100.362	50.419
Pframa	111.507	61.524
Persenbeug	92.314	46.268

1.2.3 Dimension

Bei bis zum Grundwasserstauer ausgekiesten Baggerseen wurden zweidimensionale Modelle erstellt. In Pframa wurde ein dreidimensionales Modell erstellt, da bei diesem unvollständig ausgekiesten Baggersee Zu- und Abflüsse an der Sohle des Sees möglich sind.

1.2.4 Durchlässigkeitsbeiwerte und Grundwasserspiegelgefälle der Modellgebiete

Tab. 2 zeigt eine vergleichende Übersicht der Durchlässigkeitsbeiwerte und des Grundwasserspiegelgefälles.

Tab. 2: Durchlässigkeitsbeiwerte und Grundwasserspiegelgefälle der Modellgebiete

Baggersee	Durchlässigkeitsbeiwert (Modellgebiet)	Grundwasserspiegelgefälle (Modellgebiet)
Hörsching	$1 - 1,5 \cdot 10^{-2}$ [m/s]	~2,9 ‰
Tillmitsch	$1 - 5 \cdot 10^{-3}$ [m/s]	~1,5 ‰
Grafenwörth	$5 \cdot 10^{-3}$ [m/s]	~0,8 ‰
Pframa	$5 \cdot 10^{-3}$ [m/s]	~0,3 ‰
Persenbeug	$5 \cdot 10^{-3}$ [m/s]	~0,2 ‰

Die guten Durchlässigkeitsbeiwerte spiegeln die für die Kieswirtschaft interessanten Korngrößen (Kiese und Sande) mit geringem Feinanteil wider. Grafenwörth, Pframa und Persenbeug sind von der Sedimentation der Donau dominiert und zeigen ähnliche Durchlässigkeitsbeiwerte. Das Grundwasserspiegelgefälle ist in Pframa und Persenbeug sehr gering und bedingt eine langsamere Grundwasserfließgeschwindigkeit. Die oben stehenden Parameter werden bei den jeweiligen Grundwasserströmungsmodellen eingehender diskutiert.

1.2.5 Meteorologische Wasserbilanzglieder der Untersuchungsgebiete im langjährigen Mittel

Die langjährigen Mittel der meteorologischen Wasserbilanzglieder wurden aus dem Hydrologischen Atlas Österreichs Version 3.0.0 (Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2007) entnommen und für die Modellierung der Grundwasserbedingungen bei langjährigen mittleren Grundwasserspiegeln verwendet.

Die Grundwasserneubildungsraten berechneten sich hierbei aus dem mittleren Jahresniederschlag abzüglich der effektiven Verdunstung. Auf die Seeflächen wurde der mittlere Jahresniederschlag abzüglich der potentiellen Jahresverdunstung nach Penman als positives, bzw. negatives Wasservolumen, das pro Zeiteinheit der Seefläche zukommt, modelliert.

Bei den Baggerseen in Hörsching, Persenbeug und Tillmitsch übertrifft der mittlere jährliche Jahresniederschlag die mittlere potentielle Jahresverdunstung. Bei Pframa und Grafenwörth übersteigt die potentielle Verdunstung den mittleren Jahresniederschlag. Die langjährigen Mittel der Wasserbilanzglieder der Modellgebiete sind in Tab. 3 verzeichnet.

Tab. 3: Langjährige Mittel der meteorologischen Wasserbilanzglieder der Modellgebiete [mm/a]

Baggersee	Niederschlag minus potentieller Verdunstung (Seefläche)	Grundwasserneubildungsrate des Modellgebietes	mittlerer jährlicher Gebietsniederschlag	potentielle Verdunstung (Penman)	effektive Verdunstung
Hörsching	140	250	790	650	540
Tillmitsch	280	320	920	640	600
Grafenwörth	-95	50	530	625	480
Pframa	-55	85	575	630	490
Persenbeug	180	220	810	630	590

Quelle: Hydrologischer Atlas Österreichs, Version 3.0.0 (Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2007)

1.2.6 Meteorologische Wasserbilanzglieder des Bezugsjahres 2009

Gegenüber dem langjährigen Mittel war das Bezugsjahr 2009 niederschlagsreicher, in der Folge kam es zu einem im Jahresmittel erhöhten Grundwasserspiegel. In der Modellumsetzung für das Bezugsjahr 2009 wurden folgende Klimaelemente gegenüber der Modellierung der langjährigen Mittel adaptiert:

Potentielle Verdunstung

Die potentielle Verdunstung der freien Wasserflächen wurde nach Penman (1956) berechnet. Die Eingangsparameter wurden von der ZAMG bezogen. Nach DVWK (1996) in Langguth und Voigt (2004) wurde folgendes vereinfachtes Berechnungsverfahren angewandt:

$$ETP_{\text{Penn}} = g(T) * \frac{0,6 * R_G}{L} + 0,66 * (1 + 1,08 * v_2) * \left(1 - \frac{U}{100}\right) * S_R$$

R_G = Globalstrahlung, Tagessumme [J/cm²]

L = spezielle Verdunstungswärme [(J/cm²)/mm]

v_2 = Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe, Tagesmittel [m/s]

U = relative Luftfeuchtigkeit, Tagesmittel in 2 m Höhe [%]

S_R = Verhältnis der astronomischen möglichen Sonnenscheindauer zu der tatsächlichen bei Tag- und Nachtgleiche (= $S_0/12$ h) []

T = Lufttemperatur als Tagesmittel in 2 m Höhe [°C]

$g(T)$ = Korrekturfaktor für die Temperatur errechnet nach:

$$g(T) \sim 2,3 * (T+22)/(T+123)$$

Im Untersuchungsgebiet Hörsching (OÖ) waren die Tagessummen der Globalstrahlung nicht verfügbar. Dementsprechend wurde die potentielle Evaporation nach Haude (1955) berechnet. Gegenüber der Berechnung nach Penmann, bei der alle relevanten Klimaelemente in die Auswertung einfließen, ist bei der Berechnung nach Haude das Sättigungsdefizit der Luft um 14:30 Uhr entscheidend. Aufgrund der Zufälligkeit des Sättigungsdefizits um 14:30 Uhr sind nur längere Zeiträume repräsentativ für die Berechnung. Nach DVWK (1996) in Langguth und Voigt (2004) gilt die Formel:

$$ETP_{\text{Haude}} = f * (es(T) - e)_{14}$$

f = Haude-Faktoren für die einzelnen Monate [mm/hPa]

$(es(T) - e)_{14}$ = Sättigungsdefizit der Luft um 14:30 Uhr MEZ [hPa]

Niederschlag

Die Niederschlagsdaten für die entsprechenden Untersuchungsgebiete und Zeiträume wurden von der ZAMG bezogen.

1.3 Modellierung der hydraulischen Interaktion zwischen Grund- und Seewasser

Um mögliche Abdichtungen in Ein- und Ausstrombereichen der Baggerseen durch Sedimentation, bzw. Ausfällung zu erfassen wurden im Nahbereich der Baggerseen Bereiche definiert innerhalb derer die Durchlässigkeitsbeiwerte durch inverse Modellierung bestimmt werden konnten. Diese Bereiche wurden im Uferbereich der Baggerseen umgesetzt. Den Zonen wurden unterschiedliche Durchlässigkeitsbeiwerte zugewiesen. Da es zu einer Vielzahl an Variationsmöglichkeiten kommen kann bis die beste Anpassung an die gemessenen Grund- und Seewasserspiegel erreicht ist, wurden die Durchlässigkeitsbeiwerte der Seeböschungen mit Hilfe einer automatisierten Kalibrierung (Model-Independent Parameter Estimation von J. Doherty in der Feflow® 5.2 Implementierung) ermittelt.

Die modellierten Durchlässigkeitsbeiwerte der Unterwasserböschungen sind als mittlere effektive Parameter zur Bestimmung des Grundwasserzustroms und Abstroms zu betrachten. Wie bereits angeführt, können über die Erfassung des Grundwasserspiegelgefälles die mittleren Durchlässigkeitsbeiwerte in den an- und abstromigen Zonen erfasst werden, eine exakte Lokalisation dieser an- und abstromigen Bereiche ist jedoch nicht möglich. Zonen bevorzugter In- bzw. Exfiltration können im natürlichen System auf engstem Raum neben vollständig abgedichteten Bereichen liegen. Durch die Modellierung werden diese Bereiche gemittelt und liefern bei gegebenem Grundwasserspiegelgefälle die daraus resultierenden mittleren Durchlässigkeitsbeiwerte und den mittleren Zustrom in den Baggerseen.

Es ist möglich, dass bei höherem, bzw. niedrigerem Grundwasserspiegel unterschiedlich abgedichtete Zonen im Zu- und Abstrombereich der Seen erfasst werden und sich dementsprechend die mittleren Durchlässigkeitsbeiwerte der Seeböschungen verändern. Modelliert wurde bei mittleren Grundwasserspiegeln,

eine Ableitung der Ergebnisse auf niedrigere, bzw. höhere Grundwasserspiegel ist nicht zulässig.

1.4 Mittlere Verweilzeit des Seewassers

Die mittlere Verweilzeit des Wassers im Baggersee berechnet sich aus dem Wasservolumen des Baggersees dividiert durch den Grundwasserabstrom pro Zeiteinheit.

$$\text{mittlere Verweilzeit} = \frac{\text{Volumen des Sees}}{G_i + P - E}$$

G_i = Grundwasserzustrom

P = Niederschlag

E = potentielle Evaporation

Tab. 4 zeigt eine Gegenüberstellung der Flächen und Volumina der Baggerseen.

Tab. 4: Seefläche und Wasservolumen der untersuchten Baggerseen

Baggersee	Fläche [ha]	Volumen [m ³]
Hörsching	8,6	358.000
Tillmitsch	5,9	135.000
Pframa	3,8	200.000
Persenbeug	6,0	338.000
Grafenwörth	16,4	1.057.000

1.5 Güte der Modellierung

Die Anpassung der gemessenen an die modellierten Grundwasserspiegel wurde sowohl graphisch als auch mathematisch überprüft. Die graphische Erfassung ermöglicht die schnelle visuelle Überprüfung. Dazu wurden auf der x-Achse die gemessenen, auf der y-Achse die modellierten Grundwasserspiegel der jeweiligen Messstellen aufgetragen. Bereiche innerhalb des Modells bei der die Anpassung nicht erreicht wurde können rasch identifiziert werden da die Messpunkte versetzt neben der Anpassungsgeraden streuen.

Für die statistische Auswertung wurden die Differenzen zwischen gemessenen und modellierten Grundwasserspiegeln auf das Grundwasserspiegelgefälle des Untersuchungsgebietes nach folgender Berechnung bezogen:

$$\text{normierte Abweichung [\%]} = \frac{\sum |C1 - C2|}{N} * 100$$

C1 = gemessene Grundwasserspiegel [m]

C2 = modellierte Grundwasserspiegel [m]

N = Anzahl der Grundwassermessstellen []

i = Grundwasserspiegelgefälle des Untersuchungsgebietes [m pro 1000 m]

Durch die Einbeziehung der absoluten, mittleren Abweichung auf das Grundwasserspiegelgefälle konnte insbesondere bei Untersuchungsgebieten mit geringem Grundwassergefälle eine vergleichbare Maßzahl gefunden werden. So sind z.B. Abweichungen von 0,05 m bei geringem Grundwasserspiegelgefälle von größerer Bedeutung als bei erhöhtem Gefälle im Untersuchungsgebiet.

Sensitivitätsanalyse

Eine Sensitivitätsanalyse untersucht die Auswirkungen von geänderten Eingangsparametern auf die Modellergebnisse. Unter ansonsten gleichen Bedingungen wird bei jedem Modelldurchlauf jeweils nur ein Parameter, in einem vom Bearbeiter festgelegtem sinnvollen Rahmen, variiert.

Für die Sensitivitätsanalyse werden die Durchlässigkeitsbeiwerte des Modellgebietes und die potentiellen Verdunstungsraten der untersuchten Baggerseen variiert. Die Durchlässigkeitsbeiwerte der Seeböschungen stellten wiederum das Ergebnis der

Modellierung dar von denen in Folge der Grundwasserzustrom in den See abgeleitet wurde. Die Kalibrierung des Grundwasserströmungsmodells erfolgte somit bei jeder Modellsimulation über die gegebenen Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen im Nahbereich der Baggerseen bei geänderten Durchlässigkeitsbeiwerten des Modellgebiets, bzw. geänderten potentiellen Verdunstungsraten der Baggerseen. Des Weiteren wurde jeweils eine Modell ohne kolmatierte Seeböschungen berechnet.

1.6 Alternative Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers mit Hilfe der Sauerstoffisotope $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$

Eine alternative Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers kann mit Hilfe der Sauerstoffisotope ($^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$) durchgeführt werden. Diese Methode ist unabhängig von der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung und stellt somit eine gute Möglichkeit der Plausibilitätsprüfung dar. Der Einfluss von schwankenden Grundwasserspiegeln auf den mittleren Grundwasserzustrom kann mit der Isotopenauswertung mitunter besser erfasst werden als mit der numerischen Modellierung. So beschreiben Affolter et al. (2010) im Rahmen einer modellierten Uferfiltration die Auswirkung der Anströmung nicht kolmatierter Bereiche. Insbesondere bei Hochwasserereignissen werden resultierende Zuströme unterschätzt, nicht kolmatierte Bereiche ermöglichen einen überproportional erhöhten Grundwasserzustrom.

Fraktionierung der Wasserisotope im Wasserkreislauf

Die stabilen Isotope $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$ und $^1\text{H}/^2\text{H}$ sind Bestandteil des Wassermoleküls. In der Hydrosphäre ist ^{16}O das häufigste Sauerstoffisotop, die mittlere Massenabundanz beträgt 99,763 %, gefolgt von ^{18}O mit einer mittleren Massenabundanz von 0,200 %. Für ^1H , das häufigste Wasserstoffisotop, beträgt die mittlere Massenabundanz 99,985 %, für das schwere Wasserstoffisotop ^2H 0,015 % (Gat 2010). In den Umweltgeowissenschaften stellen diese stabilen Isotope ideale Tracer dar. Bei der Erforschung des Wasserkreislaufes muss dem Wasser kein externer Tracer zugegeben werden (z.B. der Fluoreszenztracer Uranin), sondern das Wassermolekül ist der Tracer an sich.

Das Isotopenverhältnis einer Probe wird angegeben als:

$$\frac{\text{Isotopenkonzentration des seltenen Elements}}{\text{Isotopenkonzentration des häufigen Elements}}$$

und entspricht im vorliegenden Falle auch dem Verhältnis zwischen schweren und leichten Elementen ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, bzw. $^2\text{H}/^1\text{H}$).

Für die internationale Vergleichbarkeit werden die Isotopenverhältnisse als relative Abweichung zu einem definierten Standard (Vienna Standard Mean Ocean Water, abgekürzt: VSMOW) angegeben.

$$\delta^{18}\text{O} = \left(\frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{Probe}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{\text{Standard}}} - 1 \right) * 1000 \quad [\text{‰}]$$

Das Verhältnis, bzw. die Fraktionierung von ^{16}O zu ^{18}O (^1H zu ^2H) im Wasserkreislauf wird maßgeblich durch das unterschiedliche Molekulargewicht bedingt. Durch Verdunstungsprozesse kommt es zur Anreicherung der schwereren Isotope ($^{18}\text{O}/^2\text{H}$) im Wasser, während der Wasserdampf eine Anreicherung der leichteren Isotope ($^{16}\text{O}/^1\text{H}$) erfährt. Dieser physikalisch bedingte Fraktionierungsprozess ermöglicht die Nutzung der Wasserisotope als Tracer.

Das Isotopenverhältnis des Niederschlags variiert im Jahresverlauf. Neben temperatur- und höhenabhängigen Prozessen ist die Herkunft des Niederschlags entscheidend. Im langjährigen Mittel zeigen flache Grundwasserkörper die Isotopensignatur des gewichteten mittleren Niederschlags des Einzugsgebietes. Es entsteht eine gebietsabhängige Signatur des Grundwassers (Clark und Fritz, 1997).

Zwischen dem $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ - Verhältnis des Niederschlags besteht ein linearer Zusammenhang, diese Beziehung wird durch die Meteoric Water Line dargestellt. Abb. 1 zeigt schematisch die Variation der Isotopenkonzentration des Niederschlags während eines Jahres und die resultierende lokale lineare Trendlinie. Die Isotopenkonzentration des unbeeinflussten Grundwassers streut im langjährigen Mittel bei flachen Grundwässern zumeist um die Local Meteoric Water Line (Clark und Fritz 1997). Im Seewasser findet demgegenüber durch Verdunstungsprozesse eine Isotopenfraktionierung statt. Die schweren Isotope werden im verbleibenden Seewasser angereichert, darüber hinaus verändert sich das Verhältnis zwischen $\delta^2\text{H}$

und $\delta^{18}\text{O}$. Dieser sogenannte Deuterium-Exzess bewirkt, dass sich das Isotopenverhältnis der durch Verdunstung beeinflussten Wässer von der Meteoric Water Line entfernt und eine neue lineare Trendlinie bildeten, die Lake-specific Evaporation Line (Clark und Fritz, 1997).

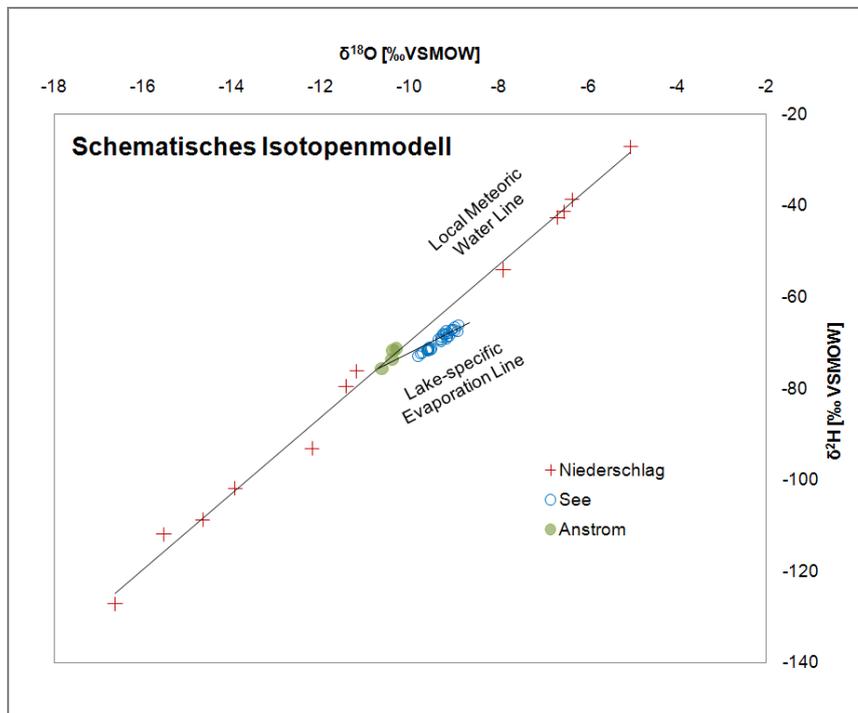


Abb. 1: Schematisches Isotopenmodell

Auflösung der Isotopengleichung zur Erfassung des mittleren Grundwasserzustroms

Bei gegebenen Isotopenverhältnissen der an der Grundwasser - Seewasser - Interaktion beteiligten Wasserbilanzglieder kann auf das Wasservolumen, das im Mittel dem Baggersee zufließt, geschlossen werden.

$$Q_{\text{in}} * \delta_{\text{in}} = Q_{\text{out}} * \delta_{\text{out}} - Q_{\text{N}} * \delta_{\text{N}} + Q_{\text{Eva}} * \delta_{\text{Eva}}$$

Durch die Substitution von

$$Q_{\text{out}} = Q_{\text{in}} + Q_{\text{P}} - Q_{\text{Eva}}$$

und der Annahme, dass

$$\delta_{\text{out}} = \delta_{\text{See}}$$

reduziert sich die Gleichung auf messbare Parameter:

$$Q_{in} = \frac{Q_N * (\delta_{See} - \delta_N) + Q_{Eva} * (\delta_{Eva} - \delta_{See})}{\delta_{in} - \delta_{See}}$$

Q_{in} = Grundwasserzustrom

Q_{out} = Grundwasserabstrom

Q_N = Niederschlag [m^3/a]

Q_{Eva} = potentielle Evaporation [m^3/a]

δ_{See} = Isotopenverhältnis des Seewassers [‰ VSMOW]

δ_N = gewichtetes Isotopenverhältnis des Niederschlags [‰ VSMOW]

δ_{Eva} = evaporationsgewichtete Isotopenverhältnis des verdunsteten Seewassers [‰ VSMOW]

δ_{in} = Isotopenverhältnis des anstromigen Grundwassers [‰ VSMOW]

δ_{out} = Isotopenverhältnis des abstromigen Grundwassers [‰ VSMOW]

Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung

Um das Isotopenverhältnis des Grundwasserzustroms und des Seewassers zu bestimmen wurden die Wasserproben saisonal genommen (siehe Anhang G) und mit einem Isotopenspektrometer analysiert (Picarro L1102-i Isotopic Liquid Water and Water Vapor Analyzer). Die Präzision, bzw. die der Wiederholbarkeit zuzuordnende Messunsicherheit liegt bei $\pm 0,1$ ‰ für $\delta^{18}O$ und $\pm 0,5$ ‰ für δ^2H .

Für die Erfassung des Isotopenverhältnisses des Niederschlags wurde auf das Österreichische Messnetz für Isotope im Niederschlag und in Oberflächengewässern (ANIP) zurückgegriffen (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft in Zusammenarbeit mit den Ämtern der neun Landesregierungen).

Die potentielle Evaporation der Seeoberflächen wurde nach Penman (1956), bzw. Haude (1955) berechnet. Die Niederschlagsdaten für die entsprechenden Untersuchungsgebiete wurden von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik bezogen. Die meteorologischen Daten konnten in einer täglichen Auflösung bezogen werden.

Das Isotopenverhältnis des verdunsteten Seewassers wurde nach dem linearen Widerstandsmodell von Craig and Gordon (1965) berechnet. In der δ -Notation ergibt sich (Yi et al., 2007):

$$\delta_E = \frac{(\delta_L - \varepsilon^*)\alpha^* - h\delta_A - \varepsilon_k}{1 - h + \varepsilon_k}$$

δ_L = Isotopenverhältnis des Seewassers [‰ VSMOW]

ε^* = Fraktionierungsfaktor []

$$\varepsilon^* = \alpha^* - 1$$

α^* = Gleichgewichtsfraktionierungsterm zwischen Wasserdampf und Wasser [‰]

nach Horita und Wesolowski (1994) mit:

$$10^3 \ln 1 - \alpha^* (^{18}\text{O}) = -7,685 + 6,7123 (10^3 / T) - 1,6664 (10^6 / T^2) + 0,35041 (10^9 / T^3)$$

T = evaporationsgewichtete Temperatur in Kelvin

δ_A = Isotopenverhältnis des atmosphärischen Wasserdampfes [‰] im Gleichgewicht mit dem lokalen

Niederschlag nach Gibson (2002) mit:

$$\delta_A = (\delta_P - \varepsilon^*) / \alpha^*$$

δ_P = gewichtetes Isotopenverhältnis des Niederschlags

h = evaporationsgewichtete relative Luftfeuchte [%]

ε_k = kinetischer Separationsterm [] nach Gonfiantini (1986) mit

$$\varepsilon_k = (1 - h) \cdot 14,2$$

Die Eingangsparameter für das Craig and Gordon Modell wurden hinsichtlich Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit evaporationsgewichtet. Je größer die potentielle Evaporation desto größer die Veränderung der Isotopensignatur des Seewassers, d.h. eine höhere Lufttemperatur in Verbindung mit einer geringen relativen Luftfeuchtigkeit verändert die Isotopensignatur des Seewassers in höherem Maße. Im Winterhalbjahr wird dementsprechend die Isotopensignatur des Seewassers geringfügiger verändert. Eine nicht evaporationsgewichtete Jahresmittelwertbildung der Parameter Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit würde im Mittel zu einer zu geringen Anreicherung der leichten Isotope in der Wasserdampfphase führen (vgl. Yi et al., 2007).

2 Mittlere Verweilzeit des Seewassers des Baggersees in Hörsching

2.1 Numerische Modellierung der langjährigen mittleren meteorologischen und hydrologischen Bedingungen

2.1.1 Eingangsparameter

Die Randbedingungen für die stationäre Modellierung wurde aus den Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel (Grundwasserschichtenplan Welser Heide, Stand: Dez. 2006, Bezug: Amt der OÖ. Landesregierung, Abteilung Wasserwirtschaft, Grund- und Trinkwasserwirtschaft, 2008) abgeleitet. Drei Grundwassermessstellen des Hydrographischen Dienstes OÖ lagen im Modellgebiet (375656, 375899 und 375915). Im anstromigen Bereich lag knapp außerhalb des Modellgebietes die Grundwassermessstelle 375063, deren Grundwasserspiegel für die Anpassung des Festpotentials im südwestlichen Bereich herangezogen wurde (siehe Abb. 2, folgende Seite). Als Stichtag der Modellierung wurde der 04.03.2009 ausgewählt (siehe Anhang F). Zu diesem Zeitpunkt konnte im Untersuchungsgebiet ein im langjährigen Beobachtungszeitraum mittlerer Grundwasserspiegel beobachtet werden.

Die in unmittelbarer Nähe zum Baggersee abgeteufte Grundwassermessstellen zeigten am 04.03.2009 folgenden Grundwasserspiegel (siehe Tab. 5). Das Gefälle zwischen kleinem und großem See lässt auf eine bereits fortgeschrittene Abdichtung des kleinen Sees schließen. Die Grundwassermessstelle Hoer/West zeigt, auch im zeitlichen Verlauf, einen Grundwasserspiegel der dem Seewasserspiegel des großen Sees entspricht (siehe Anhang F). In den folgenden Modellierungen wurde demnach die Spiegelhöhe der Grundwassermessstelle Hoer/West, die zwischen großem und kleinem See liegt, nicht verwendet.

Tab. 5: Grundwasserspiegel der abgeteufte Grundwassermessstellen in Hörsching zum 04.03.2009

Messstelle	Grundwasserspiegel
Hoer/Nord	281,00 müA
Hoer/Ost	279,83 müA
Hoer/Süd	280,59 müA
Hoer/West	280,93 müA
Hoer/großer See	280,92 müA
Hoer/kleiner See	281,53 müA

Abb. 2 zeigt die Umsetzung der Randbedingungen und die Lage der Grundwassermessstellen. Die aus den Grundwasserisohypsen bei Mittelgrundwasser abgeleiteten Randbedingungen wurden im südwestlichen Bereich aufgrund der höheren Spiegellage der Grundwassermessstelle 375063 angepasst. Das Festpotential wurde bei der westlichen Randbedingung mit 281,85 müA, bei der östlichen mit 277,75 müA angenommen. Der südliche Bereich des Modellgebietes grenzt an den Fluss Traun, im Zuge eines Kraftwerkbaues wurde in diesem Bereich der Austausch zwischen Grundwasserleiter und Fluss unterbunden. Nördlich wurde das Modellgebiet mit einer undurchlässigen Randbedingung (no-flow) abgegrenzt.

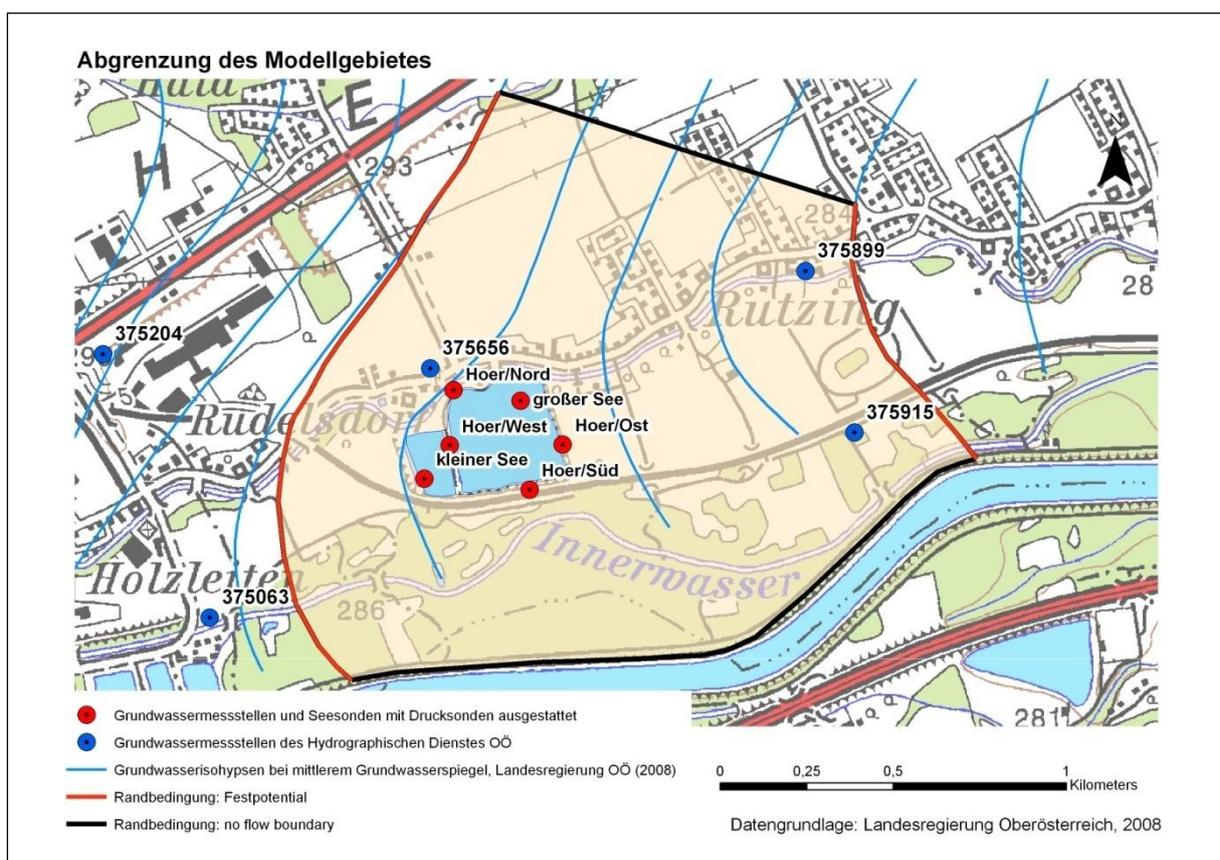


Abb. 2: Abgrenzung des Modellgebietes in Hörsching

Gewässer im Modellgebiet

Der nördlich des Baggersees fließende Mühlbach hat eine mittlere Abflussmenge von 6 – 8 m³/s und wird künstlich dotiert. Das Flussbett verläuft eingedämmt teilweise über der Geländekante und ist gegenüber dem Grundwasserkörper abgedichtet. Eine phasenweise Versickerung kann jedoch nicht ausgeschlossen werden,

aufgrund fehlender Daten kann diese jedoch nicht quantifiziert werden. (G.U.T Gruppe Umwelt + Technik GmbH, 2005)

Das Innerwasser, südlich des Baggersees gelegen, wird hauptsächlich von Baggerseen im Bereich Marchtrenk gespeist. Die Abflüsse bewegen sich zwischen 1 – 1,2 m³/s. Der Wasserspiegel des Innerwassers liegt zumeist höher als der des Grundwasserspiegels. Im Bereich Traun konnte keine Interaktion mit dem Grundwasser nachgewiesen werden, abschnittsweise ist diese jedoch möglich. (G.U.T Gruppe Umwelt + Technik GmbH, 2005)

Durchlässigkeitsbeiwerte

Die Durchlässigkeitsbeiwerte streuen im Untersuchungsgebiet, bei den erfassten Brunnen im Nahbereich des Baggersees (Amt der OÖ Landesregierung, 2004), zwischen 1 - 1,5*10⁻² m/s. Der Grundwasserleiter zeigte bei den für das Projekt abgeteufte Grundwassermessstellen einen homogenen Aufbau. Grobkies bis Mittelkies, vereinzelt Sandlinsen konnten in den Bohrprofilen erfasst werden. Für das Modellgebiet wurden die Durchlässigkeitsbeiwerte als Zufallsverteilung im Wertebereich zwischen 1 - 1,5*10⁻² m/s eingelesen. Hierzu wurde ein Raster über das Modellgebiet gelegt, die Kantenlänge eines Feldes entsprach 10 * 10 Meter. Diesen Feldern wurden Durchlässigkeitsbeiwerte im oben genannten Streubereich zugewiesen (Umsetzung: ArcGis® 9.3, random raster).

Grundwasserstauer

Die Angaben zum Grundwasserstauer wurden vom Amt der OÖ Landesregierung bezogen (Schlierrelief) und mit den Ergebnissen der Tiefenvermessung des Baggersees (Sohle des Baggersees) verschnitten. Der Grundwasserstauer fällt von Nordwest 278 müA nach Südost 270 müA ab.

2.1.2 Güte und Ergebnis der Modellierung

Zum Zeitpunkt des Stichtages zeigen die gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln eine normierte Abweichung von 2,7 %. Die maximale Abweichung beträgt 0,22 m und wurde bei Grundwassermessstelle Hoer/Ost beobachtet bei der die Modellrechnung einen zu hohen Grundwasserspiegel ergab. Abb. 3 und Tab. 6 zeigen die Unterschiede zwischen den gemessenen und den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Hörsching.

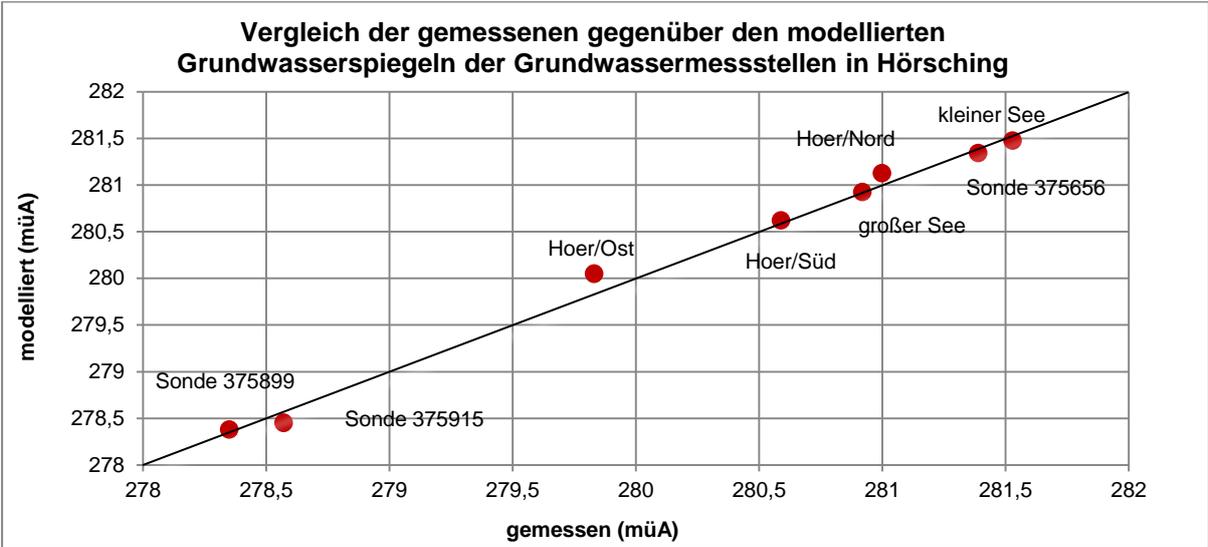


Abb. 3: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Hörsching

Tab. 6: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Hörsching [müA]

Messstelle	gemessen	modelliert	Differenz
Hoer/Süd	280,59	280,62	0,03
Hoer/Ost	279,83	280,05	0,22
Hoer/Nord	281,00	281,13	0,13
Sonde 375956	281,39	281,34	-0,05
Sonde 375899	278,35	278,38	0,03
Sonde 375915	278,57	278,45	-0,12
kleiner See	281,53	281,48	-0,05
großer See	280,92	280,92	0,00

Die Grundwasserspiegel der Messstellen 375956 und 375899 zeigen eine gute Übereinstimmung (generelles Modellgebiet). Im unmittelbaren Nahbereich des Baggersees zeigt die Grundwassermessstelle Hoer/Ost und Hoer/Nord eine

Abweichung von 0,22 bzw. 0,13 m. Die Grundwassermessstelle Hoer/Süd und die Spiegellage des großen Sees zeigen eine gute Anpassung an die gemessenen Grundwasserspiegel. Aufgrund des steilen Grundwasserspiegelgefälles im Untersuchungsgebiet und speziell im Einzugsgebiet des Baggersees ist die Abweichung zwischen gemessenem und modelliertem Grundwasserspiegel vertretbar. Das für die Abdichtung des Baggersees wichtige Grundwasserspiegelgefälle im Nahbereich des Baggersees konnte gut nachgebildet werden.

Modellierte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel

Die Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel (Abb. 4) zeigen im Nahbereich des Baggersees ein gegenüber dem Gesamtgebiet erhöhtes Grundwasserspiegelgefälle. Zwischen den beiden Seen ist eine große Differenz zwischen den Seewasserspiegeln (ca. 0,6 m) zu beobachten. Dies ist auf eine fortgeschrittene Abdichtung zurückzuführen.

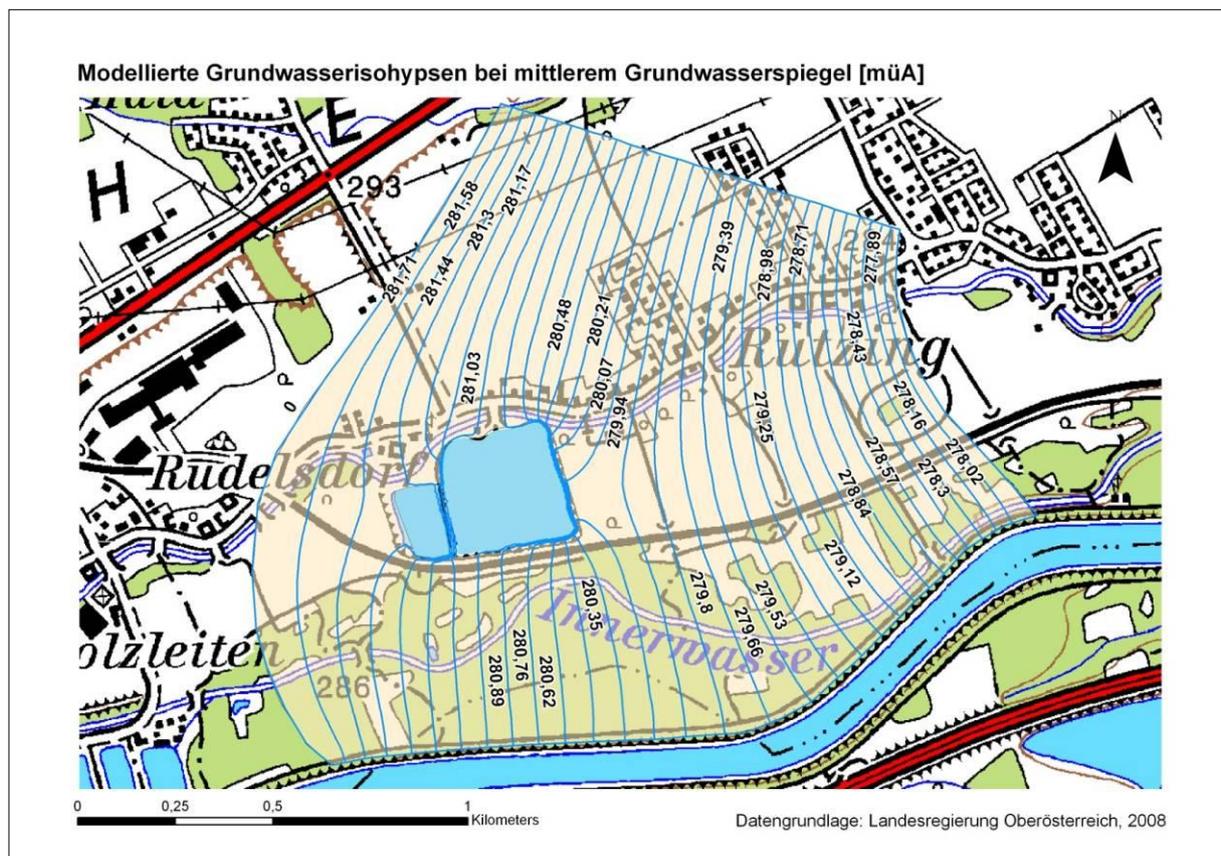


Abb. 4: Modellierte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel in Hörching

Durchlässigkeitsbeiwerte der Seeflanken (schematisch)

Abb. 5 zeigt die aus den Grundwasserspiegelhöhen abgeleiteten gemittelten Durchlässigkeitsbeiwerte in m/s. In abstromigen Bereichen liegen die Durchlässigkeitsbeiwerte bei ca. 10^{-4} bis 10^{-7} m/s, in den anstromigen Bereichen bei ca. $2 \cdot 10^{-3}$ m/s. Die anstromigen Durchlässigkeitsbeiwerte lassen auf eine geringere Abdichtung gegenüber dem Grundwasserleiter schließen. Der Durchlässigkeitsbeiwert zwischen großem und kleinem Baggersee beträgt ca. $8 \cdot 10^{-6}$ m/s.



Abb. 5: Modellierte mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte [m/s] der Seeflanken des Baggersees in Hörsching (schematisch)

2.1.3 Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers

Der aus den Grundwasserspiegelgefällen abgeleitete Grundwasserzustrom zum See beträgt $2.260 \text{ m}^3/\text{d}$, die Differenz zwischen potentieller Verdunstung und Niederschlag über der Wasserfläche beträgt $33 \text{ m}^3/\text{d}$. Bei einem Wasservolumen von 358.000 m^3 bei mittlerem Grundwasserspiegel ergibt sich eine mittlere Verweilzeit des Seewassers von 156 Tagen. Gespeist wird der Baggersee im überwiegenden

Maße durch das Grundwasser, 15 m³/d strömen von dem anstromig gelegenen kleinen See dem Untersuchungssee zu.

2.1.4 Sensitivitätsanalyse

Bei der Variation der Durchlässigkeitsbeiwerte reagierte das Grundwasserströmungsmodell sensitiv auf deren Verringerung. Der Grundwasserabstrom reduzierte sich auf 1.650 m³/d, demnach erhöhte sich die mittlere Verweilzeit des Seewassers auf 217 Tage. Weniger sensitiv reagierte das Modell bei einer Erhöhung der Durchlässigkeitsbeiwerte. Bei einem Grundwasserabstrom von 2.553 m³/d verringert sich die mittlere Verweilzeit auf 142 Tage. Die Anpassung der gemessenen an die modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen zeigte jeweils eine Verschlechterung gegenüber dem Ausgangsmodell.

Das Modell reagiert robust auf die Variation der potentiellen Verdunstung des Sees. Die Abweichungen zwischen den modellierten und gemessenen Grundwasserspiegeln sind gegenüber dem Ausgangsmodell gering. Die mittlere Verweilzeit des Seewassers variiert bei den einzelnen Modellversionen zwischen 143 und 157 Tagen.

Ohne eine abdichtende Schicht (Kolmation gegenüber dem Grundwasser) des Baggersees würde der Grundwasserabstrom auf 10.100 m³/d ansteigen, die mittlere Verweilzeit des Seewassers 35 Tage betragen. Die guten Durchlässigkeitsbeiwerte (ca. 10⁻² m/s) und der steile Grundwassergradient des Gesamtgebietes bewirken diese im Vergleich geringe mittlere Verweilzeit des Seewassers.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Tab. 7 verzeichnet. Im Anhang F befinden sich die modellierten Grundwasserspiegel der einzelnen Modellversionen.

Tab. 7: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des Grundwasserströmungsmodells in Hörsching

Variation der Modellparameter	Ausgangsmodell	Durchlässigkeitsbeiwerte des Modellgebietes Ausgangsmodell = 100 %		Niederschlag minus potentieller Verdunstung (Seefläche) Ausgangsmodelle = 140 mm/a		Ohne Abdichtung
		- 25 %	+ 25 %	0 mm/a	280 mm/a	
normierte Abweichung [%]	2,7	3,7	3,5	2,8	2,8	9,4
Niederschlag minus potentieller Verdunstung (Seefläche) [m ³ /d]	33	33	33	0	66	33
Grundwasserabstrom [m ³ /d]	2.290	1.650	2.530	2.280	2.500	10.100
mittlere Verweilzeit Seewasser [d]	156	217	142	157	143	35

2.2 Numerische Modellierung des Bezugsjahres 2009

Aufbauend auf dem numerischen Grundwasserströmungsmodell das in Kapitel 2.1 vorgestellt wurde, werden nachfolgend die angepassten Eingangsparameter für das Bezugsjahr 2009 diskutiert.

2.2.1 Meteorologische Bedingungen 2009 und Stichtag der Modellierung

Gegenüber den langjährigen mittleren meteorologischen Bedingungen (790 mm/a) war das Bezugsjahr 2009 mit 904 mm/a niederschlagsreicher (siehe Abb. 6). Insbesondere langanhaltende Niederschläge in den Monaten Juni und Juli führten zu einem starken Anstieg des Grundwasserspiegels im Untersuchungsgebiet. Die potentielle Evaporation lag geringfügig unter dem langjährigen Mittel von 650 mm/a (vgl. Tab. 8).

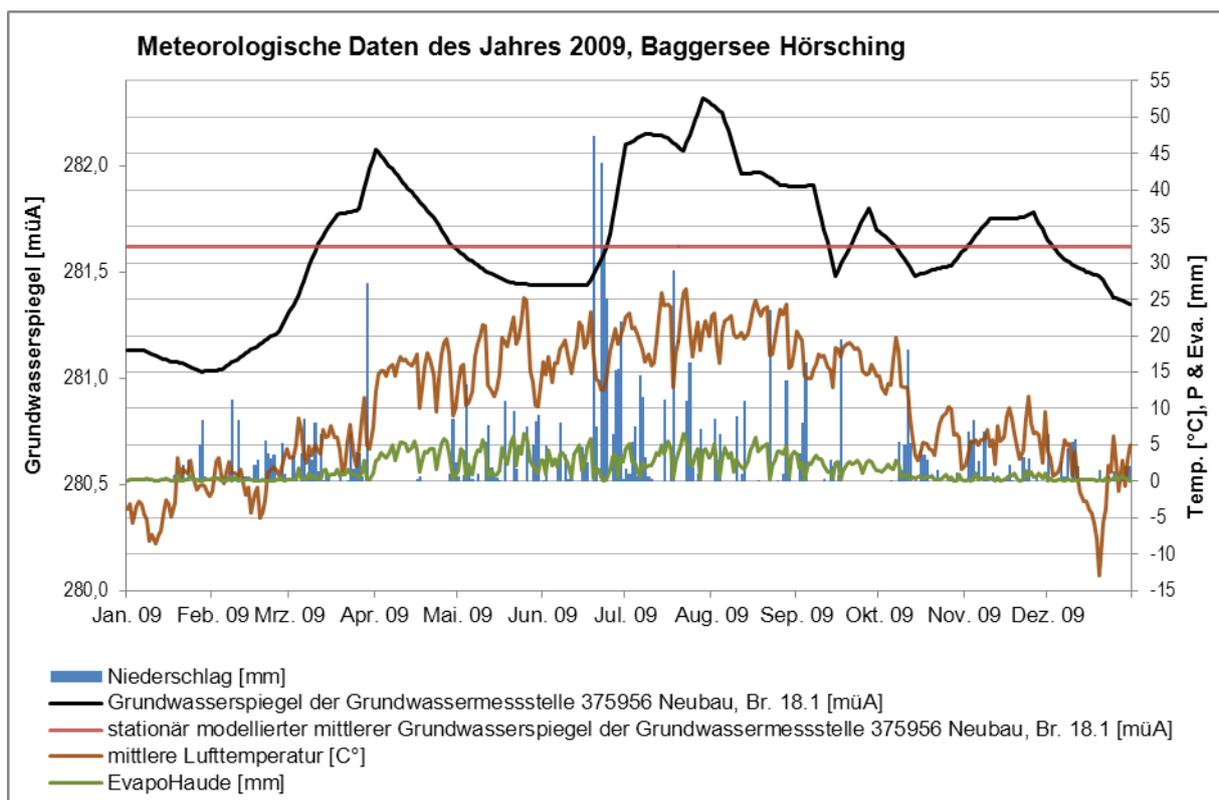


Abb. 6: Meteorologische Daten des Jahres 2009, Bezug: Wetterstation Hörsching (5000)

Der Stichtag der stationären Modellierung wurde von dem mittleren Grundwasserspiegel der Grundwassermessstelle 375956 Neubau, Br. 18.1 (Bezug: Hydrographischer Dienst OÖ) abgeleitet (siehe Abb. 6). Die für diesen Stichtag ermittelten Grund- und Seewasserspiegel sind zusammen mit den geänderten

Eingangsparametern in Tab. 8 verzeichnet. Die angepassten Randbedingungen wurden aus den Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen des hydrographischen Dienstes abgeleitet.

Tab. 8: Eingangsparameter zur Lösung des numerischen Grundwasserströmungsmodells in Hörsching (Bezugsjahr 2009)

Parameter	
Evaporation_{Pen} [mm/a]	612
Niederschlag [mm/a]	904
Grund- und Seewasserspiegel zum 29.04.2009 [müA]	
Hoer/Nord	281,29
Hoer/Ost	280,17
Hoer/Süd	280,94
kleiner See	281,77
großer See	281,27
375656 Neubau, Br.18.1	281,62
375899 Neubau, Br. 17.3	278,65
375915 Neubau, Bl. 17.7	278,81
Randbedingungen* [müA]	
westliches Festpotential	282,15
östliches Festpotential	278,00

*) siehe Kapitel 2.1.1

2.2.2 Güte der Modellierung

Die normierte Abweichung der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln beträgt 2,0 %. Tab. 9 zeigt die Unterschiede zwischen den gemessenen und den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Hörsching. Es konnte eine gute Anpassung an die gemessenen Grundwasserspiegel erreicht werden (vgl. Kapitel 2.1.2).

Tab. 9: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Hörsching [müA]

Messstelle	gemessen	modelliert	Differenz
Hoer/Süd	280,94	280,98	0,04
Hoer/Ost	280,17	280,35	0,18
Hoer/Nord	281,29	281,38	0,09
Sonde 375656	281,62	281,62	0,00
Sonde 375899	278,65	278,64	-0,01
Sonde 375915	278,81	278,72	-0,09
kleiner See	281,77	281,75	-0,02
großer See	281,27	281,31	0,04

2.2.3 Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009)

Die mittlere Verweilzeit des Seewassers ist gegenüber dem langjährigen Mittel im Bezugsjahr 2009 um ca. 40 Tage geringer. Der Grundwasserzustrom erhöht sich auf ca. 3030 m³/d. Der effektive Eintrag durch den Niederschlag erhöhte sich aufgrund der Niederschlagsintensität auf 69 m³/d.

Tab. 10: Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009), Hörsching

Parameter	
Grundwasserzustrom* [m ³ /d]	3031
Niederschlag minus mittlere potentielle Evaporation* [m ³ /d]	69
Grundwasserabstrom* [m ³ /d]	3100
mittlere Verweilzeit des Seewassers [d]	115

2.3 Isotopenauswertung zur Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers

2.3.1 Eingangparameter

Abb. 7 zeigt das $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm der Wasserbilanzglieder des Baggersees in Hörsching. Die Grundwasserproben (Anstrom) streuen um die Niederschlagsgerade. Die geringe Isotopenfraktionierung der Seewasserproben (Baggersee) zeigt sich im Diagramm durch die Nähe zu den Grundwasserproben und lässt auf eine geringe Verweilzeit des Seewassers schließen. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Seewasserproben streuen im Jahresverlauf zwischen -8,9 und -9,8 ‰, die der Grundwasserproben im Jahresverlauf zwischen -10,2 und -10,3 ‰. Die Seewasserproben zeigten bei den saisonalen Beprobungskampagnen tiefenorientiert sehr homogene $\delta^{18}\text{O}$ -Werte, diese lassen auf eine gute Durchmischung des Seewassers schließen.

Im Detail sind die Isotopenmesswerte im Anhang G nachzuschlagen.

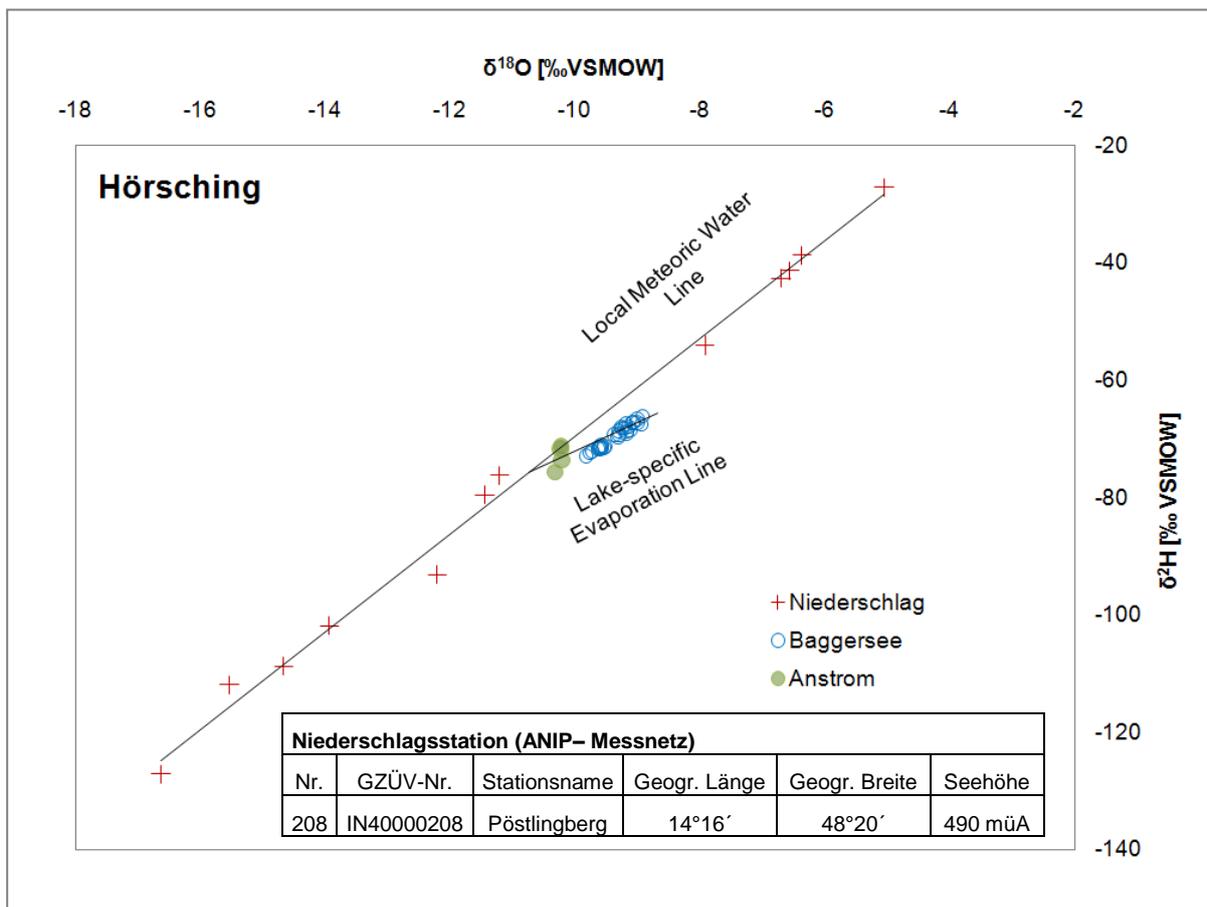


Abb. 7: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm Baggersee Hörsching

Die Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung sind in Tab. 11 vermerkt.

Tab. 11: Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung in Hörsching

Parameter	
relative Luftfeuchtigkeit [%] (evaporationsgewichtet)	71,6
Temperatur [°C] (evaporationsgewichtet)	16,2
Evaporation _{Haude} [mm/a]	612
Niederschlag [mm/a]	904
Isotopenkonzentration des anstromigen Grundwassers [‰ VSMOW] (Mittelwert aus 4 saisonalen Proben)	-10,3
Isotopenkonzentration des Seewassers [‰ VSMOW] (Mittelwert aus 30 saisonalen Proben)	-9,3
Isotopenkonzentration des verdunsteten Seewassers [‰ VSMOW] (evaporationsgewichtet)	-33,7
Isotopenkonzentration des Niederschlags [‰ VSMOW] (gewichtet nach Niederschlagsvolumen und jeweiliger Isotopenkonzentration)	-9,00

2.3.2 Ergebnis der Isotopenauswertung

Im Jahr 2009 errechnete sich ein mittlerer Grundwasserzustrom von ca. 3580 m³/d, zusammen mit einem mittleren Niederschlagseintrag von 69 m³/d ergibt sich eine mittlere Verweilzeit des Seewassers von ca. 98 Tagen. Im Vergleich mit der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung des Bezugsjahres 2009 zeigt sich eine gute Übereinstimmung (siehe Kapitel 2.2.2).

Tab. 12: Ergebnis der Isotopenauswertung, Baggersee Hörsching

Parameter	
Grundwasserzustrom* [m ³ /d]	3582
Niederschlag minus mittlere potentielle Evaporation* [m ³ /d]	69
Grundwasserabstrom* [m ³ /d]	3651
mittlere Verweilzeit des Seewassers [d]	98

*) : mittlere Werte des Jahres 2009

3 Mittlere Verweilzeit des Seewassers des Baggersees in Tillmitsch

3.1 Numerische Modellierung der langjährigen mittleren meteorologischen und hydrologischen Bedingungen

3.1.1 Eingangsparameter

Für die stationäre Modellierung wurde ein Festpotential im Zu- und Abstrombereich festgelegt. Die Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel wurden aus dem Grundwasserströmungsmodell von Fank et al. (2006) übernommen. Zwei bestehende Messstellen des Hydrographischen Dienstes Stmk (Lebring 3788, Obergralla 3792) lagen, neben den für das Projekt abgeteufte Messstellen, im Modellgebiet (siehe Abb. 8, sowie Anhang F). Diese wurden sowohl für die Erfassung des Stichtages bei mittlerem Grundwasserspiegel als auch zur Anpassung der Randbedingungen verwendet. Die Grundwasserförderung im Modellgebiet wurde dem numerischen Grundwasserströmungsmodell von Fank et al. (2006) entnommen (Ist-Zustand).

Als Stichtag der Modellierung bei mittlerem Grundwasserspiegel wurde der 22.12.2008 ausgewählt. Es herrschte ein annähernd stabiler mittlerer Grundwasserspiegel vor (siehe Anhang F). Die in unmittelbarer Nähe zum Baggersee abgeteufte Messstellen zeigten am 22.12.2008 folgende Grund- und Seewasserspiegel (siehe Tab. 13).

Tab. 13: Grund- und Seewasserspiegel der abgeteufte Grundwassermessstellen in Tillmitsch zum 22.12.2008

Messstelle	Grundwasserspiegel
Till/Nord	278,27 müA
Till/Ost	278,19 müA
Till/Süd	278,06 müA
Till/See	278,21 müA

Abb. 8 zeigt die Umsetzung der Randbedingungen und die Lage der Grundwassermessstellen. Die bei mittlerem Grundwasserspiegel abgeleiteten Randbedingungen wurden im westlichen und nördlichen Bereich mit 280,04 müA im südlichen Bereich mit 277,2 müA und entlang der Mur (östlich) mit einem fallenden Grundwasserspiegel (280,04 müA zu 277,2 müA) als Festpotential umgesetzt.

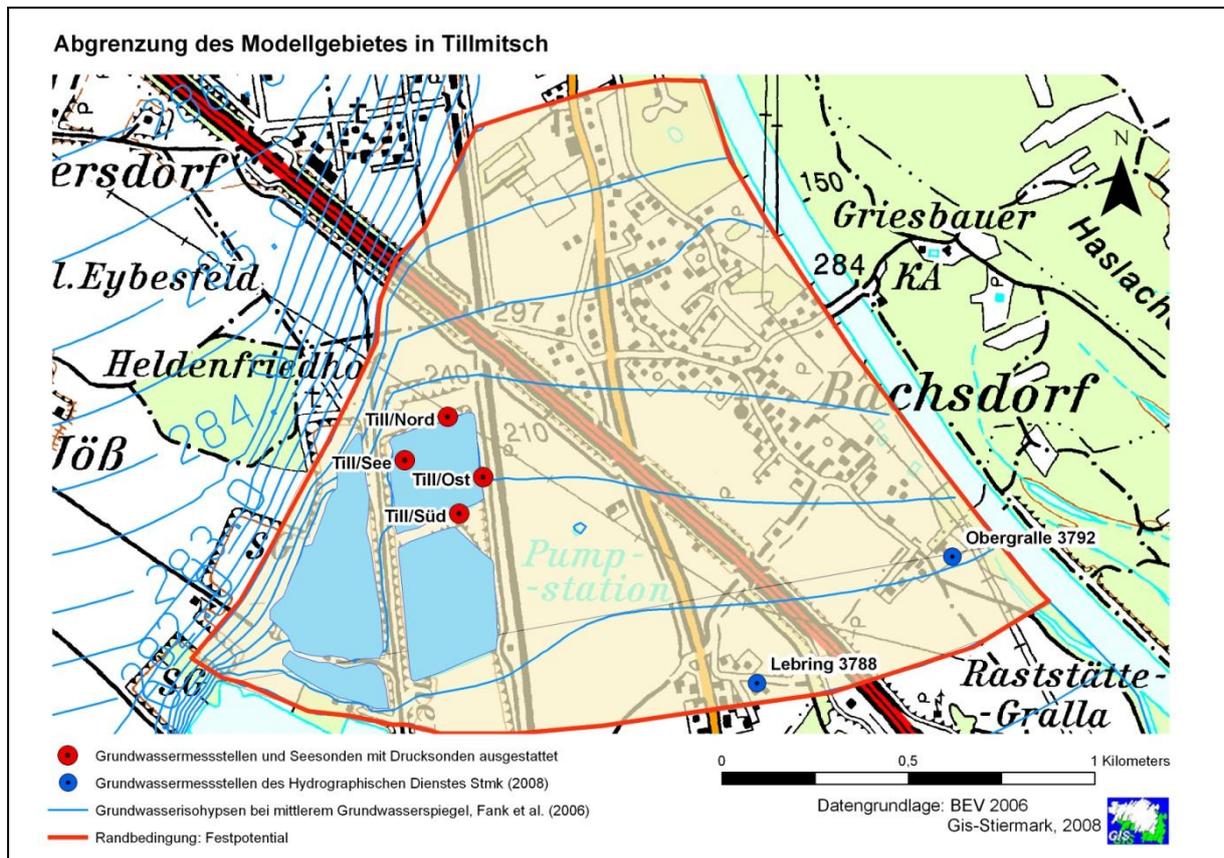


Abb. 8: Abgrenzung des Modellgebietes in Tillmitsch

Durchlässigkeitsbeiwerte

Die Durchlässigkeitsbeiwerte streuen im Untersuchungsgebiet (Würmterrasse des Leibnitzer Feldes) um $5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Bei der Terrassenkante der Jößer Rißterrasse im östlichen Bereich des Modellgebietes liegen die Durchlässigkeiten bei ca. $1 \cdot 10^{-3}$ m/s. Die Durchlässigkeitsbeiwerte wurden aus dem kalibrierten Grundwasserströmungsmodell von Fank et al. (2006) übernommen.

Grundwasserstauer

Die Angaben zum Grundwasserstauer wurden dem numerischen Grundwasserströmungsmodell von Fank et al. (2006) entnommen und mit den

Ergebnissen der Tiefenvermessung des Baggersees verschnitten (Sohle des Baggersees). Der Grundwasserstauer fällt entlang der Reißterrasse von 278,5 müA (Ost) auf 273,5 müA (Süd) ab.

3.1.2 Güte und Ergebnis der Modellierung

Zum Zeitpunkt des Stichtages zeigen die gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln eine normierte Abweichung von 1,1 %. Die maximale Abweichung beträgt -0,08 m und wurde bei Grundwassermessstelle Lebring 3788 beobachtet. Abb. 9 und Tab. 14 zeigen die Unterschiede zwischen den modellierten und den gemessenen Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Tillmitsch.

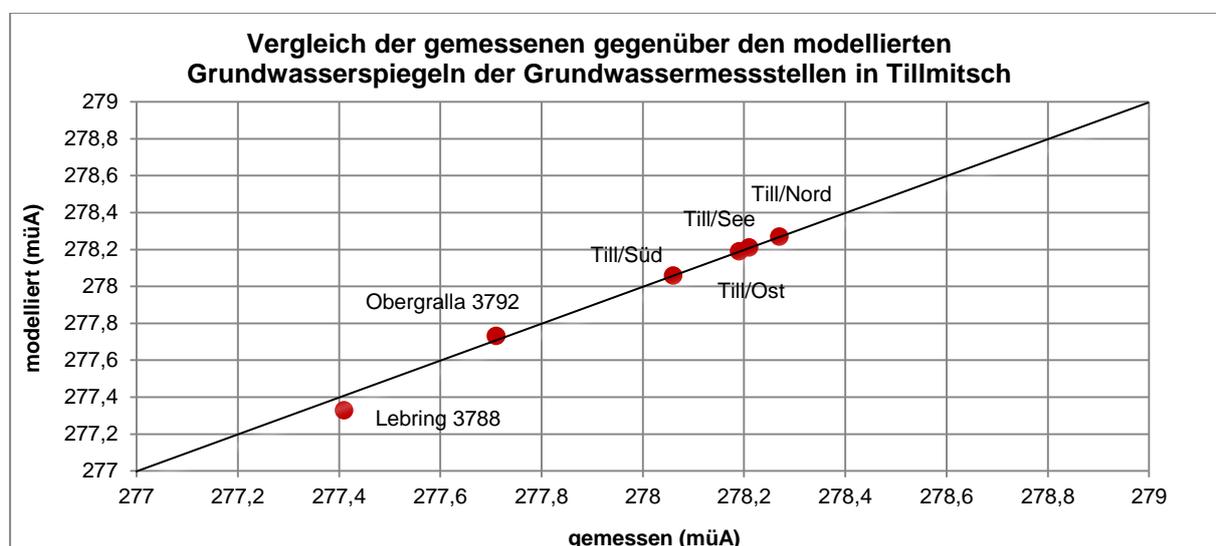


Abb. 9: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Tillmitsch

Tab. 14: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Tillmitsch [müA]

Messstelle	gemessen	modelliert	Differenz
Till/Nord	278,27	278,27	0,00
Till/Ost	278,19	278,19	0,00
Till/Süd	278,06	278,06	0,00
Till/See	278,21	278,21	0,00
Lebring 3788	277,41	277,33	-0,08
Obergralla	277,71	277,73	0,02

Die Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen zeigen im Nahbereich des Baggersees eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und modellierten Werten. Das Grundwasserspiegelgefälle im Nahbereich des Baggersees konnte nachgebildet werden. Die Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen Lebring 3788 und Obergralla 3792 zeigen eine geringe Abweichung von -0,08 m, bzw. 0,02 m.

Modellierte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel

Die modellierten Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel (siehe Abb. 10) zeigen durch die räumlich dicht liegenden Baggerseen eine starke Beeinflussung. Durch den westlich gelegenen Baggersee werden die Grundwasserisohypsen von der Rißterrasse kommend massiv versteilt. Abstromig der Seenkette ist ebenfalls ein erhöhter Gradient festzustellen. Der Einfluss der Trinkwasserförderung aus dem Grundwasserleiter (in der Karte mit Pumpstation vermerkt) bewirkt südöstlich des untersuchten Baggersees eine Absenkung des Grundwasserspiegels.

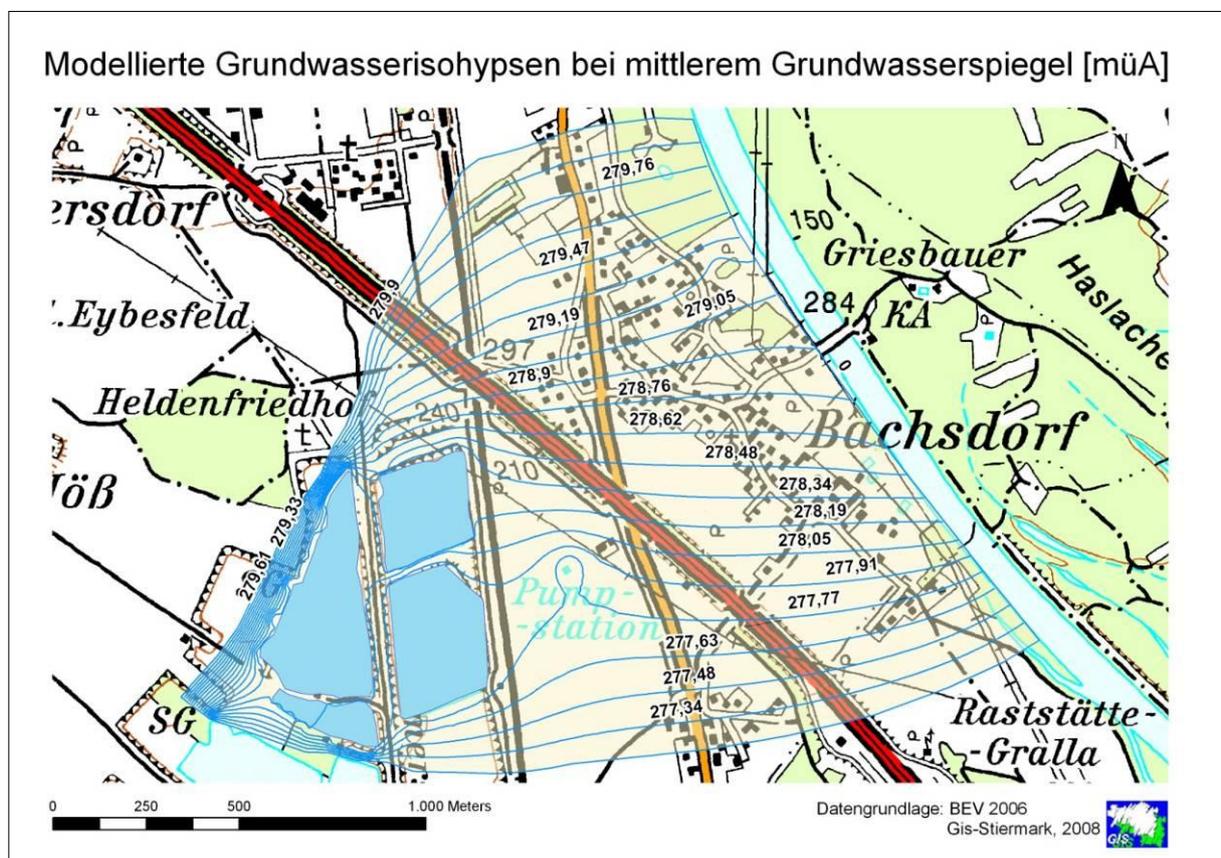


Abb. 10: Modellerte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel in Tillmitsch

Durchlässigkeitsbeiwerte der Seeflanken (schematisch)

Abb. 11 zeigt die aus den Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen abgeleiteten gemittelten Durchlässigkeitsbeiwerte in m/s. In anstromigen Bereichen ist keine Abdichtung festzustellen. Die Abdichtung östlich des Baggersees mit Durchlässigkeitsbeiwerten von $1,8 \cdot 10^{-4}$ m/s kann auf den Schilfgürtel, der in diesem Bereich vorzufinden ist, zurückgeführt werden. Abstromig zeigen sich geringere Durchlässigkeitsbeiwerte. Diese weisen auf eine beginnende Abdichtung gegenüber dem Grundwasserkörper hin.

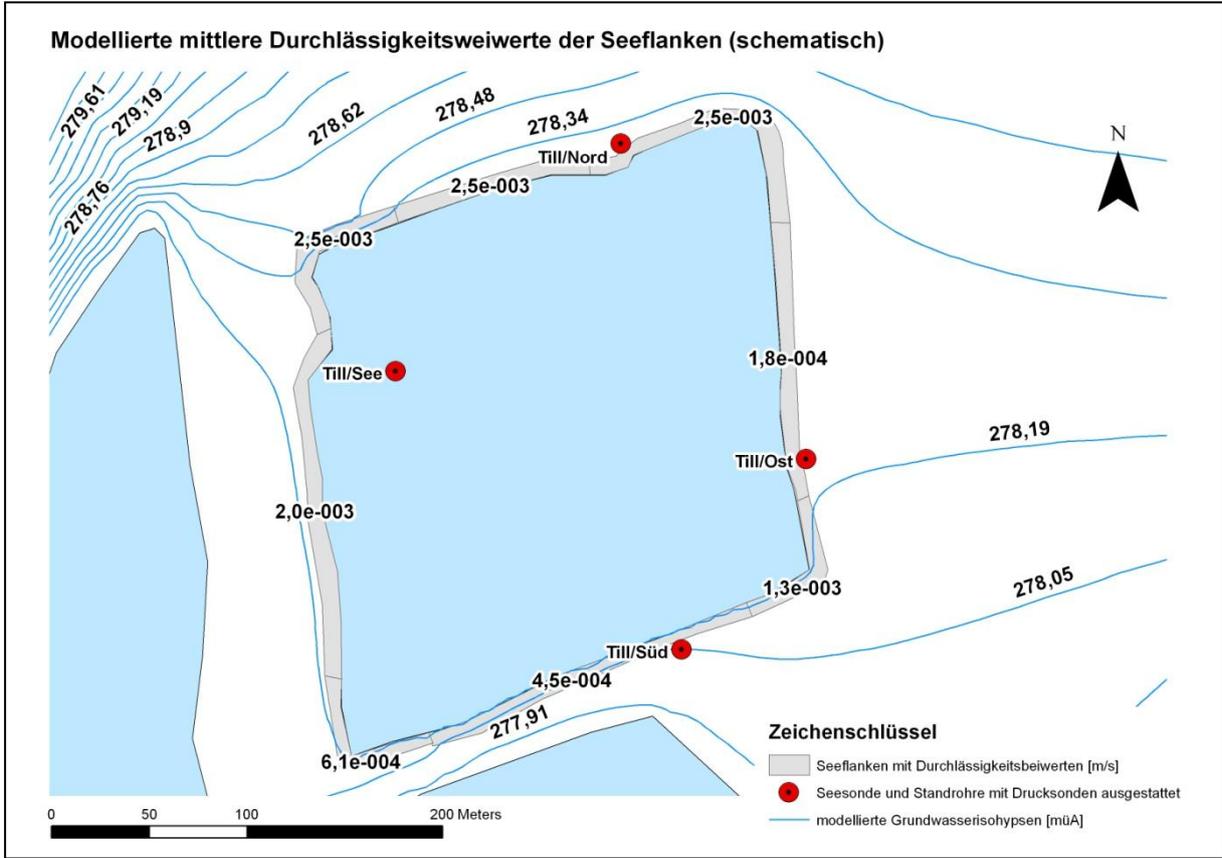


Abb. 11: Modellierte mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte [m/s] der Seeflanken des Baggersees in Tillmitsch (schematisch)

3.1.3 Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers

Der modellierte Grundwasserzustrom in den Baggersee beträgt $940 \text{ m}^3/\text{d}$, die Differenz zwischen potentieller Verdunstung und Niederschlag beträgt $45 \text{ m}^3/\text{d}$. Bei

einem Wasservolumen von 135.000 m³ bei mittlerem Grundwasserspiegel ergibt sich somit eine mittlere Verweilzeit des Seewassers von 137 Tagen.

3.1.4 Sensitivitätsanalyse

Bei der Variation der Durchlässigkeitsbeiwerte reagiert das Grundwasserströmungsmodell sensitiv. Bei einer Verminderung der Durchlässigkeitsbeiwerte des Modellgebietes reduzierte sich der Grundwasserabstrom auf 700 m³/d, die mittlere Verweilzeit erhöht sich auf 193 Tage. Bei einer Erhöhung der Durchlässigkeitsbeiwerte verringert sich die mittlere Verweilzeit, aufgrund des geringen Volumens des Baggersees, auf 114 Tage.

Das Modell reagiert robust auf die Variation der potentiellen Verdunstung des Sees. Die mittlere Verweilzeit des Seewassers streut zwischen 126 bis 131 Tagen. Die Anpassung an die gemessenen Grund- und Seewasserspiegel zeigte eine Verschlechterung gegenüber dem Ausgangsmodell.

Ohne Abdichtung steigt der Grundwasserabstrom auf 1.200 m³/d an, die mittlere Verweilzeit des Seewassers verkürzte sich auf 113 Tage.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Tab. 15 verzeichnet. Im Anhang F befinden sich die modellierten Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen der einzelnen Modellversionen.

Tab. 15: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Variation der Modellparameter	Ausgangsmodell	Durchlässigkeitsbeiwerte des Modellgebietes Ausgangsmodell = 100 %		Niederschlag minus potentieller Verdunstung (Seefläche): Ausgangsmodell = 280 mm/a		Ohne Abdichtung
		- 25 %	+ 25%	140 mm/a	420 mm/a	
Normierte Abweichung [%]	1,1	2,4	1,8	1,7	2,1	3,2
Niederschlag minus potentieller Verdunstung (Seefläche) [m ³ /d]	45	45	45	23	68	45
Grundwasserabstrom [m ³ /d]	985	700	1180	1030	1070	1200
mittlere Verweilzeit Seewasser [d]	137	193	114	131	126	113

3.2 Numerische Modellierung des Bezugsjahres 2009

Aufbauend auf dem numerische Grundwasserströmungsmodell das in Kapitel 3.1 vorgestellt wurde, werden nachfolgend die angepassten Eingangsparameter für das Bezugsjahr 2009 diskutiert.

3.2.1 Meteorologische Bedingungen 2009 und Stichtag der Modellierung

Gegenüber den langjährigen mittleren meteorologischen Bedingungen (N: 920 mm/a) war das Bezugsjahr 2009 mit 1319 mm/a niederschlagsreicher (siehe Abb. 12). Insbesondere langanhaltende Niederschläge in den Sommermonaten führten zu einem starken Anstieg des Grundwasserspiegels im Untersuchungsgebiet. Die potentielle Evaporation lag, trotz dem niederschlagsreichen Sommer, mit 733 mm/a über dem langjährigen Mittel von 640 mm/a (vgl. Tab. 8).

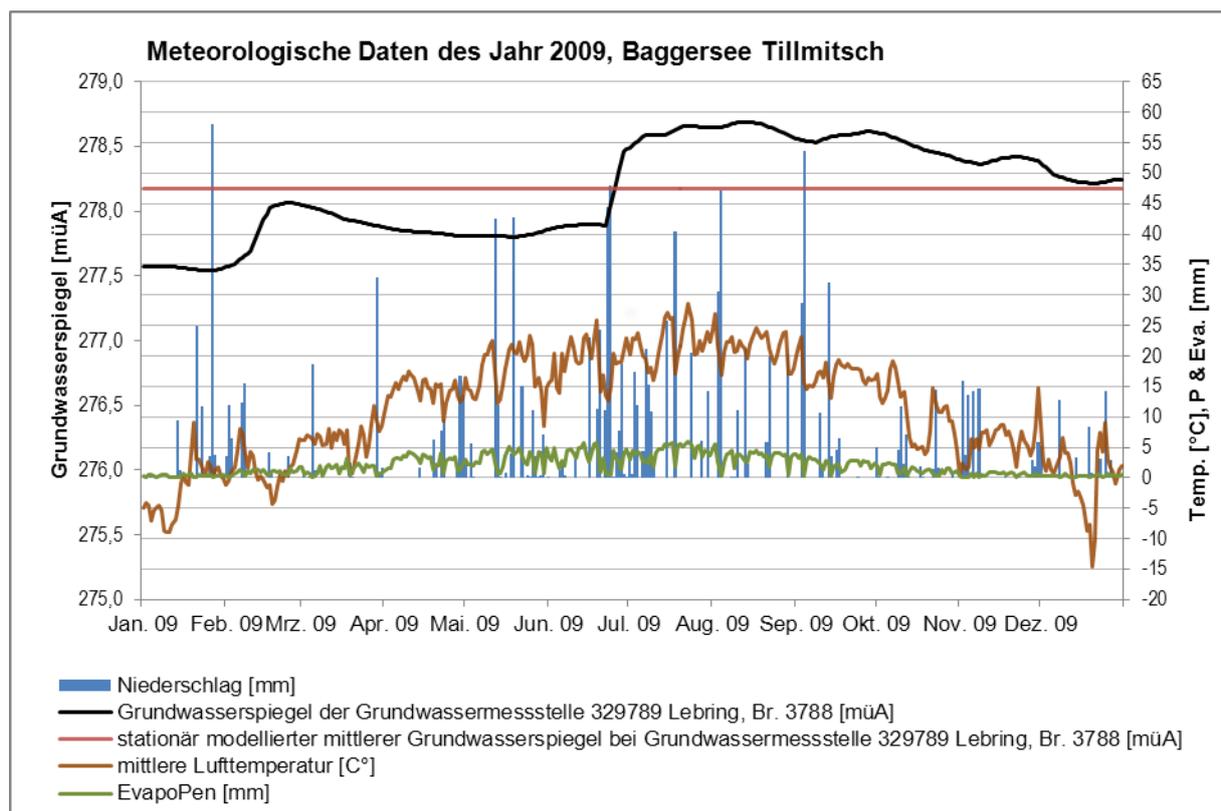


Abb. 12: Meteorologische Daten des Jahres 2009, Bezug: Wetterstation Wagna-Leibnitz (19021)

Der Stichtag der stationären Modellierung wurde von dem mittleren Grundwasserspiegel der Grundwassermessstelle 329789 Lebring, Br. 3788 (Bezug: Hydrographischer Dienst Stmk) abgeleitet (siehe Abb. 12). Die für diesen Stichtag

ermittelten Grund- und Seewasserspiegel sind zusammen mit den geänderten Eingangsparametern in Tab. 16 verzeichnet.

Tab. 16: Eingangsparameter zur Lösung des numerischen Grundwasserströmungsmodells in Tillmitsch (Bezugsjahr 2009)

Parameter		
	Evaporation _{Pen} [mm/a]	733
	Niederschlag [mm/a]	1319
Grund- und Seewasserspiegel zum 02.03.2009 [müA]		
	Till/Nord	278,91
	Till/Ost	278,80
	Till/Süd	278,64
	Till/See	278,81
	329789 Lebring, Br. 3788	278,14
	311266 Obergralla, Br. 3792	278,43
Randbedingungen* [müA]		
	nordwestliches Festpotential	280,74
	südliches Festpotential	277,90
	östliches Festpotential	277,90 – 280,74

*) siehe Kapitel 3.1.1

3.2.2 Güte der Modellierung

Die normierte Abweichung der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln beträgt 3,8 %. Tab. 6 zeigt die Unterschiede zwischen den gemessenen und den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Tillmitsch. Die Grundwassermessstelle Till/Süd zeigt eine Abweichung zwischen dem gemessenen gegenüber dem modellierten Wert von 0,18 m und konnte mit dem Modell nicht optimal erfasst werden. Der rasche Anstieg des Grundwasserspiegels im Untersuchungsgebiet zum Zeitpunkt der Modellierung könnte für diese Abweichung verantwortlich sein. Bei den wichtigen Grundwassermessstellen im Nahbereich des Baggersees konnte eine gute Anpassung an die gemessenen Grundwasserspiegel erreicht werden (vgl. Kapitel 3.1.2).

Tab. 17: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Tillmitsch [müA]

Messstelle	gemessen	modelliert	Differenz
Till/Nord	278,91	278,90	-0,01
Till/Ost	278,80	278,81	0,01
Till/Süd	278,64	278,82	0,18
Till/See	278,81	278,83	0,02
Lebring 3788	278,14	278,02	-0,12
Obergralla 3792	278,43	278,43	0,00

3.2.3 Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009)

Die mittlere Verweilzeit des Seewassers ist gegenüber dem langjährigen Mittel im Bezugsjahr 2009 um ca. 30 Tage geringer. Der Grundwasserzustrom in den Baggersee erhöhte sich auf ca. 1175 m³/d. Der effektive Eintrag durch den Niederschlag erhöhte sich aufgrund der Niederschlagsintensität auf 95 m³/d.

Tab. 18: Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009), Tillmitsch

Parameter	
Grundwasserzustrom* [m ³ /d]	1175
Niederschlag minus mittlere potentielle Evaporation* [m ³ /d]	95
Grundwasserabstrom* [m ³ /d]	1270
mittlere Verweilzeit des Seewassers [d]	106

3.3 Isotopenauswertung zur Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers

3.3.1 Eingangparameter

Abb. 13 zeigt das $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm der Wasserbilanzglieder des Baggersee Tillmitsch. Die Grundwasserproben (Anstrom) liegen leicht unterhalb der Niederschlagsgeraden. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Seewasserproben streuen im Jahresverlauf zwischen $-6,9$ und $-7,6$ ‰, die der Grundwasserproben im Jahresverlauf zwischen $-8,4$ und $-9,1$ ‰. Die Seewasserproben zeigten bei den saisonalen Beprobungskampagnen, mit Ausnahme der Sommerproben, tiefenorientiert sehr homogene $\delta^{18}\text{O}$ -Werte, diese lassen auf eine gute Durchmischung des Seewassers schließen. In den Sommermonaten konnte in den tiefen Seewasserproben (1C, 2C, 3C) ein geringer Anstieg der $\delta^{18}\text{O}$ -Werte beobachtet werden (von $6,9$ ‰ auf $7,3$ ‰).

Im Detail sind die Isotopenmesswerte im Anhang G nachzuschlagen.

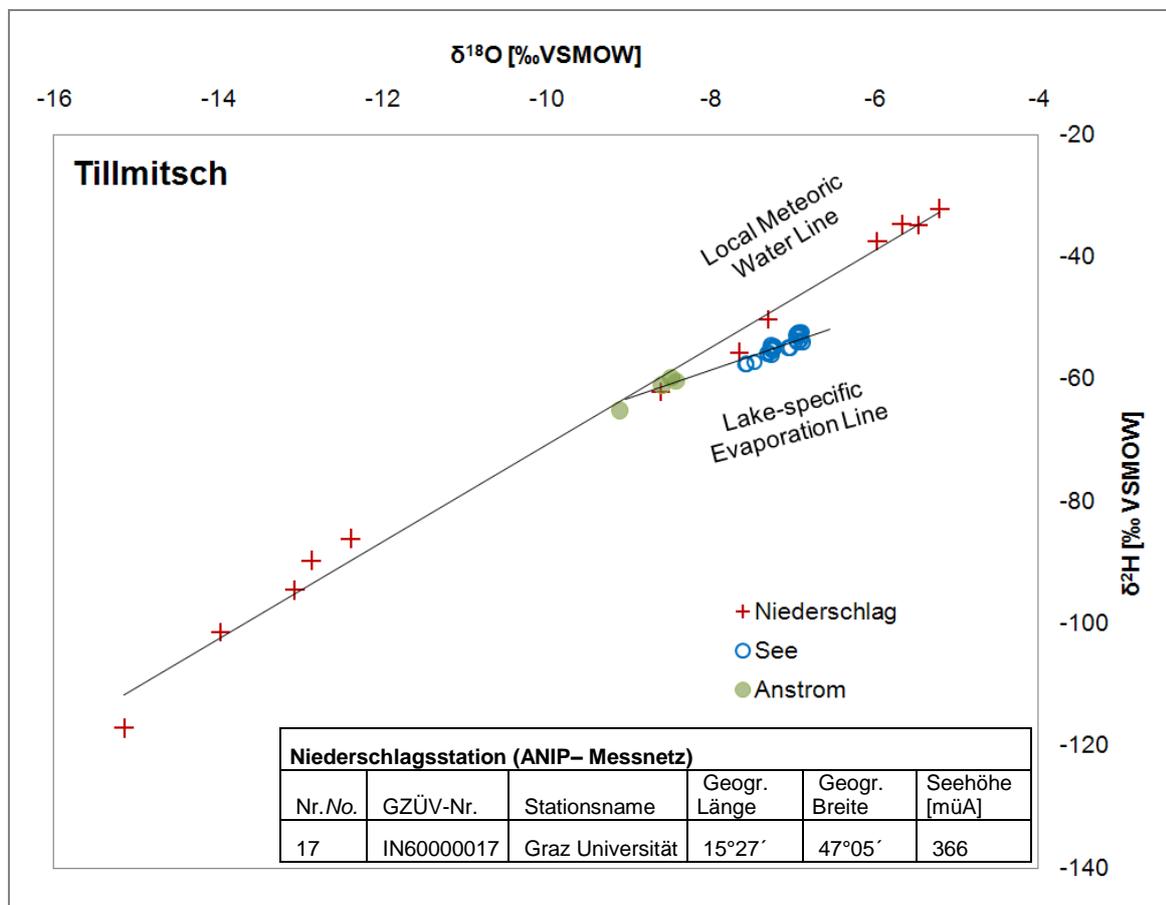


Abb. 13: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm Baggersee Tillmitsch

Die Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung sind in Tab. 19 vermerkt.

Tab. 19: Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung in Tillmitsch

Parameter	
relative Luftfeuchtigkeit [%] (evaporationsgewichtet)	66
Temperatur [°C] (evaporationsgewichtet)	17,2
Evaporation _{Pen} [mm/a]	733
Niederschlag [mm/a]	1319
Isotopenkonzentration des anstromigen Grundwassers [‰ VSMOW] (Mittelwert aus 4 saisonalen Proben)	-8,6
Isotopenkonzentration des Seewassers [‰ VSMOW] (Mittelwert aus 30 saisonalen Proben)	-7,1
Isotopenkonzentration des verdunsteten Seewassers [‰ VSMOW] (evaporationsgewichtet)	-28,6
Isotopenkonzentration des Niederschlags [‰ VSMOW] (gewichtet nach Niederschlagsvolumen und jeweiliger Isotopenkonzentration)	-8,2

3.3.2 Ergebnis der Isotopenauswertung

Im Jahr 2009 zeigte sich ein mittlerer Grundwasserzustrom von ca. 1500 m³/d, zusammen mit einem mittleren Niederschlagseintrag von 95 m³/d ergibt sich eine mittlere Verweilzeit des Seewassers von ca. 85 Tagen. Im Vergleich mit der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung des Bezugsjahres 2009 zeigt sich eine gute Übereinstimmung (siehe Kapitel 3.2.2).

Tab. 20: Ergebnis der Isotopenauswertung, Baggersee Tillmitsch

Parameter	
Grundwasserzustrom* [m ³ /d]	1500
Niederschlag minus mittlere potentielle Evaporation* [m ³ /d]	95
Grundwasserabstrom* [m ³ /d]	1595
mittlere Verweilzeit des Seewassers [d]	85

*) : mittlere Werte des Jahres 2009

4 Mittlere Verweilzeit des Seewassers des Baggersees in Pframa

4.1 Numerische Modellierung der langjährigen mittleren meteorologischen und hydrologischen Bedingungen

4.1.1 Eingangsparameter

Der Baggersee in Pframa ist nicht bis zum Grundwasserstauer ausgekieselt. Um Zu- und Abflüsse an der Sohle des Baggersees zu erfassen wurde ein dreidimensionales Grundwasserströmungsmodell umgesetzt. Die Randbedingungen wurden aus den Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel abgeleitet. Diese wurden aus dem numerischen Grundwasserströmungsmodell von Fank et al. (2008) übernommen.

Die in unmittelbarer Nähe zum Baggersee abgeteufte Grundwassermessstellen zeigten im Beobachtungszeitraum die gleiche absolute Höhe des Grundwasserspiegels, ein Gradient im Nahbereich des Sees konnte nicht erfasst werden. Die Ursache dürfte in der geringen Größe des Baggersees (3,7 ha) und dem geringen Gradienten des unbeeinflussten Grundwassers im Untersuchungsgebiet (ca. 0,3 ‰) liegen. Die Auskiesung des Baggersees wurde 2008 abgeschlossen, weshalb eine fortgeschrittene Abdichtung gegenüber dem Grundwasser nicht zu erwarten ist.

Aufgrund der gleichen Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen (siehe Anhang F) im Nahbereich des Baggersees wurde für die Überprüfung der modellierten gegenüber den gemessenen Grundwasserspiegeln der Seewasserspiegel des Baggersees als Referenz angenommen. Das Festpotential der Randbedingungen wurde aus dem Grundwasserströmungsmodell von Fank et al. (2008) übernommen. Für die westliche Randbedingung beträgt diese 144 müA und für die östliche Randbedingung 143 müA. Im Modellgebiet lag der Grundwasserspiegel Anfang Oktober in etwa im Bereich des mittleren Grundwasserspiegels (siehe Anhang F).

Abb. 14 zeigt die Umsetzung der Randbedingungen und die Lage der Grundwassermessstellen im Untersuchungsgebiet.

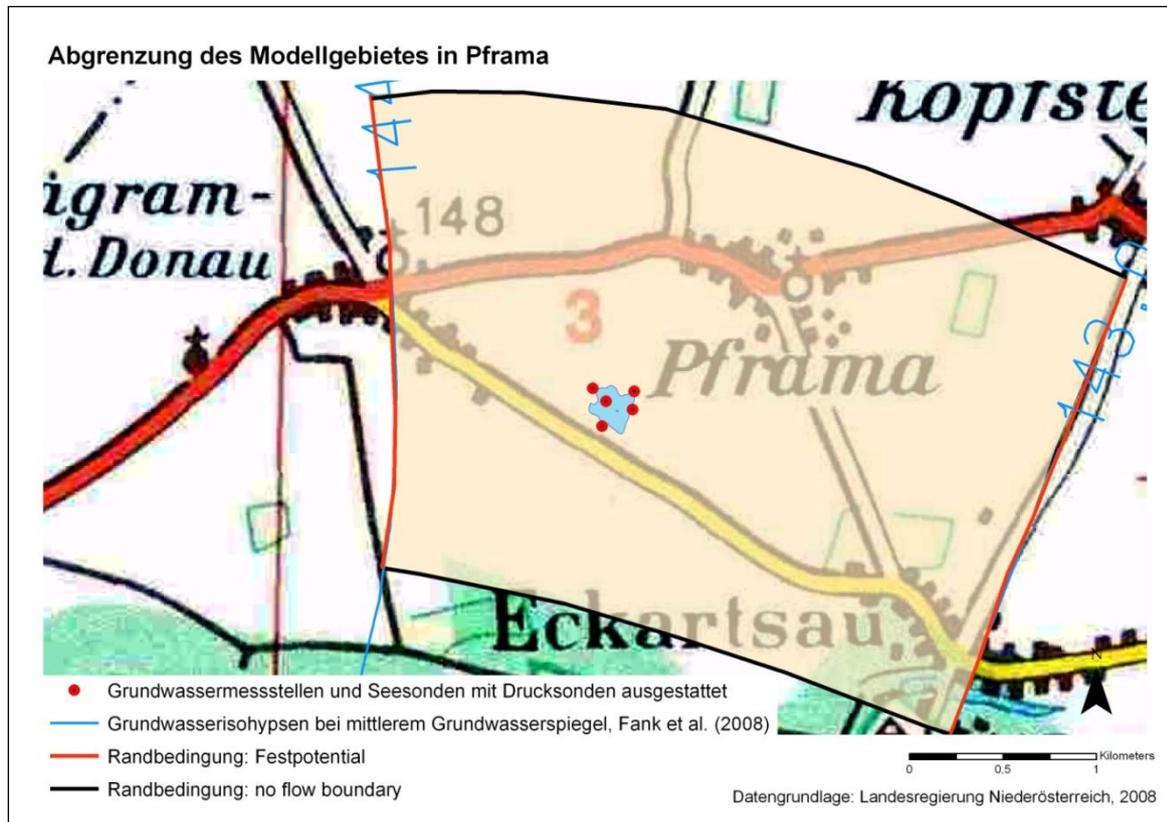


Abb. 14: Abgrenzung des Modellgebietes in Pframa

Aufbau des dreidimensionalen Modells

Um die Morphologie des Baggersees und den mitunter stattfindenden Zustrom an der Sohle zu erfassen wurde ein dreidimensionales Modell mit zwei vertikalen Abschnitten (Layers) und drei Schnitten (Slices) erstellt (siehe Abb. 15). Im ersten Abschnitt wurde die Bathymetrie des Baggersees eingelesen (Slice 2), im zweiten Abschnitt die absolute Höhe des Grundwasserstauers (Slice 3). Die Netzgenerierung erfolgte mit sechsknotigen, triangulären Prismen.

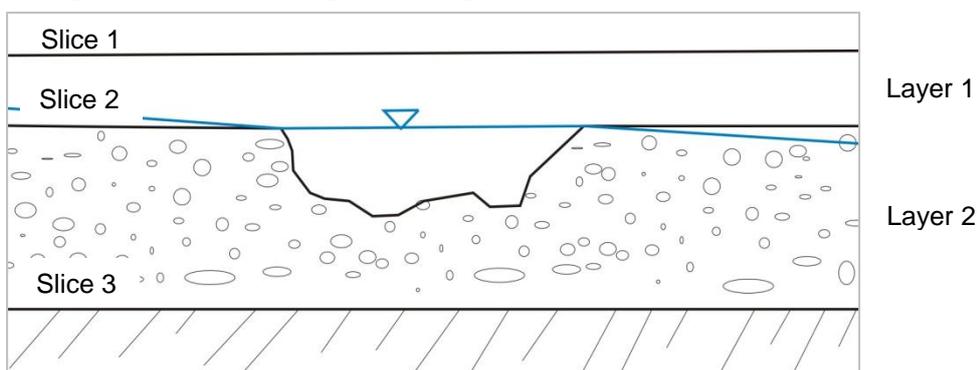


Abb. 15: Aufbau des dreidimensionalen Grundwasserströmungsmodells

Durchlässigkeitsbeiwerte

Die Durchlässigkeitsbeiwerte des Modellgebietes wurden aus dem Grundwasserströmungsmodell von Fank et al. (2008) übernommen. Die Durchlässigkeitsbeiwerte im Umfeld des Baggersees betragen ca. $5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Die Bohrprofile, der für das Projekt abgeteufte Grundwassermessstellen, zeigten einen homogenen Aufbau des Grundwasserkörpers. Mittelkiese bis Feinkiese sind vorherrschend.

Grundwasserstauer

Der Grundwasserstauer besteht hauptsächlich aus Mergel und Tonschiefer, bzw. lokalen Tonen. Im nordwestlichen Bereich des Modellgebietes befinden sich die Ausläufer der Obersiebenbrunnensenke, es kann eine Grundwassermächtigkeit von bis zu 46 m angenommen werden. Nach Südost steigt der Grundwasserstauer an, die Grundwassermächtigkeit beträgt ca. 19 m. Im Nahbereich des untersuchten Baggersees beträgt die Grundwassermächtigkeit ca. 34,5 m (Darsow et al., 2009).

4.1.2 Güte und Ergebnis der Modellierung

Zum Zeitpunkt des Stichtages zeigen die gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln eine normierte Abweichung von 2 %. Die maximale Abweichung beträgt 0,01 m. Tab. 21 zeigt die Unterschiede zwischen den modellierten und den gemessenen Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen. Es konnte eine sehr gute Anpassung des Modells an gemessene Grundwasserspiegel erreicht werden.

Tab. 21: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Pframa [müA]

Messstelle	gemessen	modelliert	Differenz
Pframa/Nord	143,73	143,72	-0,01
Pframa/Ost	143,73	143,72	-0,01
Pframa/Süd	143,73	143,73	0,00
Pframa West	143,73	143,74	0,01
Pframa/See	143,73	143,73	0,00

Der Seewasserspiegel wurde als Referenzwert verwendet. Die Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen streuen um +/-1 cm.

Modellierte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel

Abb. 16 zeigt die modellierten Grundwasserisohypsen im Nahbereich des untersuchten Baggersees in Pframa. Aufgrund des geringen Grundwasserspiegelgefälles im Untersuchungsgebiet (ca. 0,3 ‰) und dem Fehlen einer ausgeprägten Seenabdichtung gegenüber dem Grundwasserkörper ist die Beeinflussung der Grundwasserisohypsen nicht ausgeprägt.

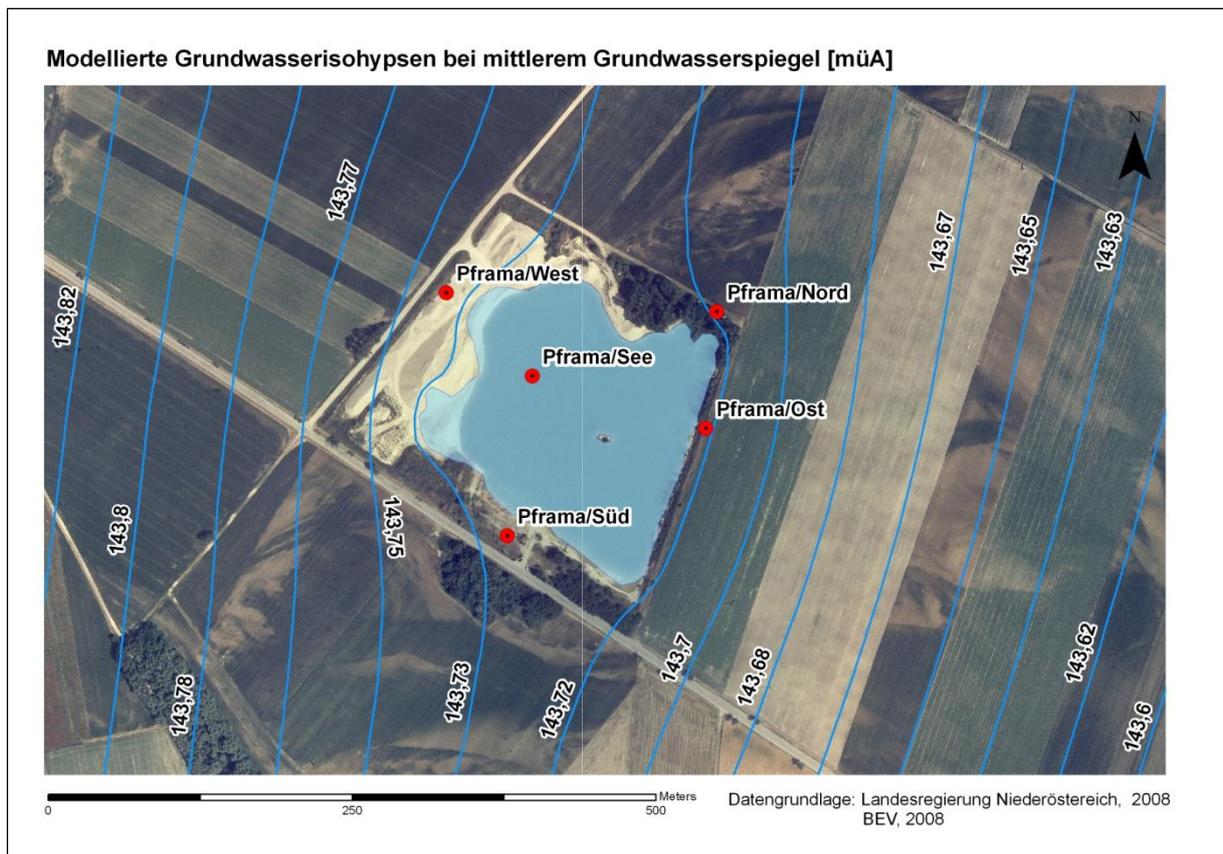


Abb. 16: Modellerte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel in Pframa

4.1.3 Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers

Der Grundwasserzustrom in den Baggersee beträgt $275 \text{ m}^3/\text{d}$, die Differenz zwischen potentieller Verdunstung und Niederschlag beträgt ca. $-5,7 \text{ m}^3/\text{d}$. Bei einem Wasservolumen von 200.000 m^3 bei mittlerem Grundwasserspiegel ergibt sich eine mittlere Verweilzeit des Seewassers von ca. 740 Tagen (2 Jahre).

4.1.4 Sensitivitätsanalyse

Das Modell reagiert robust auf die Variation der potentiellen Verdunstung des Sees. Höhere Verdunstungsraten über der Seefläche werden durch verstärkten Zustrom ausgeglichen. Bei der Variation der Durchlässigkeitsbeiwerte des Modellgebietes reagierte das Grundwasserströmungsmodell sensitiv, so steigerte sich der Grundwasserabstrom bei einer Erhöhung der Durchlässigkeitsbeiwerte auf 325 m³/d, die mittlere Verweilzeit verkürzte sich dementsprechend um 128 Tage. Bei einer Verringerung der Durchlässigkeitsbeiwerte des Modellgebietes erhöhte sich die mittlere Verweilzeit des Seewassers auf 930 Tage (2,5 Jahre).

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Tab. 22 verzeichnet. Im Anhang F befinden sich die modellierten Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen der einzelnen Modellversionen.

Tab. 22: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Variation der Modellparameter	Ausgangsmodell	Durchlässigkeitsbeiwerte des Modellgebietes Ausgangsmodell = 100 %		Niederschlag minus potentieller Verdunstung (Seefläche): Ausgangsmodell = - 55 mm/a	
		- 25 %	+ 25%	0 mm/a	- 110 mm/a
normierte Abweichung [%]	2,0	2,7	4,0	2,0	2,0
Niederschlag minus potentieller Verdunstung (Seefläche) [m ³ /d]	-5,7	-5,7	-5,7	0	-11,5
Grundwasserabstrom [m ³ /d]	270	215	325	270	270
mittlere Verweilzeit Seewasser [d]	741	930	615	741	741

4.2 Numerische Modellierung des Bezugsjahres 2009

Aufbauend auf dem numerischen Grundwasserströmungsmodell das in Kapitel 4.1 vorgestellt wurde, werden nachfolgend die angepassten Eingangsparameter für das Bezugsjahr 2009 diskutiert.

4.2.1 Meteorologische Bedingungen 2009 und Stichtag der Modellierung

Im Bezugsjahr 2009 zeigt sich ein dem langjährigen Mittel entsprechender Niederschlag von 559 mm/a. Die potentielle Evaporation, berechnet nach Penman, lag mit 793 mm/a über dem langjährigen Durchschnitt von 630 mm/a. (vgl. Tab. 23).

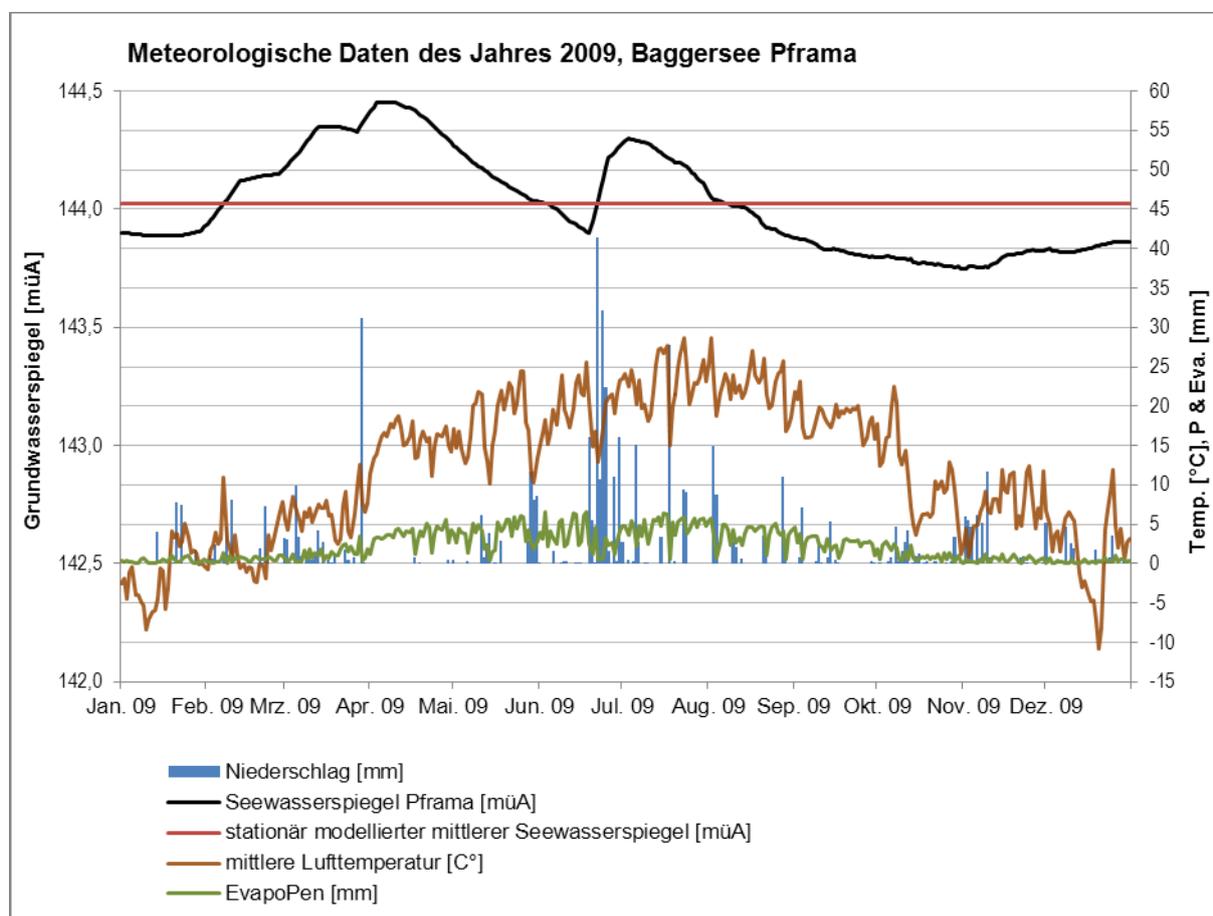


Abb. 17: Meteorologische Daten des Jahres 2009, Bezug: Wetterstation Groß Enzersdorf (5972)

Der Stichtag der stationären Modellierung wurde von dem mittleren Seewasserspiegel des Baggersees Pframa abgeleitet (siehe Abb. 17). Die für diesen Stichtag ermittelten Grund- und Seewasserspiegel sind zusammen mit den geänderten Eingangsparametern in Tab. 23 verzeichnet. Aufgrund des Einflusses eines Donauhochwassers zeigt sich in den Frühlingsmonaten ein erhöhter

Grundwasserspiegel im Untersuchungsgebiet. Gegenüber dem langjährigen Mittel liegt der Grundwasserspiegel um ca. 0,3 m höher.

Tab. 23: Eingangsparameter zur Lösung des numerischen Grundwasserströmungsmodells in Pframa (Bezugsjahr 2009)

Parameter		
	Evaporation_{Pen} [mm/a]	793
	Niederschlag [mm/a]	559
Grund- und Seewasserspiegel zum 07.08.2009 [müA]		
	Pframa/Nord	144,03
	Pframa/Ost	144,03
	Pframa/Süd	144,03
	Pframa/West	144,03
	Pframa/See	144,03
Randbedingungen* [müA]		
	westliches Festpotential	144,30
	östliches Festpotential	143,30

*) siehe Kapitel 4.1.1

4.2.2 Güte der Modellierung

Die normierte Abweichung der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln beträgt 2 %. Tab. 24 zeigt die Unterschiede zwischen den gemessenen und den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Pframa, es konnte eine gute Anpassung erreicht werden.

Tab. 24: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Pframa [müA]

Messstelle	gemessen	modelliert	Differenz
Pframa/Nord	144,03	144,02	-0,01
Pframa/Ost	144,03	144,02	-0,01
Pframa/Süd	144,03	144,03	0,00
Pframa/West	144,03	144,04	0,01
Pframa/See	144,03	144,03	0,00

4.2.3 Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009)

Die mittlere Verweilzeit des Seewassers ist gegenüber dem langjährigen Mittel im Bezugsjahr 2009 um ca. 130 Tage geringer. Der Grundwasserzustrom in den

Baggersee erhöhte sich auf ca. 350 m³/d. Die Evaporation des Sees übersteigt den Eintrag durch den Niederschlag um 24 m³/d.

Tab. 25: Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009), Pframa

Parameter	
Grundwasserzustrom* [m³/d]	350
Niederschlag minus mittlere potentielle Evaporation* [m³/d]	-24
Grundwasserabstrom* [m³/d]	326
mittlere Verweilzeit des Seewassers [a]	1,7

4.3 Isotopenauswertung zur Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers

4.3.1 Eingangparameter

Abb. 18 zeigt das $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm der Wasserbilanzglieder des Baggersees in Pframa. Die Grundwasserproben (Anstrom) liegen auf der Niederschlagsgeraden. Die Isotopenfraktionierung der Seewasserproben weist eine Streubreite von -5,9 bis -8,8 ‰ auf, zusammen mit einer ausgeprägten Temperaturschichtung zeigt sich eine geringere Fraktionierung der tiefen Sommerwasserproben. Für die Isotopenauswertung wurden die tiefen Sommerwasserproben (1C, 2C und 3C) nicht in die Berechnung aufgenommen (vgl. Stets et al., 2010, Yi et al., 2007). Die anstromigen Grundwasserproben streuen im Jahresverlauf sehr begrenzt zwischen -10,3 und -10,5 ‰.

Im Detail sind die Isotopenmesswerte im Anhang G nachzuschlagen.

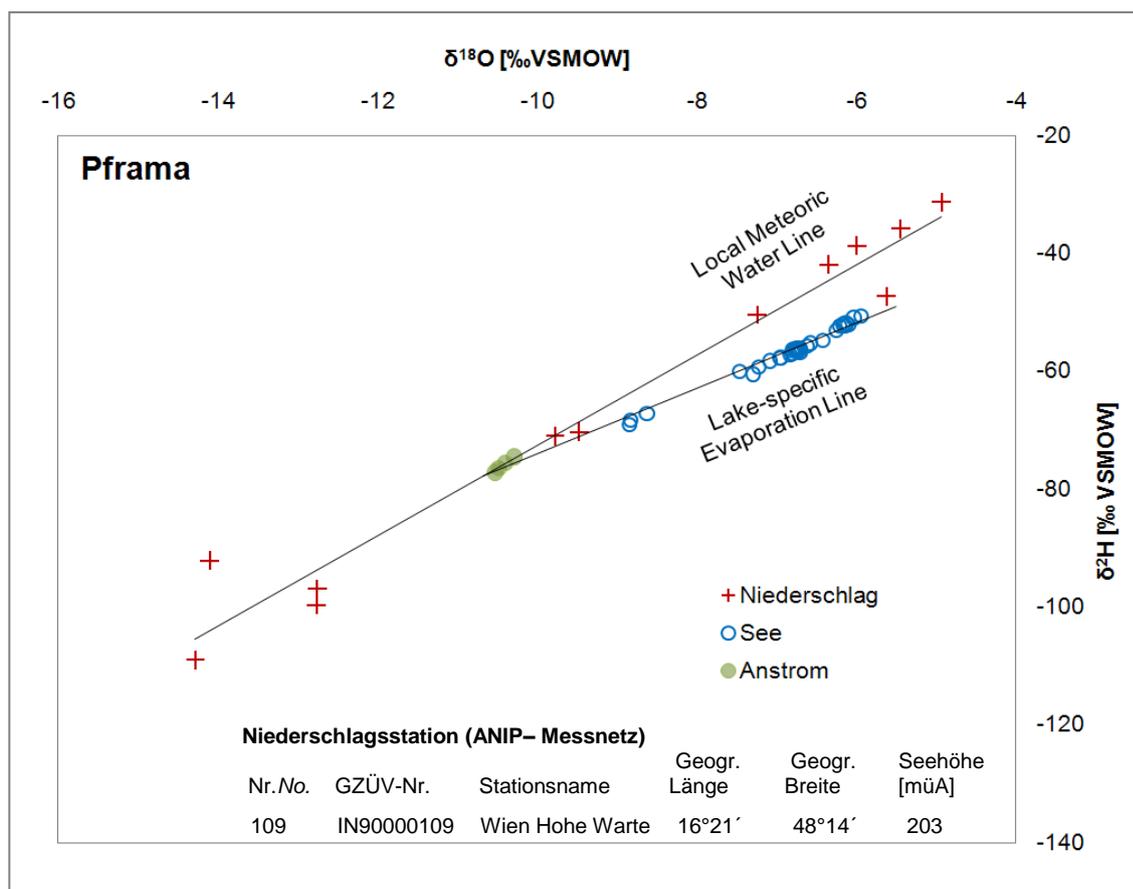


Abb. 18: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm Baggersee Pframa

Die Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung sind in Tab. 26 vermerkt.

Tab. 26: Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung in Pframa

Parameter	
relative Luftfeuchtigkeit [%] (evaporationsgewichtet)	61,9
Temperatur [°C] (evaporationsgewichtet)	18,3
Evaporation _{Pen} [mm/a]	793
Niederschlag [mm/a]	559
Isotopenkonzentration des anstromigen Grundwassers [‰ VSMOW] (Mittelwert aus 4 saisonalen Proben)	-10,4
Isotopenkonzentration des Seewassers [‰ VSMOW] (Mittelwert aus 27 saisonalen Proben)	-6,6
Isotopenkonzentration des verdunsteten Seewassers [‰ VSMOW] (evaporationsgewichtet)	-27,6
Isotopenkonzentration des Niederschlags [‰ VSMOW] (gewichtet nach Niederschlagsvolumen und jeweiliger Isotopenkonzentration)	-8,5

4.3.2 Ergebnis der Isotopenauswertung

Im Jahr 2009 zeigte sich ein mittlerer Grundwasserzustrom von ca. 423 m³/d, zusammen mit einer potentiellen Evaporation, die den Niederschlagseintrag um 24 m³/d übersteigt, ergibt sich eine mittlere Verweilzeit des Seewassers von ca. 1,4 Jahren. Im Vergleich mit der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung des Bezugsjahres 2009 zeigt sich eine gute Übereinstimmung (siehe Kapitel 4.2.2).

Tab. 27: Ergebnis der Isotopenauswertung, Baggersee Pframa

Parameter	
Grundwasserzustrom* [m ³ /d]	423
Niederschlag minus mittlere potentielle Evaporation* [m ³ /d]	-24
Grundwasserabstrom* [m ³ /d]	399
mittlere Verweilzeit des Seewassers [a]	1,4

*) : mittlere Werte des Jahres 2009

5 Mittlere Verweilzeit des Seewassers des Baggersees in Persenbeug

5.1 Numerische Modellierung der langjährigen mittleren meteorologischen und hydrologischen Bedingungen

5.1.1 Eingangsparameter

Die Randbedingungen für die stationäre Modellierung wurden aus den Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel (Amt der NÖ Landesregierung, 2009) abgeleitet. Die Messungen des Hydrographischen Dienstes NÖ bei der Messstelle „303008, Persenbeug, Bl 2058.001“ konnten aufgrund einer Beschädigung dieser nicht verwendet werden.

Die Auswertung der Grundwasserspiegel der in unmittelbarer Nähe zum Baggersee abgeteufte Grundwassermessstellen (siehe Anhang F) wiesen Anfang Dezember über einen längeren Zeitraum einen stabilen mittleren Grundwasserspiegel auf. Als Stichtag der Modellierung wurde der 05.12.2009 verwendet (siehe Tab. 28).

Tab. 28: Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen in Persenbeug zum 05.12.2009

Messstelle	Grundwasserspiegel
Pers/Nord	214,27 müA
Pers/Ost	214,26 müA
Pers/Süd	214,24 müA
Pers/West	214,27 müA
Pers/See	214,27 müA

Abb. 19 (folgende Seite) zeigt die Umsetzung der Randbedingungen und die Lage der Grundwassermessstellen. Das Festpotential, abgeleitet aus den Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel wurde bei der westlichen Randbedingung mit 214,31 müA, bei der östlichen mit 214,16 müA angesetzt. Das Grundwasserspiegelgefälle beträgt im Untersuchungsgebiet bei mittlerem Grundwasserspiegel ca. 0,2 ‰. An den nordöstlichen Bereich des Modellgebietes (abstromig des Baggersees) grenzt eine aktive Nassbaggerung, nach Auswertung der Orthophotos und Felderhebungen zeigte diese jedoch nicht die in der ÖK 50 verzeichneten Ausmaße.

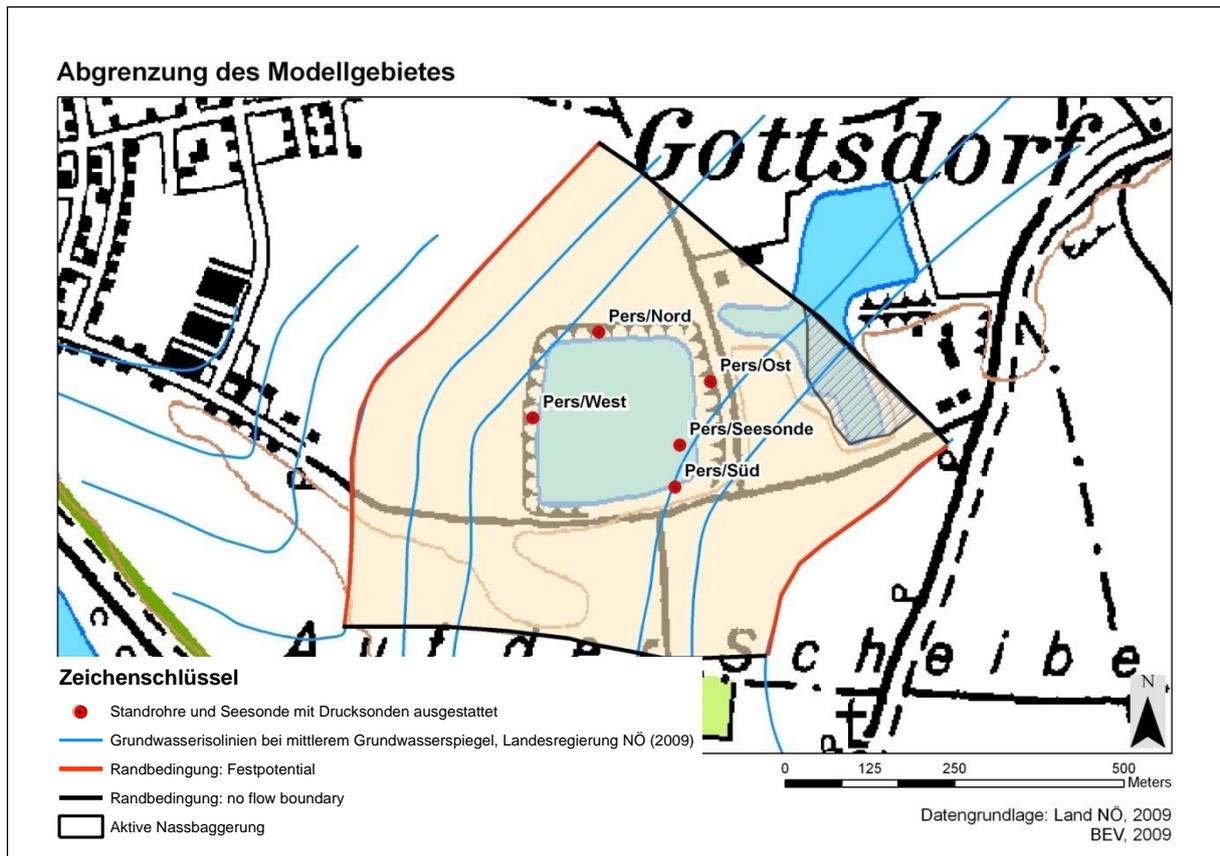


Abb. 19 Abgrenzung des Modellgebietes in Persenbeug

Durchlässigkeitsbeiwerte

Die Durchlässigkeitsbeiwerte betragen im Untersuchungsgebiet im Mittel $5 \cdot 10^{-3}$ m/s (Scheidleder et al., 2005). Der Grundwasserleiter zeigte bei den für das Projekt abgeteufte Grundwassersonden einen relativ homogenen Aufbau. Mittelkies bis Feinkies, teilweise grobsandig wurden im Bohrprofil erfasst.

Grundwasserstauer

Die absolute Höhe des Grundwasserstauers wurde von den abgeteufte Grundwassermessstellen abgeleitet und mit den Ergebnissen der Tiefenvermessung des Baggersees verschnitten. Die Höhe des Grundwasserstauers wurde gebietseinheitlich mit 205,6 müA angenommen.

5.1.2 Güte und Ergebnis der Modellierung

Zum Stichtag der Modellierung konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen erreicht werden (siehe Abb. 20 und Tab. 29).

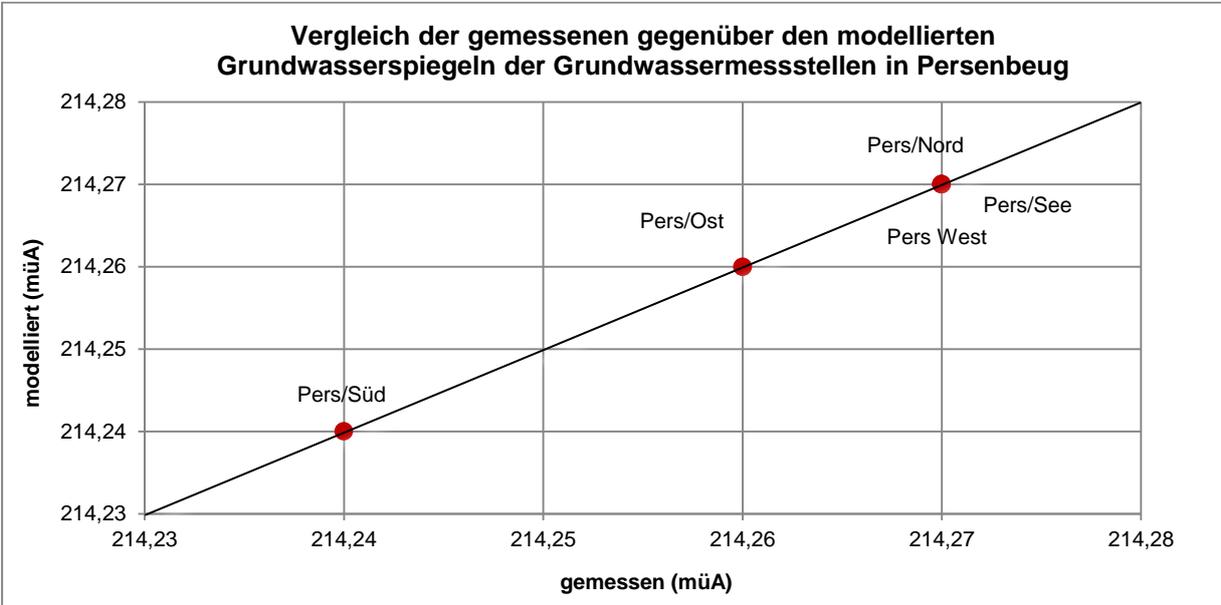


Abb. 20: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Persenbeug

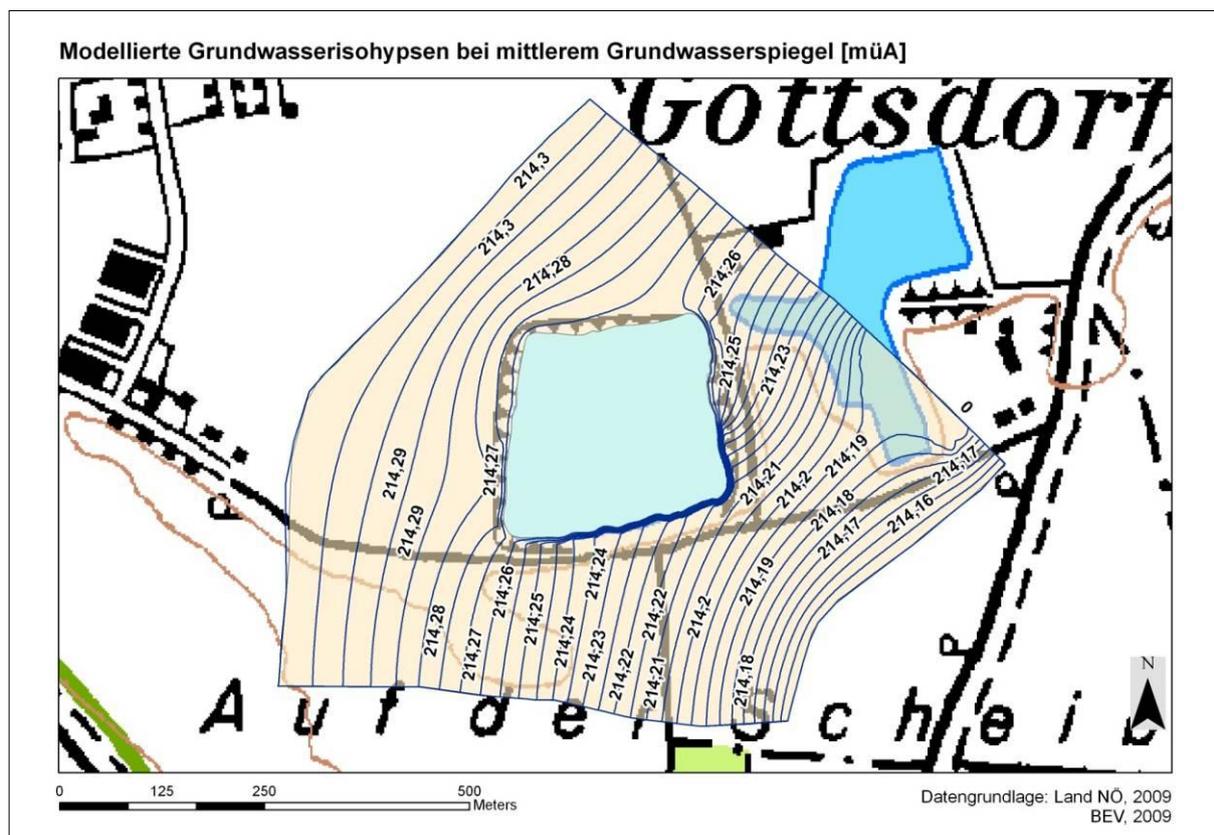
Tab. 29 Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Persenbeug [müA]

Messstelle	gemessen	modelliert	Differenz
Pers/Nord	214,27	214,27	0,00
Pers/Ost	214,26	214,26	0,00
Pers/Süd	214,24	214,24	0,00
Pers West	214,27	214,27	0,00
Pers/See	214,27	214,27	0,00

Modellierte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel

Die Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel (Abb. 21) zeigen südöstlich, abstromig des Baggersees, ein erhöhtes Grundwasserspiegelgefälle. Dieses ist auf eine fortgeschrittene Abdichtung gegenüber dem Grundwasserleiter zurückzuführen, in anstromigen Bereichen ist keine Abdichtung vom Grundwasserspiegelgefälle ableitbar.

Abb. 21: Modellierte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel in Persenbeug



Durchlässigkeitsbeiwerte der Seeflanken (schematisch)

Abb. 22 zeigt die gemittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im Nahbereich der Uferzonen in m/s. In abstromigen Bereichen ist eine Abdichtung gegenüber dem Grundwasserleiter zu beobachten, die Durchlässigkeitsbeiwerte bewegen sich in diesen Bereichen zwischen 10^{-4} bis $2 \cdot 10^{-5}$ m/s.

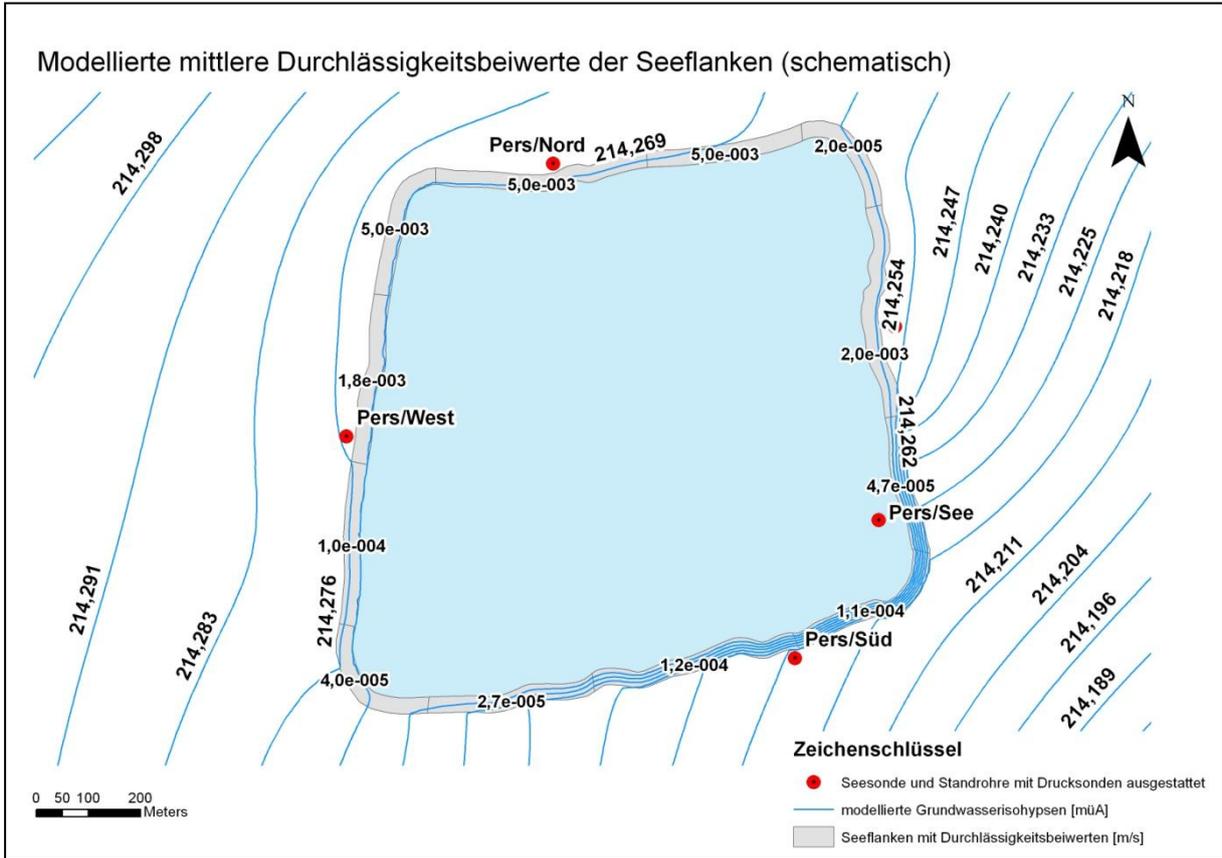


Abb. 22: Modellerte mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte [m/s] der Seeflanken des Baggerssees in Persenbeug (schematisch)

5.1.3 Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers

Der Grundwasserzustrom in den Baggerssee beträgt 275 m³/d, die Differenz zwischen der potentiellen Verdunstung und dem Niederschlag über der Seefläche beträgt 30 m³/d. Bei einem Wasservolumen von 338.000 m³ bei mittlerem Grundwasserspiegel ergibt sich eine mittlere Verweilzeit des Seewassers von ca. 1.100 Tagen (3 Jahre).

5.1.4 Sensitivitätsanalyse

Das Grundwasserströmungsmodell reagiert robust auf die Erhöhung der potentiellen Verdunstung des Sees. Durch die unvollständige Anpassung der modellierten an die gemessenen Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen im Nahbereich des Baggersees (normierte Abweichung 5,7 %) kann der erhöhte Grundwasserabstrom bei dieser Modellsimulation erklärt werden. Bei einer Verringerung der potentiellen Verdunstung des Sees erhöht sich der Grundwasserabstrom auf 350 m³/d, die mittlere Verweilzeit des Seewassers verringert sich auf ca. 970 Tage (siehe Tab. 30).

Bei einer Erhöhung der Durchlässigkeitsbeiwerte reagiert das Modell sensitiv, die mittlere Verweilzeit des Seewassers verringerte sich auf ca. 900 Tage. Die Anpassung der modellierten an die gemessenen Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen konnte nicht erreicht werden. Bei einer Verringerung der Durchlässigkeitsbeiwerte konnte die Anpassung an die gemessenen Grundwasserspiegel erreicht werden, der Grundwasserabstrom reduzierte sich auf 250 m³/d.

Insgesamt streut die mittlere Verweilzeit des Seewassers bei der für das Grundwasserströmungsmodell durchgeführten Sensitivitätsanalyse zwischen 2,4 - 3,7 Jahren.

Ohne eine abdichtende Schicht steigt der Grundwasserabstrom auf ca. 520 m³/d, die mittlere Verweilzeit des Seewassers beträgt ca. 1,8 Jahre.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Tab. 30 verzeichnet. Im Anhang F befinden sich die modellierten Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen der einzelnen Modellversionen.

Tab. 30: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des Grundwasserströmungsmodells Persenbeug

Variation der Modellparameter	Ausgangsmodell	Durchlässigkeitsbeiwerte des Modellgebietes Ausgangsmodell = 100 %		Niederschlag minus potentieller Verdunstung (Seefläche): Ausgangsmodell = 180 mm/a		ohne Abdichtung
		- 25 %	+ 25%	90 mm/a	270 mm/a	
normierte Abweichung [m]	0,00	0,00	4,00	4,00	1,00	5,00
Niederschlag minus potentieller Verdunstung (Seefläche) [m ³ /d]	30	30	30	15	45	30
Grundwasserabstrom [m ³ /d]	305	250	390	310	350	520
mittlere Verweilzeit Seewasser [d]	1108	1352	867	1090	966	650

5.2 Numerische Modellierung des Bezugsjahres 2009

Aufbauend auf dem numerischen Grundwasserströmungsmodell das in Kapitel 5.1 vorgestellt wurde, werden nachfolgend die angepassten Eingangsparameter für das Bezugsjahr 2009 diskutiert.

5.2.1 Meteorologische Bedingungen 2009 und Stichtag der Modellierung

Gegenüber den langjährigen mittleren meteorologischen Bedingungen (810 mm/a) war das Bezugsjahr 2009 mit 1047 mm/a niederschlagsreicher (siehe Abb. 23). Insbesondere langanhaltende Niederschläge im Monat März, aber auch den Sommermonaten führten zu einem starken Anstieg des Grundwasserspiegels im Untersuchungsgebiet. Die potentielle Evaporation lag geringfügig über dem langjährigen Mittel von 630 mm/a (vgl. Tab. 31).

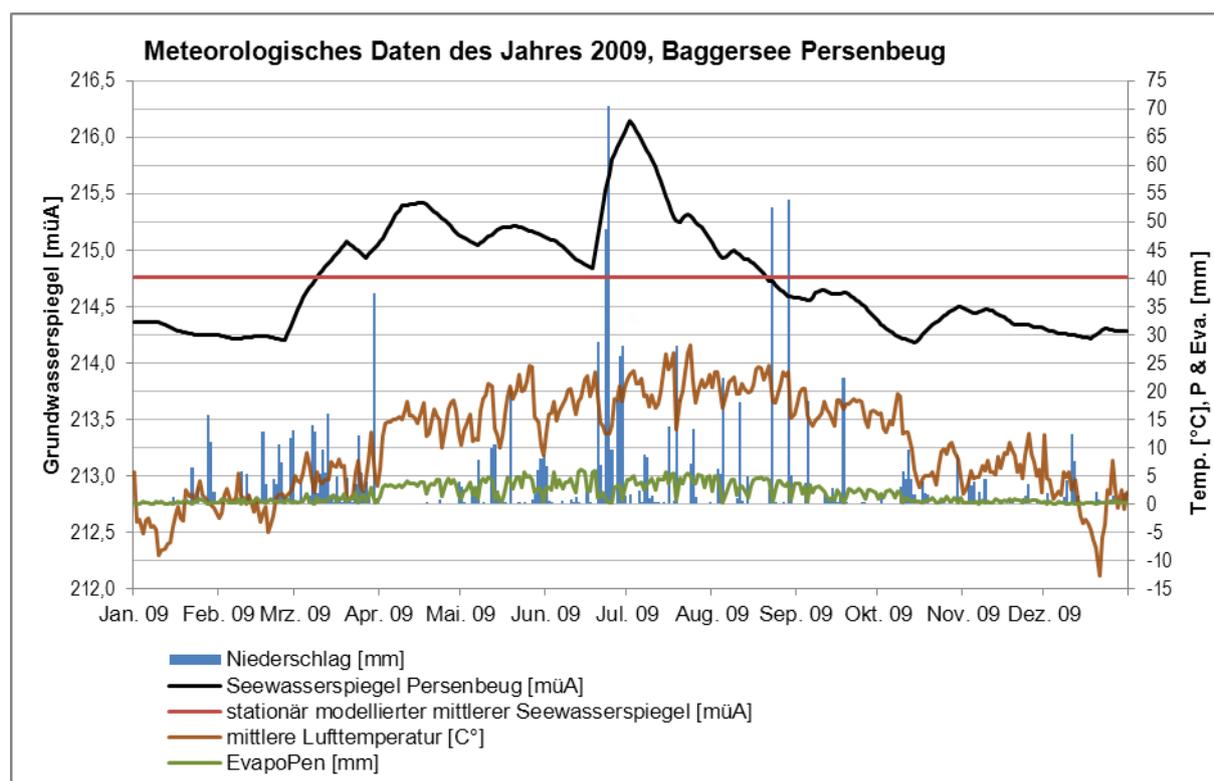


Abb. 23: Meteorologische Daten des Jahres 2009, Bezug: Wetterstation Wieselburg (5421)

Der Stichtag der stationären Modellierung wurde von dem mittleren Seewasserspiegel des Baggersees Persenbeug abgeleitet (siehe Abb. 23). Die für diesen Stichtag ermittelten Grund- und Seewasserspiegel sind zusammen mit den geänderten Eingangsparametern in Tab. 31 verzeichnet.

Tab. 31: Eingangsparameter zur Lösung des numerischen Grundwasserströmungsmodells in Persenbeug (Bezugsjahr 2009)

Parameter		
	Evaporation _{Pen} [mm/a]	696
	Niederschlag [mm/a]	1047
Grund- und Seewasserspiegel zum 21.08.2009 [müA]		
	Pers/Nord	214,75
	Pers/Ost	214,75
	Pers/Süd	214,73
	Pers West	214,78
	Pers/See	214,76
Randbedingungen* [müA]		
	westliches Festpotential	214,86
	östliches Festpotential	214,60

*) siehe Kapitel 5.1.1

5.2.2 Güte der Modellierung

Die normierte Abweichung der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln beträgt am Stichtag 3 %. Tab. 32 zeigt die Unterschiede zwischen den gemessenen und den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Persenbeug. Der Grundwasserspiegel der Messstelle Pers/ Süd zeigt eine Abweichung von 0,02 m, die weiteren Grundwassermessstellen konnten gut nachgebildet werden. (vgl. Kapitel 5.1.2).

Tab. 32: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Persenbeug [müA]

Messstelle	gemessen	modelliert	Differenz
Pers/Nord	214,75	214,76	0,01
Pers/Ost	214,75	214,75	0,00
Pers/Süd	214,73	214,75	0,02
Pers West	214,78	214,78	0,00
Pers/See	214,76	214,76	0,00

5.2.3 Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009)

Die mittlere Verweilzeit des Seewassers ist gegenüber dem langjährigen Mittel im Bezugsjahr 2009 aufgrund des niederschlagsreichen Sommers und dem Einfluss des Donauhochwassers um ca. 1,4 Jahre geringer. Der Grundwasserzustrom in den Baggersee verdoppelte sich auf ca. 740 m³/d. Der effektive Eintrag durch den Niederschlag erhöhte sich aufgrund der Niederschlagsintensität auf 58 m³/d.

Tab. 33: Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009), Persenbeug

Parameter	
Grundwasserzustrom* [m ³ /d]	743
Niederschlag minus mittlere potentielle Evaporation* [m ³ /d]	58
Grundwasserabstrom* [m ³ /d]	801
mittlere Verweilzeit des Seewassers [a]	1,2

5.3 Isotopenauswertung zur Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers

5.3.1 Eingangparameter

Abb. 24 zeigt das $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm der Wasserbilanzglieder des Baggersee Persenbeug. Die Grundwasserproben (Anstrom) liegen auf der Niederschlagsgeraden. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Seewasserproben streuen im Jahresverlauf zwischen -7,6 und -9,4 ‰, die der Grundwasserproben im Jahresverlauf zwischen -10,3 und -10,7 ‰. Die tiefen Frühlings- und Sommerwasserproben zeigten gegenüber dem Grundwasser eine geringe Isotopenfraktionierung die zusammen mit einer Temperaturschichtung auftraten. Für die Isotopenauswertung wurden die tiefen Frühlings- und Sommerwasserproben (1C, 2C, 3C) nicht in die Berechnung aufgenommen (vgl. Stets et al., 2010, Yi et al., 2007).

Die Isotopenmesswerte sind im Anhang G ausführlich dokumentiert.

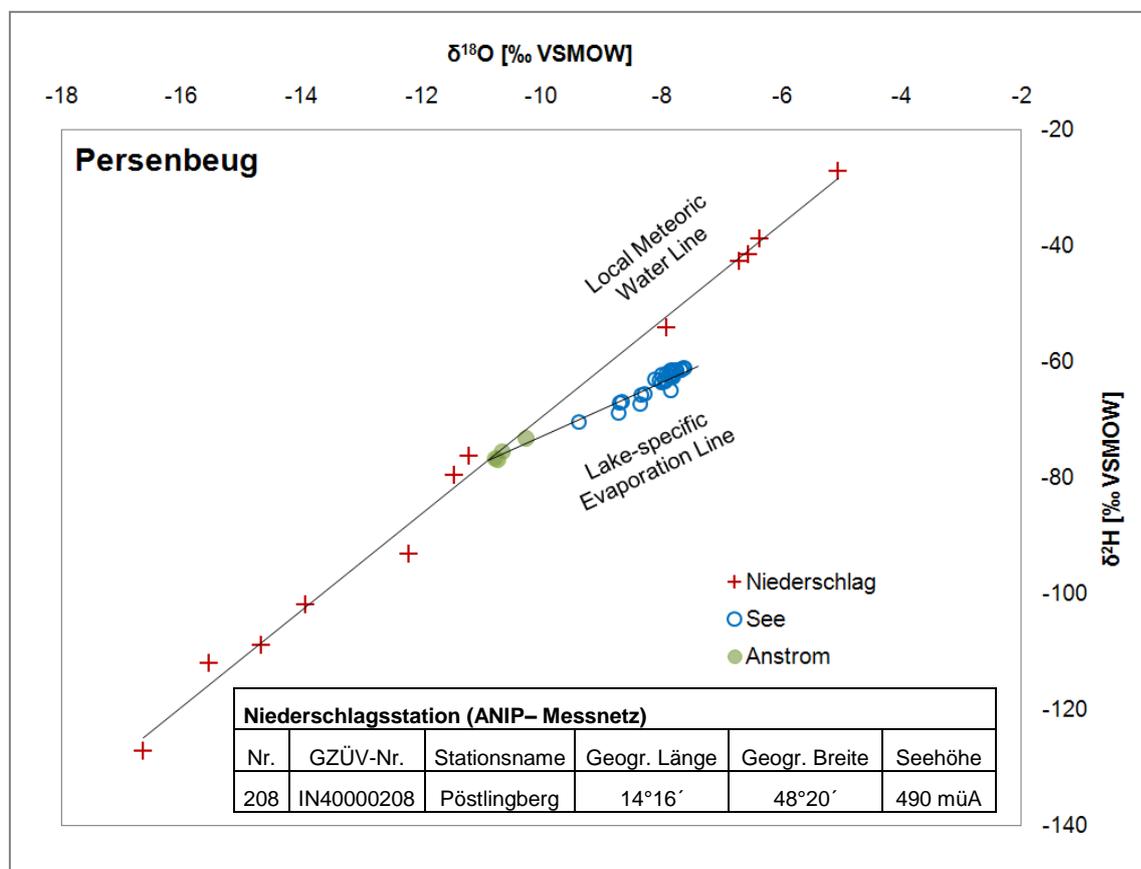


Abb. 24: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm Baggersee Persenbeug

Die Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung sind in Tab. 34 vermerkt.

Tab. 34: Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung in Persenbeug

Parameter	
relative Luftfeuchtigkeit [%] (evaporationsgewichtet)	68,5
Temperatur [°C] (evaporationsgewichtet)	17,2
Evaporation _{Pen} [mm/a]	696
Niederschlag [mm/a]	1047
Isotopenkonzentration des anstromigen Grundwassers [‰ VSMOW] (Mittelwert aus 4 saisonalen Proben)	-10,6
Isotopenkonzentration des Seewassers [‰ VSMOW] (Mittelwert aus 26 saisonalen Proben)	-7,9
Isotopenkonzentration des verdunsteten Seewassers [‰ VSMOW] (evaporationsgewichtet)	-28,7
Isotopenkonzentration des Niederschlags [‰ VSMOW] (gewichtet nach Niederschlagsvolumen und jeweiliger Isotopenkonzentration)	-9,2

5.3.2 Ergebnis der Isotopenauswertung

Im Jahr 2009 zeigte sich ein mittlerer Grundwasserzustrom von ca. 790 m³/d, zusammen mit einem mittleren Niederschlagseintrag von ca. 58 m³/d ergibt sich eine mittlere Verweilzeit des Seewassers von ca. 1,1 Jahren. Im Vergleich mit der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung des Bezugsjahres 2009 zeigt sich eine gute Übereinstimmung (siehe Kapitel 5.2.2).

Tab. 35: Ergebnis der Isotopenauswertung, Baggersee Persenbeug

Parameter	
Grundwasserzustrom* [m ³ /d]	790
Niederschlag minus mittlere potentielle Evaporation* [m ³ /d]	58
Grundwasserabstrom* [m ³ /d]	848
mittlere Verweilzeit des Seewassers [a]	1,1

*): mittlere Werte des Jahres 2009

6 Mittlere Verweilzeit des Seewassers des Baggersees in Grafenwörth

6.1 Numerische Modellierung der langjährigen mittleren meteorologischen und hydrologischen Bedingungen

6.1.1 Eingangsparameter

Die Randbedingungen für die stationäre Modellierung wurden aus den Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel (Grundwasserströmungsmodell Kremser Bucht, Fank et al., 2002) abgeleitet. Zwei Messstellen des Hydrographischen Dienstes NÖ waren für die Erfassung des Stichtages und der Grundwasserspiegel des Festpotentials im Modellgebiet vorhanden (337022 - Kamp, 42303172 - Jettsdorf). Als Stichtag der Modellierung wurde der 15.06.2009 ausgewählt (siehe Anhang F). Zu diesem Zeitpunkt war die für die Aufbereitung der Sande und Kiese notwendige Grundwasserförderung seit vier Tagen nicht aktiv und es herrschte ein stabiler mittlerer Grundwasserspiegel im Untersuchungsgebiet vor.

Die in unmittelbarer Nähe zum Baggersee abgeteufte Grundwassermessstellen zeigten am 15.06.2009 Uhr folgende Grundwasserspiegel (siehe Tab. 36).

Tab. 36: Grundwasserspiegel der abgeteufte Grundwassermessstellen in Grafenwörth zum 15.06.2009

Messstelle	Grundwasserspiegel
Graf/Anstrom	187,14 müA
Graf/C	187,01 müA
Graf/B	186,97 müA
Graf/A1	186,91 müA
Graf/A2	186,78 müA
Graf/Abstrom 1	186,66 müA
Graf/Abstrom 2	186,64 müA
Graf/See/Abbau	187,04 müA
Graf/See/Bestand	187,03 müA
Graf/Schlamm	187,03 müA
Kamp	187,54 müA
Jettsdorf	187,25 müA

In einer zweiten Modellversion wurde das Grundwassersystem bei eingeschalteter Grundwasserförderung nachgebildet. Über das Betriebsjahr (16.02.2009 – 04.12.2009) wurden laut Werkwasseruhr (siehe Anhang F) ca. 85.000 m³ Grundwasser gefördert und wieder versickert. Das entspricht einer durchschnittlichen

Förderung von ca. 300 m³ pro Tag (inklusive werksfreier Tage). Diese durchschnittliche Förderleistung wurde für das Modell übernommen.

Nach Tillmanns und Hoffmann (2007) weisen die bei Nassabgrabungsverfahren gewonnenen Kiese und Sande durchschnittliche 5 % Haftwasser sowohl vor, als auch nach der Kieswäsche auf. Dementsprechend wird die für die Kieswäsche eingesetzte Wassermenge im Schlammbecken annähernd ohne Verluste wieder versickert. Ausgenommen sind jene Mengen die im Zuge des Aufbereitungsprozesses bereits dem Grundwasser durch Versickerung zufließen, bzw. verdunsten. Da konkrete Zahlen im Rahmen dieses Projektes nicht erhoben werden konnten wurde in der Modellumsetzung die entnommene Wassermenge wieder im Schlammbecken versickert.

Abb. 25 zeigt die Umsetzung der Randbedingungen und die Lage der Grundwassermessstellen. Aus dem zweijährigen Mittelwert der Grundwasserspiegel der Messstellen (337022 - Kamp, 42303172 – Jettsdorf) wurde im westlichen Bereich dem Festpotential ein Grundwasserspiegel von 187,7 müA und im östlichen Bereich von 185,5 müA zugewiesen.

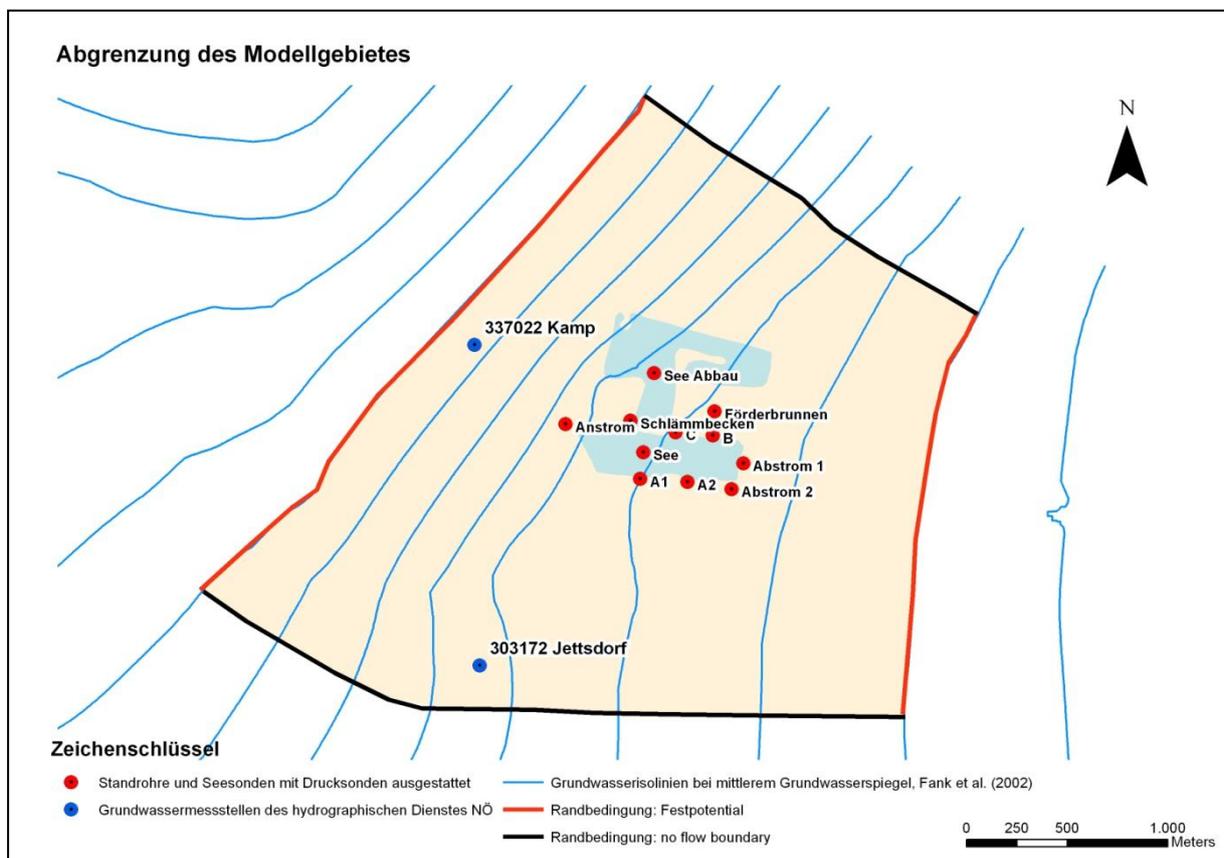


Abb. 25: Abgrenzung des Modellgebietes in Grafenwörth

Durchlässigkeitsbeiwerte

Der Durchlässigkeitsbeiwert für den Grundwasserleiter im Untersuchungsgebiet wird nach Schuch (1973, in (Meyer, 1997) mit $5 \cdot 10^{-3}$ m/s angegeben. Die Auswertung der Bohrprofile der für das Projekt abgeteufte Grundwassermessstellen zeigte einen homogenen Aufbau des Grundwasserleiters mit Feinkies bis Mittelkies. Vereinzelt konnten im Bohrprofil Stein- und Sandlagen erfasst werden. Der Durchlässigkeitsbeiwert für das Versickerungsbecken wurde aufgrund des hohen Feinkornanteiles des Kieswaschwassers mit 10^{-6} m/s abgeschätzt.

Grundwasserstauer

Die Angaben über die Tiefenlage und Verbreitung des Grundwasserstauers wurde vom Land Niederösterreich bezogen (Grundwasserströmungsmodell Fank et al. (2002), Kremser Bucht). Der Grundwasserstauer fällt von Nord 180,5 müA nach Süd 174,5 müA, bzw. Südost 178 müA ab.

6.1.2 Güte und Ergebnis der Modellierung

Zum Zeitpunkt des Stichtages zeigen die gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln eine normierte Abweichung von 0,5 %. Abb. 26 und Tab. 37 (folgende Seite) zeigen die Unterschiede zwischen den gemessenen und den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Grafenwörth.

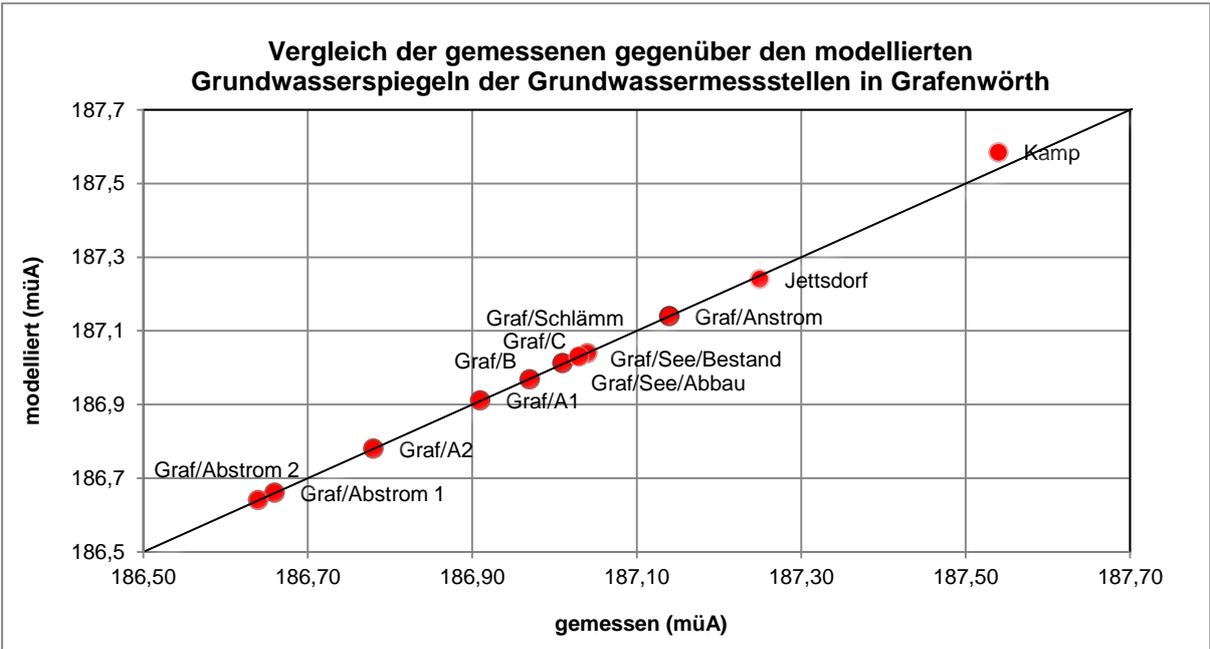


Abb. 26: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Grafenwörth

Tab. 37: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Grafenwörth [müA]

Messstelle	gemessen	modelliert	Differenz
Graf/Anstrom	187,14	187,14	0,00
Graf/C	187,01	187,01	0,00
Graf/B	186,97	186,97	0,00
Graf/A1	186,91	186,91	0,00
Graf/A2	186,78	186,78	0,00
Graf/Abstrom 1	186,66	186,66	0,00
Graf/Abstrom 2	186,64	186,64	0,00
Graf/See/Abbau	187,04	187,04	0,00
Graf/See/Bestand	187,03	187,03	0,00
Graf/Schlamm	187,03	187,03	0,00
337022 - Kamp	187,54	187,58	0,04
303172 - Jettsdorf	187,25	187,24	-0,01

Die Anpassung der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln zeigt eine gute Übereinstimmung. Die Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen im Nahbereich des Baggersees konnten nachgebildet werden. Eine geringe Abweichung ist bei den Grundwassermessstellen 337022 Kamp und 303172 Jettsdorf zu verzeichnen.

Modellierte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel

Die Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel (siehe Abb. 27) zeigen eine Versteilung des Grundwasserspiegelgefälles abstromig des Baggersees, anstromig ist dies in geringerem Maße festzustellen. Die Gleichgewichtslinie des untersuchten Baggersees wird durch die Beeinflussung der aktiven Nassbaggerung in südliche Richtung gedreht.

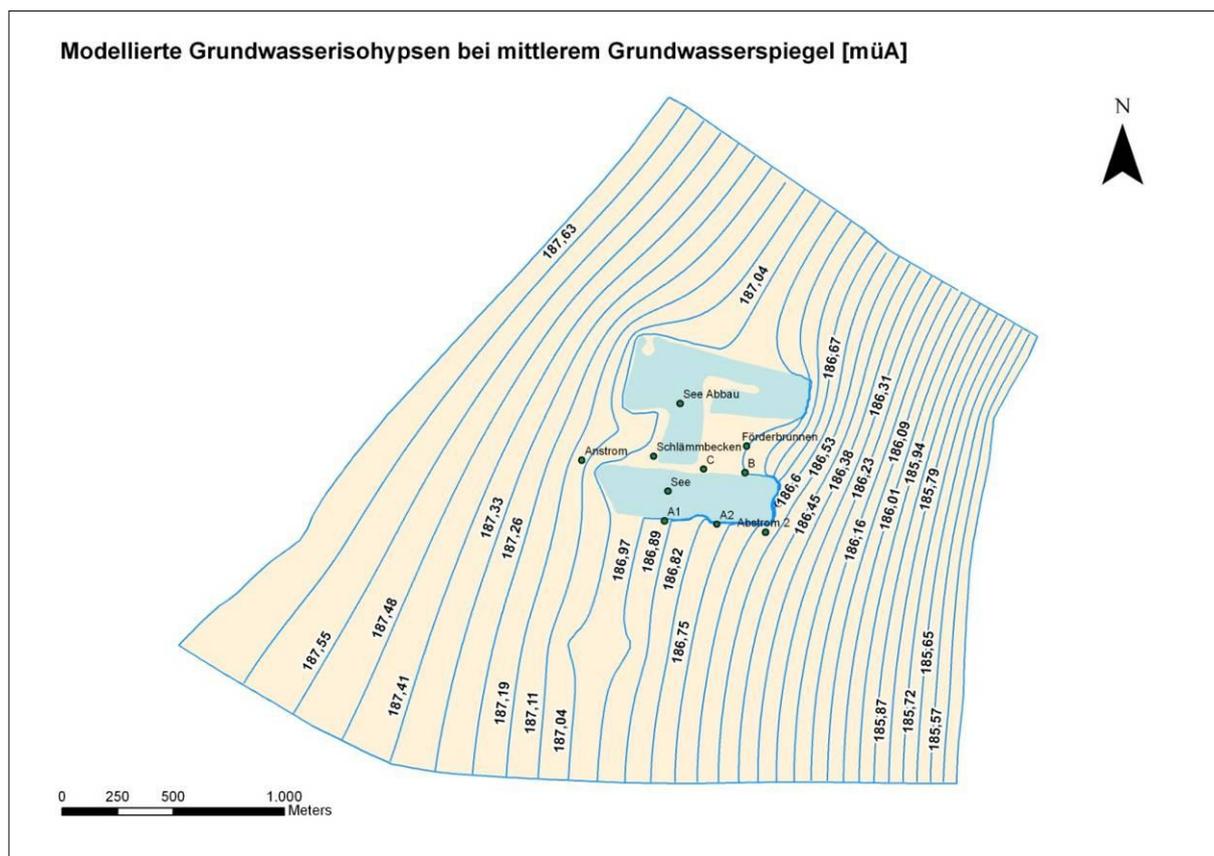


Abb. 27: Modellierte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel (müA) in Grafenwörth

Durchlässigkeitsbeiwerte der Seeflanken (schematisch)

Abb. 28 zeigt die aus den Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen abgeleiteten gemittelten Durchlässigkeitsbeiwerte in m/s. In abstromigen Bereichen liegen die Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen 10^{-4} bis 10^{-5} m/s, in den anstromigen Bereichen ist keine, bzw. eine geringe Abdichtung festzustellen. Zwischen aktiver und bestehender Nassbaggerung liegen die Durchlässigkeitsbeiwerte um 10^{-5} m/s.

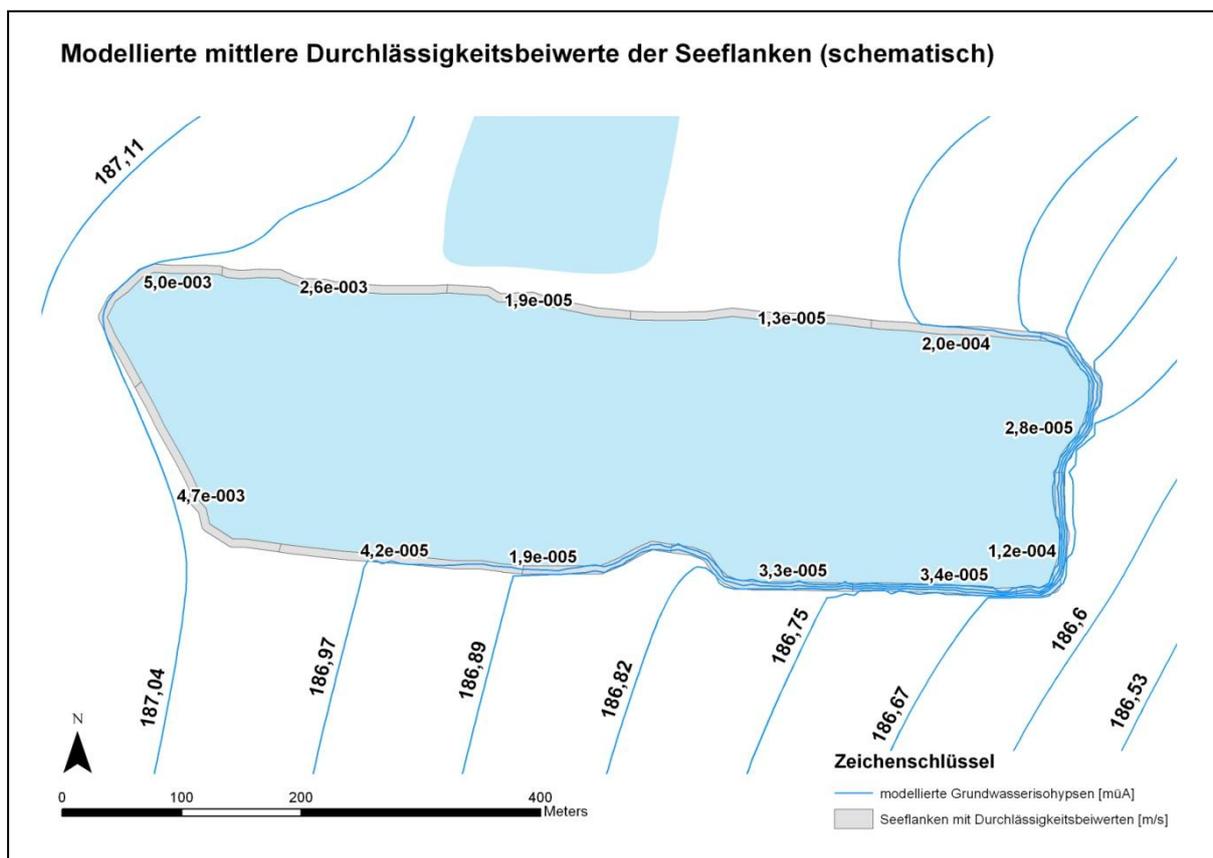


Abb. 28: Modellierte mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte der Seeflanken des Baggersees in Grafenwörth (schematisch)

6.1.3 Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers

Der aus dem Grundwasserspiegelgefälle abgeleitete Grundwasserzustrom zum See beträgt ca. 1.373 m³/d, die Differenz zwischen potentieller Verdunstung und Niederschlag über der Wasserfläche beträgt -43 m³/d. Bei einem Wasservolumen von 1.057.000 m³ bei mittlerem Seewasserspiegel ergibt sich eine mittlere

Verweilzeit des Seewassers von ca. 2,2 Jahren. 17 m³/d strömen von dem sich in Abbau befindlichen Baggersee dem Untersuchungssee zu.

6.1.4 Sensitivitätsanalyse

Bei der Variation der Durchlässigkeitsbeiwerte des Modellgebietes reagierte das Grundwasserströmungsmodell sensitiv. Die mittlere Verweilzeit des Seewassers erhöht sich bei der Variation um +/- 25 % auf 3 Jahre, bzw. reduziert sich auf 1,8 Jahre (siehe Tab. 38). Die Abweichung zwischen gemessenen und modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen zeigte jeweils eine schlechtere Anpassung.

Das Modell reagiert robust auf die Variation der potentiellen Verdunstung des Sees. Unterschiedliche potentielle Verdunstungen werden über den Grundwasserzufluss ausgeglichen, der Grundwasserabstrom ändert sich kaum.

Ohne eine abdichtende Schicht des Baggersees steigt der Grundwasserabstrom auf 2.880 m³/d an, die mittlere Verweilzeit des Seewassers beträgt ca. 1 Jahr.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Tab. 38 verzeichnet. Im Anhang F befinden sich die modellierten Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen der einzelnen Modellversionen.

Tab. 38: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des Grundwasserströmungsmodells Grafenwörth

Variation der Modellparameter	Ausgangsmodell	Durchlässigkeitsbeiwerte des Modellgebietes Ausgangsmodell = 100 %		Niederschlag minus potentieller Verdunstung (Seefläche): Ausgangsmodell: -95 mm/a		Ohne Abdichtung
		- 25 %	+ 25%	0 mm/a	-190 mm/a	
normierte Abweichung [%]	0,5	0,6	1,6	0,5	0,7	10,0
Niederschlag minus potentieller Verdunstung (Seefläche) [m ³ /d]	-43	-43	-43	0	-85	-43
Grundwasserabstrom [m ³ /d]	1330	970	1650	1335	1315	2880
mittlere Verweilzeit Seewasser [d]	795	1090	641	792	804	367

6.1.5 Modellierung der Grundwasserförderung bei Werksbetrieb (Kieswäsche)

Die durchschnittliche Grundwasserfördermenge beträgt, in der Betriebszeit von Mitte Februar bis Mitte Dezember, ca. 300 m³/d. Die entnommene Grundwassermenge wird im Schlammbecken, nordwestlich des Baggersees, nach der Kieswäsche wieder

versickert. In der stationären Modellumsetzung wird dieser Durchschnittswert verwendet um die Auswirkungen auf die mittlere Verweilzeit des Seewassers zu erfassen.

Ergebnis der Modellierung bei Grundwasserförderung

Abb. 29 zeigt die Grundwasserisohypsen und die Stromlinienbahnen (Einzugsgebiet des Förderbrunnen) bei einer Grundwasserförderung von 300 m³/d. Die Stromlinienbahnen zeigen, dass das Einzugsgebiet vorwiegend im Bereich der aktiven Nassbaggerung liegt. Durch die Absenkung des Grundwasserspiegels im Umfeld der Grundwasserförderung und dem dadurch einhergehenden steileren Grundwasserspiegelgradienten erhöht sich der Abstrom aus dem Baggersee. Die mittlere Verweilzeit des Seewassers verkürzt sich dadurch auf 742 Tage, der Grundwasserabstrom steigt auf 1425 m³/d.

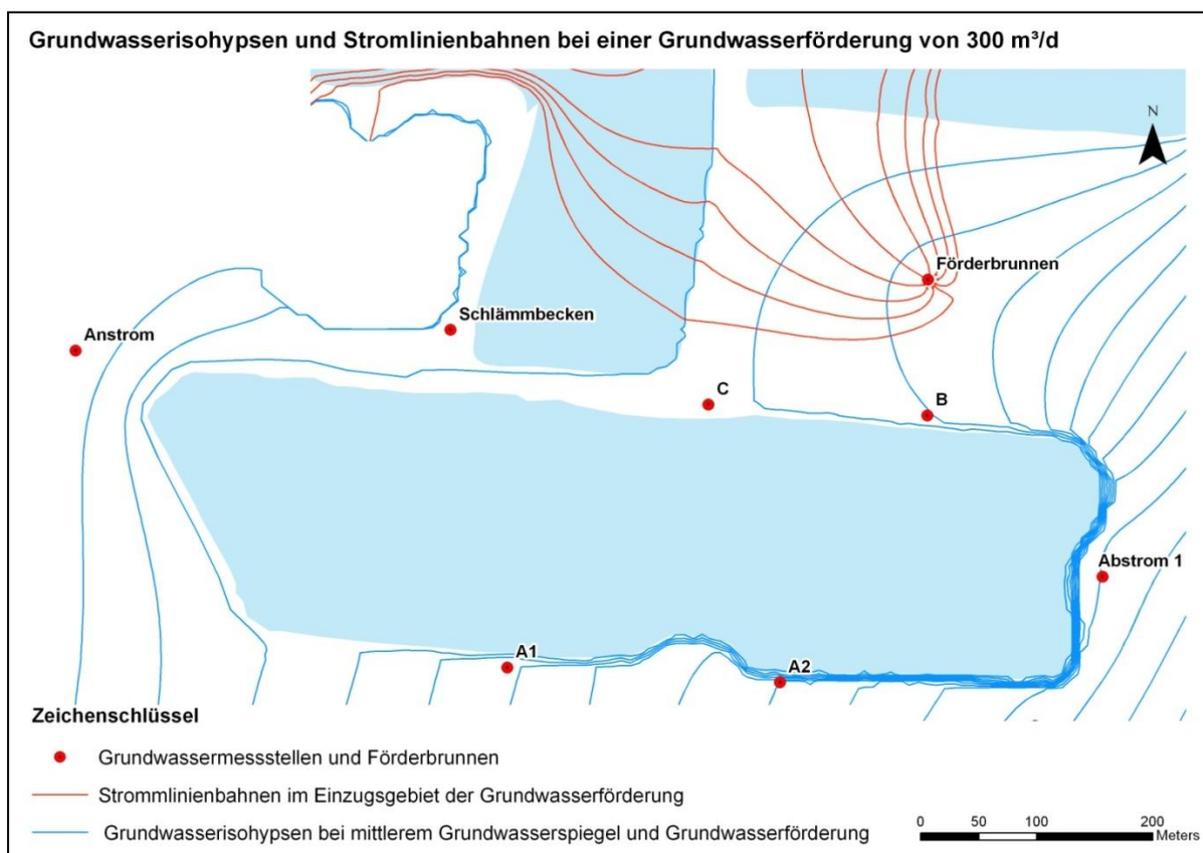


Abb. 29: Grundwasserisohypsen und Stromlinienbahnen bei einer Grundwasserförderung von 300 m³/d in Grafenwörth

6.1.6 Mittlere Verweilzeit des Wassers im Baggersee unter Berücksichtigung der Grundwasserförderung

Während der aktiven Abbauphase beträgt der Grundwasserabstrom aus dem Baggersee 1425 m³/d, in der betriebsfreien Zeit (ca. 2 Wintermonate) reduziert sich dieser auf 1330 m³/d. Die berechnete mittlere Verweilzeit des Seewassers beträgt demnach ca. 750 Tage. Modelliert wurde die Verweilzeit bei einer gemittelten Grundwasserentnahme. Aufgrund der unterschiedlichen Grundwasserförderung ist die berechnete Verweilzeit jedoch mit einer möglichen Streubreite verbunden. Tab. 39 zeigt die bei unterschiedlichen Förderraten modellierte Verweilzeit des Seewassers unter Berücksichtigung der betriebsfreien Zeit.

Tab. 39: Mittlere Verweilzeit des Seewassers bei unterschiedlicher Grundwasserförderung

	Grundwasserförderung [m ³ /d]			
	0	300	150	500
Grundwasserabstrom aus See [m ³ /s]	1330	1425	1365	1480
mittlere Verweilzeit Seewasser [d]	795	742	774	714
mittlere Verweilzeit des Seewassers unter Berücksichtigung der betriebsfreien Zeit [d]	795	751	778	728

Zusammengefasst betrachtet zeigt sich, dass die abweichende Verweilzeit des Seewassers in Grafenwörth, verursacht durch eine unterschiedliche Grundwasserförderung, geringer ist als die Streubreite die durch die Variation der Durchlässigkeitsbeiwerte ausgelöst wird.

6.2 Numerische Modellierung des Bezugsjahres 2009

Aufbauend auf dem numerischen Grundwasserströmungsmodell das in Kapitel 6.1 vorgestellt wurde, werden nachfolgend die angepassten Eingangsparameter für das Bezugsjahr 2009 diskutiert.

6.2.1 Meteorologische Bedingungen 2009 und Stichtag der Modellierung

Gegenüber den langjährigen mittleren meteorologischen Bedingungen (530 mm/a) war das Bezugsjahr 2009 mit 686 mm/a niederschlagsreicher (siehe Abb. 30). Insbesondere Niederschläge in den Sommermonaten führten zu einem Anstieg des Grundwasserspiegels im Untersuchungsgebiet. Die potentielle Evaporation lag geringfügig über dem langjährigen Mittel von 625 mm/a (vgl. Tab. 40).

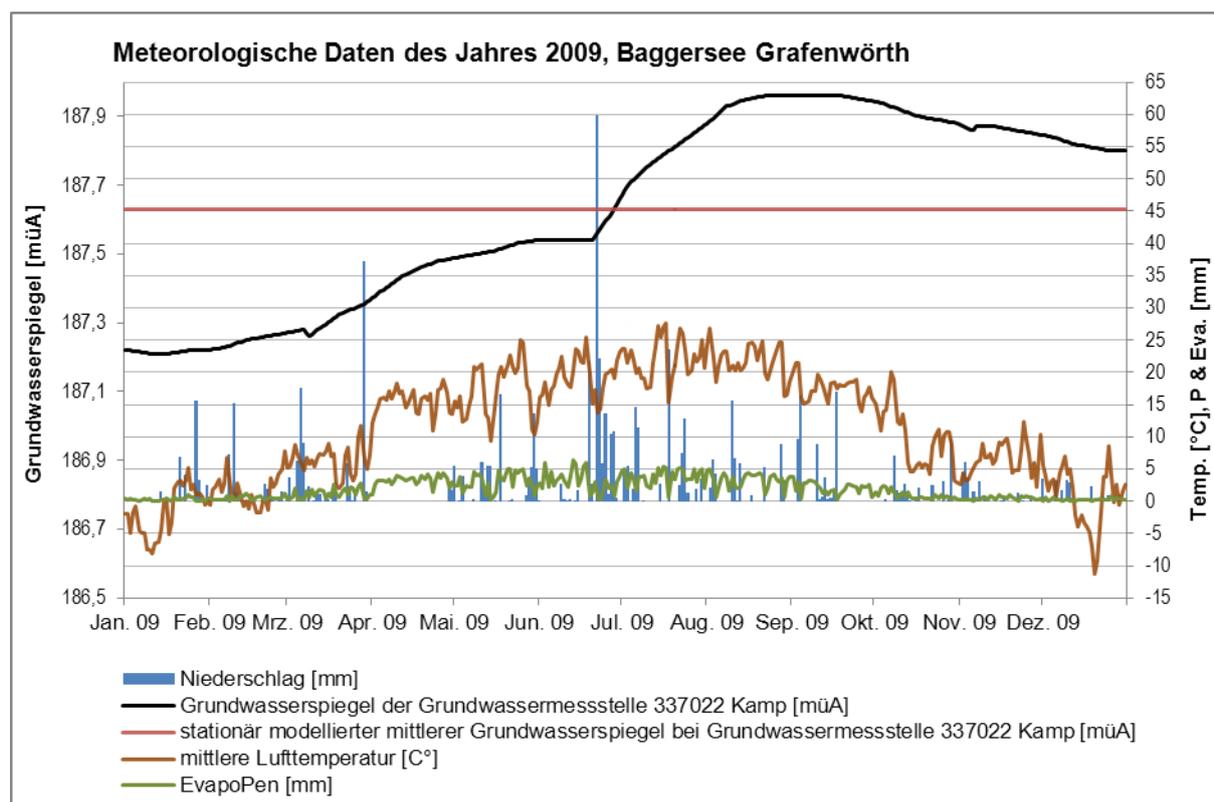


Abb. 30: Meteorologische Daten des Jahres 2009, Bezug: Wetterstation Krems (3805)

Der Stichtag der stationären Modellierung wurde von dem mittleren Grundwasserspiegel der Grundwassermessstelle 337022 Kamp (Bezug: Hydrographischer Dienst NÖ) abgeleitet (siehe Abb. 30). Die für diesen Stichtag ermittelten Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen sind zusammen mit den geänderten Eingangsparametern in Tab. 40 verzeichnet.

Tab. 40: Eingangsparameter zur Lösung des numerischen Grundwasserströmungsmodells in Grafenwörth (Bezugsjahr 2009)

Parameter		
	Evaporation_{Pen} [mm/a]	672
	Niederschlag [mm/a]	686
Grund- und Seewasserspiegel zum 28.06.2009 [müA]		
	Graf/Anstrom	187,29
	Graf/C	187,13
	Graf/B	187,09
	Graf/A1	187,03
	Graf/A2	186,88
	Graf/Abstrom 1	186,75
	Graf/Abstrom 2	186,74
	Graf/See/Abbau	187,21
	Graf/See/Bestand	187,21
	Graf/Schlamm	187,15
	337022 Kamp	187,63
	303172 Jettsdorf	187,92
Randbedingungen* [müA]		
	westliches Festpotential	187,83
	östliches Festpotential	185,55
	Grundwasserförderung* [m³/d]	300

*) siehe Kapitel 6.1.1

6.2.2 Güte der Modellierung

Die normierte Abweichung der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln beträgt 7,6 %. Tab. 41 zeigt die Unterschiede zwischen den gemessenen und den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Grafenwörth. Es konnte eine gute Anpassung an die gemessenen Grundwasserspiegel im Nahbereich des Baggersees erreicht werden. Die Grundwassermessstelle 303172 Jettsdorf zeigt hingegen eine Abweichung von -0,54 m, diese Abweichung dürfte auf den Einfluss des Kamphochwassers zurück zu führen sein. (vgl. Kapitel 6.1.2).

Tab. 41: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Grafenwörth [müA]

Messstelle	gemessen	modelliert	Differenz
Graf/Anstrom	187,29	187,28	-0,01
Graf/C	187,13	187,13	0,00
Graf/B	187,09	187,08	-0,01
Graf/A1	187,03	187,03	0,00
Graf/A2	186,88	186,89	0,01
Graf/Abstrom 1	186,75	186,76	0,01
Graf/Abstrom 2	186,74	186,74	0,00
Graf/See/Abbau	187,21	187,16	0,00
Graf/See/Bestand	187,21	187,16	0,01
Graf/Schlamm	187,15	187,17	0,02
337022 Kamp	187,63	187,75	0,12
303172 Jettsdorf	187,92	187,38	-0,54

6.2.3 Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009)

Die mittlere Verweilzeit des Seewassers ist gegenüber dem langjährigen Mittel im Bezugsjahr 2009 um ca. 130 Tage geringer. Der Grundwasserzustrom in den Baggersee erhöhte sich auf ca. 1570 m³/d. Der effektive Eintrag durch den Niederschlag beträgt ca. 6 m³/d.

Tab. 42: Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009), Grafenwörth

Parameter	
Grundwasserzustrom [m³/d]	1574
Niederschlag minus mittlere potentielle Evaporation [m³/d]	6
Grundwasserabstrom [m³/d]	1580
mittlere Verweilzeit des Seewassers [a]	1,8

6.3 Isotopenauswertung zur Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers

6.3.1 Eingangsparmeter

Abb. 31 zeigt das $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm der Wasserbilanzglieder des Baggersee Grafenwörth. Die Grundwasserproben (Anstrom) liegen auf der Niederschlagsgeraden. Die $\delta^{18}\text{O}$ -Werte der Seewasserproben streuen im Jahresverlauf zwischen -6,6 und -7,6 ‰, die der Grundwasserproben im Jahresverlauf zwischen -9,5 und -10,0 ‰. Die Seewasserproben zeigten bei den saisonalen Beprobungskampagnen tiefenorientiert homogene $\delta^{18}\text{O}$ -Werte, diese lassen auf eine gute Durchmischung des Seewassers schließen. Im Detail sind die Isotopenmesswerte im Anhang G nachzuschlagen.

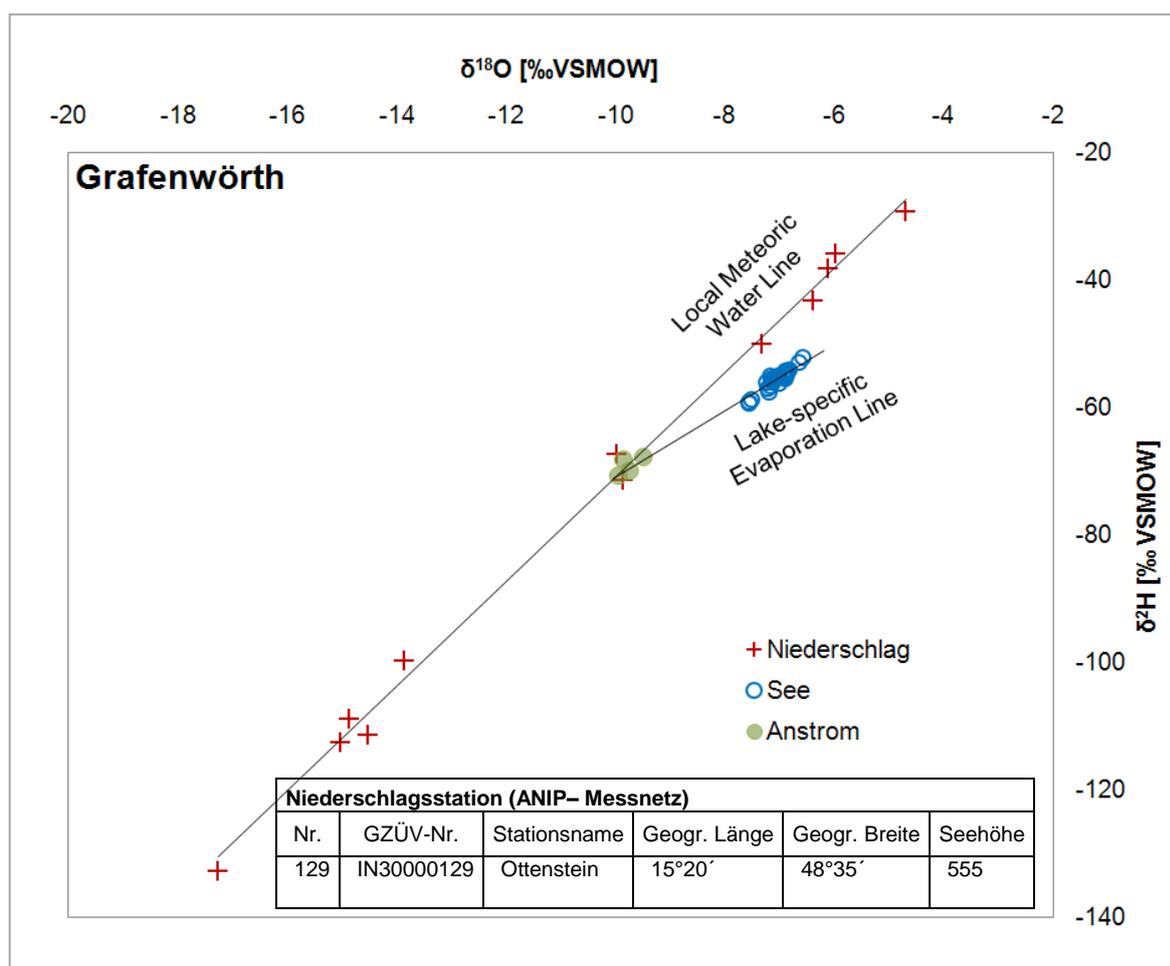


Abb. 31: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm Baggersee Grafenwörth

Die Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung sind in Tab. 43 vermerkt.

Tab. 43: Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung in Grafenwörth

Parameter	
relative Luftfeuchtigkeit [%] (evaporationsgewichtet)	63
Temperatur [°C] (evaporationsgewichtet)	17,7
Evaporation _{Pen} [mm/a]	672
Niederschlag [mm/a]	686
Isotopenkonzentration des anstromigen Grundwassers [‰ VSMOW] (Mittelwert aus 4 saisonalen Proben)	-9,8
Isotopenkonzentration des Seewassers [‰ VSMOW] (Mittelwert aus 30 saisonalen Proben)	-7,0
Isotopenkonzentration des verdunsteten Seewassers [‰ VSMOW] (evaporationsgewichtet)	-27,1
Isotopenkonzentration des Niederschlags [‰ VSMOW] (gewichtet nach Niederschlagsvolumen und jeweiliger Isotopenkonzentration)	-9,1

6.3.2 Ergebnis der Isotopenauswertung

Im Jahr 2009 zeigte sich ein mittlerer Grundwasserzustrom von ca. 1954 m³/d, zusammen mit einem mittleren Niederschlagseintrag von ca. 6 m³/d ergibt sich eine mittlere Verweilzeit des Seewassers von ca. 1,5 Jahren. Im Vergleich mit der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung des Bezugsjahres 2009 zeigt sich eine gute Übereinstimmung (siehe Kapitel 6.2.2).

Tab. 44: Ergebnis der Isotopenauswertung, Baggersee Grafenwörth

Parameter	
Grundwasserzustrom* [m ³ /d]	1954
Niederschlag minus mittlere potentielle Evaporation* [m ³ /d]	6
Grundwasserabstrom* [m ³ /d]	1960
mittlere Verweilzeit des Seewassers [a]	1,5

*) : mittlere Werte des Jahres 2009

7 Zusammenfassung

Die Durchströmung der Baggerseen bei mittlerem Grundwasserspiegel wurde mit Hilfe eines numerischen Grundwasserströmungsmodells berechnet. Die hydraulische Durchlässigkeit des Übergangsbereiches Grundwasserleiter-Baggersee wurde invers kalibriert. Aus dem modellierten Grundwasserzustrom und –abstrom wurde die mittlere Verweilzeit berechnet.

Ziel war die Erfassung des Grundwasserzustroms bei langjährigen meteorologischen und hydrologischen Mittelwerten, sowie bei mittlerem Grundwasserspiegel des Untersuchungsjahres 2009 mit den jeweiligen meteorologischen Bedingungen.

Eine alternative Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers wurde mit Hilfe der Wasserisotope ($^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$) durchgeführt. Durch Fraktionierungsprozesse im Seewasser in Folge von Verdunstungsprozessen verändert sich das Verhältnis der Sauerstoffisotope ^{16}O zu ^{18}O . Dieser Prozess ermöglicht die Erfassung des Grundwasserzustroms bei Vorliegen der Isotopenverhältnisse der Wasserbilanzglieder. Die Unabhängigkeit der Isotopenmethode von der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung ermöglicht die alternative Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers.

Ergebnisse der numerischen Grundwasserströmungsmodellierungen und der Isotopenauswertung

Die Ergebnisse der Modellierung bei langjährigen hydrologischen und meteorologischen Bedingungen gibt die mittlere Verweilzeit wieder, die für die einzelnen Baggerseen im langjährigen Mittel zu erwarten ist.

Gegenüber den langjährigen mittleren meteorologischen Bedingungen war das Bezugsjahr 2009 niederschlagsreicher, dies führte zu einer Erhöhung der Grundwasserspiegel in den Untersuchungsgebieten und einen erhöhten Grundwasserzustrom in die Baggerseen.

Die Isotopenauswertung erbrachte eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Grundwasserströmungsmodelle des Untersuchungsjahres 2009. Sowohl bei den Baggerseen mit längerer Verweilzeit des Seewassers, als auch bei denen mit hohem Grundwasserzustrom konnte eine gute Übereinstimmung erzielt werden.

Tendenziell zeigen die Ergebnisse der Isotopenmethode, im Vergleich mit den Ergebnissen der numerischen Grundwasserströmungsmodellierungen, höhere Grundwasserzuflüsse in die Baggerseen (siehe Abb. 32). Bei höheren Grundwasserspiegellagen dürften überwiegend nicht kolmatierte Bereiche angeströmt werden und dadurch überproportional viel Grundwasser den Baggerseen zufließen. Die für den mittleren Grundwasserspiegel kalibrierten stationären Grundwasserströmungsmodelle können diese besser durchlässigen Bereiche bei höheren Grundwasserspiegellagen nicht wiedergeben.

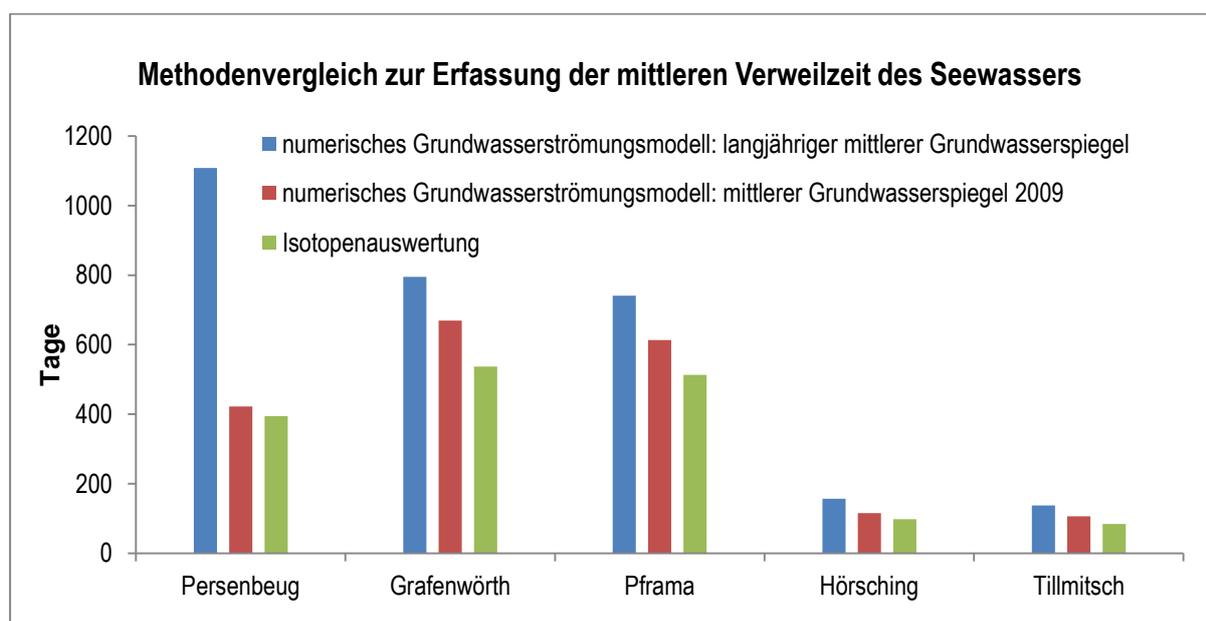


Abb. 32: Methodenvergleich zur Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers

Aufgrund der möglichen Unterschätzung des Grundwasserzustroms bei der stationären Modellierung der Grundwasser- Seewasser- Interaktion wurden für die Massenbilanzierung die Ergebnisse der Isotopenmethode herangezogen.

Grundwasserbilanz und mittlere Verweilzeit des Seewassers

Die untersuchten Baggerseen in Hörsching und Tillmitsch weisen eine geringe mittlere Verweilzeit des Seewassers auf (siehe Tab. 45). Diese liegt im Untersuchungsjahr 2009 zwischen 0,2 – 0,3 Jahre. Bei den untersuchten Baggerseen in Pframa und Grafenwörth liegt diese zwischen 1,4 – 1,5 Jahre. Aufgrund des starken Anstiegs des Grundwasserspiegels in Persenbeug im Jahr 2009 in Folge eines Donauhochwassers ist eine starke Erhöhung des Grundwasserszustroms in den Baggersee zu verzeichnen. Im Untersuchungsjahr 2009 ist von einer mittleren Verweilzeit des Seewassers von ca. 1,1 Jahre auszugehen.

Tab. 45: Grundwasserbilanz und mittlere Verweilzeit des Seewassers

Baggersee	Zustrom	Abstrom	Niederschlag	Evaporation	Mittlere Verweilzeit des Seewassers
	[m ³ /d]	[m ³ /d]	[m ³ /d]	[m ³ /d]	[Jahre]
Pframa	423	399	58	83	1,4
Grafenwörth	1954	1960	308	302	1,5
Tillmitsch	1500	1595	213	119	0,2
Persenbeug	790	848	172	114	1,1
Hörsching	3582	3651	213	144	0,3

Zusammenfassung der Sensitivitätsanalysen

Eine Sensitivitätsanalyse wurde im Rahmen der numerischen Grundwasserströmungsmodellierung für die langjährigen mittleren hydraulischen und meteorologischen Bedingungen erstellt. Diese sollte, unabhängig von Extremereignissen, generelle Aussagen über die Reaktion des Systems ermöglichen. Die Sensitivitätsanalyse zeigte, dass der Durchlässigkeitsbeiwert sowie der Grundwasserspiegelgradient des umgebenden Gebietes entscheidend für den Grundwasserzustrom in die untersuchten Baggerseen ist, im Vergleich dazu ist der Wasserumsatz der Klimatelemente Niederschlag und Verdunstung gering. Bei den Baggerseen zeigte sich des Weiteren kein direkter Zusammenhang zwischen dem Alter der Baggerseen und der mittleren Verweilzeit des Seewassers. Mit fortschreitendem Alter ist die Kolmation der ein- und ausströmenden Bereiche zwar entscheidend für den Grundwasserzustrom, dies belegen Modellversionen ohne

Abdichtung, vom Alter des Baggersees auf die mittlere Verweilzeit des Seewassers zu schließen ist jedoch nur bedingt zulässig. So zeigte sich beim ältesten Baggersee (Hörsching) eine bedeutend kürzere mittlere Verweilzeit des Seewassers als bei dem gerade ausgekiesten im Marchfeld (Pframa). Verantwortlich hierfür ist der im Vergleich zu Pframa steilere Grundwasserspiegelgradient in Hörsching.

8 Literatur

- Affolter, A., P. Huggenberger, et al. (2010). "Adaptives Grundwassermanagement in urbanen Gebieten." *Grundwasser* 15(3): 147-161.
- Amt der NÖ Landesregierung, G. W.-A. W. (1994). Wasserrechtliche Bescheid der Nassbaggerung Franz Malaschofsky GesmbH.
- Amt der NÖ Landesregierung, G. W.-A. W. (2009a). Grundwasserisohypsen Ybbser Scheibe - digitaler Datensatz.
- Amt der OÖ Landesregierung, W., Grund- und Trinkwasserwirtschaft (2004). "Kiesleitplan Oberösterreich - Zentralraum."
- Amt der OÖ Landesregierung, W., Grund- und Trinkwasserwirtschaft (2009b). Grundwasserschichtenplan Welser Heide, Stand: Dez. 2006, digitaler Datensatz.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, U. u. W. "Österreichisches Messnetz für Isotopen im Niederschlag und in Oberflächengewässern (ANIP) ". Retrieved 09.09.2010, 2010, from <http://wisa.lebensministerium.at/h2o>.
- Clark, F. and P. Fritz (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. New York, Lewis Publishers.
- Craig, H. and L. I. Gordon (1965). Deuterium and oxygen 18 variations in the ocean and marine atmosphere. *Stable Isotopes in Oceanographic Studies and Paleotemperatures*. E. Tongiogi. Spoleto, Italy, V. Lishi e F., Pisa: pp 9-130.
- Darsow, A., M. T. Schafmeister, et al. (2009). "An arcgis® approach to include tectonic structures in point data regionalization." *Ground Water* 47(4): 591-597.
- Fank, J., Rock, G., Dalla-Via, A., Harum, T., Ortner, G., Poltning, W. (2002). Grundwassermodell "Kremser Bucht" Endbericht. - Unveröff. Bericht, Inst. f. Hydrologie und Geothermie JOANNEUM RESEARCH, Graz: pp. 156.
- Fank, J., Rock, G., Dalla-Via, A., Poltning, W., Draxler, M., Plieschnegger, M. (2008). Grundwasserströmungsmodell Marchfeld, Studie im Auftrag der Niederösterreichischen Landesregierung, St. Pölten, unveröffentlicher Bericht: pp. 117.
- Fank, J., G. Rock, et al. (2005). Erfassung des gegenwärtigen Zustandes und Prognose zukünftiger Entwicklungen der Baggerseen im Westlichen Leibnitzer Feld aus hydrologischer, limnologischer und fischereibiologischer Sicht unter Berücksichtigung möglicher nachhaltiger aber auch ökonomischer Nachnutzungsformen, Studie im Auftrag der steiermärkischen Landesregierung (Hrsg.): pp. 237.
- Feflow (2007a). "Feflow Reference Manual." Retrieved 20.02.2010, from <http://www.feflow.info>.
- Feflow (2007b, 20.02.2010). "White Papers Vol. 1-4." from <http://www.feflow.info>.
- Fleckenstein, J. H., C. Neumann, et al. (2009). "Spatio-temporal patterns of lake-groundwater exchange in an acid mine lake." *Raumzeitmuster des See-Grundwasser-Austausches in einem sauren Tagebaurestsee* 14(3): 207-217.
- Gat, R.J., 2010. *Isotope Hydrology: A Study of the Water Cycle*. Series on Environmental Science and Management – Vol. 6, Imperial College Press, London.
- Gibson, J. J. (2002). "Short-term evaporation and water budget comparisons in shallow Arctic lakes using non-steady isotope mass balance." *Journal of Hydrology* 264(1-4): 242-261.
- Gonfiantini, R. (1986). Environmental isotopes in lake studies. *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, The Terrestrial Environment*, Vol. 2. . P. Fritz, Fontes, J.-C. (Eds.). New York, Elsevier: pp. 113-168.
- Gruppe Umwelt und Technik (2005). Wasserwerk Scharlinz - Ausweisung von Schutzzonen, Hydrogeologische Untersuchungen - Darstellung von Gefährdungspotentialen, Studie im Auftrag der Luinz Service GmbH, unveröffentlicher Bericht.

- HAÖ (2007). Hydrologischer Atlas von Österreich, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Horita, J. and D. J. Wesolowski (1994). "Liquid-vapor fractionation of oxygen and hydrogen isotopes of water from the freezing to the critical temperature." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58(16): 3425-3437.
- Meyer, J. (1997). "Erweiterung und Sanierung einer Nassbaggerung in der KG Grafenwörth - Hydrogeologisches Gutachten." Unveröffentlichtes Gutachten.
- Scheidleder, A., Eisenkölb, G., Vincze, G., Lindinger, H., Humer, F., Schramm, C., Stadler, C. (2005). "Ergebnisbericht - Bestandsaufnahme gemäß Artikel 3 und 5 WRRL, Erstellung von Karten, Tabellen und Texten,." Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion VII/1: 27.
- Schuch, M. (1977). "Beiträge zur Hydrogeologie des Marchfeldes." Habilitationsschrift an der Universität Wien: 74.
- Simpkins, W. W. (2006). "A multi-scale investigation of ground water flow at Clear Lake, Iowa. *Ground Water* 44 (1) pp. 35-46."
- Wenter, F. (2007). Geologischer und hydrogeologischer Aufbau des Grundwasserleitersystems im Bereich des Marchfeldes. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Wien, Wien: 88.
- Wessely, G. (2006). "Geologie der Österreichischen Bundesländer - Niederösterreich." Geologische Bundesanstalt, Wien: 416.
- Yi, Y., B. E. Brock, et al. (2008). "A coupled isotope tracer method to characterize input water to lakes." *Journal of Hydrology* 350(1-2): 1-13.

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Schematisches Isotopenmodell
- Abb. 2: Abgrenzung des Modellgebietes in Hörsching
- Abb. 3: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Hörsching
- Abb. 4: Modellierte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel in Hörsching
- Abb. 5: Modellierte mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte [m/s] der Seeflanken des Baggersees in Hörsching (schematisch)
- Abb. 6: Meteorologische Daten des Jahres 2009, Bezug: Wetterstation Hörsching (5000)
- Abb. 7: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm Baggersee Hörsching
- Abb. 8: Abgrenzung des Modellgebietes in Tillmitsch
- Abb. 9: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Tillmitsch
- Abb. 10: Modellierte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel in Tillmitsch
- Abb. 11: Modellierte mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte [m/s] der Seeflanken des Baggersees in Tillmitsch (schematisch)
- Abb. 12: Meteorologische Daten des Jahres 2009, Bezug: Wetterstation Wagna-Leibnitz (19021)
- Abb. 13: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm Baggersee Tillmitsch
- Abb. 14: Abgrenzung des Modellgebietes in Pframa
- Abb. 15: Aufbau des dreidimensionalen Grundwasserströmungsmodells
- Abb. 16: Modellierte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel in Pframa
- Abb. 17: Meteorologische Daten des Jahres 2009, Bezug: Wetterstation Groß Enzersdorf (5972)
- Abb. 18: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm Baggersee Pframa
- Abb. 19: Abgrenzung des Modellgebietes in Persenbeug
- Abb. 20: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Persenbeug
- Abb. 21: Modellierte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel in Persenbeug
- Abb. 22: Modellierte mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte [m/s] der Seeflanken des Baggersees in Persenbeug (schematisch)
- Abb. 23: Meteorologische Daten des Jahres 2009, Bezug: Wetterstation Wieselburg (5421)
- Abb. 24: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm Baggersee Persenbeug
- Abb. 25: Abgrenzung des Modellgebietes in Grafenwörth
- Abb. 26: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Grafenwörth
- Abb. 27: Modellierte Grundwasserisohypsen bei mittlerem Grundwasserspiegel (müA) in Grafenwörth
- Abb. 28: Modellierte mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte der Seeflanken des Baggersees in Grafenwörth (schematisch)
- Abb. 29: Grundwasserisohypsen und Stromlinienbahnen bei einer Grundwasserförderung von 300 m³/d in Grafenwörth
- Abb. 30: Meteorologische Daten des Jahres 2009, Bezug: Wetterstation Krems (3805)
- Abb. 31: $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ Diagramm Baggersee Grafenwörth
- Abb. 32: Methodenvergleich zur Erfassung der mittleren Verweilzeit des Seewassers

Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Anzahl der Elemente und Knoten des Finite Elemente Netzes
- Tab. 2: Durchlässigkeitsbeiwerte und Grundwasserspiegelgefälle der Modellgebiete
- Tab. 3: Langjährige Mittel der meteorologischen Wasserbilanzglieder der Modellgebiete [mm/a]
- Tab. 4: Seefläche und Wasservolumen der untersuchten Baggerseen
- Tab. 5: Grundwasserspiegel der abgeteufte Grundwassermessstellen in Hörsching zum 04.03.2009
- Tab. 6: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Hörsching [müA]
- Tab. 7: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des Grundwasserströmungsmodells in Hörsching
- Tab. 8: Eingangsparameter zur Lösung des numerischen Grundwasserströmungsmodells in Hörsching (Bezugsjahr 2009)
- Tab. 9: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Hörsching [müA]
- Tab. 10: Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009), Hörsching
- Tab. 11: Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung in Hörsching
- Tab. 12: Ergebnis der Isotopenauswertung, Baggersee Hörsching
- Tab. 13: Grund- und Seewasserspiegel der abgeteufte Grundwassermessstellen in Tillmitsch zum 22.12.2008
- Tab. 14: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Tillmitsch [müA]
- Tab. 15: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse
- Tab. 16: Eingangsparameter zur Lösung des numerischen Grundwasserströmungsmodells in Tillmitsch (Bezugsjahr 2009)
- Tab. 17: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Tillmitsch [müA]
- Tab. 18: Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009), Tillmitsch
- Tab. 19: Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung in Tillmitsch
- Tab. 20: Ergebnis der Isotopenauswertung, Baggersee Tillmitsch
- Tab. 21: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Pframa [müA]
- Tab. 22: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse
- Tab. 23: Eingangsparameter zur Lösung des numerischen Grundwasserströmungsmodells in Pframa (Bezugsjahr 2009)
- Tab. 24: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Pframa [müA]
- Tab. 25: Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009), Pframa
- Tab. 26: Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung in Pframa
- Tab. 27: Ergebnis der Isotopenauswertung, Baggersee Pframa
- Tab. 28: Grundwasserspiegel der Grundwassermessstellen in Persenbeug zum 05.12.2009
- Tab. 29: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Persenbeug [müA]
- Tab. 30: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des Grundwasserströmungsmodells Persenbeug
- Tab. 31: Eingangsparameter zur Lösung des numerischen Grundwasserströmungsmodells in Persenbeug (Bezugsjahr 2009)
- Tab. 32: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Persenbeug [müA]
- Tab. 33: Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009), Persenbeug
- Tab. 34: Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung in Persenbeug
- Tab. 35: Ergebnis der Isotopenauswertung, Baggersee Persenbeug
- Tab. 36: Grundwasserspiegel der abgeteufte Grundwassermessstellen in Grafenwörth zum 15.06.2009

- Tab. 37: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Grafenwörth [müA]
- Tab. 38: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse des Grundwasserströmungsmodells Grafenwörth
- Tab. 39: Mittlere Verweilzeit des Seewassers bei unterschiedlicher Grundwasserförderung
- Tab. 40: Eingangsparameter zur Lösung des numerischen Grundwasserströmungsmodells in Grafenwörth (Bezugsjahr 2009)
- Tab. 41: Vergleich der gemessenen gegenüber den modellierten Grundwasserspiegeln der Grundwassermessstellen in Grafenwörth [müA]
- Tab. 42: Grundwasserzustrom und mittlere Verweilzeit des Seewassers (Bezugsjahr 2009), Grafenwörth
- Tab. 43: Eingangsparameter zur Lösung der Isotopengleichung in Grafenwörth
- Tab. 44: Ergebnis der Isotopenauswertung, Baggersee Grafenwörth
- Tab. 45: Grundwasserbilanz und mittlere Verweilzeit des Seewassers