

**INSTITUT FÜR
WASSERRESSOURCENMANAGEMENT
HYDROGEOLOGIE UND GEOPHYSIK**

***GRUNDWASSERMODELL GRAZER FELD - SÜD
ENDBERICHT***

UNIV.-DOZ. DR. J. FANK, ING. G. ROCK, DI. DR. H. KUPFERSBERGER

GRUNDWASSERMODELL GRAZER FELD SÜD

**INSTITUT FÜR
WASSERRESSOURCENMANAGEMENT
HYDROGEOLOGIE UND GEOPHYSIK**

***GRUNDWASSERMODELL GRAZER FELD - SÜD
ENDBERICHT***

UNIV.-DOZ. DR. J. FANK, ING. G. ROCK, DI. DR. H. KUPFERSBERGER

DEZEMBER 2004

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung und Problemstellung	1
1.1	Detailfragestellungen	1
2	Grundwassermodell Grazer Feld - Süd – Datengrundlage	2
3	Grundwasserströmungsmodell	3
3.1	Hydrogeologisches Konzeptmodell	3
3.2	Mathematisches Modell	4
3.2.1	Kontinuitätsgleichung und Darcy'sches Gesetz.....	4
3.2.2	Die Interaktion von Oberflächengewässern und Grundwasser	6
3.2.3	Rand- und Anfangsbedingungen	7
3.2.4	Die Lösung des mathematischen Modells mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM)	7
3.3	Instationäre Kalibration des Grundwasserströmungsmodells	8
3.3.1	Definition der Randbedingungen	8
3.3.2	Kalibrationsergebnisse	9
3.3.2.1	Dokumentation der Kalibrationsergebnisse	14
3.3.2.2	Kalibration des Modells am zeitlichen Verlauf des Grundwasserstandes	16
3.3.2.3	Bewertung der Kalibrationsqualität	25
3.3.2.4	Verteilung der Durchlässigkeiten und des entwässerbaren Porenvolumens	28
3.3.2.5	Grundwasserströmungsverhältnisse bei Ist-Zustand	28
4	Simulationsrechnungen mit Hilfe des kalibrierten Grundwasserströmungsmodells.....	29
4.1	Auswertung des Pumpversuches der BGG	29
4.2	Wasserhaltungsmaßnahmen in der Bauphase der Unterflurtrasse Feldkirchen.....	31
4.3	Simulation der Auswirkung der Trassenführung in den Unterflurbereichen.....	40
4.3.1	Unterflurtrasse Feldkirchen	41
4.3.2	Unterflurtrasse Weitendorf	43
4.4	Auswirkung der Versickerungsbecken.....	55
4.4.1	Grundlagen zur Bewertung	55
4.4.1.1	Versickerungsleistung der Becken.....	55
4.4.1.2	Starkniederschlagsereignis und flächenhafte Grundwasserneubildung.....	57
4.4.2	Grundwassermodell - Simulationsrechnungen und deren Ergebnisse	59
5	Zusammenfassung.....	72
6	Literatur	78

Verzeichnis der Beilagen

- Beilage 1: Einlagezahl 0342: Übersicht
Beilage 2: Einlagezahl 0343: Grundwasserstauer
Beilage 3: Einlagezahl 0344: Durchlässigkeitsbeiwerte
Beilage 4: Einlagezahl 0345: Entwässerbares Porenvolumen
Beilage 5: Einlagezahl 0346: Grundwasserschichtenlinien Istzustand bei NGW(9.2.2002)
Beilage 6: Einlagezahl 0347: Grundwasserschichtenlinien Istzustand bei MGW(25.6.1997)
Beilage 7: Einlagezahl 0348: Grundwasserschichtenlinien Istzustand bei HGW(29.10.1996)

Verzeichnis der Abbildungen

- Abbildung 1: Instationäre Modellkalibration: Vergleich der berechneten Grundwasserstandsganglinie mit den Messdaten beispielhaft an der Grundwasserstandsmessstelle UW3596 des Hydrografischen Dienstes..... 10
Abbildung 2: Instationäre Modellkalibration: Scatterplot der gemessenen Grundwasserspiegellagen im Vergleich zu den zeitgleichen berechneten Grundwasserständen beispielhaft an der Grundwasserstandsmessstelle UW3596 des Hydrografischen Dienstes..... 10
Abbildung 3: Instationäre Modellkalibration: Zeitlicher Verlauf der Differenzen zwischen den gemessenen und den zeitgleichen berechneten Grundwasserständen beispielhaft an der Grundwasserstandsmessstelle UW3596 des Hydrografischen Dienstes..... 11
Abbildung 4: Instationäre Modellkalibration: Doppelsummenkurve der Absolutwertänderungen der Grundwasserspiegellage der gemessenen und der zeitgleichen berechneten Grundwasserstände beispielhaft an der Grundwasserstandsmessstelle UW3596 des Hydrografischen Dienstes..... 11
Abbildung 5: Auswahl von Grundwasserstandsmessstellen im südwestlichen Grazer Feld, an denen die Kalibrationsqualität des instationär kalibrierten Grundwasserströmungsmodells dokumentiert werden soll. 15
Abbildung 6: Kalibration des instationären Grundwasserströmungsmodells: Vergleich der gemessenen Grundwasserspiegelganglinie (Punkte) mit den Berechnungsergebnissen (blaue Linie) für die Messstelle UW3532..... 16
Abbildung 7: Kalibration des instationären Grundwasserströmungsmodells: Vergleich der gemessenen Grundwasserspiegelganglinie (Punkte) mit den Berechnungsergebnissen (blaue Linie) für die Messstelle UW3546..... 17
Abbildung 8: Kalibration des instationären Grundwasserströmungsmodells: Vergleich der gemessenen Grundwasserspiegelganglinie (Punkte) mit den Berechnungsergebnissen (blaue Linie) für die Messstelle UW3596..... 17
Abbildung 9: Kalibration des instationären Grundwasserströmungsmodells: Vergleich der gemessenen Grundwasserspiegelganglinie (Punkte) mit den Berechnungsergebnissen (blaue Linie) für die Messstelle UW35668..... 18
Abbildung 10: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle UW3636..... 19
Abbildung 11: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle UW3628..... 19
Abbildung 12: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle UW3660..... 20
Abbildung 13: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle UW3756..... 20
Abbildung 14: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle UW3758..... 21
Abbildung 15: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle UW36162..... 21

Abbildung 16: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle UW37481.....	22
Abbildung 17: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle KB-F05_98....	22
Abbildung 18: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle KB-F08_98....	23
Abbildung 19: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle KB-S04_98	23
Abbildung 20: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle KB-S08_98	24
Abbildung 21: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle KB-S23_98	24
Abbildung 22: Vergleich gemessener mittlerer Grundwasserspiegellagen mit berechneten mittleren Grundwasserspiegellagen an den zur Kalibration herangezogenen Messstellen, für die annähernd im gesamten Berechnungszeitraum Messdaten verfügbar waren in Scatterplotdarstellung.....	26
Abbildung 23: Vergleich gemessener mittlerer Grundwasserspiegellagen mit berechneten mittleren Grundwasserspiegellagen an allen zur Kalibration herangezogenen Messstellen in Scatterplotdarstellung	27
Abbildung 24: Messdaten, Kalibrationsergebnisse und Berechnungsergebnisse ohne Rückversickerung des beim Pumpversuch geförderten Wassers an den Beobachtungsstellen HB-F01a_03 (links) und HB-F01b_03 (rechts)	30
Abbildung 25: Vergleich der Wasserhaltungsmengen zwischen MGW und Bauwasserspiegel der unterschiedlichen Abschnitte.....	33
Abbildung 26: Absenkung und Aufspiegelung bei der Wasserhaltung für den Abschnitt Km 8.70-8.80 für die Variante Bauwasserspiegel und Wasserhaltung mittels 3 Brunnen.....	34
Abbildung 27: Absenkung und Aufspiegelung bei der Wasserhaltung für den Abschnitt Km 8.90-9.00 für die Variante Bauwasserspiegel und Wasserhaltung mittels 3 Brunnen.....	35
Abbildung 28: Absenkung und Aufspiegelung bei der Wasserhaltung für den Abschnitt Km 9.10-9.20 für die Variante Bauwasserspiegel und Wasserhaltung mittels 3 Brunnen.....	36
Abbildung 29: Absenkung und Aufspiegelung bei der Wasserhaltung für den Abschnitt Km 8.90-9.05 für die Variante Bauwasserspiegel und Wasserhaltung mittels 4 Brunnen.....	37
Abbildung 30: Absenkung und Aufspiegelung bei der Wasserhaltung für den Abschnitt Km 9.05-9.20 für die Variante Bauwasserspiegel und Wasserhaltung mittels 4 Brunnen.....	38
Abbildung 31: Absenkung und Aufspiegelung bei der Wasserhaltung für den Abschnitt Km 8.70-8.80 für die Variante Bauwasserspiegel und Wasserhaltung mittels 2 Brunnen.....	39
Abbildung 32: Berechnung der zu erwartenden Aufspiegelung (bzw. Absenkung) des Grundwasserspiegels oberstrom (bzw. unterstrom) der Unterflurtrasse in Abhängigkeit von der Bauwerkseintiefung in das Grundwasser (bzw. der Restmächtigkeit des Aquifers)	40
Abbildung 33: Vergleich der Grundwasserganglinien Istzustand und Simulation der Unterflurtrasse am Pegel KB_F05/98.....	42
Abbildung 34: Vergleich der mittleren Jahresgrundwasserstandsganglinien Istzustand und Simulation der Unterflurtrasse am Pegel KB_F05/98.....	42
Abbildung 35: Vergleich der Grundwasserabflüsse im Trassenquerschnitt bei NGW (9.3.2002).....	45
Abbildung 36: Vergleich der Grundwasserabflüsse im Trassenquerschnitt bei MGW (25.6.1997).....	45
Abbildung 37: Vergleich der Grundwasserabflüsse im Trassenquerschnitt bei HGW (29.10.1996)	46
Abbildung 38: Vergleich der Grundwasserabflüsse charakteristischer hydrologischer Zustände für den Prognosezustand	46
Abbildung 39: Differenz des GW-Spiegels zwischen der Simulation der Wanne (SIM) und dem Istzustand (IST) sowie GW-Schichtenlinien beider Zustände bei NGW.....	48
Abbildung 40: Differenz des GW-Spiegels zwischen der Simulation der Wanne (SIM) und dem Istzustand (IST) sowie GW-Schichtenlinien beider Zustände bei MGW	49
Abbildung 41: Differenz des GW-Spiegels zwischen der Simulation der Wanne (SIM) und dem Istzustand (IST) sowie GW-Schichtenlinien beider Zustände bei HGW.....	50
Abbildung 42: Häufigkeitsverteilung der Grundwasserspiegellagen über den Grundwasserschwankungsbereich an der Beobachtungsstelle BR_WE56 im Vergleich der Ist Variante zur Sim Variante.....	52

Abbildung 43: Vergleich der Ganglinien der Grundwasserspiegellagen an der Beobachtungsstelle BR?WE56 zwischen Ist Variante und Sim Variante.....	52
Abbildung 44: Lage der Observation Points zur punktuellen Beurteilung der Auswirkung der geplanten Wanne auf die Grundwasserspiegellage im Raum Weitendorf – Werndorf.....	53
Abbildung 45: Versickerungsganglinien der 9 Versickerungsbecken.....	56
Abbildung 46: Ganglinie des Bodenwasserhaushaltsdefizits für einen typischen Boden im Grazer Feld: Ganglinie 1992 – 2003 (oben) und mittlere Jahresganglinie (unten).....	58
Abbildung 47: Auswirkung des Starkregenereignisses auf die flächenhafte Grundwasserneubildung im Grazer Feld. Vergleich von Bodenwasserhaushaltsdefizit (BWH) und Tagessummen der Grundwasserneubildung (NB) zwischen normaler Niederschlagsverteilung und Einbindung eines Extremereignisses.....	59
Abbildung 48: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA1.....	60
Abbildung 49: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA2.....	61
Abbildung 50: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA4.....	62
Abbildung 51: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA5.....	63
Abbildung 52: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA6.....	64
Abbildung 53: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA7.....	65
Abbildung 54: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA10.....	66
Abbildung 55: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA11.....	67
Abbildung 56: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA12.....	68
Abbildung 57: Auswirkung der Versickerung der Meteorwässer über die Versickerungsbecken GSA6 und GSA7 im Nordteil des Untersuchungsgebietes auf die regionalen Grundwasserstands- und –strömungsverhältnisse als Differenzenplan zwischen den Varianten „Starkregen mit Becken“ minus „Starkregen ohne Becken“ und den entsprechenden Grundwasserschichtenliniendarstellungen für den 11.08.2002.....	69
Abbildung 58: Auswirkung der Versickerung der Meteorwässer über die Versickerungsbecken GSA10, GSA11 und GSA12 im Südteil des Untersuchungsgebietes auf die regionalen Grundwasserstands- und –strömungsverhältnisse als Differenzenplan zwischen den Varianten „Starkregen mit Becken“ minus „Starkregen ohne Becken“ und den entsprechenden Grundwasserschichtenliniendarstellungen für den 11.08.2002.....	70

Verzeichnis der Tabellen

<i>Tabelle 1: Instationäre Modellkalibration: Kennwerte der Modellkalibration beispielhaft dargestellt an der Grundwasserstandsmessstelle BR3596 des Hydrografischen Dienstes</i>	<i>14</i>
<i>Tabelle 2: Ergebnisse der Berechnung der statistischen Auswertung der instationären Kalibration des Grundwasserströmungsmodells südwestliches Grazer Feld für jene Messstellen, für die annähernd im gesamten Berechnungszeitraum Messdaten verfügbar waren.</i>	<i>25</i>
<i>Tabelle 3: Kenngrößen für die Simulation der Wasserhaltung</i>	<i>31</i>
<i>Tabelle 4: Zusammenfassung der Wasserhaltungsvarianten</i>	<i>32</i>
<i>Tabelle 5: Bauwerkunterkanten (BWUK) zu den entsprechenden Bauabschnitten</i>	<i>41</i>
<i>Tabelle 6: Für die Simulation entlang der Unterflurtrasse (Km) verwendete Stauerhöhe, Bauwerksunterkante (BWUK) und die Differenz zum Grundwasserstauer (BWUK-Stauer)</i>	<i>43</i>
<i>Tabelle 7: Durchflussmengen im Trassenquerschnitt nach Abschnitten</i>	<i>44</i>
<i>Tabelle 8: Dokumentation der Auswirkung der Variante Sim auf hydrografische Kennzahlen der Beobachtungsstelle BR_WE56 im Vergleich zu den Kennzahlen der Variante Ist</i>	<i>51</i>
<i>Tabelle 9: Zusammenfassung der Auswertung der Auswirkung (negative Werte = Absenkung, positive Werte = Aufspiegelung) der Wanne Weitendorf auf die Grundwasserspiegellagen an den Beobachtungspunkten in Abbildung 44 zu unterschiedlichen hydrologischen Zuständen (NGW, HGW, MGW)</i>	<i>54</i>
<i>Tabelle 10: Kenndaten der Versickerungsbecken, der Becken – Versickerungsrate und des Grundwasserspiegels als Grundlage für die Simulation der Auswirkung der Versickerungsbecken auf die Grundwassersituation</i>	<i>60</i>

1 Einleitung und Problemstellung

Im Bereich des Grazer Feldes treten aufgrund der strukturellen Entwicklung in immer stärker werdendem Maße Wechselwirkungen zwischen geplanten infrastrukturellen Maßnahmen und der Nutzung naturräumlicher Ressourcen auf. Um eventuellen Konfliktpotentialen von vornherein wirksam entgegenwirken zu können, müssen die Auswirkungen von anthropogenen Eingriffen in unterschiedliche Kompartimente von Ökosystemen vor deren Realisierung prognostiziert und hinsichtlich einer Minimierung optimiert werden. Hinsichtlich der Ressourcen im Grundwasserbereich bieten sich dafür – aufgrund der hervorragenden Datenlage – numerische Modelle unterschiedlicher Art an. Die Prognose und Minimierung der Auswirkungen von Planungen der Verkehrsinfrastruktur auf die Grundwasserverhältnisse im Grundwassergebiet des Grazer Feldes, wurde bereits in der Vergangenheit mehrfach erfolgreich durchgeführt. Als Grundlage für diese Arbeiten wurde das Grundwasserströmungsmodell Kalsdorf in den letzten 10 Jahren in Kooperation zwischen dem Amt der Steiermärkischen Landesregierung – Wasserwirtschaftliche Planung, dem Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung, der HL-AG und dem Wasserverband Umland Graz erstellt und kontinuierlich weiterentwickelt.

Hinsichtlich aktuell anstehender Detailplanungsvorhaben im Rahmen der Planung der Koralmbahn wurde das Institut für WasserRessourcenManagement – Hydrogeologie und Geophysik der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, beauftragt, notwendige Modellerweiterungen und Szenario-Berechnungen zu einer optimalen Planungsdurchführung durchzuführen und über die Auswirkung geplanter Maßnahmen ein grundwasserhydrologisches Gutachten zu erarbeiten.

1.1 Detailfragestellungen

Aus hydrogeologischer Sicht ergaben sich folgende Detailfragestellungen, die durch die Kalibration unterschiedlicher numerischer Modelle und folgender Simulationsrechnungen beantwortet werden mussten:

- Auswertung des vom Büro WAIBEL (BGG) durchgeführten Pump- und Versickerungsversuchs im Bereich der Unterflurtrasse des Flughafenastes der Koralmbahn
- Bewertung unterschiedlicher Wasserhaltungsvarianten im Rahmen der Errichtung der Unterflurtrasse des Flughafenastes der Koralmbahn
- Erstellung eines instationär kalibrierten Grundwasserströmungsmodells für den Bereich Weitendorf durch Erweiterung und Neukalibration des bestehenden instationären Grundwasserströmungsmodells Kalsdorf zur Beurteilung der Auswirkung von Unterflurtrassen im Raum Feldkirchen und Weitendorf auf Grundwasserströmung und -spiegellage
- Bewertung der Versickerung von Meteorwässern entlang der Koralmbahn unter Berücksichtigung der Wechselwirkung mit dem Grundwassersystem

2 Grundwassermodell Grazer Feld - Süd – Datengrundlage

Die Grundwassermessstellen und Förderbrunnen sind in Beilage 1 dargestellt. Nicht für alle in dieser Karte dargestellten Grundwasserpegel waren auch Grundwasserspiegelmessungen für die Kalibration des instationären Modells verfügbar.

Für die Erarbeitung der Höhenlage des präquartären Untergrundes und seiner Oberflächenmorphologie wurde auf Ergebnisse vorhandener Bohrungen sowie bereits existierender Untergrunddarstellungen zurückgegriffen. Aufgrund der Komplexität der Untergrundmorphologie und der geologischen Verhältnisse im Bereich Weitendorf wurden diese Auswertungen durch geophysikalische Messungen ergänzt.

Für die instationäre Kalibration standen Grundwasserganglinien an insgesamt 241 Pegel zur Verfügung. Messungen für den gesamten Kalibrationszeitraum standen vom hydrographischen Dienst der Steiermark, vom Wasserverband Umland Graz und von den Grazer Stadtwerken zur Verfügung. Grundwasserspiegelmessungen für das Projekt gab es an einer Reihe von Pegeln seit 1998 und einer zusätzliche Reihe von Pegeln seit 2003. Die AHP (ehemals STEWEAG) stellte ihre Grundwasserspiegelmessungen für die Errichtung des KW Mellach zur Verfügung, die allerdings mit Ende 1992 endeten. Diese Messungen konnten bei der Kalibration als Zusatzinformation im Aubereich verwendet werden.

Wasserspiegel- und Durchflussganglinien an den Pegeln des hydrographischen Dienstes der Steiermark standen für zwei Pegel an der Mur und einem Pegel an der Kainach zur Verfügung. Die AHP (ehemals STEWEAG) stellte die vorhandenen Murprofile und die für das Projektgebiet vorhandenen Wasserspiegelberechnungen zur Verfügung. Mittels dieser Daten konnten die für die Grundwassermodellierung notwendigen Wasserspiegelganglinien entlang der Mur geschätzt werden. Für die Kainach stand eine Abflussuntersuchung vom Büro Zach und die von der Hydroconsult für das Projekt durchgeführte Detailuntersuchung zur Verfügung. Aus diesen Daten wurden ebenso wie an der Mur Wasserspiegelganglinien entlang der Kainach geschätzt, die als Randbedingung für das Grundwassermodell notwendig sind.

Entnahmedaten der Brunnen des Wasserwerk Kalsdorf wurden seitens des Wasserverbandes Umland Graz zur Verfügung gestellt, aufbereitet und als instationäre Entnahmeganglinien auf Tagesbasis im Grundwassermodell eingesetzt.

3 Grundwasserströmungsmodell

3.1 Hydrogeologisches Konzeptmodell

Grundlage jeder Grundwasserströmungsmodellierung bildet die Vorstellung des Hydrogeologen über das Strömungsverhalten des Grundwassers, der Interaktion des Grundwasserkörpers mit den Oberflächengewässern, den relevanten Prozessen der Grundwassererneuerung und der Interaktion des zu untersuchenden Grundwasserkörpers mit den benachbarten Teilsystemen über die Randbedingungen. Diese Vorstellungen und Annahmen, die auch die Auftrennung aller physikalischen Einflussnahmen auf den Grundwasserkörper in relevante und weniger bedeutsame Prozesse beinhaltet bildet das grundlegende hydrogeologische Konzeptmodell, an das die numerische Modellierung gekoppelt wird.

Die Morphologie des Untersuchungsgebietes ist geprägt von der weiten Terrassenfläche der Würmschotter, in die die Austufe der Mur als Erosionsform eingetieft ist. Die Oberfläche der Würmterrasse verläuft mit leichtem Gefälle von NW nach SE und weist eine gegenüber der Tertiäroberfläche stärker gegen SE ausgerichtete Neigungsrichtung aus, woraus dann deutliche Unterschiede in der Grundwassermächtigkeit und Grundwasserüberdeckung resultieren. Die Sprunghöhe des Abfalles der Würmterrasse in die Austufe, beträgt etwa 2 bis 5 m.

Das in Form von meist sandig-schluffigem Material ausgebildete Tertiär kann generell als Wasserstauer des Untersuchungsgebietes angesehen werden. Die Morphologie des Grundwasserstauers als untere Randbedingung des Grundwasserströmungsmodells ist in Beilage 2 dargestellt. Dominierendes Element des wasserstauenden Untergrundes des Grazer Beckens ist eine Tiefenrinne. Gegen Süden tritt eine zunehmende Verflachung der Rinne bei einer gleichzeitigen Verbreiterung ein, wobei letztlich der ganze Bereich zwischen Kaiserwaldterrasse im Westen und dem Tertiärrand im Osten in die Rinnenstruktur einbezogen ist. An der breitesten und flachsten Stelle der Rinne südlich Kalsdorf, wird die Untergrundmorphologie und die Rinnenstruktur undeutlich. Sie scheint sich hier in zwei flache Tiefenbereiche aufzuteilen bzw. durch eine Erhebung zweigeteilt zu sein. Am Südende des Grazer Beckens, wo das Murtal durch die Leithakalke (bzw. die Grundgebirgshochlage der Sausalschwelle) zwischen Wildon und Wurzing (Kollischberg, Weißenegg) durchbricht, ist auch im tertiären Untergrund wieder eine deutliche Rinnenstruktur vorhanden. Im Raum Weitendorf ragt im Untergrund ein Sporn weit gegen Osten in das Grazer Feld hinein und trennt hier die Begleitgrundwasserströme der Mur und der Kainach. Den Aquifer stellen die tieferen Bereiche der darüber lagernden fluvioglazialen Schotter der Würm-Kaltzeit dar. Die Mächtigkeit dieser Schotter erreicht im natürlichen Aufbau bis zu 25 m.

Die tieferen Bereiche dieser fluvioglazialen Würmschotter sind mit Grundwasser mit freier Oberfläche erfüllt. Die Erneuerung dieses Grundwasserkörpers erfolgt in erster Linie aus den infiltrierenden Niederschlägen im Bereich der Terrasse selbst als wesentlichste Komponente, aus der Wechselwirkung des Grundwassers mit relevanten Oberflächengewässern (in erster Linie der Mur) sowie Randzuflüssen aus den umgrenzenden hydrogeologischen Einheiten (Plabutsch, Kaiserwald-

Terrasse, Tertiäres Hügelland). Die jahreszeitlich unterschiedliche Grundwasserneubildung bewirkt in erster Linie ein natürliches Schwankungsverhalten des Grundwasserspiegels von etwa 2.5 m. Die Mächtigkeit des gesättigten Teiles des Grundwasserleiters und die der Grundwasserüberdeckung variieren dem gemäß in der Zeit.

Wesentlichste Quelle der Grundwassererneuerung und damit ein dominanter Prozess, der im Grundwasserströmungsmodell als obere Randbedingung fungiert, stellt die flächenhafte Sickerwasserrate, d.h. die Grundwasserneubildung über infiltrierende Niederschläge dar. Hinsichtlich der Erfassung der flächenhaften Grundwasserneubildung stehen in Abhängigkeit von den Verhältnissen in den jeweiligen Grundwasserleitersystemen unterschiedliche hydrologische Ansätze sowie die Auswertung des Bodenwasserhaushalts mit unterschiedlichen Modellen zur Verfügung (vgl. FANK, 1999).

In der Praxis wird auf Modelle zurückgegriffen, bei denen die Inputparameter aus bereits bestehenden Datengrundlagen abgeleitet werden können bzw. die Parametrisierung der Bodendaten ohne analytische Bestimmungen auskommt. Daher wurde als Simulationsmodell für die Berechnung der Grundwasserneubildungsrate im südwestlichen Grazer Feld einerseits ein statistisches Modell zur Ableitung der zeitlich differenzierten Neubildung an Grundwasserstandsganglinien des Hydrografischen Dienstes, gekoppelt mit einem geostatistischen Modell zur Übertragung der Punktergebnisse in die Fläche des Untersuchungsgebietes und andererseits das Einschicht-Bodenwasser - Bilanzmodell gewählt, wobei die zeitlich differenzierte Neubildung für jede unterschiedliche Bodenform mit landwirtschaftlicher Nutzung aus dem Bodenwasserspeichervermögen in Koppelung mit einem Verdunstungsmodell nach HAUDE berechnet wird. Die Bodenformen wurden aus der Österreichischen Bodenkarte 1:25000 digital erfasst, die agrarischen Nutzflächen wurden über Remote Sensing Verfahren aus Satellitenbildern abgeleitet.

3.2 Mathematisches Modell

Wie in fast allen Bereichen der Natur- und Ingenieurwissenschaften basieren die Untersuchungsmethoden auch in der Analyse der Grundwasserströmung auf einem Verständnis der physikalischen Prozesse, die in den meisten Fällen durch mathematische Formeln und Gleichungen beschrieben werden können. Die grundlegende Fließgleichung ist das Gesetz von Darcy. In Kombination mit der Kontinuitätsgleichung, die den Massenerhalt an Wasser während des Flusses durch ein poröses Medium beschreibt, resultiert eine partielle Differentialgleichung der Grundwasserströmung. Die gut bekannten Gleichungen für stationären und instationären Fluß treten als eine Komponente eines „boundary value problems“ in Erscheinung.

3.2.1 Kontinuitätsgleichung und Darcy'sches Gesetz

Die Experimente von Henry DARCY (DARCY, 1856) zeigten, dass der spezifische Durchfluß v durch eine mit Sand gefüllte Säule proportional ist der durchflossenen Fläche, proportional ist dem

Unterschied in der Wasserspiegellage zwischen Eintritts- und Austrittsbereich und umgekehrt proportional ist der Länge des Filters. Das daraus abgeleitete DARCY'sche Gesetz kann in der Form

$$\text{Gleichung 1} \quad v = -K \frac{\Delta h}{\Delta l}$$

niedergeschrieben werden, wobei K eine Proportionalitätskonstante, bekannt als hydraulische Leitfähigkeit darstellt. Da Δh (die Unterschiede in der Spiegellage) und Δl (Filterlänge) beide eine Längendimension aufweisen, wird klar, dass K die Dimension einer Geschwindigkeit haben muss.

In einem Kontroll-Einheitsvolumen beschreibt das Gesetz der Massenerhaltung für den stationären Fluss durch ein gesättigtes poröses Medium, dass die Flussrate in das Kontrollvolumen gleich ist der Flussrate aus dem betrachteten Volumen. Die Kontinuitätsgleichung führt dieses Gesetz in die mathematische Form

$$\text{Gleichung 2} \quad -\frac{\delta(\rho v_x)}{\delta x} - \frac{\delta(\rho v_y)}{\delta y} - \frac{\delta(\rho v_z)}{\delta z} = 0$$

Unter der Annahme einer inkompressiblen Flüssigkeit konstanter Dichte ρ führt das Einsetzen des DARCY'schen Gesetzes für v_x, v_y, v_z zur Strömungsgleichung für stationären Fluss in einem anisotropen gesättigten porösen Medium:

$$\text{Gleichung 3} \quad \frac{\delta}{\delta x} \left(K_x \frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(K_y \frac{\delta h}{\delta y} \right) + \frac{\delta}{\delta z} \left(K_z \frac{\delta h}{\delta z} \right) = 0$$

Für ein isotropes und homogenes poröses Medium reduziert sich diese Gleichung zu

$$\text{Gleichung 4} \quad \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = 0,$$

der grundlegenden Laplace'schen Differentialgleichung. Die Lösung dieser Gleichung ist eine Funktion $h(x, y, z)$, die das hydraulische Potential an jedem Punkt in einem dreidimensionalen Strömungsfeld beschreibt.

Das Gesetz der Erhaltung der Masse für instationären Fluss in einem gesättigten porösen Medium fordert, dass die in ein Kontrollvolumen einströmende Masse gleich ist der austretenden sowie der Änderung des Speicherinhaltes des Kontrollvolumens in einem Zeitschritt. Die Gleichung erhält also die Form

$$\text{Gleichung 5} \quad -\frac{\delta(\rho v_x)}{\delta x} - \frac{\delta(\rho v_y)}{\delta y} - \frac{\delta(\rho v_z)}{\delta z} = \frac{\delta(\rho S_s)}{\delta t}$$

Unter Einsetzen des DARCY'schen Gesetzes ergibt sich daraus die Strömungsgleichung für instationären Fluss durch ein gesättigtes anisotropes poröses Medium. Unter der Annahme von Homogenität und Isotropie nimmt diese Gleichung die Form

Gleichung 6
$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = \frac{S_s}{K} \frac{\delta h}{\delta t},$$

bestens bekannt als Diffusionsgleichung, an. Die Lösung $h(x, y, z, t)$ beschreibt die Potentialhöhe an jedem Punkt eines Strömungsfeldes zu jedem Zeitpunkt. Diese Strömungsgleichung basiert auf dem DARCY'schen Gesetz (DARCY, 1856), auf der Potentialtheorie von HUBBERT (1940), sowie den Konzepten der Aquifer Elastizität von MEINZER (1923) und des effektiven Stresses von TERZAGHI (1925).

3.2.2 Die Interaktion von Oberflächengewässern und Grundwasser

Um die In- bzw. Exfiltration von Oberflächengewässern zu beschreiben, kann das Leakageprinzip benutzt werden. Nach dem Gesetz von DARCY ist der Durchfluss durch eine Trennschicht zwischen zwei benachbarten Aquiferen proportional zu dem zwischen ihnen bestehenden Piezometerhöhengefälle mit dem Durchlässigkeitsbeiwert der Trennschicht als Proportionalitätsfaktor. Der Leakagefaktor kombiniert die beiden Größen Durchlässigkeit und Dicke der Trennschicht. Im Falle der Interaktion des Grundwassers mit Oberflächengewässern ist die treibende Piezometerhöhendifferenz, welche die In- bzw. Exfiltration bestimmt, die Differenz zwischen der Grundwasserhöhe und dem Wasserspiegel des Oberflächengewässers. Dies gilt so lange, wie die Grundwasserhöhe nicht unter die Sohle des Oberflächengewässers fällt. Der Austausch pro Bezugsfläche lautet

Gleichung 7
$$q_L = \frac{k_f}{d} (h_r - h) = l(h_r - h),$$

mit q_L als spezifischer Austauschrate, k_f als Durchlässigkeitsbeiwert der Kolmatierungsschicht, d als Dicke dieser Schicht, h_r als Höhe des Flusswasserspiegels über dem Bezugsniveau und h als Höhe des Grundwasserspiegels über Bezugsniveau. Der Leakagefaktor l fasst wieder Durchlässigkeit und Dicke der Trennschichte zusammen. Fällt der Grundwasserspiegel unter die Sohle des Oberflächengewässers, so wird der Durchfluss unabhängig von der Höhenlage des Grundwasserspiegels. Die treibende Höhendifferenz ist dann im wesentlichen die Differenz zwischen dem Wasserspiegel und der Höhenlage der Sohle des Oberflächengewässers über Bezugsniveau (b_r):

Gleichung 8
$$q_L = l(h_r - b_r).$$

3.2.3 Rand- und Anfangsbedingungen

Die in Kap. 3.2.1 angeführten Strömungsgleichungen sind partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung für die unbekannte Piezometerhöhenverteilung als Funktion der Zeit und des Ortes $h(x, y, t)$. Zu ihrer Lösung sind Anfangs- und Randbedingungen erforderlich. Für stationäre Probleme werden nur Randbedingungen benötigt. Die Anfangsbedingungen bestehen aus einer gegebenen Piezometerhöhenverteilung zum Zeitpunkt, zu dem die Simulation beginnt.

Es gibt mehrere Arten von Randbedingungen:

- Randbedingungen der ersten Art (DIRICHLET-Bedingungen) schreiben die Piezometerhöhen als Funktion der Zeit am Rand vor. Ein Spezialfall der Randbedingungen erster Art ist der Festpotentialrand mit zeitlich unabhängiger konstanter Piezometerhöhe.
- Randbedingungen der zweiten Art (NEUMANN-Bedingungen) schreiben den Zufluss oder Abfluss auf dem Rand vor, d.h. sie legen im isotropen Aquifer den Gradienten des Grundwasserspiegels senkrecht zum Rand fest. Ein Spezialfall dieser Randbedingung ist der undurchlässige Rand. Wenn Randstromlinien das Modellgebiet begrenzen, werden diese wie undurchlässige Ränder behandelt.
- Randbedingungen der dritten Art (CAUCHY-Bedingungen) stellen eine Kombination aus Randbedingungen der ersten und zweiten Art dar. Sie schreiben eine Linearkombination $(\alpha h + \beta \delta h / \delta n)$ auf dem Rand vor. Verwendet werden diese Randbedingungen zur Beschreibung halbdurchlässiger Ränder, wie z.B. bei Leakage aus einem Oberflächengewässer. Dabei wird das äußere Potential durch einen Widerstand abgeschwächt im Aquifer wirksam.

3.2.4 Die Lösung des mathematischen Modells mit Hilfe der Finiten Elemente Methode (FEM)

Für die mathematische Lösung der Strömungsgleichung existieren analytische und numerische Verfahren. Für einfachste Fälle ist die Strömungsgleichung geschlossen lösbar. Die erforderlichen Annahmen wie unendlich ausgedehnter Aquifer, Isotropie, Homogenität etc. schränken die Anwendung dieser Lösungen stark ein und geben nur eine unvollkommene Beschreibung natürlicher Verhältnisse. Für regionale Strömungsprobleme sind die Voraussetzungen der analytischen Lösungen im allgemeinen nicht erfüllt. Deshalb muss diese numerisch gelöst werden. Ein numerisches Strömungsmodell stellt eine räumlich und zeitlich diskretisierte Wasserbilanz eines Gebietes dar.

Die Finite Elemente Methode stellt eine diskrete Beschreibungsmöglichkeit der Grundwasserströmung dar, die direkt von den physikalischen Bedingungen der Grundwasserströmung ausgeht, nämlich von der Gültigkeit des Darcy'schen Gesetzes und von der Kontinuitätsbedingung. Die Erfüllung der Kontinuitätsbedingung ist vom Diskretisierungsgrad abhängig. Je kleiner die Dreieckselemente sind, desto besser kann der exakte Verlauf der Potentialverteilung approximiert werden. Eine zweite

Abhängigkeit zur Erfüllung der Kontinuität ist durch die Form der Dreieckselemente gegeben. Ein gleichseitiges Dreieck stellt dabei die beste Form der Elemente dar.

Die Methode der Finiten Elemente ermöglicht es, über die physikalische Beschreibung im Innern und an den Rändern der Elemente die Potentialhöhen in den Knotenpunkten zu bestimmen. Dabei sind die Durchflussmengen als Knotenpunktergiebigkeiten aufzufassen. Bei der exakten Lösung der Strömungsgleichung erscheint die Potentialhöhenverteilung als Potentialfläche über der Strömungsebene, die stetig, glatt und in den meisten Fällen gekrümmt ist. In der diskretisierten Strömungsebene hängt die Gestalt der Potentialfläche von den Potentialhöhen an den Knotenpunkten des Netzes ab. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich die Potentialhöhe innerhalb und auf den Rändern eines Dreieckselementes linear in jede Richtung ändert, d.h., dass die von den Potentialhöhen der Knotenpunkte aufgespannte Raumfläche eine Ebene ist. Ergebnis der Berechnung der Knotenpunktergiebigkeiten für alle Knotenpunkte eines Strömungsmodells bildet ein lineares Gleichungssystem, dessen Lösung die diskrete Potentialhöhenverteilung in dem Strömungsfeld liefert.

3.3 Instationäre Kalibration des Grundwasserströmungsmodells

Ziel der instationären Kalibration des Grundwasserströmungsmodells ist es, unter definierten Randbedingungen (äußere und innere Ränder) durch Variation der Systemparameter Durchlässigkeit und Verteilung des nutzbaren Porenvolumens eine möglichst gute Anpassung der berechneten Grundwasserspiegellagen an die gemessenen Grundwasserstandsganglinien im Untersuchungsgebiet zu erreichen. Je größer die Anzahl der Beobachtungspunkte und je besser die zugrunde liegenden Messdaten sind, desto besser kann ein Modell instationär kalibriert werden, bzw. umso besser ist die Signifikanz und der Zuverlässigkeitsbereich eines Modells bewertbar.

Aufgrund der Komplexität der Interaktion des Grundwassers im Untersuchungsgebiet mit seiner Umgebung über die Randbedingungen ist in den meisten Fällen eine vollständige homogene Beschreibung der Randbedingungen als Vorgabe für die Modellkalibration nicht möglich. In vielen Fällen müssen auch die aus dem hydrogeologischen Konzeptmodell abgeleiteten Randbedingungsarten und v.a. –größen im Zuge der Modellkalibration innerhalb plausibler Größen variiert werden um zu einem in sich möglichst stimmigen und plausiblen Kalibrationsergebnis zu gelangen. Letzteres gilt v.a. für die durch Messungen praktisch nicht fassbaren Leakage-Werte an den Oberflächengewässern, aber auch für die Zu- und Abflüsse über die äußeren und inneren Ränder. Aufgrund der Problematik der Schätzung der Wasserspiegellagen an Oberflächengewässern sind auch diese nicht als fixe Größen anzusehen, sondern unterliegen im Zuge des Kalibrationsvorganges Modifikationen und Verschiebungen.

3.3.1 Definition der Randbedingungen

Mathematisch gesehen bedeutet die Grundwassermodellierung, die Lösung partieller Differentialgleichungen 2. Ordnung mit Hilfe numerischer Verfahren. Diese Lösung ist nur durch die Vorgabe von Ausgangs- und Randbedingungen möglich. Die Randbedingungen beschreiben die

Interaktion des Grundwassers im Modellgebiet mit seiner Umgebung. Im gegenständlichen Modell wurden unterschiedliche Arten von Rand- und Ausgangsbedingungen verwendet:

- Die untere Begrenzung des untersuchten Grundwasserleiters – der Grundwasserstauer – wurde aus Bohrungen punktuell abgeleitet (Darstellung in Beilage 2).
- Die obere Randbedingung des Grundwasserströmungsmodells stellt die Wassernachlieferung über infiltrierende Niederschläge dar.
- Als Ausgangsspiegellage für die instationäre Modellierung des Grundwassersystems wurde das Ergebnis einer zuerst durchgeführten stationären Modellierung gewählt.
- Die Startverteilung der Durchlässigkeiten im Untersuchungsgebiet wurde aus Unterlagen früherer Untersuchungen und Modelle festgelegt.
- Die Startverteilung des Porenvolumens – ein wichtiger Systemparameter zur Beschreibung der Speicherfähigkeit in der instationären Modellierung – wurde aus vorhandenen Modellen festgelegt.
- Relevante Grundwasserentnahmen als wesentliche Kontrollgröße der Relevanz der kalibrierten Durchlässigkeiten und Porenvolumina standen in Form von Messdaten zur Verfügung bzw. wurden aus der erarbeiteten Datenbasis abgeleitet.
- Die Modellränder im Norden und Westen des Modellgebietes wurden entlang von Grundwassermessstellen festgelegt. Die Ganglinien dieser Messstellen wurden zwischen den Pegeln linear interpoliert und als fixes (instationäres) Potential definiert.
- Die Randbedingungen an der Mur wurden teils als fixes (instationäres) Potential und teils als Leakage-Randbedingung (instationär) definiert. An der Mur wurde dabei an allen Punkten mit Profilinformatoren mittels eines Abflussmodells ein Pegelschlüssel ermittelt und mittels dieses Pegelschlüssels und den Durchflüssen des hydrografischen Dienstes instationäre Ganglinien geschätzt. Diese Ganglinien wurden danach noch auf die Modellknoten interpoliert. Die Leakage Faktoren wurden im Zuge der Modellkalibration erarbeitet.
- Ebenso wurden für die Kainach aus vorhandenen Untersuchungen, Pegelschlüssel und Wasserspiegelganglinien geschätzt und als Leakage-Randbedingung definiert. Die Leakage Faktoren wurden im Zuge der Modellkalibration erarbeitet.

3.3.2 Kalibrationsergebnisse

Im Zuge der Modellkalibration wurde danach durch Variation der Durchlässigkeitsverteilung und der Verteilung der Porenvolumina in plausiblen Rahmen eine bestmögliche Anpassung der berechneten Ganglinien an die gemessenen Grundwasserstandsganglinien an zur Verfügung stehenden Messstellen gesucht.

Für jede Messstelle wurde ein Vergleich zwischen Messung und Rechnung in der zeitlichen Entwicklung (Abbildung 1), ein Vergleich der gemessenen Spiegellagen mit den zeitgleichen, berechneten Grundwasserspiegellagen (Abbildung 2), der zeitliche Verlauf der Differenzen zwischen Messung und zeitgleichen Rechenergebnissen (Abbildung 3) sowie die Doppelsummenkurve der Absolutwertänderungen der Grundwasserspiegellage der gemessenen und der zeitgleichen berechneten Grundwasserstände (Abbildung 4) grafisch ausgewertet.

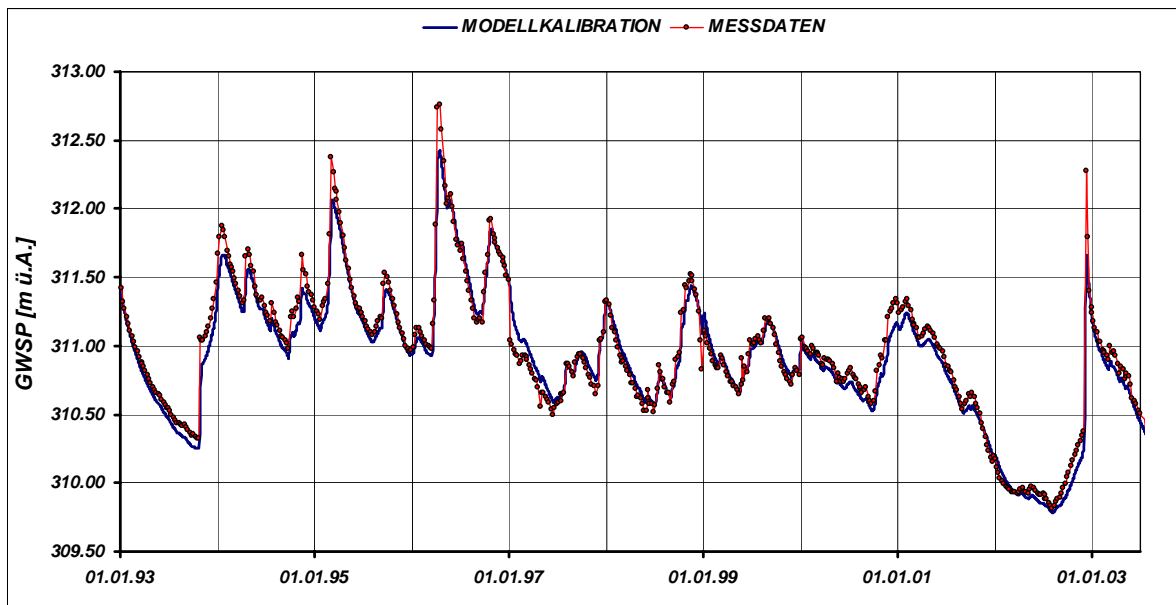


Abbildung 1: Instationäre Modellkalibration: Vergleich der berechneten Grundwasserstandsganglinie mit den Messdaten beispielhaft an der Grundwasserstandsmessstelle UW3596 des Hydrografischen Dienstes

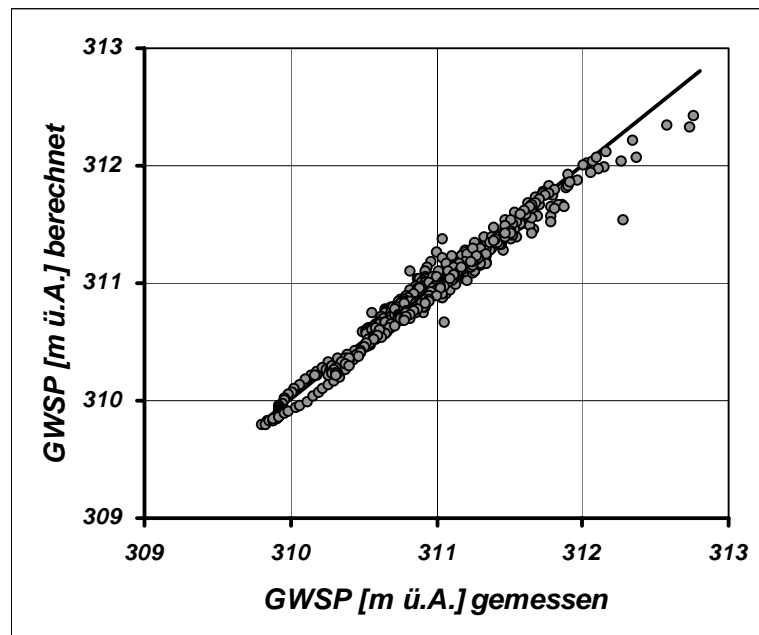


Abbildung 2: Instationäre Modellkalibration: Scatterplot der gemessenen Grundwasserspiegellagen im Vergleich zu den zeitgleichen berechneten Grundwasserständen beispielhaft an der Grundwasserstandsmessstelle UW3596 des Hydrografischen Dienstes

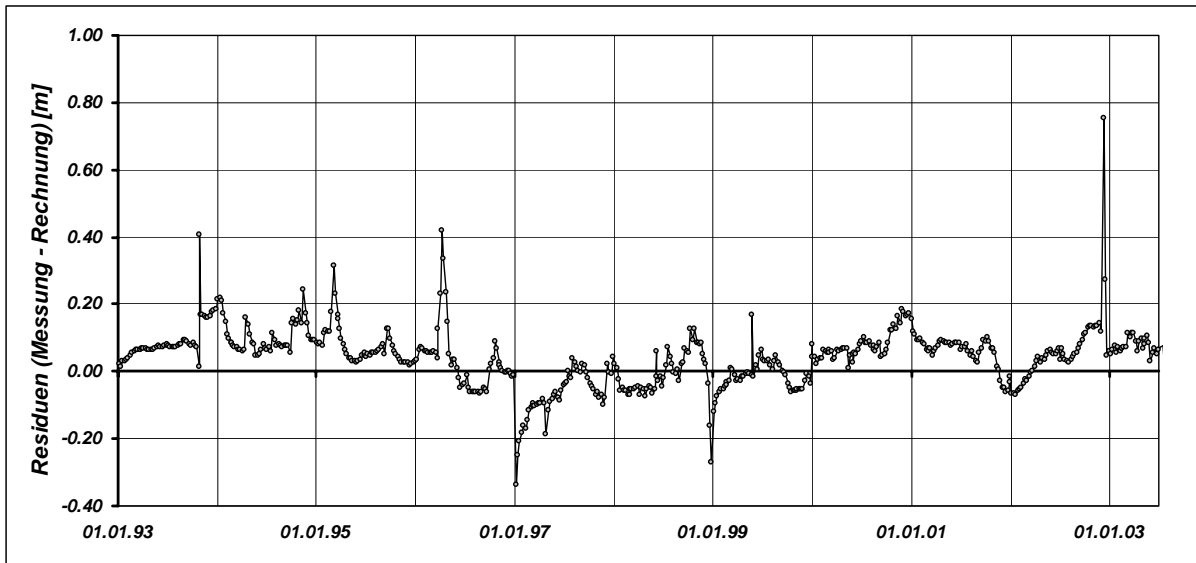


Abbildung 3: Instationäre Modellkalibration: Zeitlicher Verlauf der Differenzen zwischen den gemessenen und den zeitgleichen berechneten Grundwasserständen beispielhaft an der Grundwasserstandsmessstelle UW3596 des Hydrografischen Dienstes

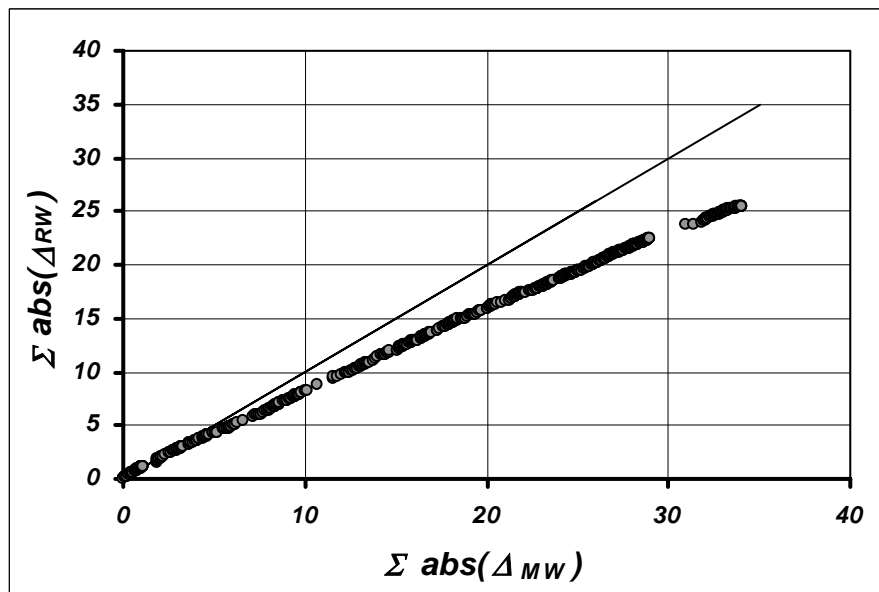


Abbildung 4: Instationäre Modellkalibration: Doppelsummenkurve der Absolutwertänderungen der Grundwasserspiegellage der gemessenen und der zeitgleichen berechneten Grundwasserstände beispielhaft an der Grundwasserstandsmessstelle UW3596 des Hydrografischen Dienstes

Die Kennwerte der instationären Modellkalibration für jede Messstellen wurden analog zu den Angaben in Tabelle 1 erstellt. Neben Minimum, Mittelwert und Maximum der Messdaten im Vergleich zu den äquivalenten Berechnungsergebnissen wurde auch eine Fehlerstatistik basierend auf statistischen Kriterien für die zeitgleichen Beobachtungstermine nach folgenden Formeln berechnet (O = Observation [Messwert]; P = Prediction [Berechnungsergebnis]; n = Anzahl der zeitgleichen

Wertepaare; Mittelwert der Messwerte $\bar{O} = \frac{\sum_{i=1}^n O_i}{n}$);

RES_MIN: größte negative Abweichung [m]:

$$\min_{i=1}^n (O_i - P_i)$$

Der Wert ist sehr stark von einzelnen Ausreißern abhängig, die oft aus messfehlerbehafteten Daten oder für den Kalibrationszeitraum wenig aussagekräftigen Einzelereignissen resultieren. Zur Beurteilung der Kalibrationsgüte ist RES_MIN nur schlecht geeignet.

RES_MEAN: mittlere Abweichung [m]:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n}$$

Bei ausreichend langen Messreihen und großer Anzahl von Wertepaaren ist RES_MEAN zur Beurteilung der Kalibrationsqualität gut geeignet und sollte möglichst nahe bei 0 liegen. Dieser Parameter allein birgt aber in der Bewertung die Gefahr eines systematischen Fehlers in der Berechnung (ähnlich viele stark positive und stark negative Abweichungen heben sich auf).

RES_MAX: größte positive Abweichung [m]:

$$\max_{i=1}^n (O_i - P_i)$$

Der Wert ist sehr stark von einzelnen Ausreißern abhängig, die oft aus messfehlerbehafteten Daten oder für den Kalibrationszeitraum wenig aussagekräftigen Einzelereignissen resultieren. Zur Beurteilung der Kalibrationsgüte ist RES_MAX nur schlecht geeignet.

RMSQ: mittlere Residuenquadratsumme [m²]:

$$\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}$$

Um dem möglichen systematischen Fehler in RES_MEAN zu begegnen, werden die Residuen quadriert. Dadurch werden aber Extremwerte der Differenzen – wie sie bei extremen Grundwasserständen häufig auftreten (da das Modell nicht in erster Linie für Extrembeobachtungen kalibriert wird) - stark überbewertet. Dieser Effekt ist daran zu erkennen, dass RES_MEAN² deutlich kleiner ist als RMSQ.

SQR(RMSQ): Wurzel(RMSQ) [m]:

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$$

Durch die Verwendung dieses Parameters kann die Modellbewertung anhand üblicherweise verwendeter Messgrößen durchgeführt werden, die Überbewertung der Extremwerte der Differenzen bleibt aber erhalten. Zur Bewertung der Kalibrationsgüte ist dieser Parameter sehr gut geeignet und sollte möglichst nahe

0 liegen, die zulässige Schranke sollte allerdings deutlich höher als die gewünschte mittlere Abweichung gesetzt werden.

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \cdot 100$$

RMSE: mittlerer Fehler [% von \bar{O}]:

Der „root mean square error“ sollte möglichst nahe bei 0 liegen. Durch die Angabe der Abweichung der Berechnungsergebnisse von den beobachteten Daten in % des Mittelwertes der Beobachtungen ist dieser Parameter stark von der mittleren Höhe des Grundwasserspiegels abhängig. Bei regionalen Modellen mit großen Differenzen in der mittleren Grundwasserspiegellage im Untersuchungsgebiet sind die Ergebnisse an den einzelnen Messstellen nicht direkt miteinander vergleichbar. Bei Verwendung der Bezugshöhe Meeresspiegel werden die prozentualen Abweichungen der Modellrechnung von den Messdaten in den meisten Fällen sehr klein.

$$\frac{\left(\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i \right)}{\sum_{i=1}^n O_i}$$

CRM: Koeffizient der mittleren Residuenmasse [-]:

Der „coefficient of residual mass“ sollte möglichst nahe bei 0 liegen, kann aber auch negative Werte erlangen. Der Koeffizient beschreibt unter der Annahme unabhängiger Residuen (also eines Fehlens eines systematischen Fehlers in der Kalibration) jenen Anteil an Daten einer Messstelle, der durch das numerische Modell nicht wiedergegeben wird. Der Parameter ist zur Bewertung der Kalibrationsqualität von Modellen als Vergleich von unterschiedlichen Messstellen untereinander sehr gut geeignet und liefert v.a. Informationen darüber, in welchen Bereichen noch Kalibrationsarbeiten erforderlich sind.

$$\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{O})^2}$$

CD: Koeffizient der Modelldetermination [-]:

Der „coefficient of determination“ ist eine Maßzahl für den Anteil der Gesamtvarianz der beobachteten Daten, der durch die Modellrechnung beschrieben wird. Das Ergebnis dieser Berechnung sollte möglichst nahe bei 1 liegen.

Dieser Parameter ist sehr gut geeignet, die Qualität der Modellrechnung im Vergleich der einzelnen ausgewerteten Beobachtungsstellen zu beschreiben.

$$\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

EF: Modelleffizienz [-]:

Die „modelling efficiency“ sollte an jeder ausgewerteten Messstelle möglichst nahe bei 1 liegen. Der Wert kann auch negativ werden, wobei in diesem Fall die durch das Modell vorhergesagten Werte keine sehr hohe Aussagekraft haben.

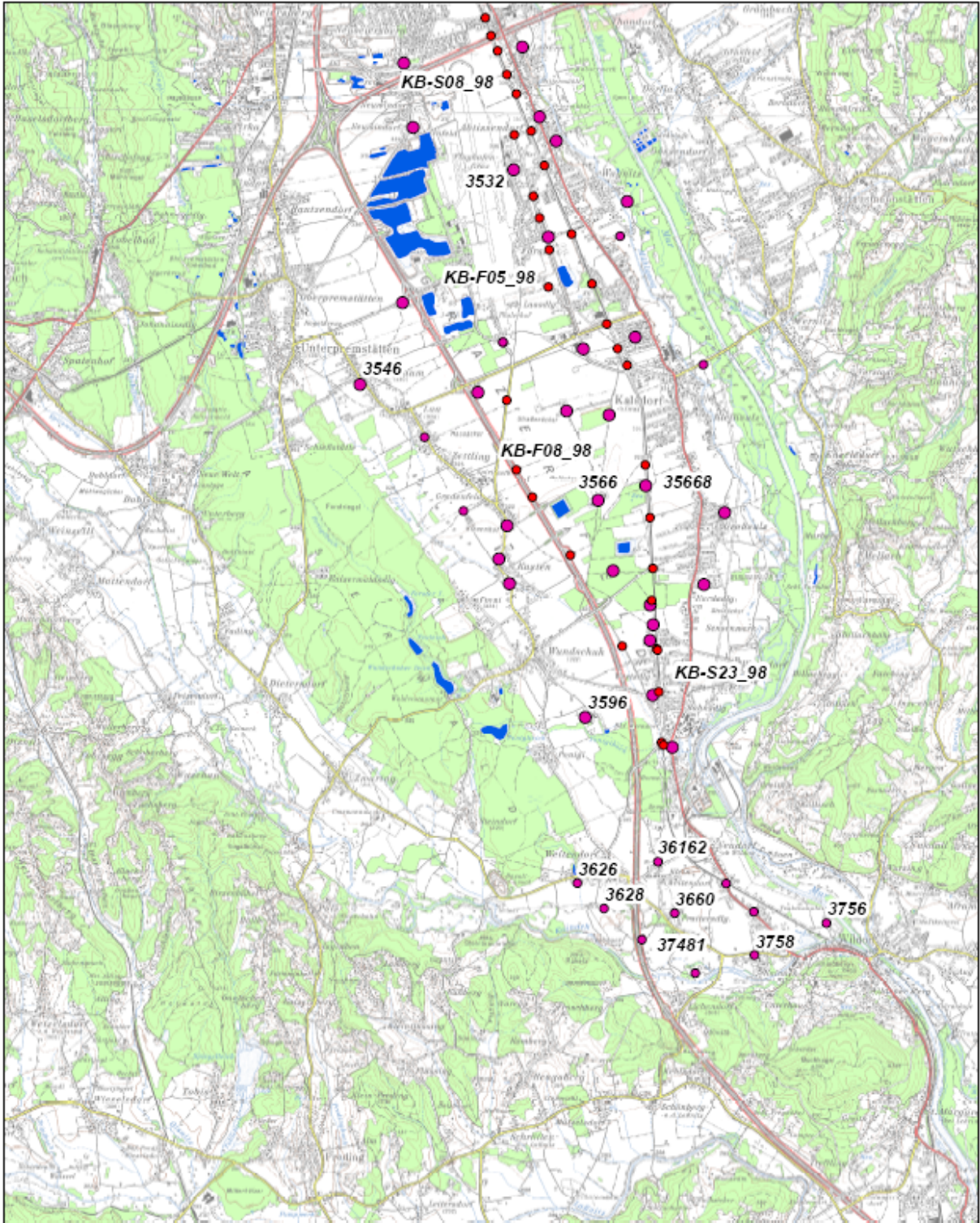
Tabelle 1: Instationäre Modellkalibration: Kennwerte der Modellkalibration beispielhaft dargestellt an der Grundwasserstandsmessstelle BR3596 des Hydrografischen Dienstes

uw3596_Gesar	MESSUNG	BERECHNUNG
MINIMUM	309.81	309.78
MITTELWERT	310.93	310.89
MAXIMUM	312.76	312.42
FEHLERSTATISTIK		
RES_MIN	größte negative Abweichung [m]	-0.338550
RES_MEAN	mittlere Abweichung [m]	0.042856
RES_MAX	größte positive Abweichung [m]	0.753510
RMSQ	mittlere Residuenquadratsumme [m ²]	0.008782
SQR(RMSQ)	Wurzel(RMSQ) [m]	0.093714
RMSE	Mittlerer Fehler [%]	0.030140
CRM	Koeffizient der mittleren Residuenmasse [-]	0.000138
CD	Koeffizient der Modelldetermination [-]	1.070064
EF	Modelleffizienz [-]	0.964437

Generell ist aber festzuhalten, dass die Qualität der Modellkalibration gerade, bei über einen längeren Zeitraum instationär geeichteten Modell, an jeder beobachteten Messstelle in erster Linie durch den visuellen Vergleich der gemessenen Grundwasserstandsdaten mit der berechneten Ganglinie zu prüfen ist. Die Berechnung der oben angeführten statistischen Parameter liefert aber die Möglichkeit, diesen n-dimensionalen Raum der regional verteilten Zeitreihen auf eine einzelne Kenngröße je Beobachtungsstelle zu reduzieren und damit Aussagen über die regionale Verteilung der Kalibrationsqualität zu erhalten.

3.3.2.1 Dokumentation der Kalibrationsergebnisse

Grundsätzlich existiert an allen für die Kalibration verwendeten Messstellen eine vollständige Auswertung der Modellkalibration. Aus der Vielzahl dieser Daten wurden für die Dokumentation der Qualität der Modellkalibration ein Subset von Grundwasserstandsmessstellen ausgewählt, das in der Folge die Güte der instationären Modellierung des Grundwassers des südwestlichen Grazer Feldes dokumentieren soll. Die Lage dieser ausgewählten Grundwasserstandsmessstellen ist in Abbildung 5 dargestellt.



HD_STMK **HL_AG**
● LANGZEIT-KALIBRATION ● MODELL-VERIFIKATION
● MODELL-VERIFIKATION

0.5 0 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 Km



Abbildung 5: Auswahl von Grundwasserstandsmessstellen im südwestlichen Grazer Feld, an denen die Kalibrationsqualität des instationär kalibrierten Grundwasserströmungsmodells dokumentiert werden soll.

- Messstellen des Hydrografischen Dienstes (HD_STMK)
 - Messstellen, die zur Langzeit Kalibration des Modells verwendet wurden (LANGZEIT-KALIBRATION). An diesen Messstellen sind Grundwasserstandsmessdaten nahezu über den gesamten Modellierungszeitraum (1.1.1993 bis 31.12.2003) verfügbar
 - Messstellen, die zur Modell-Verifikation verwendet wurden (MODELL-VERIFIKATION). An diesen Messstellen sind nur in Teilzeitbereichen Messdaten vorliegend
- Messstellen der HL-AG im Untersuchungsgebiet (HL_AG). Diese Messstellen wurden in den Jahren nach 1997 errichtet und es existieren daher nur für eingeschränkte Zeiträume Messdaten. Messstellen, die seit 1998 in Beobachtung sind, wurden für die Verifikation der instationären Modellkalibration herangezogen (MODELL-VERIFIKATION)

3.3.2.2 Kalibration des Modells am zeitlichen Verlauf des Grundwasserstandes

In den folgenden Darstellungen wird die Kalibrationsqualität an ausgewählten Messstellen im südlichen Grazer Feld durch den Vergleich der gemessenen Grundwasserspiegellagen zu den Berechnungsergebnissen über der Zeitachse dargestellt. Die Lage der Messstellen ist Abbildung 5 zu entnehmen. Die Dokumentation wird für jene Messstellen durchgeführt, die in der Karte mit der Messstellenbezeichnung versehen sind.

Die hohe Qualität der instationären Kalibration des Grundwasserströmungsmodells über den gesamten Modellierungszeitraum von 1993 bis 2003 ist anhand der Grafiken in Abbildung 6 bis Abbildung 9 dargestellt.

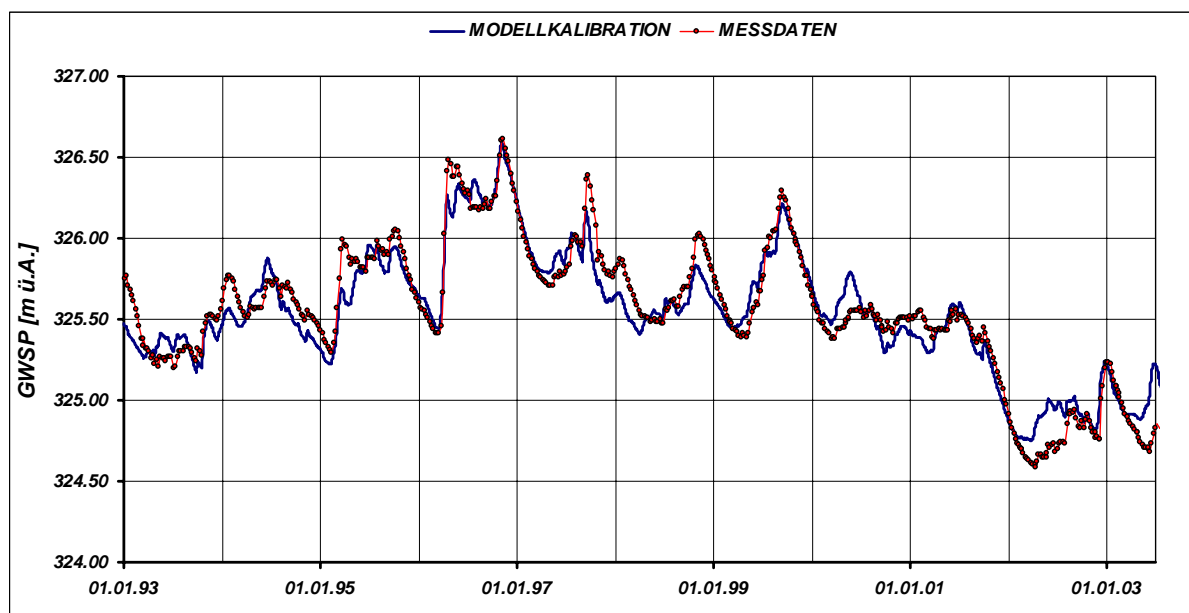


Abbildung 6: Kalibration des instationären Grundwasserströmungsmodells: Vergleich der gemessenen Grundwasserspiegelganglinie (Punkte) mit den Berechnungsergebnissen (blaue Linie) für die Messstelle UW3532

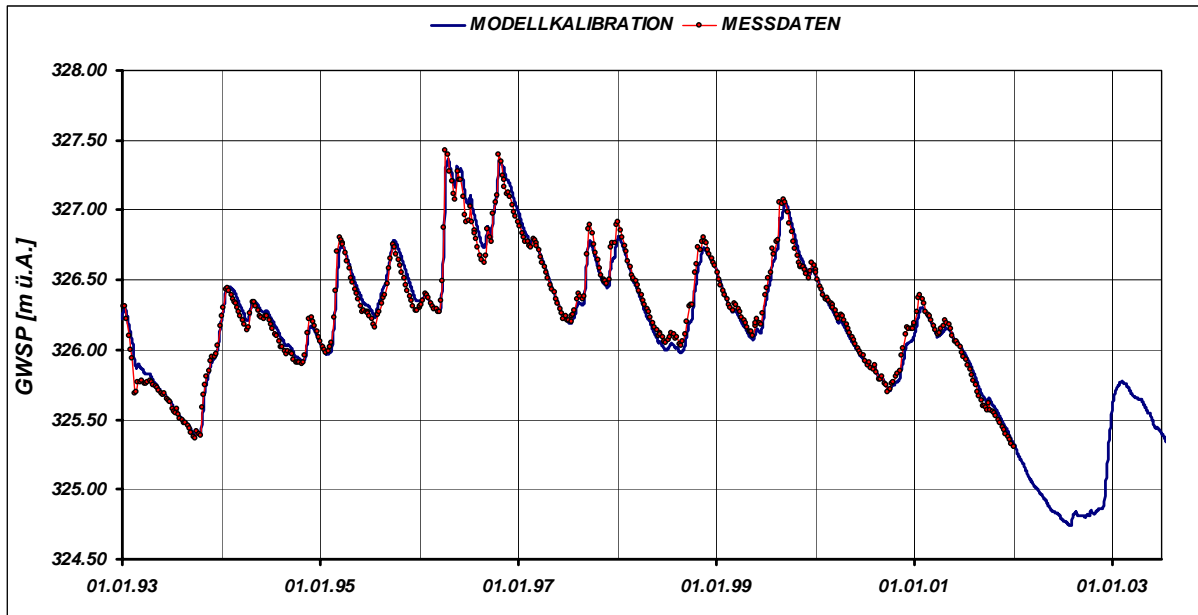


Abbildung 7: Kalibration des instationären Grundwasserströmungsmodells: Vergleich der gemessenen Grundwasserspiegelganglinie (Punkte) mit den Berechnungsergebnissen (blaue Linie) für die Messstelle UW3546

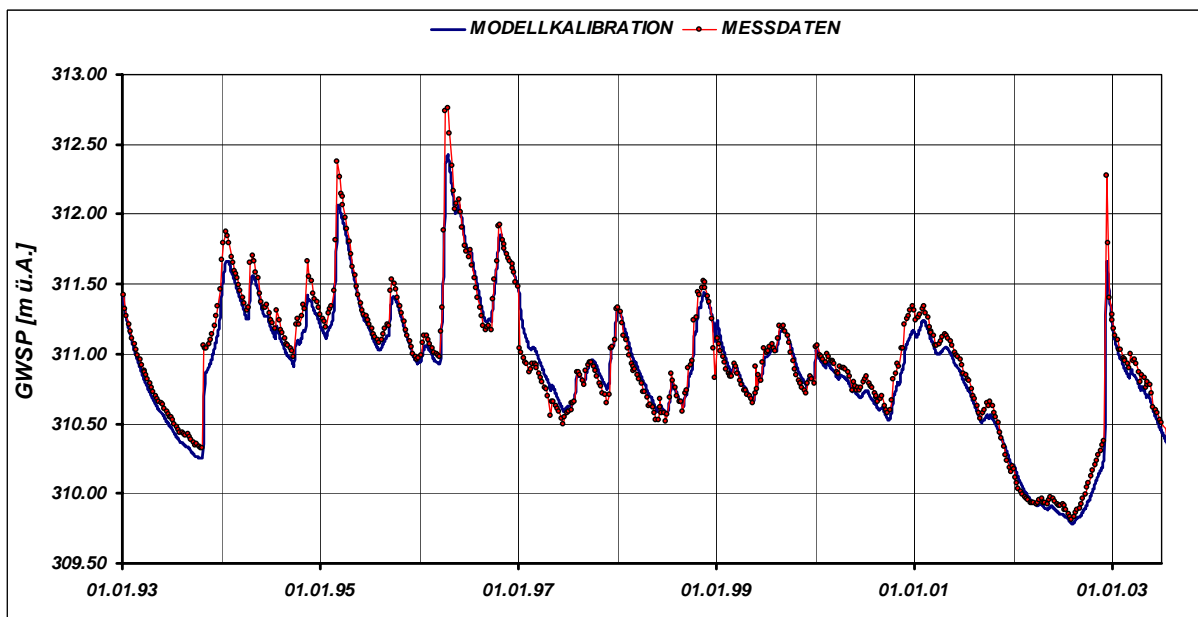


Abbildung 8: Kalibration des instationären Grundwasserströmungsmodells: Vergleich der gemessenen Grundwasserspiegelganglinie (Punkte) mit den Berechnungsergebnissen (blaue Linie) für die Messstelle UW3596

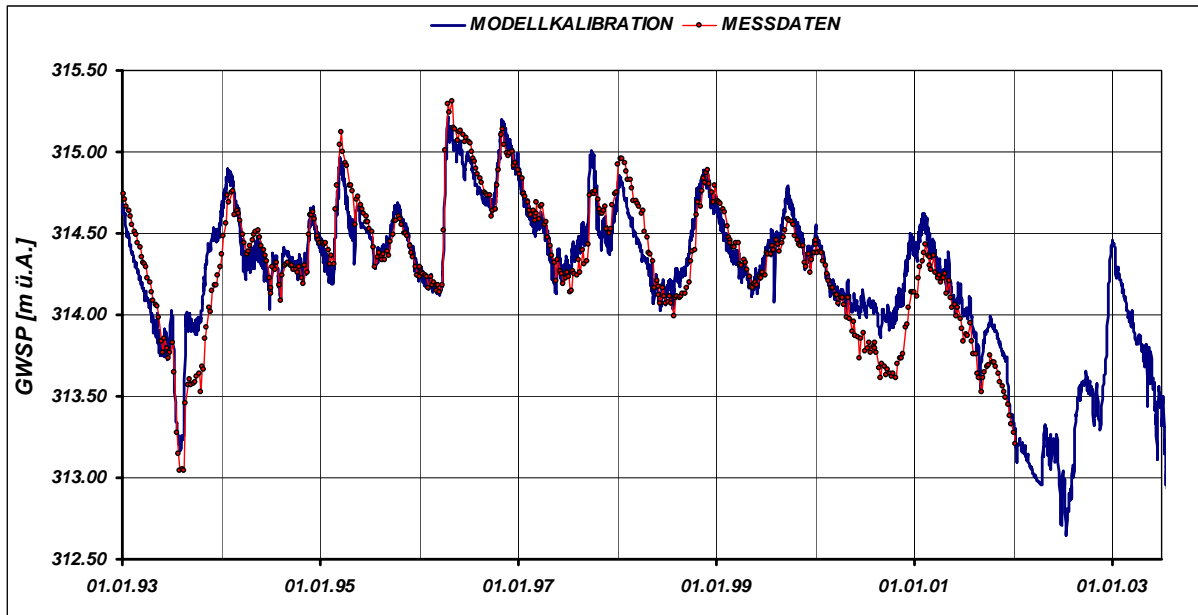


Abbildung 9: Kalibration des instationären Grundwasserströmungsmodells: Vergleich der gemessenen Grundwasserspiegelganglinie (Punkte) mit den Berechnungsergebnissen (blaue Linie) für die Messstelle UW35668

Diese Messstellen des hydrografischen Dienstes liegen zwischen Kalsdorf im Norden des Bearbeitungsgebietes (3532) und Werndorf im südlichen Bereich (3596) sowie im Westteil (3546) als auch im Osten (35668). Letztere Messstelle ist nahe den Förderbrunnen des Wasserwerkes Kalsdorf des Wasserverbandes Umland Graz gelegen, was sowohl in der gemessenen Ganglinie (Wochenwerte), aber noch deutlicher in der berechneten Ganglinie (Tageswerte) durch kurzfristige Schwankungen der Spiegellage aufgrund der zeit-variablen Entnahme erkennbar ist.

Grundsätzlich belegen diese Darstellungen mit mittleren Abweichungen von < 5 cm zwischen gemessenen und berechneten Grundwasserspiegellagen die Güte des Modells für den gesamten Untersuchungsraum.

Die Gültigkeit des Modells wurde an Messstellen mit kurzer Beobachtungsdauer, die nicht zur Eichung des Gesamtzeitraumes herangezogen werden konnten, überprüft. Einerseits standen für dies Verifizierung nicht durchgehende beobachtete Messstellen des Hydrografischen Dienstes und andererseits die Messdaten der Beweissicherung der HL-AG an Messstellen die seit 1998 in Beobachtung stehen, zur Verfügung. Die Messung-Rechnungsvergleiche sind in Abbildung 10 bis Abbildung 21 dargestellt.

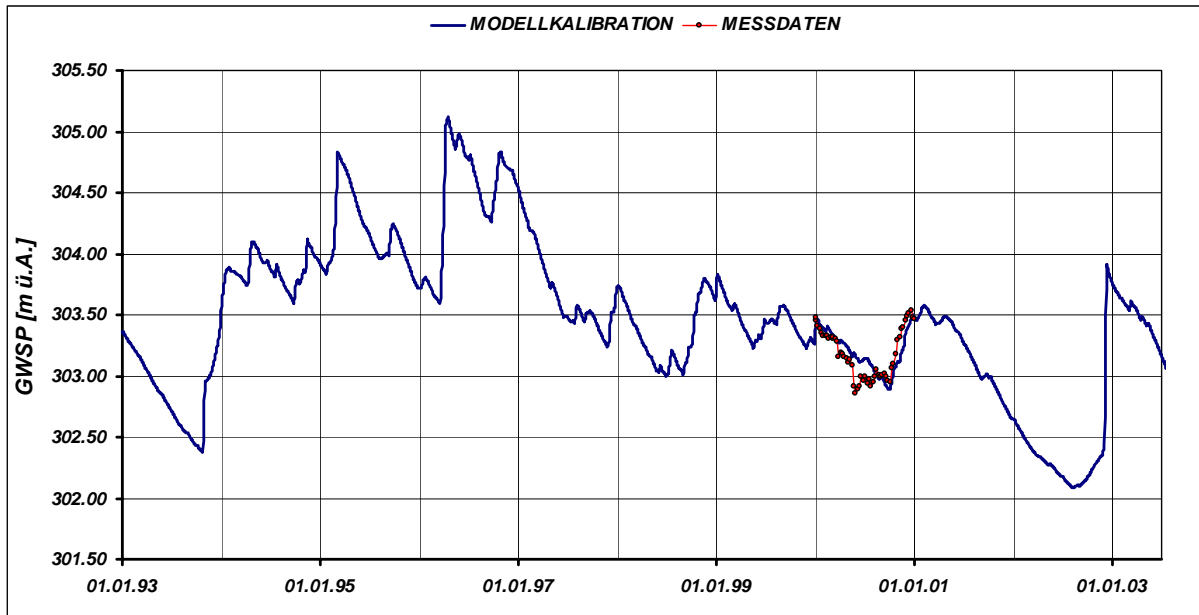


Abbildung 10: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle UW3636

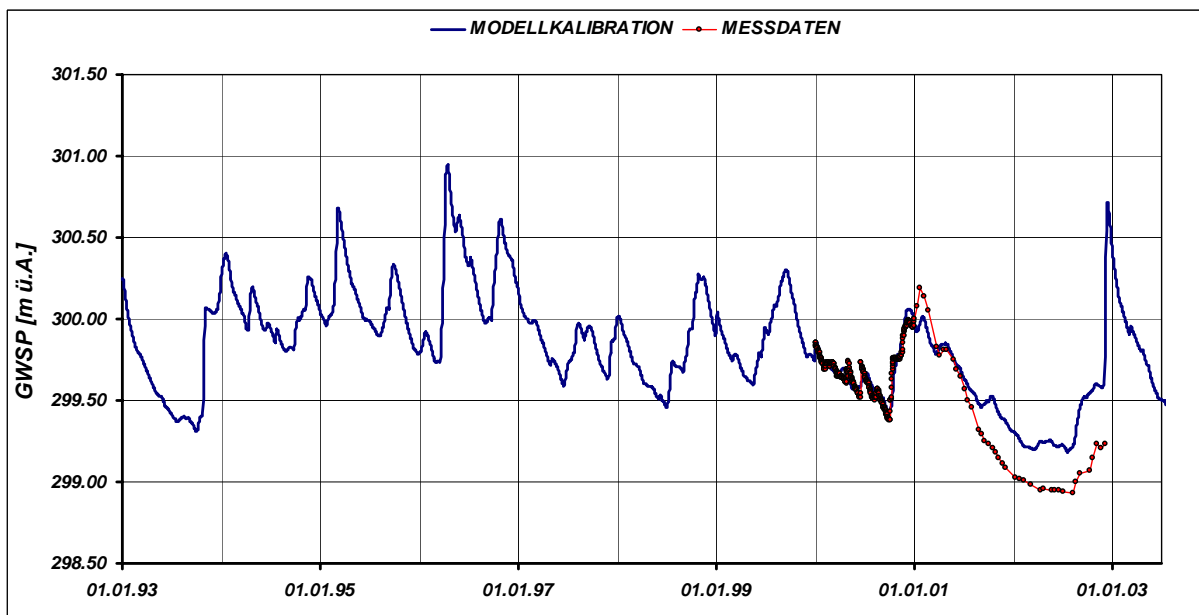


Abbildung 11: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle UW3628

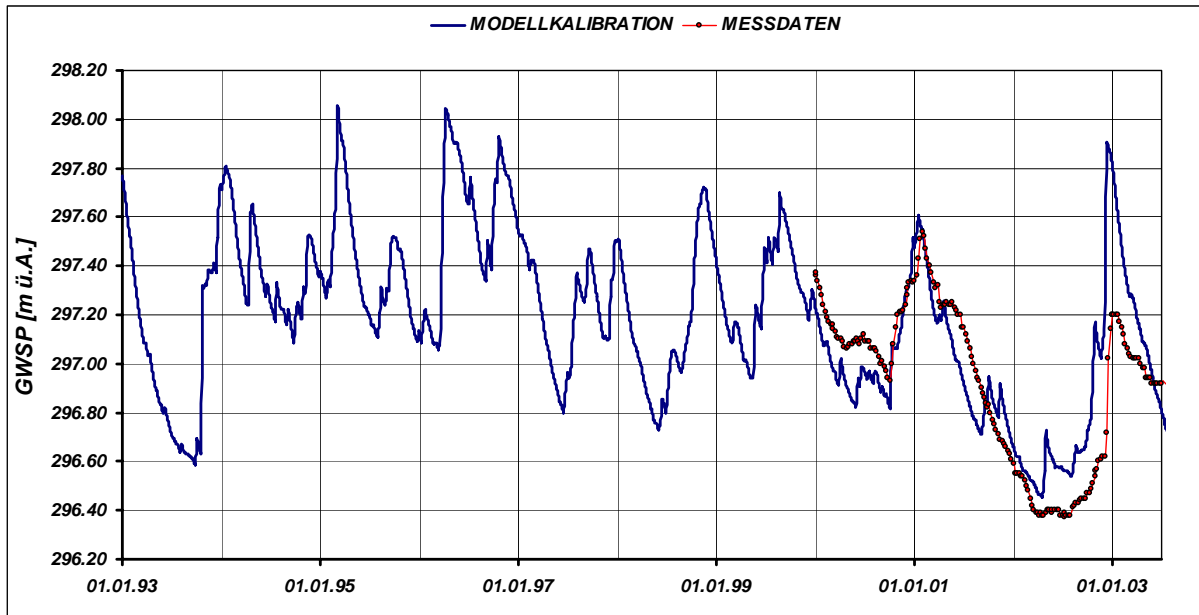


Abbildung 12: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle UW3660

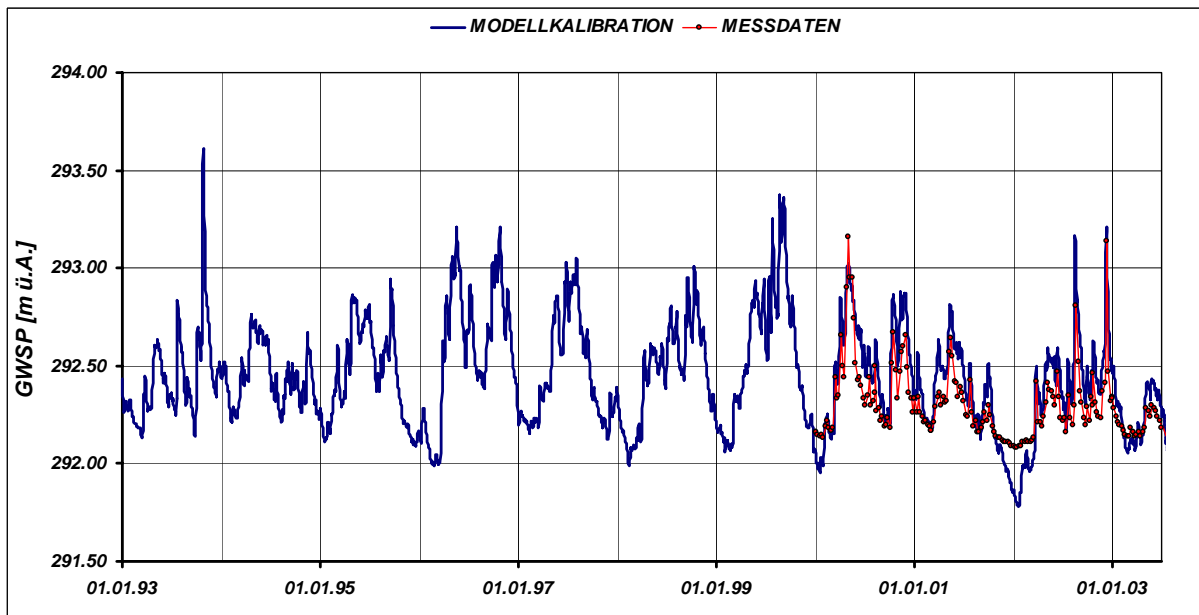


Abbildung 13: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle UW3756

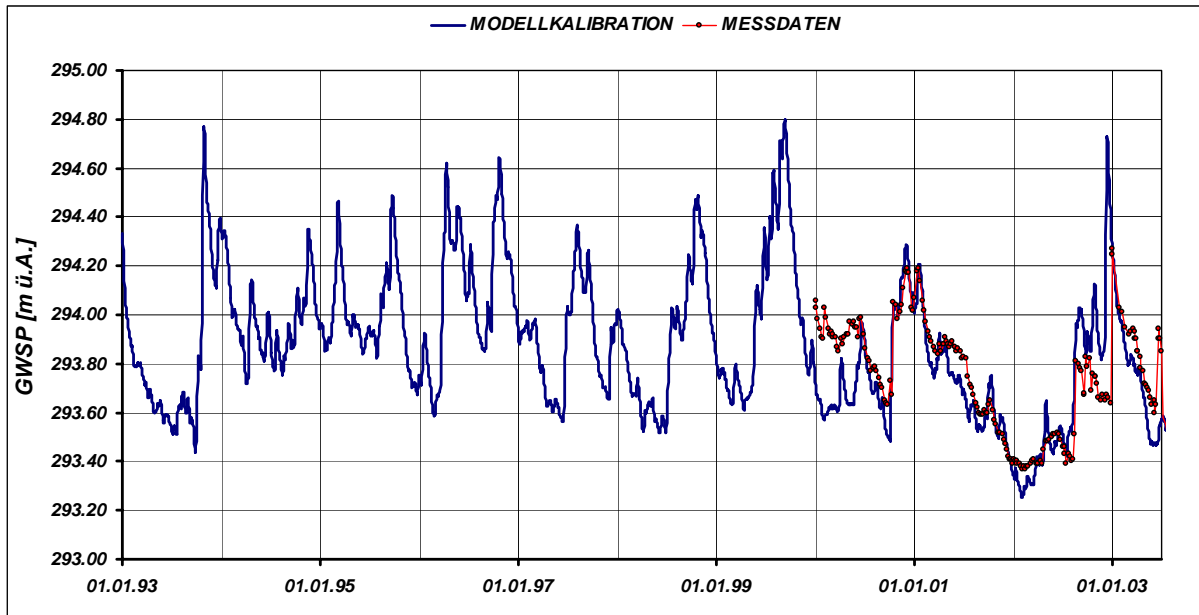


Abbildung 14: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle UW3758

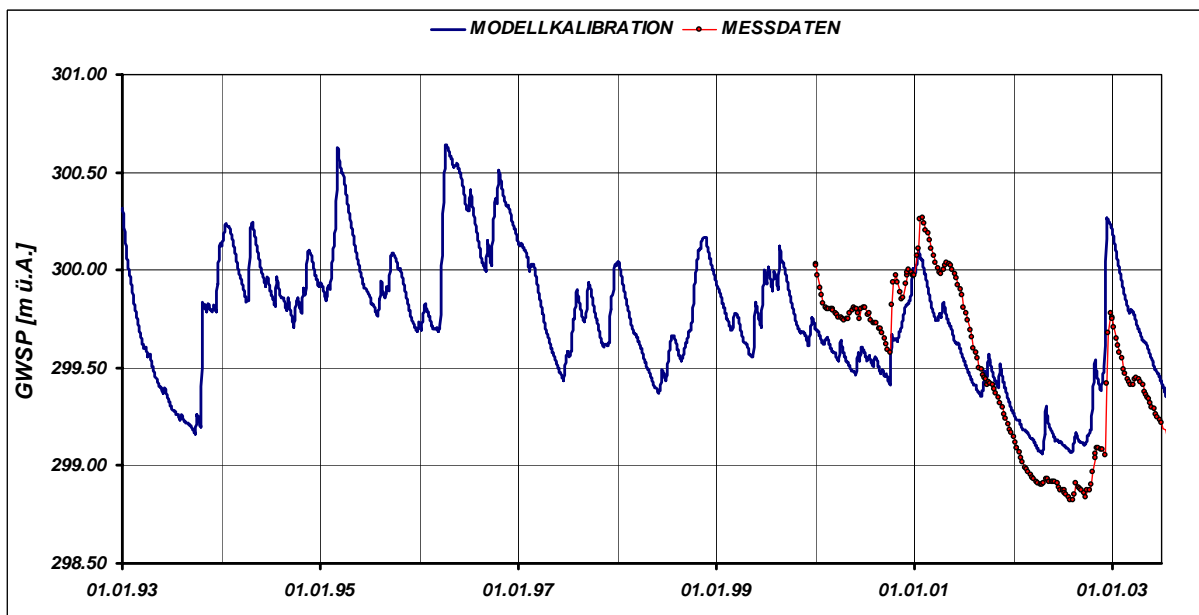


Abbildung 15: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle UW36162

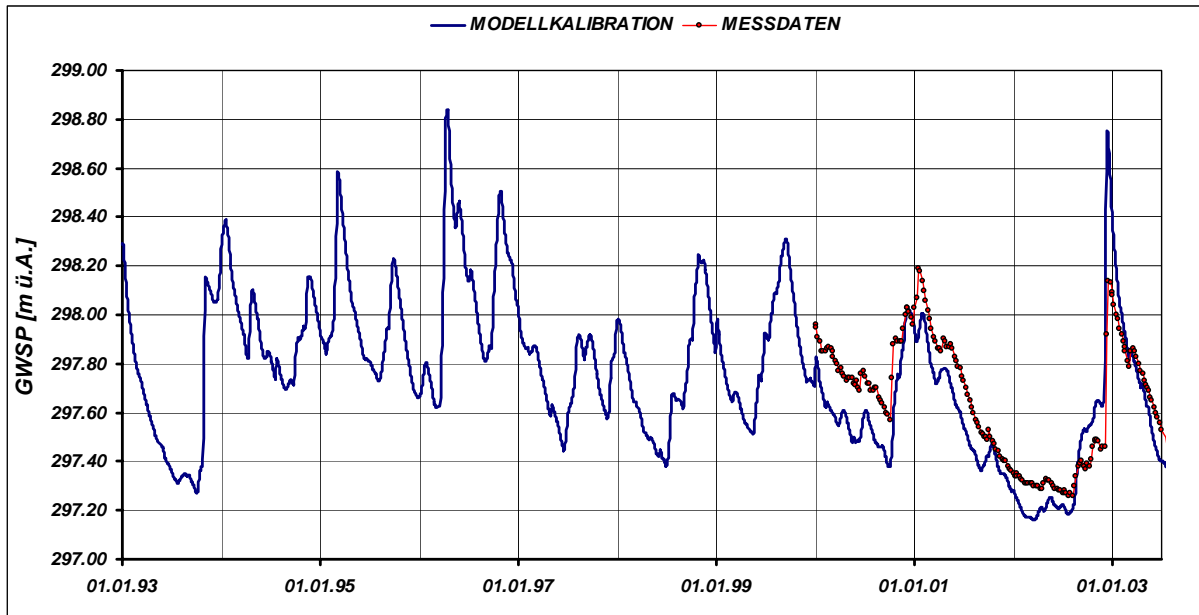


Abbildung 16: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle UW37481

Diese bisherigen Vergleichsganglinien in Relation zur Lage dieser Messstellen (Abbildung 5) belegt die überaus hohe Qualität der Modellkalibration auch im Südteil des südwestlichen Grazer Feldes im Nahbereich der Einmündung der Kainach in die Mur sowie im kritischen Bereich der Unterflurquerung der Autobahn durch die Koralmtrasse. Die mittleren Abweichungen zwischen Messung und Rechnung im jeweiligen Messzeitraum liegen zwischen -0.06 und $+0.06$ m.

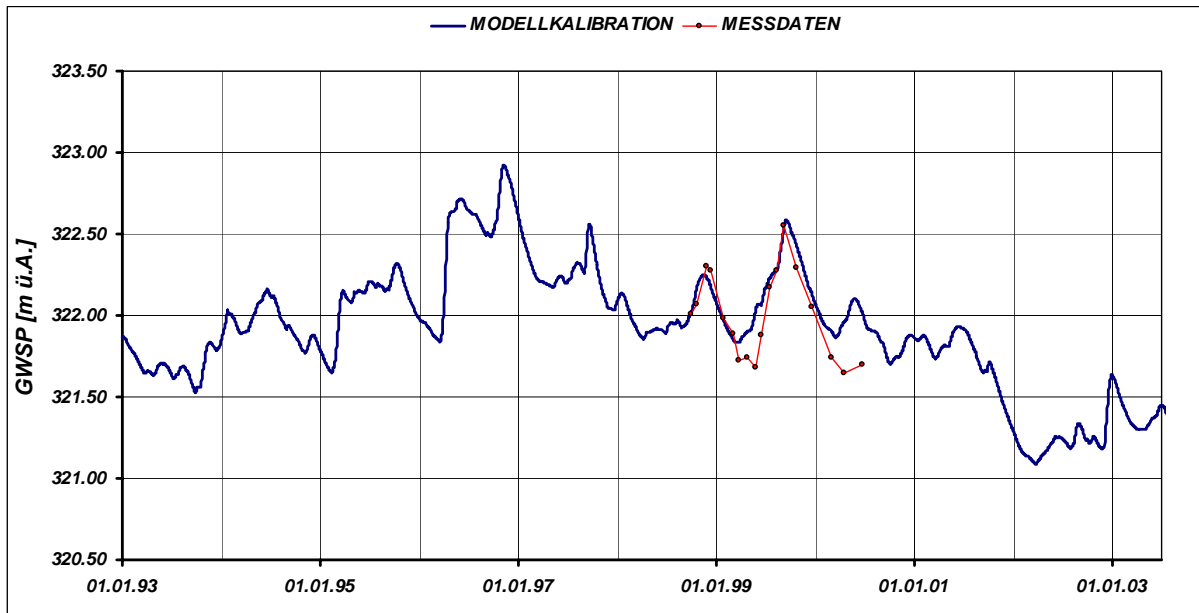


Abbildung 17: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle KB-F05_98

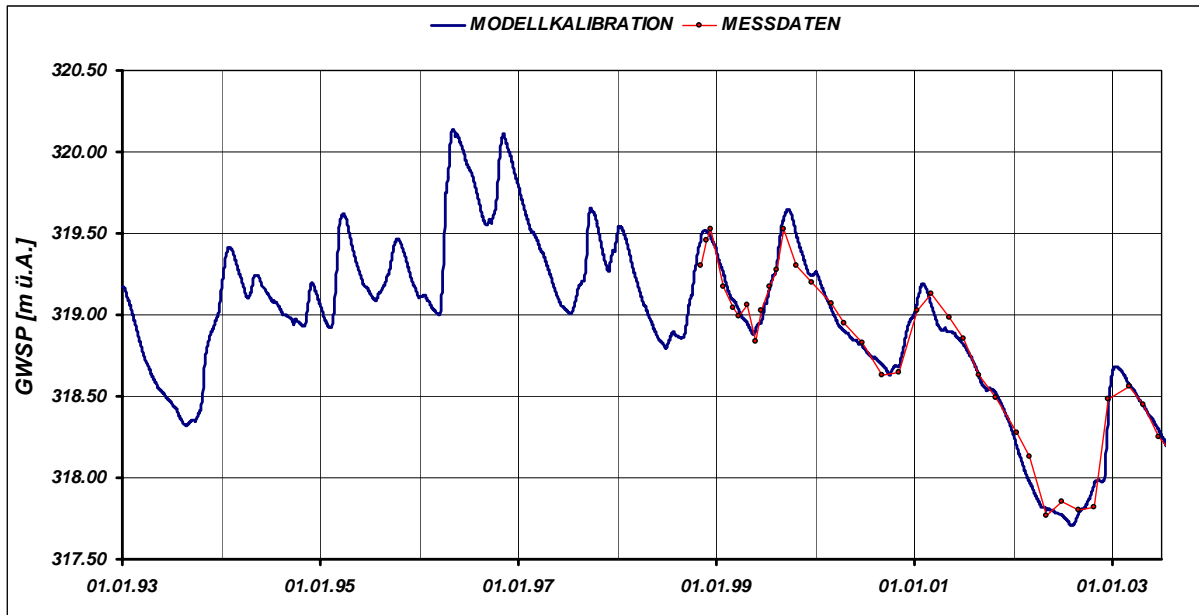


Abbildung 18: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle KB-F08_98

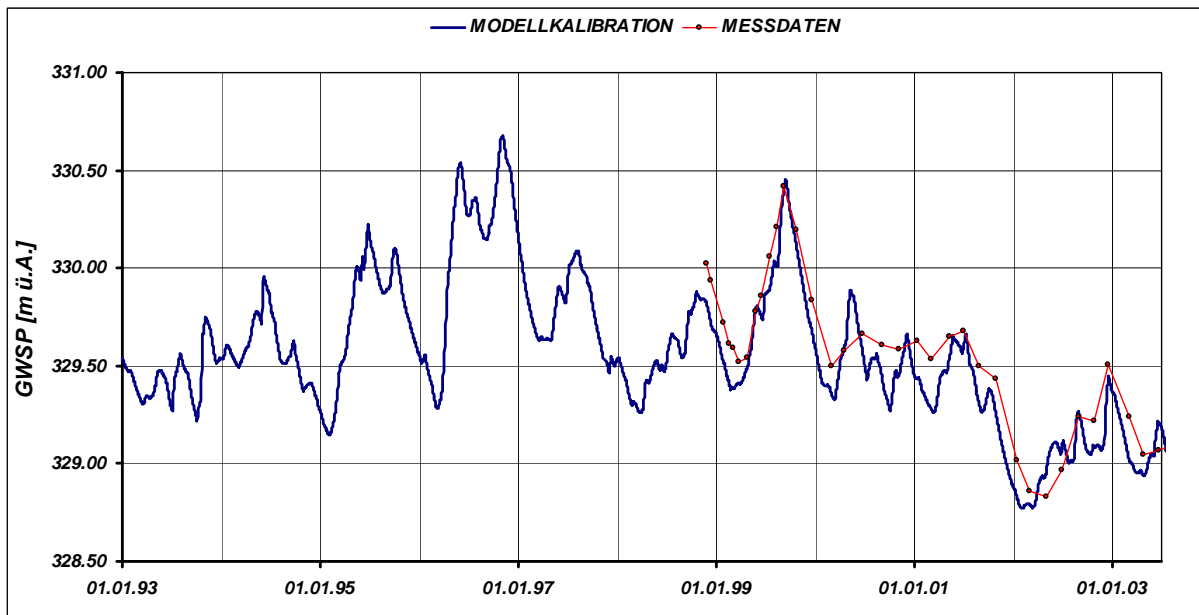


Abbildung 19: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle KB-S04_98

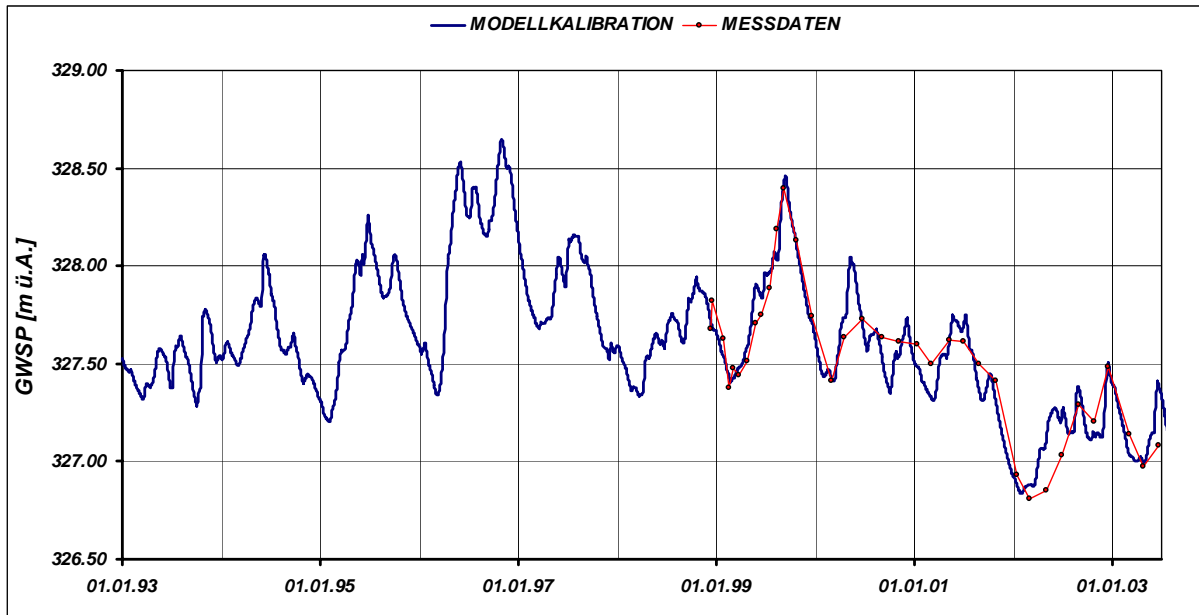


Abbildung 20: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle KB-S08_98

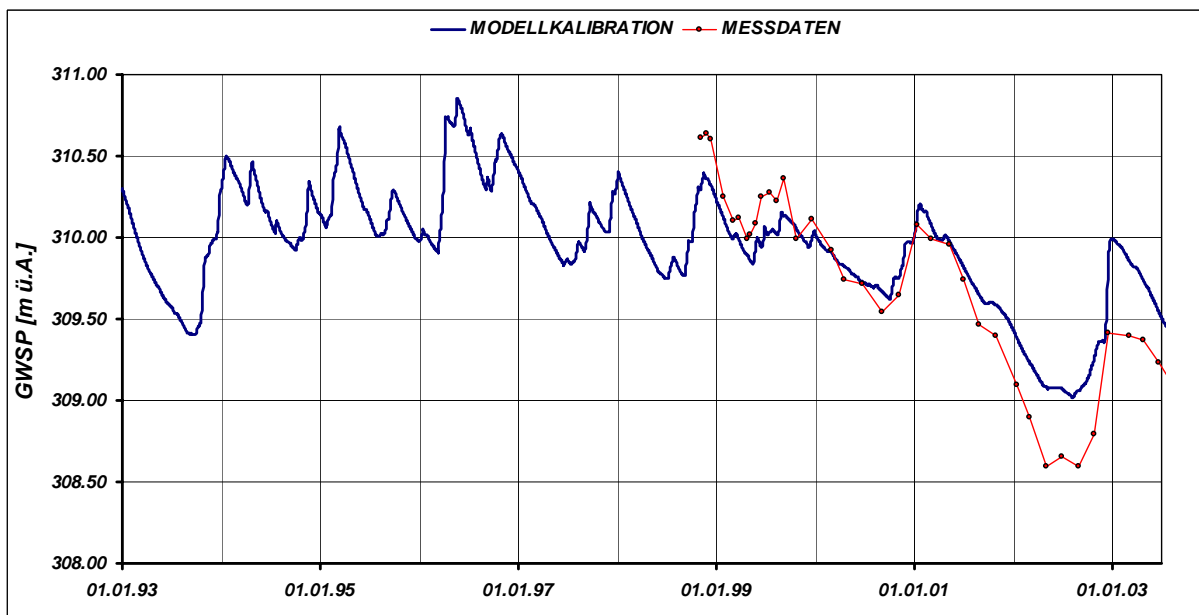


Abbildung 21: Verifizierung des instationären Grundwassermodells des südwestlichen Grazer Feldes durch Gegenüberstellung der Messwerte und der Rechenergebnisse an der Messstelle KB-S23_98

Das letzte Set an Abbildung zeigt Vergleiche für ausgewählte Messstellen der HL-AG im Nahbereich der Koralmtrasse. Sinnvollerweise wurden für diese Darstellung nur solche Messstellen ausgewählt, an denen zumindest mehrjährige Messungen vorliegen, zumal das Messintervall an diesen Messstellen deutlich weiter ist als bei den Beobachtungsstellen des Hydrografischen Dienstes.

3.3.2.3 Bewertung der Kalibrationsqualität

Tabelle 2 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse statistischen Auswertung der instationären Kalibration für alle jene Messstellen, für die annähernd im gesamten Berechnungszeitraum Messdaten vorlagen.

Tabelle 2: Ergebnisse der Berechnung der statistischen Auswertung der instationären Kalibration des Grundwasserströmungsmodells südwestliches Grazer Feld für jene Messstellen, für die annähernd im gesamten Berechnungszeitraum Messdaten verfügbar waren.

MESS-STELLE	MESSUNG	KALI-BRATION	RESIDUEN	RMSQ	SQR(RMSQ)	RMSE	CRM	CD	EF
Minimum	303.73	303.41	-0.31	0.0031	0.0559	0.0171	-0.0010	0.2855	-0.7163
Mittelwert	318.71	318.68	0.03	0.0690	0.2491	0.0783	0.0001	1.1183	0.6040
Maximum	332.97	332.68	0.31	0.1588	0.3986	0.1312	0.0010	2.1551	0.9826
uw3492	330.73	330.57	0.16	0.0469	0.2166	0.0655	0.0005	1.3034	0.8689
uw3496	332.97	332.68	0.28	0.0910	0.3017	0.0906	0.0009	0.9919	0.7475
uw3500	327.89	327.65	0.24	0.0734	0.2709	0.0826	0.0007	0.7207	0.4340
uw3530	325.00	324.70	0.30	0.1127	0.3357	0.1033	0.0009	0.5202	-0.1010
uw3532	325.50	325.50	0.00	0.0177	0.1332	0.0409	0.0000	1.2999	0.9104
uw3546	326.28	326.29	0.00	0.0031	0.0559	0.0171	0.0000	0.9826	0.9826
uw3552	318.38	318.64	-0.26	0.1040	0.3226	0.1013	-0.0008	1.1805	0.6800
uw3564	318.11	318.22	-0.11	0.0370	0.1924	0.0605	-0.0003	0.5727	0.7864
uw3566	315.24	315.55	-0.30	0.1418	0.3765	0.1194	-0.0010	1.2327	0.6661
uw3572	316.74	317.00	-0.25	0.1281	0.3579	0.1130	-0.0008	0.4051	0.0833
uw3576	317.76	317.86	-0.11	0.0618	0.2486	0.0782	-0.0003	0.4660	0.5455
uw3578	310.58	310.40	0.18	0.0818	0.2860	0.0921	0.0006	1.8038	0.7548
uw3596	310.93	310.89	0.04	0.0088	0.0937	0.0301	0.0001	1.0701	0.9644
uw35201	326.00	325.75	0.25	0.0852	0.2919	0.0895	0.0008	0.7844	0.4309
uw35221	329.16	328.90	0.26	0.0941	0.3068	0.0932	0.0008	1.0020	0.6894
uw35325	322.81	322.66	0.15	0.0412	0.2029	0.0629	0.0005	0.5365	0.5304
uw35421	318.15	318.13	0.02	0.0265	0.1627	0.0511	0.0001	1.3571	0.7475
uw35445	322.58	322.39	0.19	0.0453	0.2129	0.0660	0.0006	0.7300	0.7959
uw35465	326.01	326.32	-0.31	0.1073	0.3276	0.1005	-0.0009	0.7679	0.6308
uw35485	321.13	320.94	0.19	0.0587	0.2423	0.0754	0.0006	0.2855	-0.7163
uw35525	319.48	319.48	0.00	0.0262	0.1620	0.0507	0.0000	1.6615	0.8887
uw35662	311.47	311.40	0.07	0.0505	0.2247	0.0722	0.0002	1.8551	0.8238
uw35667	316.98	317.22	-0.24	0.0936	0.3060	0.0965	-0.0008	1.2978	0.6709
uw35668	314.32	314.36	-0.04	0.0240	0.1551	0.0493	-0.0001	1.4768	0.8539
uw35701	310.71	310.83	-0.12	0.0266	0.1632	0.0525	-0.0004	1.2570	0.5544
uw35741	313.32	313.53	-0.21	0.0653	0.2556	0.0816	-0.0007	1.1651	0.6801
uw35742	310.33	310.05	0.28	0.1102	0.3319	0.1070	0.0009	1.2354	0.4451
uw35785	310.69	310.68	0.02	0.0489	0.2212	0.0712	0.0000	2.1551	0.8518
uw35904	308.28	308.46	-0.18	0.1006	0.3172	0.1029	-0.0006	2.0945	0.7201
uw36021	303.73	303.41	0.31	0.1588	0.3986	0.1312	0.0010	1.3382	0.1997

Im Mittel dieser 30 über das Untersuchungsgebiet verteilten Messstellen beträgt die Differenz zwischen dem Mittelwert der Messdaten und demjenigen der berechneten Daten 0.03 m, wobei die Mittelwertschätzung einen Fehler zwischen -0.31 und 0.31 m aufweist. Auch die in Kap. 3.3.2 diskutierten statistischen Parameter zeigen im Mittel über das Untersuchungsgebiet die gewünschten Ergebnisse (RMSE 0.078 %, CRM -.0001, CD 1.118).

Die im Mittel außerordentlich gute Kalibrationsqualität ist auch aus der Gegenüberstellung der gemessenen mittleren Grundwasserspiegellage zu der berechneten an den einzelnen Messstellen in Abbildung 22 ersichtlich: Die resultierenden Punkte verteilen sich im Scatterplot auf der 1:1 – Geraden, die Abweichungen sind minimal, eine lineare Regressionsgerade weist eine Steigung von nahe 1 auf, wobei der Regressionskoeffizient R^2 bei 0.9993 liegt.

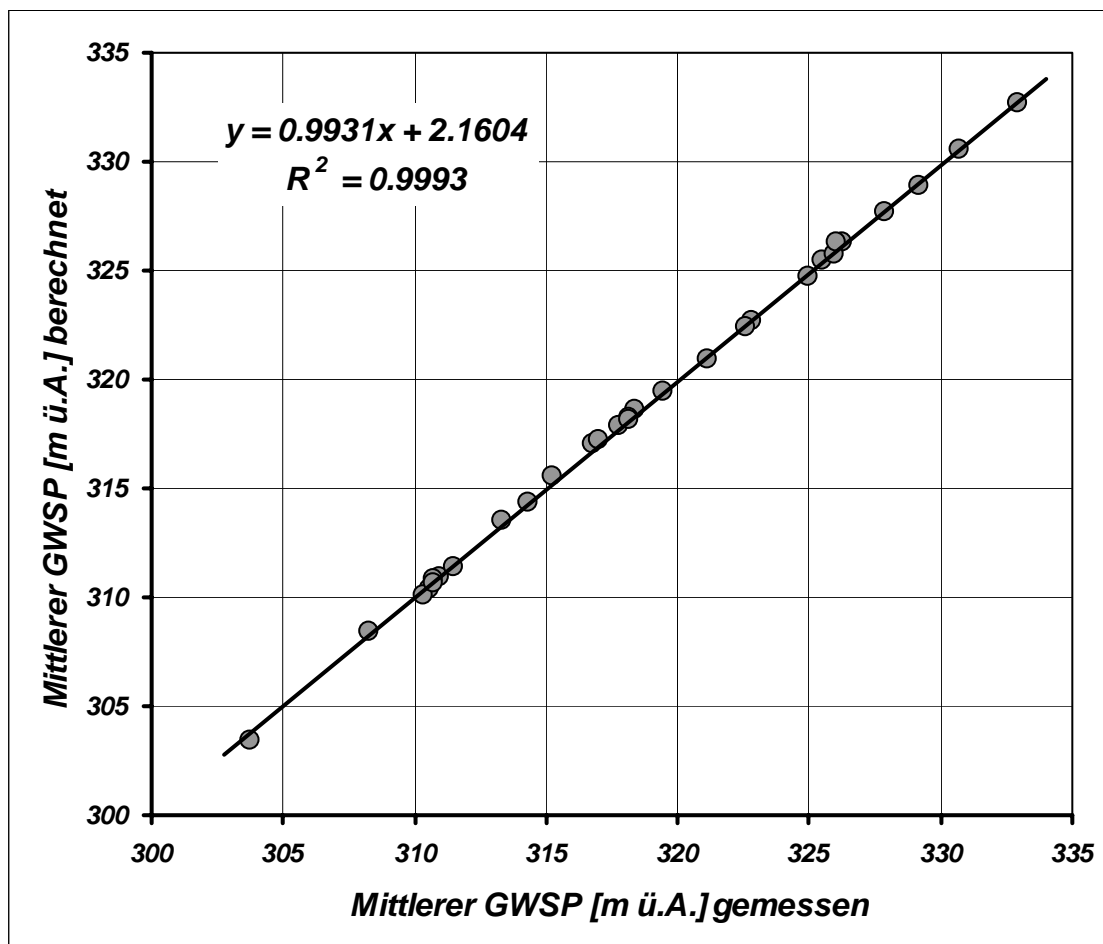


Abbildung 22: Vergleich gemessener mittlerer Grundwasserspiegellagen mit berechneten mittleren Grundwasserspiegellagen an den zur Kalibration herangezogenen Messstellen, für die annähernd im gesamten Berechnungszeitraum Messdaten verfügbar waren in Scatterplotdarstellung

Die Verteilung dieser Beziehung für all jene Messstellen, deren Beobachtungszeitraum innerhalb des Untersuchungszeitraumes nur kurz war ist in Abbildung 23 dargestellt. In dieser Darstellung wurde naturgemäß für die Berechnung der Beziehung zwischen gemessener und gerechneter mittlerer Grundwasserspiegellage bei jeder Messstellen nur der Zeitraum herangezogen, in denen zeitgleiche Werte verfügbar waren. Die Qualität der Schätzung ist eine ähnliche wie oben erwähnt: die Punkte liegen auf einer 1:1 – Geraden mit einer Steigung von 1 und einem Regressionskoeffizienten von 0.9997 bei insgesamt 51 Datensätzen.

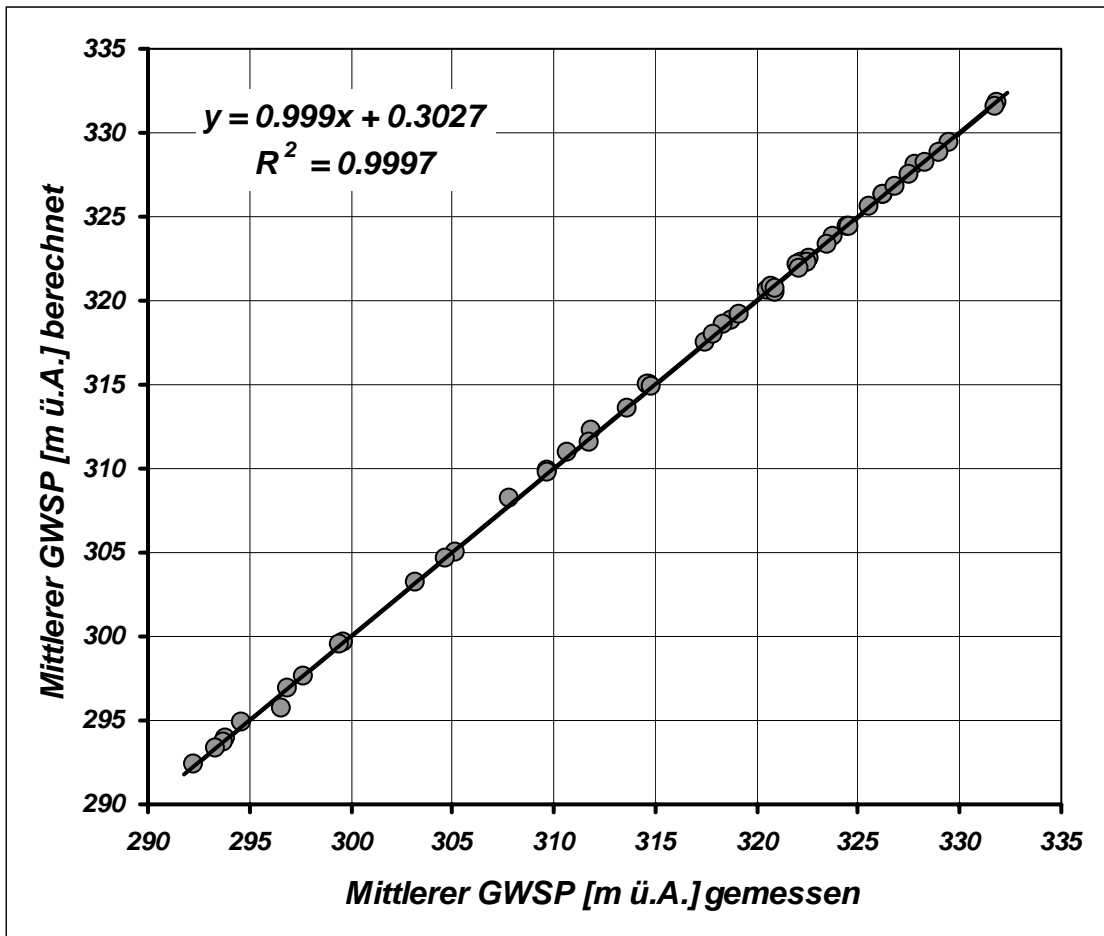


Abbildung 23: Vergleich gemessener mittlerer Grundwasserspiegellagen mit berechneten mittleren Grundwasserspiegellagen an allen zur Kalibration herangezogenen Messstellen in Scatterplotdarstellung

Für alle zur Kalibration und Verifikation verwendeten Messstellen gilt oben gesagtes: die Relation zwischen gemessenem und berechnetem mittlerem Grundwasserspiegel im Auswertzeitraum jeder Messstelle liegt bei annähernd 1, der Regressionskoeffizient beträgt 0.9996 bei insgesamt 82 ausgewerteten Messstellen, die über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt sind. Die Auswertungen des Vergleichs von Messung und Schätzung mittlerer Grundwasserspiegellagen belegt auch, dass für das gesamte Untersuchungsgebiet von Wildon im Süden bis Feldkirchen im Norden, von Unterpremstätten im Westen bis Kalsdorf im Osten eine praktisch gleich gute Kalibrationsqualität vorliegt.

Generell kann die Kalibrationsqualität des Grundwasserströmungsmodells unter Berücksichtigung der Messstellendichte und deren Verteilung sowie der Unsicherheiten bei der Definition der Randbedingungen als sehr gut bezeichnet werden. Gerade im spezifisch interessierenden Bereich des Verlaufes der Koralmtrasse im südlichen Grazer Feld und ihrer Umgebung ist die Aussagesicherheit als außerordentlich hoch zu werten.

3.3.2.4 Verteilung der Durchlässigkeiten und des entwässerbaren Porenvolumens

In Beilage 3 ist als Ergebnis der instationären Kalibration des Grundwasserströmungsmodells südwestliches Grazer Feld die Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte im Modellgebiet dargestellt. Basierend auf den Ergebnissen der Auswertung von Pumpversuchen, der Erarbeitung einer Startverteilung aus den Unterlagen früherer Untersuchungen und Modelle wurde durch „trial and error“ eine bestmögliche Kalibration der Durchlässigkeitsverteilung durch Anpassung der Berechnungsergebnisse an die gemessenen Ganglinien von 241 Messstellen gesucht. Die resultierende Verteilung zeigt in großen Bereichen mit Werten zwischen $k_f = 1 \cdot 10^{-3}$ und $k_f = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s für derartige Aquifere typische Größenordnungen. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Zonierung der Durchlässigkeitsverteilung. Im Nordteil des Untersuchungsgebietes (nördlich der Linie Wundschuh – Werndorf) liegen die Durchlässigkeiten im Bereich von $3 \cdot 10^{-3}$ bis $5 \cdot 10^{-3}$ m/s, südlich dieser Linie liegen die Durchlässigkeiten im Bereich von $1 \cdot 10^{-3}$ bis $3 \cdot 10^{-3}$ m/s, im Bereich Weitendorf (westlich der Autobahn) sind sie noch geringer und erreichen minimale Werte von bis zu $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

In Beilage 4 ist die Verteilung des für die Grundwasserspeicherung zur Verfügung stehenden entwässerbaren effektiven Porenvolumens dargestellt. Ausgehend von Kennwerten dieses Parameters aus der Literatur und auch von Untersuchungen in anderen Talaquiferen (Murtal, siehe auch FANK, 1999) wurde die flächenhafte Verteilung im Rahmen der Kalibration des instationären Verlaufes der Grundwasserstandsganglinien gewonnen. Die resultierenden Ergebnisse weisen speichernutzbare Porositäten zwischen 5 und 16 % aus. Berücksichtigt man, dass auch die hier gelagerten Kiese und Sande Residualwassergehalte von bis zu 10 % aufweisen kommt man zu – für derartige Aquifere in der Literatur als typisch beschriebenen - Größenordnungen der Porenvolumina zwischen 15 und 25 %. Im Bereich Weitendorf liegen die speichernutzbaren Porositäten bei nur 0.5 %. Die geringeren nutzbaren Porositäten sind grundsätzlich im westlichen Teil des Grundwasserfeldes (entlang des Beckenrandes zur Kaiserwaldterasse) und im Kainachtal zu finden.

3.3.2.5 Grundwasserströmungsverhältnisse bei Ist-Zustand

Zur Dokumentation der Grundwasserströmungsverhältnisse wurden in Beilage 5 die Grundwasserschichtenlinien bei niedrigen Grundwasserverhältnissen, in Beilage 6 bei mittleren Grundwasserverhältnissen und in Beilage 7 bei hohen Grundwasserverhältnissen dargestellt. Das Grundwasser im südwestlichen Grazer Feld strömt im Allgemeinen vom westlichen Talrand (Kaiserwaldterasse) in südöstliche Richtung und entwässert die Mur. Der Mühlgang hat bis etwa Kalsdorf eine geringe Auswirkung auf das Grundwasserströmungsverhalten, südlich davon hat er zusammen mit Augewässern eine erhebliche Vorflutwirkung und entwässert den Großteil des anströmenden Grundwassers. Die Stauerhochlage im Bereich Weitendorf mit den gering durchlässigen Materialien bewirkt eine starke lokale Ablenkung der Grundwasserströmung in Richtung Osten. Im Nahbereich der Kainach exfiltriert das Grundwasser in die Kainach, nördlich davon herrscht vorwiegend eine zur Kainach parallele Strömung in Richtung Mur vor. Die Strömungsrichtung verändert sich zwischen niedrigen, mittleren und hohen Grundwasserspiegeln nur sehr gering.

4 Simulationsrechnungen mit Hilfe des kalibrierten Grundwasserströmungsmodells

Steht – wie in der gegenständlichen Fragestellung – ein ausreichend gut kalibriertes und verifiziertes Grundwasserströmungsmodell zur Verfügung, das in seiner zeitlichen Dimension einen Großteil der auftretenden hydrologischen Situationen umfasst (Modellgültigkeit für Niederwasserverhältnisse, Hochwasserverhältnisse und für unterschiedliche jahreszeitliche Verläufe der Grundwasserstandsverhältnisse), kann die Auswirkung von Eingriffen in das Grundwassersystem vor deren tatsächlichen Realisierung nicht nur interpretativ-qualitativ diskutiert, sondern quantitativ prognostiziert werden. Ist die Kalibration des Modells über einen ausreichend langen Zeitraum erfolgt und hat der Modellierungszeitraum Gültigkeit für das langfristige Verhalten des Grundwasserkörpers in seiner Wechselwirkung mit den dominanten Systemkomponenten, kann die Auswirkung von Eingriffen dadurch quantifiziert werden, dass in das instationäre Modell die Eingriffnahme bei unveränderten Randbedingungen über den gesamten Modellzeitraum simuliert wird. Der Vergleich der Kalibrationsergebnisse mit den Simulationsergebnissen erlaubt in der Folge eine Bewertung der Auswirkungen der geplanten Maßnahmen.

Das gegenständliche Modell wurde über einen Zeitraum von 11 Jahren (1. 1. 1993 bis 31. 12. 2003) geeicht. Der gewählte Modellzeitraum umfasste unterschiedlichste hydrologische Zustände. Aus diesen Gründen ist es zulässig, unterschiedliche Maßnahmen, die auf das Grundwasser des südwestlichen Grazer Feldes wirken, über den gesamten Modellzeitraum zu berechnen und daraus Aussagen über die Auswirkung auf das Grundwasser hinsichtlich der Spiegellagenverteilung, der Strömungsverhältnisse und auch der Durchflüsse abzuleiten.

4.1 Auswertung des Pumpversuches der BGG

Im November 2003 wurde im Bereich des Portals der Unterflurtrasse Feldkirchen seitens der BGG ein Pump- und Versickerungsversuch mit einer maximalen Pump- und Versickerungsleistung von 50 l/s durchgeführt, um experimentell die Möglichkeiten der Wasserhaltung in diesem Bereich abzuklären und um Aquiferkennwerte aus dem durch die Wasserhaltung beanspruchten Bereich zu erhalten. Die Pumpversuchsplanung, -durchführung und -auswertung sind dem Gutachten der BGG zu entnehmen.

Die analytische Auswertung von Pumpversuchen geht in ihrem Formelwerk unter anderem von durch Entnahmen außer dem Förderbrunnen oder durch Zuflüsse zum Grundwasser (z.B. Versickerungen) unbeeinflussten Grundwasser-Strömungszuständen aus. Bei der Durchführung des Pump- und Versickerungsversuches war jedenfalls davon auszugehen, dass die in den Messstellen im Umgebungsbereich gemessenen Grundwasserspiegellagen jedenfalls durch die wechselseitige Beeinflussung überprägt waren. Um die Relevanz dieser Einflussnahme und deren Auswirkung auf die Auswertergebnisse des Pumpversuches quantifizieren zu können wurde der Pump- und Versickerungsversuch auch mittels des kalibrierten numerischen Modells nachgebildet.

Wie in Beilage 3 ersichtlich liegen die Durchlässigkeitsbeiwerte im Bereich des Pumpversuches zwischen 3 und $5 \cdot 10^{-3}$ m/s. Die Pumpversuchsentnahmedaten und die Rückversickerungsdaten wurden in das Grundwassermodell als Randbedingung implementiert. Eine Auswertung wurde für die Messstellen HB-F01a_03 in einer Entfernung von 6.75 m zum Förderbrunnen und für die Messstelle HB-F01b_03 in einer Entfernung von 10.72 m zum Versickerungsbrunnen durchgeführt (Abbildung 24). Auf die Auswertung des Pump- und Versickerungsbrunnen selbst wurde bewusst verzichtet, da anzunehmen war, dass diese jedenfalls extrem stark durch Brunneneffekte beeinflusst sein würden. Dies zeigt sich auch in den Ergebnissen – v.a. des Versickerungsversuches. Während an den ausgewählten Messstellen mit vergleichbaren Distanzen zu Entnahme- bzw. Versickerungsbrunnen die Absenkung und Aufspiegelung in etwa vergleichbare Werte liefern, lag die Absenkung im Förderbrunnen bei ca. 1.2 m, die Aufspiegelung im Schluckbrunnen aber bei > 4 m.

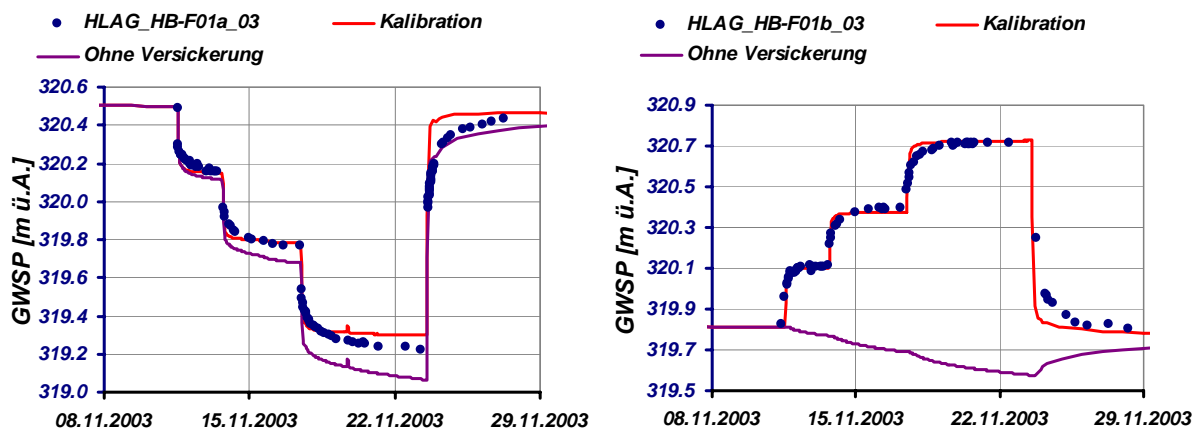


Abbildung 24: Messdaten, Kalibrierungsergebnisse und Berechnungsergebnisse ohne Rückversickerung des beim Pumpversuch geförderten Wassers an den Beobachtungsstellen HB-F01a_03 (links) und HB-F01b_03 (rechts)

In den beiden gewählten, nahe der Entnahme bzw. Versickerung gelegenen Messstellen konnte die Absenkungs- und Aufspiegelungsganglinie in sehr guter Qualität durch das Modell nachgebildet werden. Simulationsrechnungen mit gleicher Fördercharakteristik aber ohne Rückversickerung zeigen, dass durch die Wiederversickerung der Grundwasserspiegel nahe dem Förderbrunnen (HF-F01a_03) am Ende des Versuches um etwa 0.2 m tiefer gelegen wäre, an der Messstelle HB-F01b_03 (nahe dem Versickerungsbrunnen) wäre in diesem Fall eine Absenkung in der Größenordnung von 20 cm zu registrieren gewesen (Abbildung 24). Der Versuch und die daran gekoppelte Modellrechnung belegt, dass aufgrund der vorliegenden guten Durchlässigkeitsbeiwerte durch die Entnahme- und Wiederversickerung von Grundwasser ein relativ großer Bereich beeinflusst wird – der Schluckbrunnen liegt in etwa in einer Entfernung von 290 m.

Zur Bewertung der Auswirkung dieser Wechselwirkung zwischen Entnahme und Wiederversickerung auf die analytische Auswertung des Pumpversuchs und die daraus gewonnenen Aquiferparameter wurde die Ganglinie der Messstelle HB-F01a_03 nach dem Verfahren von COOPER & JACOS instationär (Zeit – Absenkungs – Verfahren) analytisch ausgewertet. Das Ergebnis dieser Auswertung zeigte eine Transmissivität $6.07 \cdot 10^{-2}$ m²/s. Eine Auswertung der Modellganglinie ohne Versickerung

nach dem gleichen Verfahren führt an dieser Messstelle zu einer Transmissivität von $4.26 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Die resultierenden Durchlässigkeitsbeiwerte aus der Pumpversuchsauswertung können damit unter Verwendung einer gesättigten Mächtigkeit von 12 m für diesen Bereich mit etwa $4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ angegeben werden, ein Wert der sehr gut mit den Kalibrationsergebnissen des Modells korreliert.

4.2 Wasserhaltungsmaßnahmen in der Bauphase der Unterflurtrasse Feldkirchen

Für die Bauarbeiten der Unterflurtrasse im Abschnitt Km 8.70 bis 9.20 ist eine offene Wasserhaltung geplant. Das instationäre Modell konnte für die Simulation dieser Fragestellung nicht verwendet werden, weil die gegenseitige Beeinflussung zwischen Wiederversickerung und anfallenden Pumpmengen bei der Wasserhaltung nicht definierbar ist. Die Simulation der Auswirkungen dieser Wasserhaltungsmaßnahmen wurde deshalb mittels eines speziell dafür erstellten stationären Strömungsmodells durchgeführt, das Gleichgewicht zwischen Entnahme und Wiederversickerung über eine Vielzahl von Simulationen manuell hergestellt. Als Ausgangszustand für die Simulation der Wasserhaltung wurde der sogenannte Bauwasserspiegel (RHHGW abzüglich 1.5m) vorgegeben. Aus dem kalibrierten Instationärmodell wurde ein stationäres Modell extrahiert, welches den als Bauwasserspiegel definierten Ausgangswasserspiegel repräsentiert. Als Entnahme in den Brunnen Kalsdorf wurde dabei der Durchschnitt zwischen 2000-2003 wie folgt angesetzt ($VFB1 = 1000\text{m}^3/\text{d}$, $VFB1a = 0\text{m}^3/\text{d}$, $VFB2=2950\text{m}^3/\text{d}$). Während der Wasserhaltung werden die anfallenden Wassermengen in einem Schluckbrunnen in Trassennähe bei Km 9.40 wiederversickert. Die Netzgeometrie wurde soweit verändert, dass Entnahmen in Abständen von je 50m definiert werden können. Dafür mussten FE-Netz-Verfeinerungen und Netzknotenverschiebungen durchgeführt werden. Es wurden unterschiedliche Varianten der offenen Wasserhaltung im Abschnitt Km 8.70 bis 9.20 simuliert und ausgewertet. Bei der Berechnung der einzelnen Varianten wurde im Abschnitt Km 8.70 bis 9.05 eine Absenkung von 0.50m, im Abschnitt Km 9.05 bis 9.20 eine Absenkung von 0.70m gegenüber dem Bauwasserspiegel gefordert. In Tabelle 3 werden die Bauwerksunterkanten (BWUK), der Bauwasserspiegel (BWSP), die Differenz zwischen Bauwerksunterkante und Bauwasserspiegel, der zu erreichende abgesenkte Grundwasserspiegel (ZielGWSP), sowie die Differenz zwischen Bauwasserspiegel und abgesenktem Wasserspiegel zusammengefasst.

Tabelle 3: Kenngrößen für die Simulation der Wasserhaltung

Km	BWUK	BWSP	BWUK - BWSP	Absenkung	ZielGWSP	BWUK - ZielGWSP
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
8.60	327.66	327.11	0.55	0.50	326.61	1.05
8.65	327.24	327.05	0.19	0.50	326.55	0.69
8.70	326.82	326.98	-0.16	0.50	326.48	0.34
8.75	326.82	326.92	-0.10	0.50	326.42	0.40
8.80	326.81	326.85	-0.04	0.50	326.35	0.46
8.85	326.69	326.78	-0.09	0.50	326.28	0.41
8.90	326.56	326.70	-0.14	0.50	326.20	0.36
8.95	326.44	326.61	-0.18	0.50	326.11	0.32

Km	BWUK	BWSP	BWUK - BWSP	Absenkung	ZielGWSP	BWUK - ZielGWSP
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
9.00	326.31	326.52	-0.21	0.50	326.02	0.29
9.05	326.09	326.43	-0.34	0.70	325.73	0.36
9.10	325.86	326.33	-0.47	0.70	325.63	0.23
9.15	325.78	326.24	-0.46	0.70	325.54	0.24
9.20	325.69	326.14	-0.45	0.70	325.44	0.25

Grundsätzlich wurde der Abschnitt in Baugruben von 100m Länge unterteilt. Für den Abschnitt Km 9.05 bis 9.20 wurden zusätzlich Baugrubenlängen von 150m simuliert. Grundsätzlich wurde alle 50m ein Förderbrunnen angenommen (auf 100m 3 Brunnen, auf 150m 4 Brunnen). Der Abschnitt Km 8.70 bis 8.80 wurde zusätzlich mit nur 2 Brunnen (Abstand 100m) simuliert. Zusätzlich zum Bauwasserspiegel wurden die Varianten außerdem mit einem dem MGW (mittlere Grundwasserspiegellage) entsprechenden Ausgangszustand simuliert. Die simulierten Varianten samt notwendigen Förderraten sind in Tabelle 4 zusammengefasst, wobei neben dem Bezugs – Grundwasserspiegel (Zustand), der Kilometrierung (Km), der Länge der Baugrube = Bereich für den die Absenkung unter die geforderte Ziel- Spiegellage zu erfolgen hat (Länge), der Anzahl der angesetzten Entnahmebrunnen auch die erforderliche Förderrate (l/s) um das Absenkungsziel zu erreichen angeführt ist

Tabelle 4: Zusammenfassung der Wasserhaltungsvarianten

Zustand	Km	Länge	Brunnen	Förderrate
		[m]	Anzahl	l/s
MGW	8.70 - 8.80	100	3	18.0
MGW	8.80 - 8.90	100	3	15.0
MGW	8.90 - 9.00	100	3	15.0
MGW	9.00 - 9.10	100	3	28.0
MGW	9.10 - 9.20	100	3	35.0
MGW	8.90 - 9.05	150	4	18.0
MGW	9.05 - 9.20	150	4	35.0
MGW	8.70 - 8.80	100	2	17.0
BWSP	8.70 - 8.80	100	3	35.0
BWSP	8.80 - 8.90	100	3	32.0
BWSP	8.90 - 9.00	100	3	32.0
BWSP	9.00 - 9.10	100	3	45.0
BWSP	9.10 - 9.20	100	3	58.0
BWSP	8.90 - 9.05	150	4	40.0
BWSP	9.05 - 9.20	150	4	65.0
BWSP	8.70 - 8.80	100	2	33.0

Die Abbildung 25 zeigt einen abschnittsbezogenen Vergleich zwischen den erforderlichen Wasserhaltungsmengen bei MGW und Bauwasserspiegel.

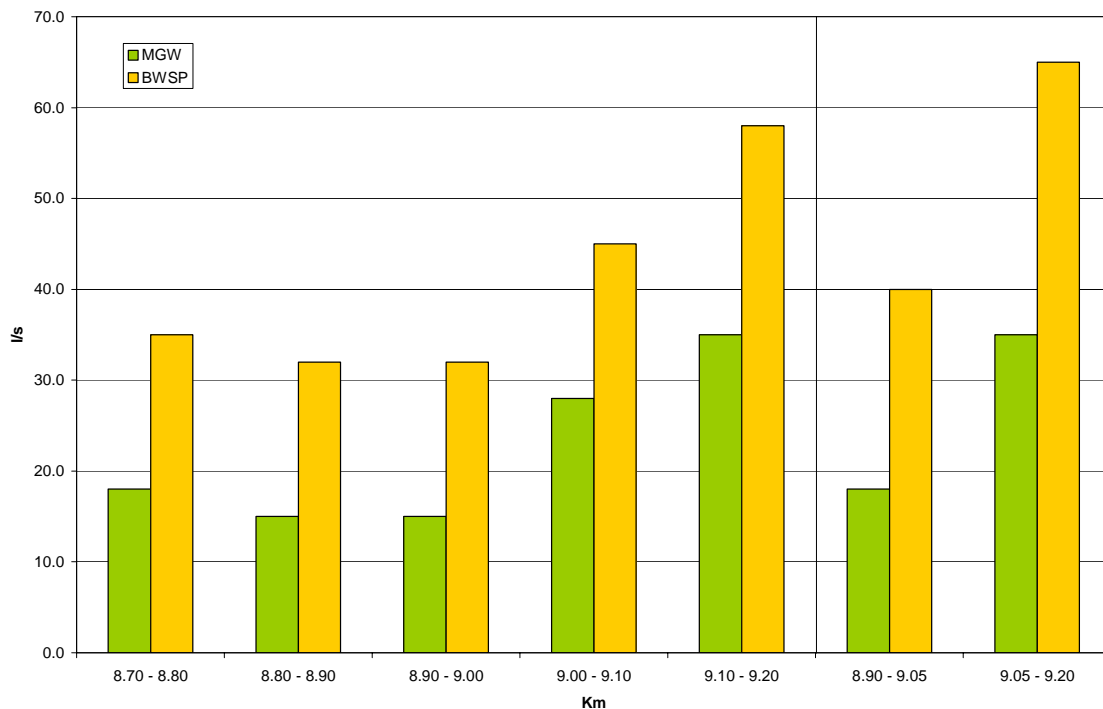


Abbildung 25: Vergleich der Wasserhaltungsmengen zwischen MGW und Bauwasserspiegel der unterschiedlichen Abschnitte

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Wasserhaltungsmengen für den Bauwasserspiegel höher als für den mittleren Grundwasserspiegel sind. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die Wasserhaltungsmengen zwischen Km 9.00 und 9.20 größer sind als zwischen Km 8.70 und 9.05. Das liegt einerseits an der höheren Absenkung (0.70m anstatt 0.50m) und andererseits an der geringeren Entfernung der Wiederversickerung. Bei den Varianten mit Baugrubenlänge von 150m ist die Wasserhaltungsmenge nur unwesentlich höher als bei jenen mit 100m.

Die Auswirkung der Wasserhaltung auf die Grundwasserspiegellage ist relativ eng begrenzt (in etwa einem Radius von 150 m um Entnahme und Versickerungsbrunnen), die Aufspiegelungs- und Absenkungsbeträge schwanken in Abhängigkeit von der gewählten Variante, erreichen aber generell nirgends Werte von >1.0 m und sind in Relation zu vorhandenen Grundwasserressourcen nicht relevant. Eine Auswirkung auf die Grundwasserströmungsverhältnisse außerhalb des direkten Einflussbereiches ist praktisch nicht nachweisbar, eine Einflussnahme auf das Einzugsgebiet der Wasserversorgungsanlage Kalsdorf ist keinesfalls zu erwarten.

Die folgenden Abbildungen (Abbildung 26 bis Abbildung 31) zeigen die flächenhafte Absenkung und Aufspiegelung einzelner Varianten in Form einer Differenzendarstellung (Absenkung negative, Aufspiegelung positive Werte).

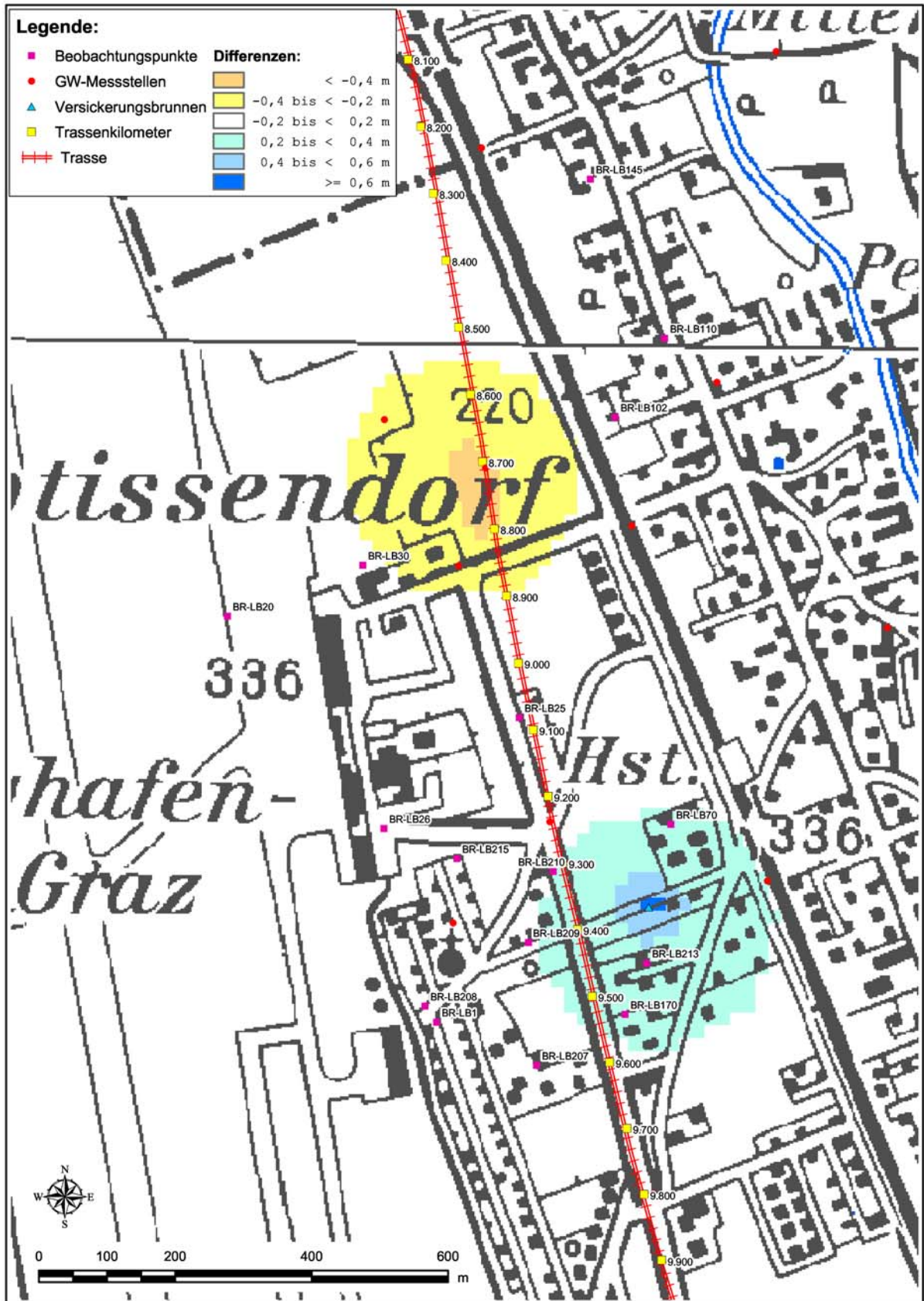


Abbildung 26: Absenkung und Aufspiegelung bei der Wasserhaltung für den Abschnitt Km 8.70-8.80 für die Variante Bauwasserspiegel und Wasserhaltung mittels 3 Brunnen

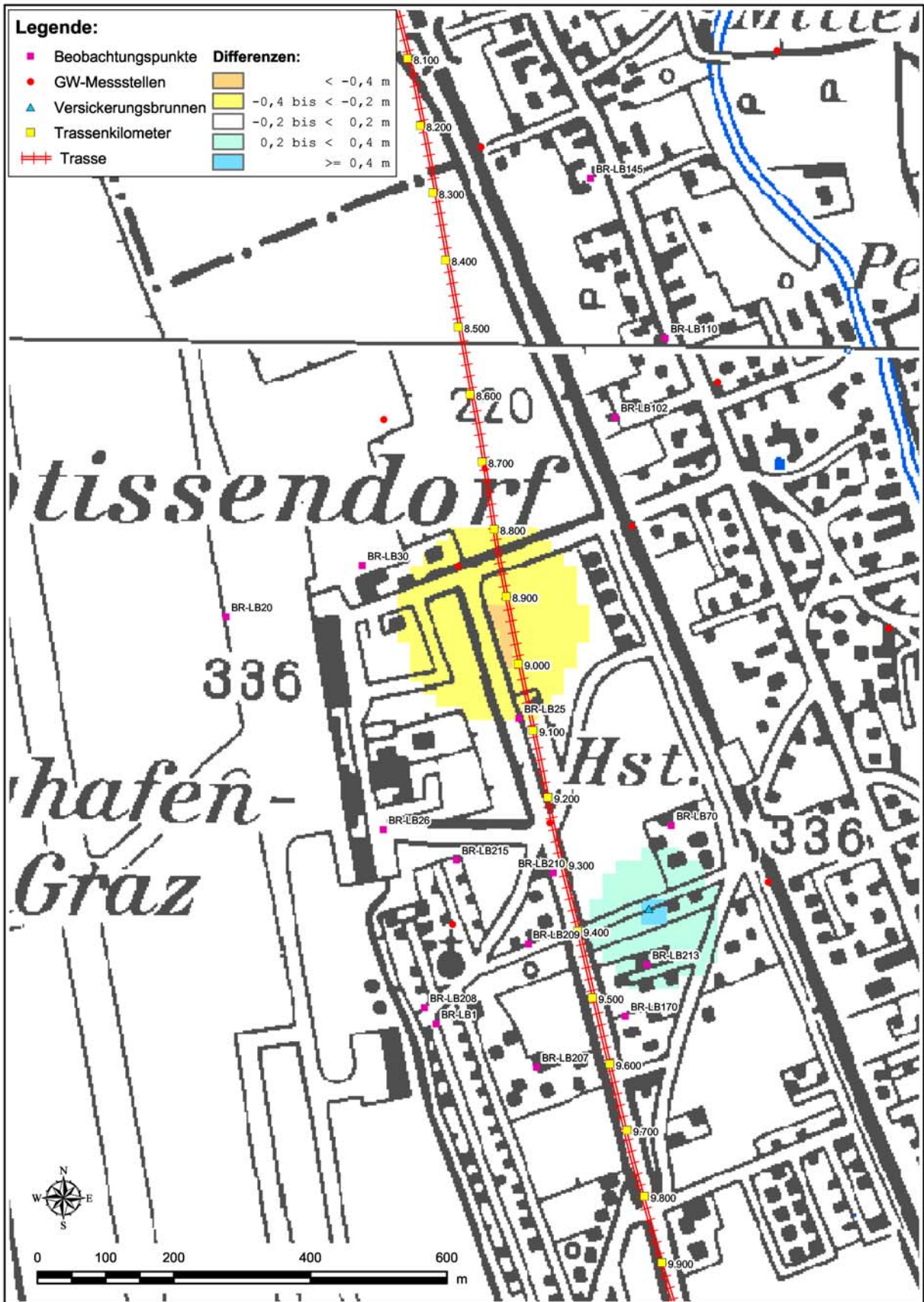


Abbildung 27: Absenkung und Aufspiegelung bei der Wasserhaltung für den Abschnitt Km 8.90-9.00 für die Variante Bauwasserspiegel und Wasserhaltung mittels 3 Brunnen

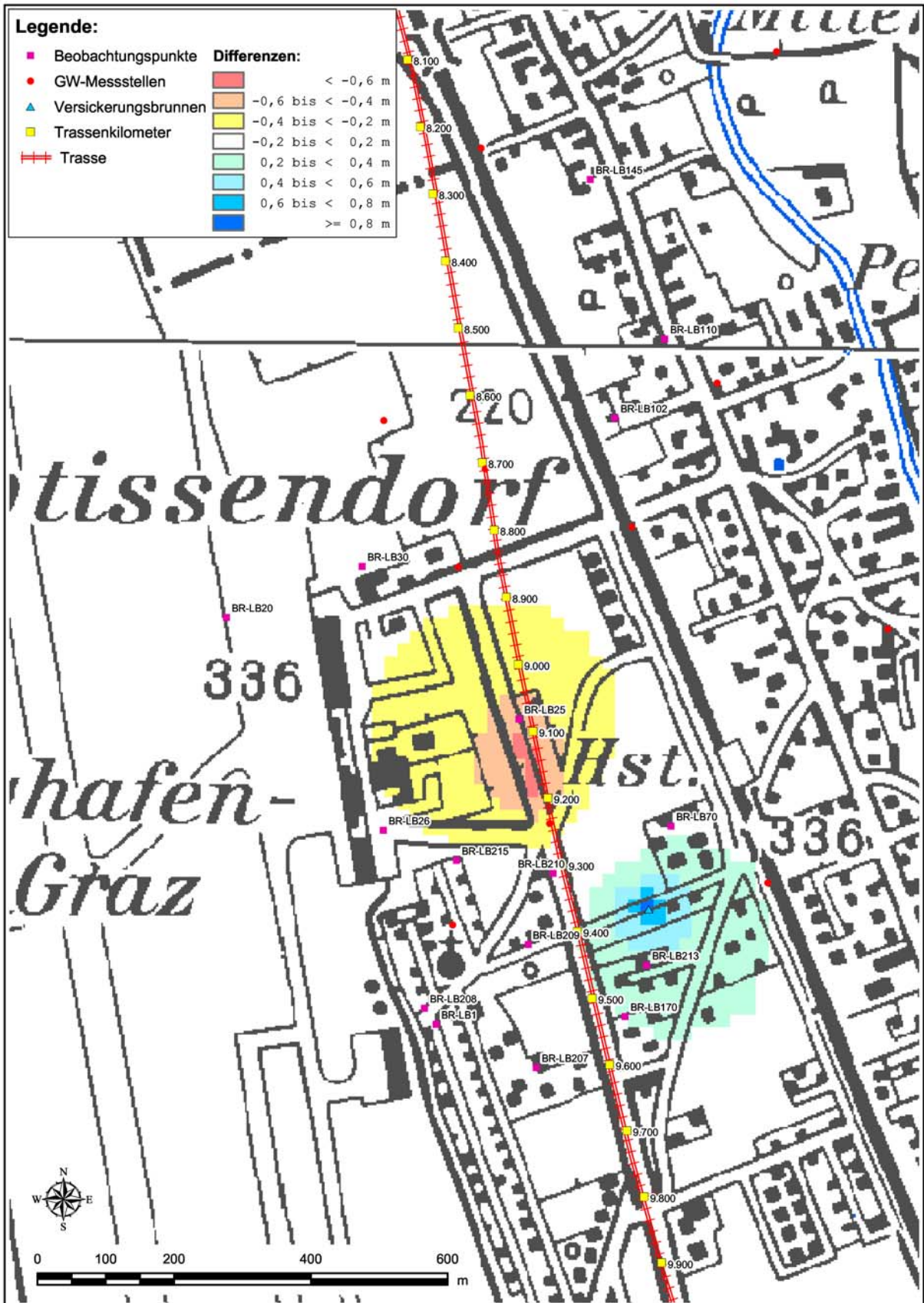


Abbildung 28: Absenkung und Aufspiegelung bei der Wasserhaltung für den Abschnitt Km 9.10-9.20 für die Variante Bauwasserspiegel und Wasserhaltung mittels 3 Brunnen

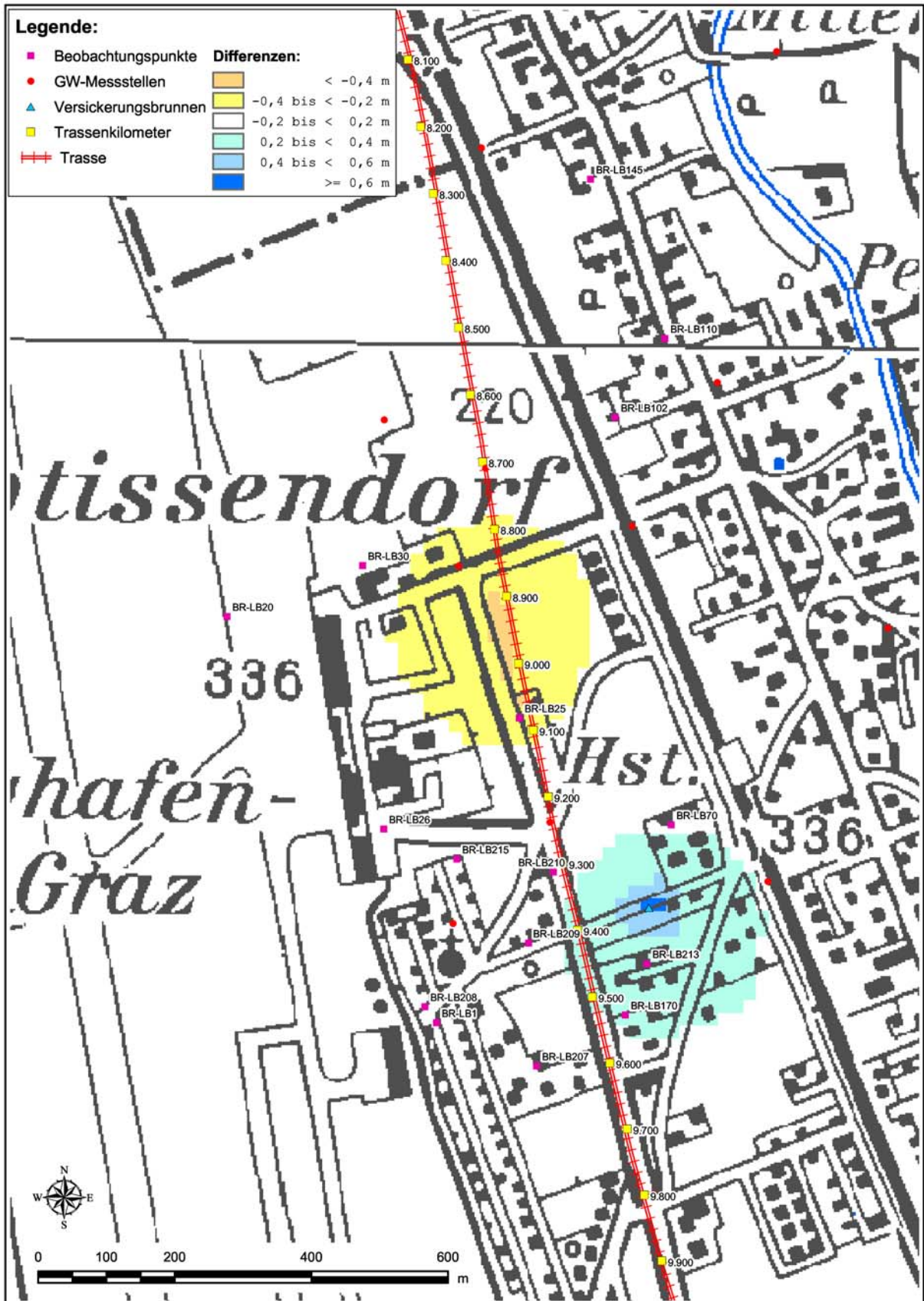


Abbildung 29: Absenkung und Aufspiegelung bei der Wasserhaltung für den Abschnitt Km 8.90-9.05 für die Variante Bauwasserspiegel und Wasserhaltung mittels 4 Brunnen

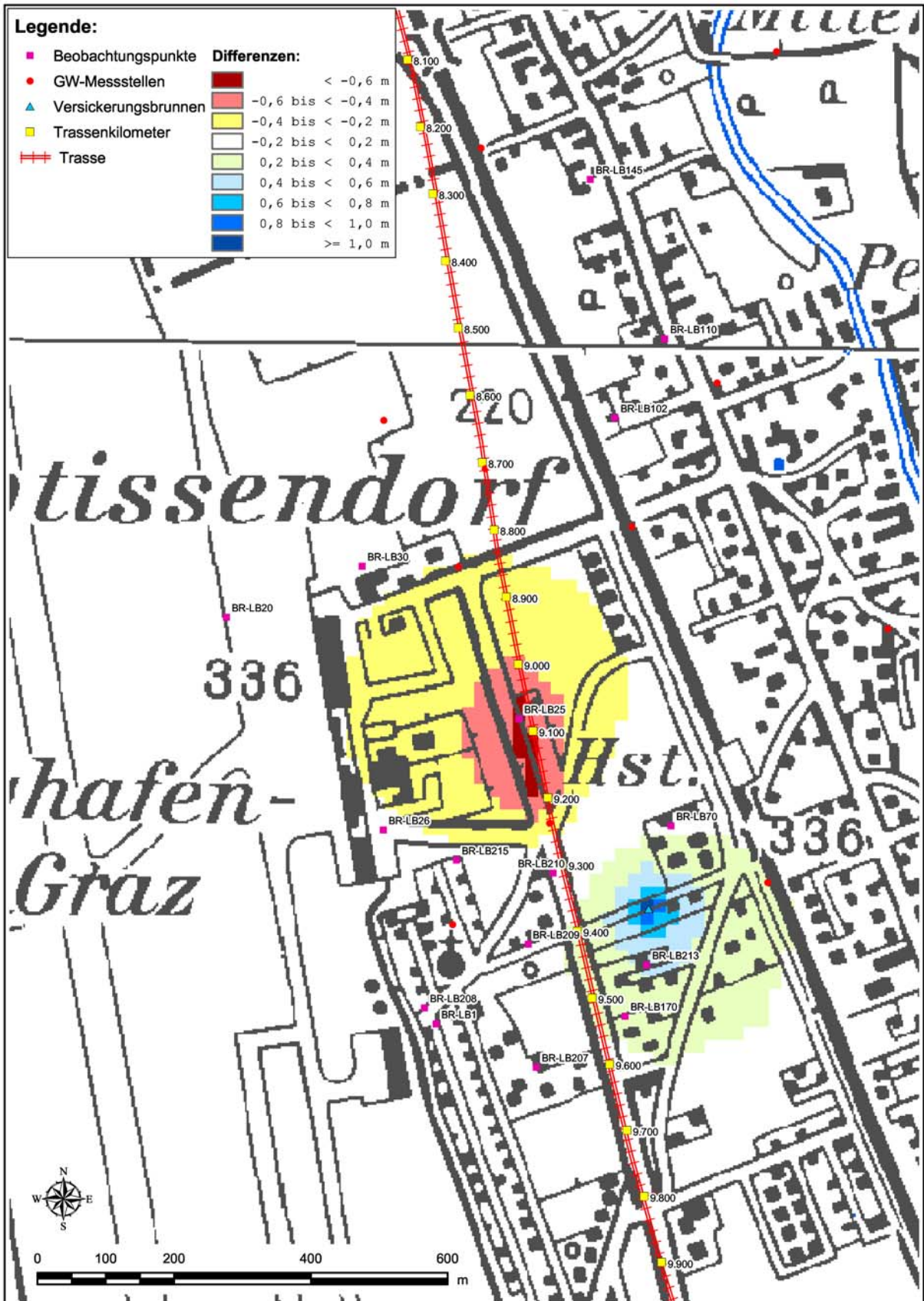


Abbildung 30: Absenkung und Aufspiegelung bei der Wasserhaltung für den Abschnitt Km 9.05-920 für die Variante Bauwasserspiegel und Wasserhaltung mittels 4 Brunnen

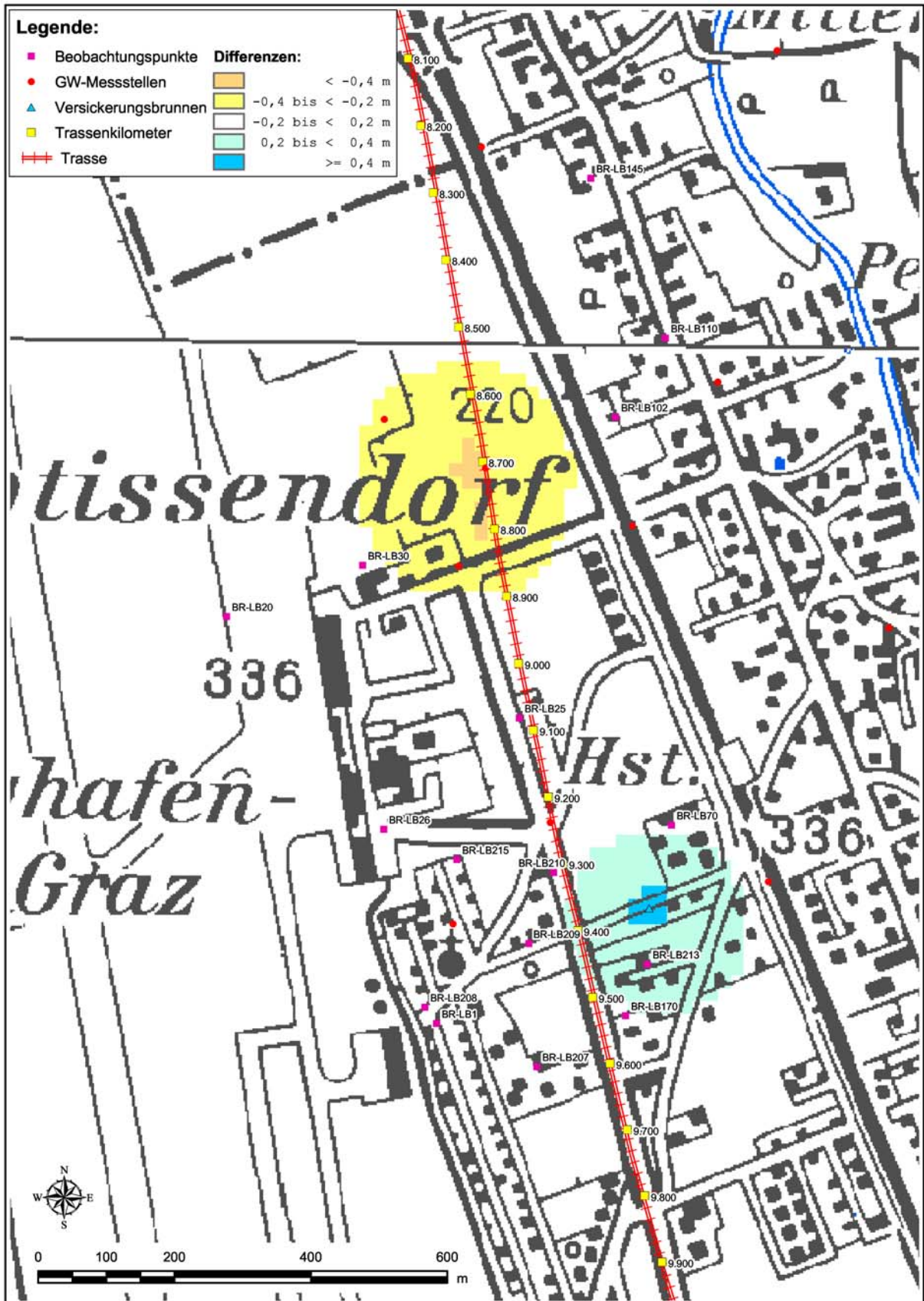


Abbildung 31: Absenkung und Aufspiegelung bei der Wasserhaltung für den Abschnitt Km 8.70-8.80 für die Variante Bauwasserspiegel und Wasserhaltung mittels 2 Brunnen

4.3 Simulation der Auswirkung der Trassenführung in den Unterflurbereichen

Unterflurtrassen in der gesättigten Zone des Aquifers verringern den Durchflussquerschnitt. Grundsätzlich entsteht ein Aufstauereffekt im anströmenden Bereich, sowie eine Absenkung im abströmenden Bereich. Die Größenordnung von Aufstau und Absenkung ist von den hydraulischen Parametern wie Durchflussmenge, Lage des Bauwerks zur Strömungsrichtung, Breite des Bauwerks, Durchlässigkeitsbeiwerte des Aquifers, vor allem aber vom Prozentsatz der Querschnittsverringeringung abhängig.

Zur Veranschaulichung der Problematik wurde zusätzlich zum horizontal ebenen 2D-Grundwasserströmungsmodell auch ein 2D-vertikales Schnittmodell erstellt und in diesem Modell die Auswirkung unterschiedlicher Einbautiefen in den Aquifer auf die oberstromigen Grundwasserstandsverhältnisse simuliert (siehe Abbildung 32). Die dargestellten Werte gelten – aufgrund des gewählten Modellansatzes – nur für Einbauten mit großer Längserstreckung. In der Realität wird der hier prognostizierte Aufstau aufgrund der Kleinräumigkeit der Unterwassereintiefung und der dadurch gegebenen Möglichkeit der Umströmung des dichten Abschnittes gemildert.

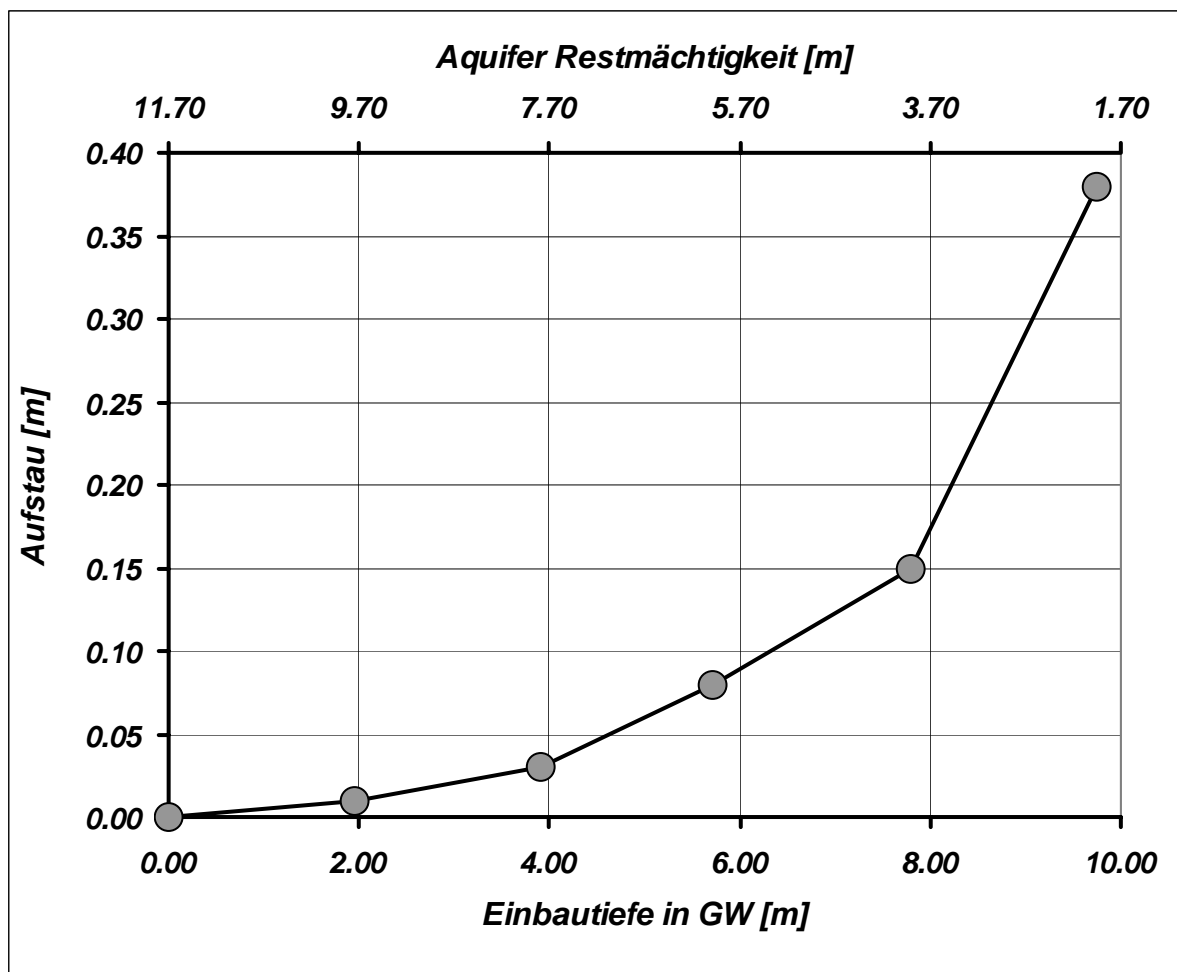


Abbildung 32: Berechnung der zu erwartenden Aufspiegelung (bzw. Absenkung) des Grundwasserspiegels oberstrom (bzw. unterstrom) der Unterflurtrasse in Abhängigkeit von der Bauwerkseintiefung in das Grundwasser (bzw. der Restmächtigkeit des Aquifers)

4.3.1 Unterflurtrasse Feldkirchen

Die Auswirkung der Unterflurtrasse Feldkirchen auf die Grundwasserströmung wurde durch die Definition der Bauwerksunterkante (BWUK) als obere Begrenzung des Aquifers simuliert. Dies bewirkt die Simulation von gespannten Verhältnissen, wenn der Wasserspiegel auf die vorgegebene Höhe steigt und entspricht damit den realen, in der Natur gegebenen Verhältnissen. Die Bauwerksunterkanten der Unterflurtrasse Feldkirchen wurden seitens der technischen Planung bekannt gegeben und sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Tabelle 5: Bauwerkunterkanten (BWUK) zu den entsprechenden Bauabschnitten

Bau-Km	BWUK
8.70	326.82
8.80	326.81
8.90	326.56
9.00	326.31
9.10	325.86
9.20	325.69
9.30	321.24
9.40	320.99
9.50	320.74
9.60	320.49
9.70	320.24
9.80	319.94
9.90	319.64
10.00	319.34
10.10	319.04
10.20	318.74
10.30	318.44
10.40	317.84
10.50	317.83
10.60	317.75
10.70	320.88
10.80	320.73
10.90	320.58
11.00	320.43
11.10	320.16
11.20	320.01
11.30	319.86
11.40	319.83
11.50	319.68
11.60	319.53
11.70	319.38
11.80	319.23
11.90	318.89
12.00	318.97
12.10	319.51
12.20	319.63
12.30	319.99
12.40	320.25
12.50	320.55

Durch die geringe Reduktion des Querschnittes (aufgrund der geringen Einbautiefe in das Grundwasser und der verbleibenden großen Restmächtigkeit des gesättigten Aquifers) und wegen

der geringen Breite des Bauwerkes in Relation zu den Dimensionen des Grundwassersystems ist die Beeinflussung der Grundwasserströmung sehr gering bis nicht nachweisbar. Als Beispiel für diese geringe Auswirkung wurden die Grundwasserganglinien des nahe der Trasse gelegenen Pegels KB-F05/98 im Istzustand (Ist) und für die Simulation der Unterflurtrasse (Sim) in Abbildung 33 dargestellt. Abbildung 34 zeigt die mittleren Jahresgrundwasserstandsganglinien (über den Modellzeitraum) des Pegels KB-F05/98 für beide Zustände.

Aus diesen beiden Darstellungen, die gleichzeitig jenen Bereich repräsentieren, der von der Unterwassereintiefung am stärksten betroffen ist, wird klar, dass de facto keinerlei negative Auswirkung des Unterflurbauwerkes auf Grundwasserstand und Grundwasserströmung zu erwarten ist. Diese Ergebnisse decken sich auch mit den Ergebnissen der Berechnungen für die Umweltverträglichkeitserklärung.

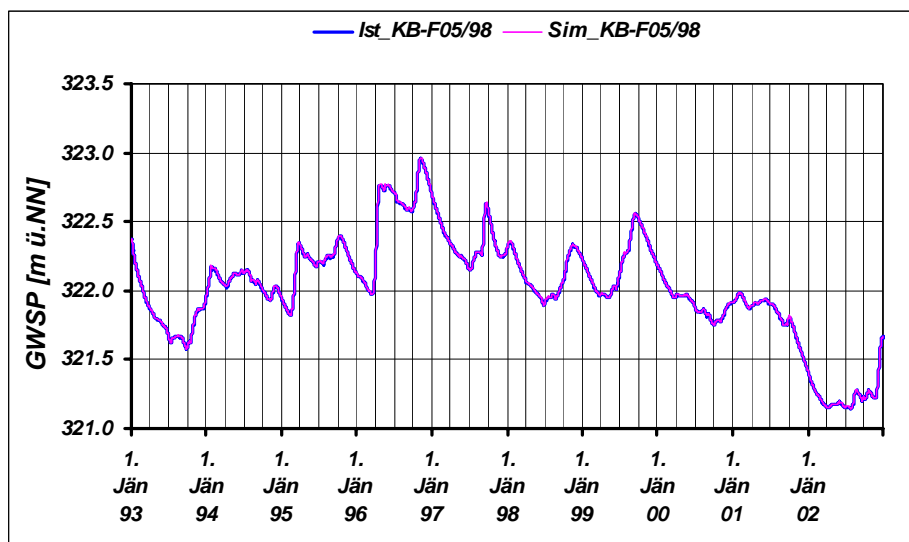


Abbildung 33: Vergleich der Grundwasserganglinien Istzustand und Simulation der Unterflurtrasse am Pegel KB_F05/98.

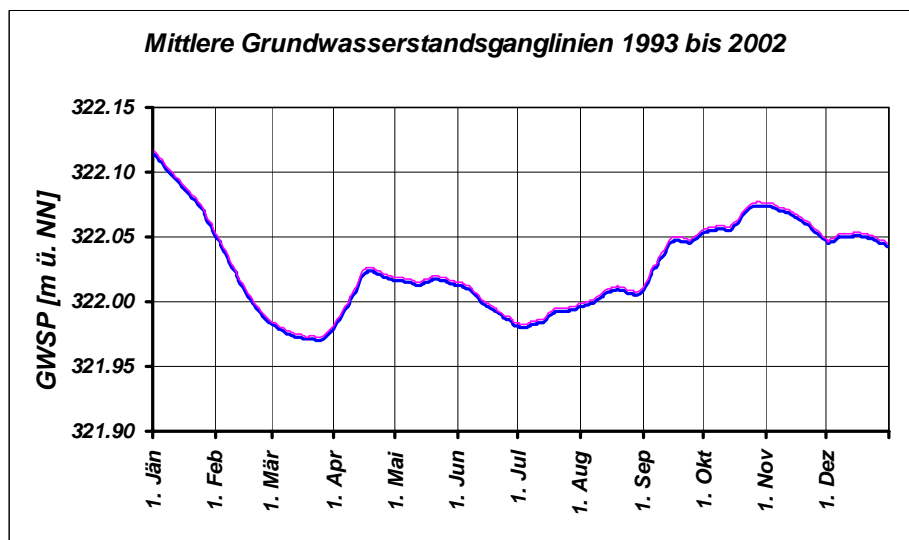


Abbildung 34: Vergleich der mittleren Jahresgrundwasserstandsganglinien Istzustand und Simulation der Unterflurtrasse am Pegel KB_F05/98.

4.3.2 Unterflurtrasse Weitendorf

Im Bereich der Unterflurtrasse Weitendorf erfolgt die Einbindung der Wanne teilweise in den dichten Grundwasserstauer, sodass im Längsschnitt Bereiche entstehen, die hinsichtlich des Grundwasserabstroms vollkommen abgeschlossen werden. Daran anschließend liegen Teilbereiche vor, in denen zwischen Bauwerksunterkante und Grundwasserstauer ein durchflusswirksamer Restquerschnitt verbleiben wird.

Die Auswirkung der Unterflurtrasse Weitendorf auf die Grundwasserströmung wurde durch das Definieren von praktisch undurchlässigen k_f -Werten ($1 \cdot 10^{-9}$ m/s) in den Abschnitten ohne durchflusswirksamen Restquerschnitt und einer oberen Begrenzung des Aquifers in den Abschnitten mit Restquerschnitt simuliert. Die Definition der oberen Begrenzung des Aquifers bewirkt die Simulation von gespannten Verhältnissen, wenn der Wasserspiegel auf die vorgegebene Höhe steigt. Bei der Ermittlung der modellrelevanten Bauwerksunterkanten wurden die Bereiche mit Bohrpfahlwand als zum Bauwerk gehörend (also als dicht) angenommen. Dies gilt auch für jene Bereiche mit aufgelöster Bohrpfahlwand. Die Simulation der Auswirkung der Unterflurtrasse auf die Grundwasserverhältnisse stellt somit also einen „worst-case-Fall“ dar. Im Abschnitt Km 20.1 – 20.6 wurden die Bauwerksunterkanten als obere Aquiferbegrenzung definiert. Im Abschnitt Km 20.6 – 21.3 bleibt kein durchflusswirksamer Restquerschnitt, deshalb wurden für diesen Abschnitt die k_f -Werte auf $1 \cdot 10^{-9}$ m/s gesetzt. Für die Simulation der Wanne wurden FE-Netz-Verfeinerungen durchgeführt, um die Unterflurtrasse im regionalen Modell möglichst gut diskretisieren zu können. Die Bauwerksunterkanten (BWUK) sind zusammen mit der Stauerhöhe (Stauer), sowie der Differenz zwischen Bauwerksunterkante und Stauer (BWUK-Stauer) in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Für die Simulation entlang der Unterflurtrasse (Km) verwendete Stauerhöhe, Bauwerksunterkante (BWUK) und die Differenz zum Grundwasserstauer (BWUK-Stauer)

Km	Stauerhöhe [m ü.A.]	BWUK [m ü.A.]	BWUK-Stauer [m]
20.1	297.3	304.0	6.7
20.2	297.5	303.0	5.5
20.3	297.9	302.2	4.3
20.4	298.3	302.1	3.8
20.5	298.8	300.1	1.3
20.6	299.6	298.2	-1.4
20.7	300.3	297.3	-3.0
20.8	300.1	293.0	-7.1
20.9	298.4	293.3	-5.1
21.0	296.6	293.5	-3.1
21.1	295.9	293.9	-2.0
21.2	295.9	294.9	-1.0
21.3	295.8	296.0	0.2

In Tabelle 7 sind die aus der Modellberechnung resultierenden Durchflussmengen in den einzelnen Kilometrierungsabschnitten der Trasse als Vergleich zwischen Istzustand und der Simulation der Wanne im Bauwerksbereich FW12 für verschiedene Grundwasserstände dargestellt. Diese Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der geringen Durchlässigkeiten und der gesättigten Mächtigkeit

des Aquifers nur außerordentlich geringe Wasserflüsse auftreten. Das Maximum liegt im Abschnitt zwischen Kilometer 20.0 und 20.1 bei hohen Grundwasserständen bei 3.8 l/s. Wie aus den Angaben im Istzustand zu erkennen ist, ist auch bei derzeitigen Strömungszuständen im Bereich der Trassenführung zwischen Kilometer 20.4 und 21.0 praktisch kein Grundwasserabstrom vorliegend. Durch den Einbau der Wanne werden sich diese Durchflüsse praktisch nicht verändern, in den Randbereichen zu den dann verlängerten Bereichen ohne Durchströmungsmöglichkeit werden die Durchflussmengen leicht ansteigen (Ausbildung eines größeren Gefälles aufgrund der Aufstau- und Absenkungswirkung des Bauwerkes). Die Auswirkungen bleiben hinsichtlich der Durchflüsse aber jedenfalls auf den Bereich des Wannensbauwerkes selbst beschränkt.

Tabelle 7: Durchflussmengen im Trassenquerschnitt nach Abschnitten

Km	Simulation Wanne FW12			Istzustand		
	NGW [l/s]	MGW [l/s]	HGW [l/s]	NGW [l/s]	MGW [l/s]	HGW [l/s]
	09.03.2002	25.06.1997	29.10.1996	09.03.2002	25.06.1997	29.10.1996
20.0-20.1	2.4	2.8	3.8	2.5	2.8	3.8
20.1-20.2	2.3	2.7	3.7	2.3	2.7	3.6
20.2-20.3	0.6	0.7	1.0	0.6	0.7	1.0
20.3-20.4	0.2	0.3	0.4	0.2	0.2	0.4
20.4-20.5	0.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.1
20.5-20.6	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1
20.6-20.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
20.7-20.8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20.8-20.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20.9-21.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
21.0-21.1	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.6
21.1-21.2	0.0	0.0	0.0	0.3	0.4	0.6
21.2-21.3	0.1	0.2	0.2	0.4	0.5	0.7
21.3-21.4	1.0	1.3	1.6	0.6	0.7	0.9
21.4-21.5	0.7	0.9	1.1	0.6	0.7	0.9

In den Darstellungen in Abbildung 35 bis Abbildung 38 sind die Unterschiede in den Durchflüssen für die einzelnen Trassenabschnitte und unterschiedliche hydrologische Zustände als Vergleich zwischen Istzustand und Simulationszustand (Wanne FW12) grafisch dargestellt.

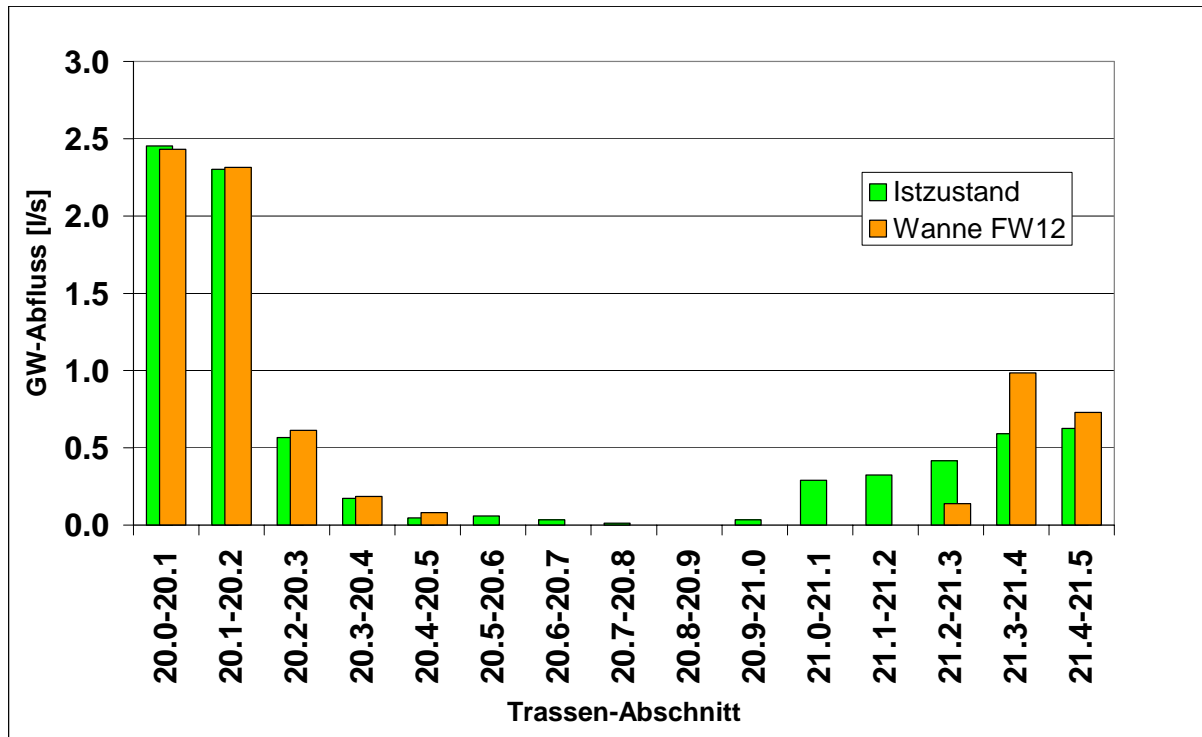


Abbildung 35: Vergleich der Grundwasserabflüsse im Trassenquerschnitt bei NGW (9.3.2002)

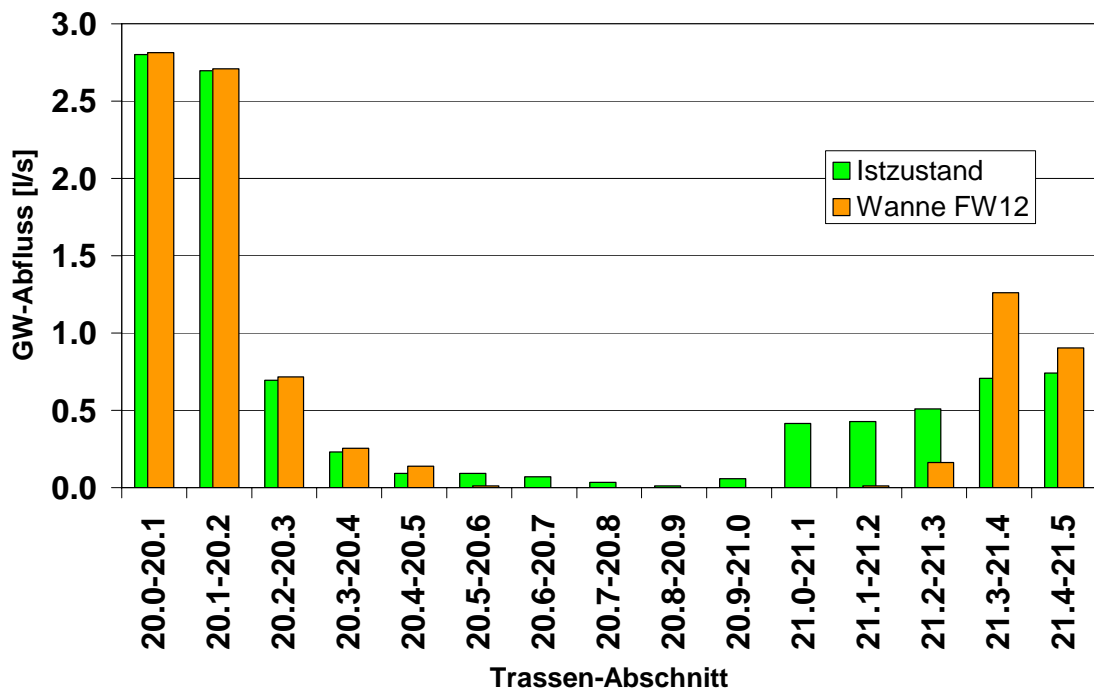


Abbildung 36: Vergleich der Grundwasserabflüsse im Trassenquerschnitt bei MGW (25.6.1997)

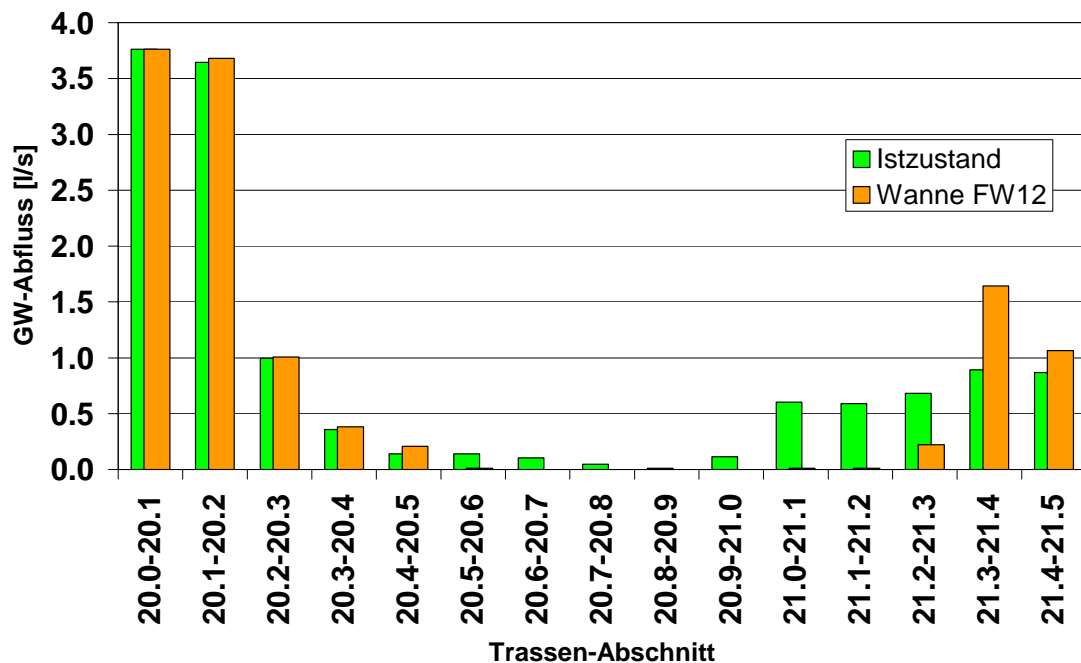


Abbildung 37: Vergleich der Grundwasserabflüsse im Trassenquerschnitt bei HGW (29.10.1996)

Die zukünftig zu erwartenden Durchflüsse in den einzelnen Trassen-Abschnitten des Wannengebäudes FW12 für unterschiedliche hydrologische Zustände sind in Abbildung 38 zusammenfassend dargestellt. Deutlich erkennbar ist der Bereich, in dem das Bauwerk in den Grundwasserstauer einbindet (Km 20.5 bis 21.2).

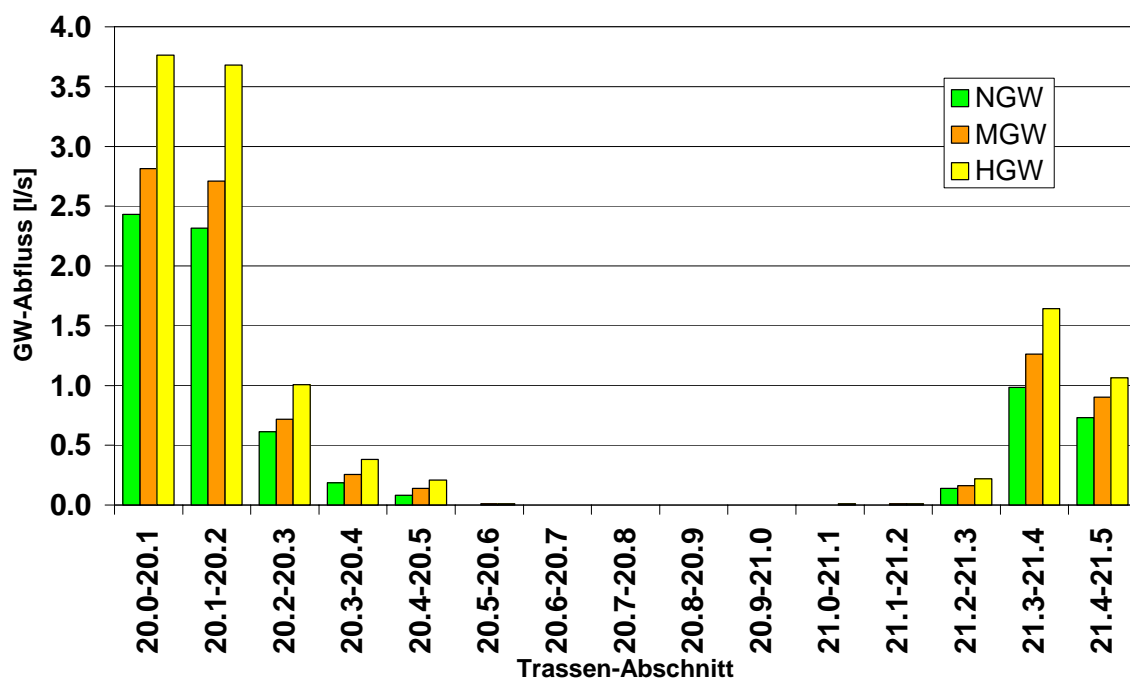


Abbildung 38: Vergleich der Grundwasserabflüsse charakteristischer hydrologischer Zustände für den Prognosezustand

Die Auswirkung der geplanten Maßnahmen im Bereich des Unterführungsbauwerkes FW12 unter Annahme einer „worst case“ Situation (dichte Bohrpfahlwand und auch dichte aufgelöste Bohrpfahlwand) auf die Grundwasserspiegellage und die Grundwasserströmungsverhältnisse sind für unterschiedliche hydrologische Zustände in den Darstellungen Abbildung 39 für NGW-, Abbildung 40 für MGW- und Abbildung 41 für HGW – Verhältnisse dargestellt.

Die zu erwartende Auswirkung auf die Grundwasserspiegellage wird in Form von Grundwasserspiegeldifferenzen dargestellt, wobei positive Werte eine Aufspiegelung, negative eine Absenkung bedeuten. Die Auswirkung auf die Grundwasserströmung ist aus den Darstellungen der Grundwasserschichtenlinien ablesbar, die vergleichend für den Istzustand und den Simulationszustand in den Abbildungen dargestellt sind. Die maximal zu erwartenden Auswirkungen sind im Bereich der Autobahn Aufspiegelungen im Anstrombereich (westlich) und Absenkungen im Abstrombereich (östlich) von etwa 1 m. Der Bereich der Auswirkung mit Werten > 0.2 m ist nur kleinräumig und praktisch auf den Bereich der Autobahnauf- und -abfahrt beschränkt.

Die Auswertung der zu erwartenden Auswirkung der Wanne Weitendorf zeigt, dass aufgrund der äußerst geringen Grundwasserabstrommengen, die aus der hydrogeologischen Situation in diesem Bereich resultiert (geringe gesättigte Mächtigkeit und geringe Sedimentdurchlässigkeiten) und der engen Begrenzung der Beeinflussung des Grundwasserspiegels Grundwasser-Kommunikationsmaßnahmen zwischen dem oberstromigen Aufstaubereich (westlich der Trasse) zum abstromigen Absenkungsbereich (östlich der Trasse) aus grundwasserhydrologischer Sicht nicht erforderlich sind.

Hinsichtlich der Bauphase ist aufgrund der angeführten hydrogeologischen Randbedingungen bei offener Wasserhaltung nur mit sehr geringen Entnahmemengen zu rechnen. Die Absenkbereiche um die Entnahmebrunnen werden lokal begrenzt bleiben. Ein Problem wird möglicherweise die Rückversickerung des entnommenen Wassers im Bereich der Stauerhochlage beim Weitendorfer Sporn darstellen. Diesbezüglich wird vorgeschlagen, das Wasser aus der Wasserhaltung entweder östlich der Trasse nördlich Klein-Weitendorf in das Grundwasser der Würmterrasse des Grazer Feldes zu versickern oder wenn möglich entlang der Trasse in ein Oberflächengewässer nach Süden abzuleiten.

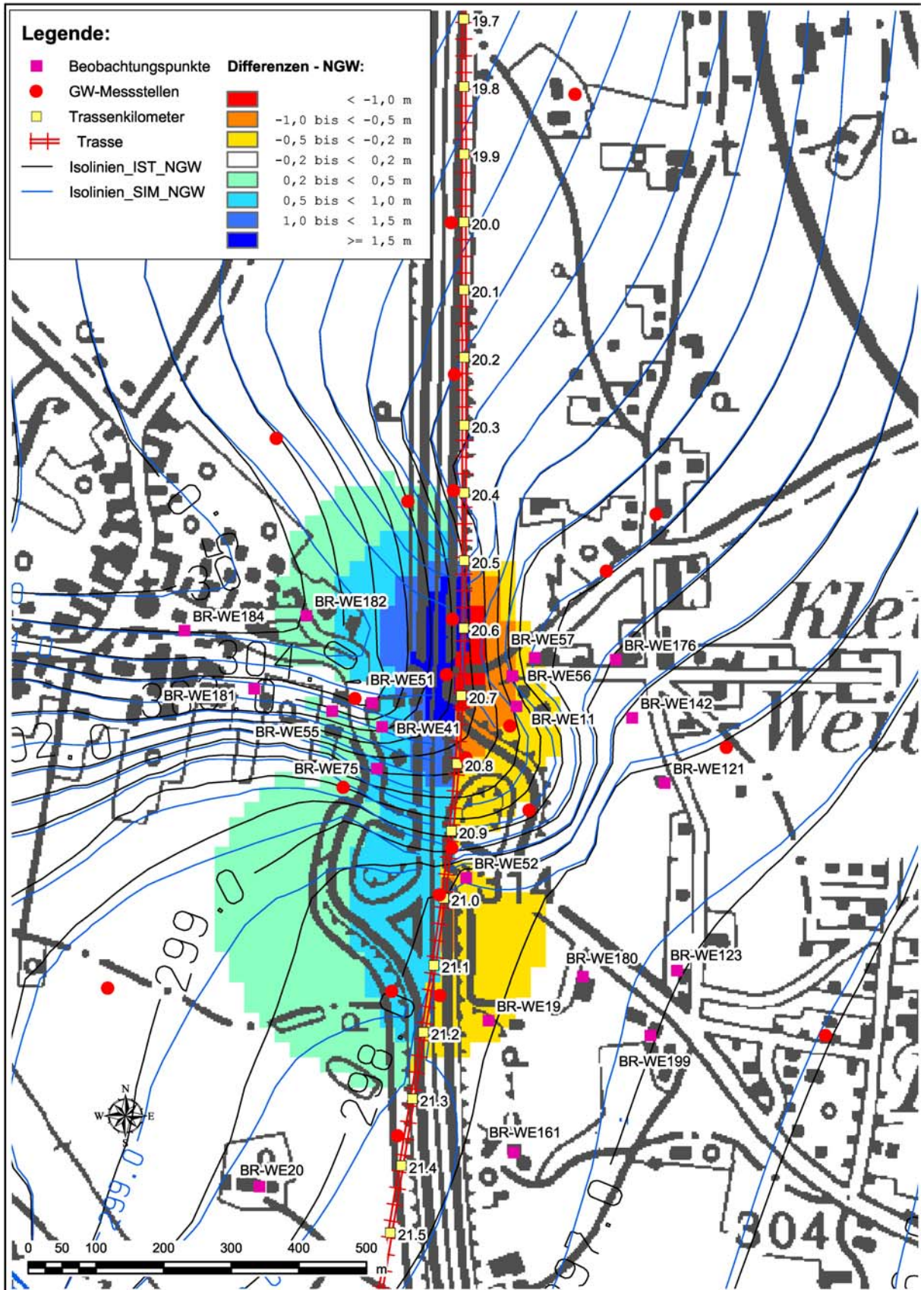


Abbildung 39: Differenz des GW-Spiegels zwischen der Simulation der Wanne (SIM) und dem Istzustand (IST) sowie GW-Schichtenlinien beider Zustände bei NGW

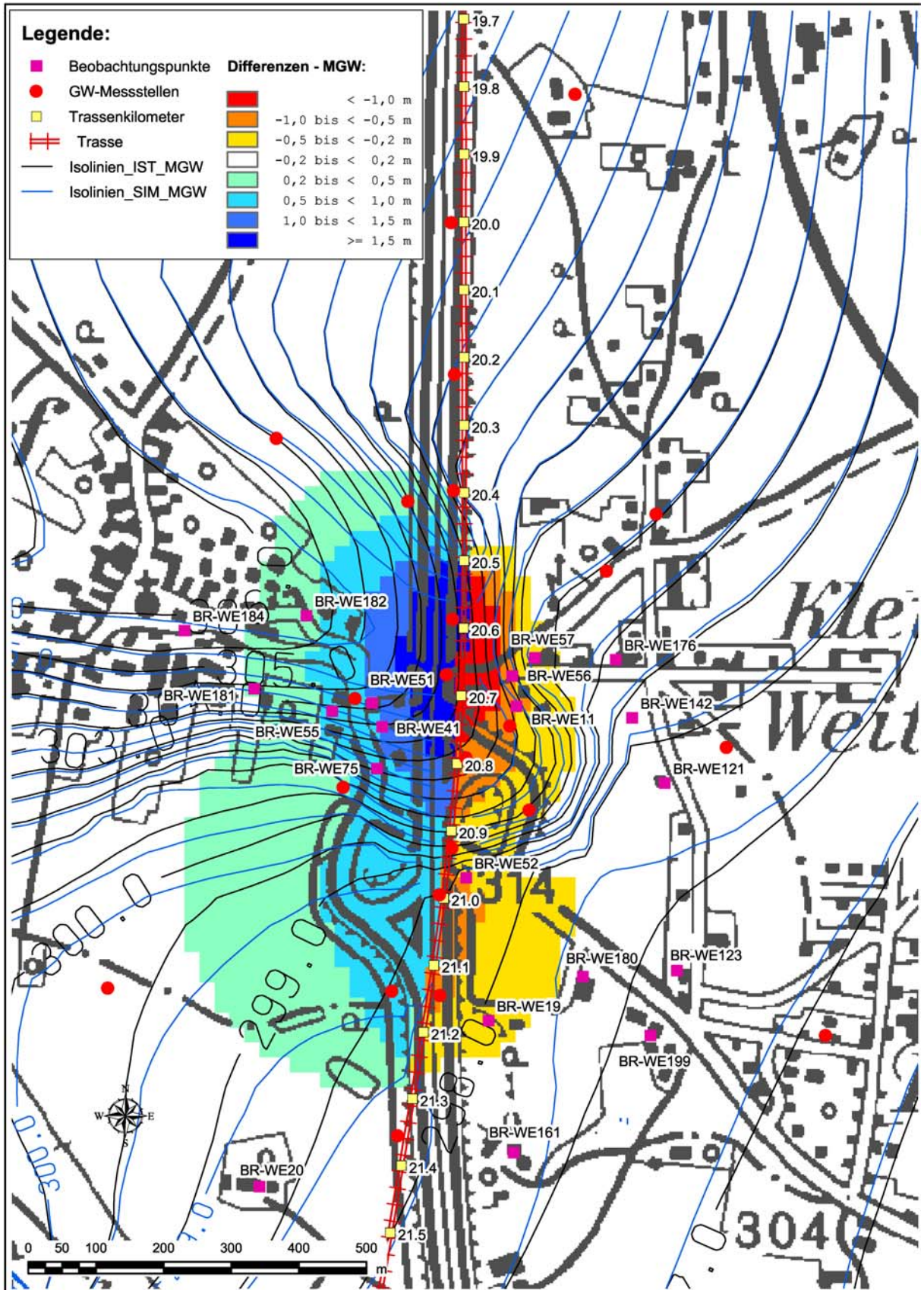


Abbildung 40: Differenz des GW-Spiegels zwischen der Simulation der Wanne (SIM) und dem Istzustand (IST) sowie GW-Schichtenlinien beider Zustände bei MGW

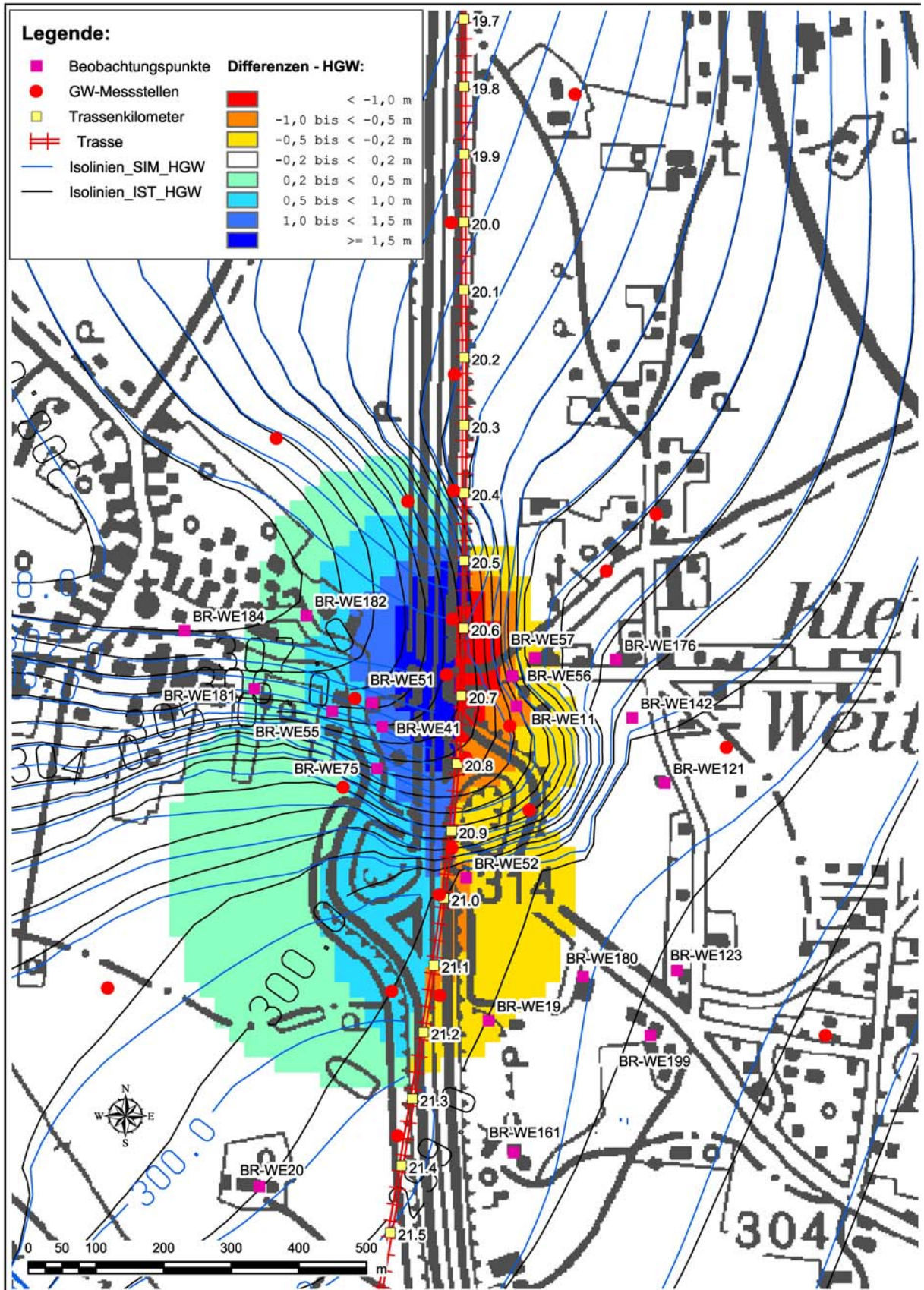


Abbildung 41: Differenz des GW-Spiegels zwischen der Simulation der Wanne (SIM) und dem Istzustand (IST) sowie GW-Schichtenlinien beider Zustände bei HGW

Im Bereich der zu erwartenden Auswirkung der Unterflurtrasse auf die Grundwasserspiegellage wurden Beobachtungspunkte definiert, die einerseits die existierenden Grundwasserstandsmessstellen darstellen, andererseits aus der Brunnenkartierung resultieren. Letztere wurden seitens der BGG als zu bewertende Punkte definiert. Die Darstellung der Auswirkung an den Beobachtungspunkten (= Grundwasserstandsmessstellen) erfolgte auf Basis einer statistischen Auswertung der berechneten Ganglinien (Variante Sim) und einer vergleichenden Gegenüberstellung zur Istvariante (Variante Ist). Anhand der Auswertung der Beobachtungsstelle BR_WE56 (Lage siehe Abbildung 44) östlich der Trasse mit zu erwartender Grundwasserspiegelabsenkung soll das angewandte Verfahren beschrieben werden.

Wie Tabelle 8 zeigt, wurde für die Berechnungsvarianten an den jeweiligen Beobachtungsstellen mittlere monatliche Niedrig-, Mittel- und Hochwasserstände berechnet und zusätzlich die monatlichen Differenzen zwischen den betrachteten Varianten angeführt. Im zweiten Teil der Tabelle wurde die Auswirkung der Variante Sim im Vergleich zur Ist Variante auf mittleren Dauerwerte der Modellierungsperiode beschrieben. An der Messstelle BR_WE56 ist im Mittel ein Rückgang des Grundwasserspiegels um 0.52 m zu erwarten.

Tabelle 8: Dokumentation der Auswirkung der Variante Sim auf hydrografische Kennzahlen der Beobachtungsstelle BR_WE56 im Vergleich zu den Kennzahlen der Variante Ist

Zeitraum: 1993 bis 2002 **Station:** Ist_BR-WE56

Mittlere Monatliche Grundwasserstände

	JAN	FEB	MAR	APR	MAI	JUN	JUL	AUG	SEP	OKT	NOV	DEZ	JAHR
NGW [m NN] Ist_BR-WE56	300.05	299.97	299.90	299.88	299.87	299.82	299.75	299.74	299.78	299.77	300.02	300.16	299.74
NGW [m NN] sim_BR-WE56	299.51	299.43	299.36	299.34	299.35	299.30	299.24	299.23	299.28	299.37	299.56	299.61	299.23
NGW-Differenz [m]	-0.54	-0.54	-0.54	-0.53	-0.52	-0.51	-0.51	-0.51	-0.50	-0.39	-0.47	-0.55	-0.51
HGW [m NN] Ist_BR-WE56	301.63	301.66	302.09	302.37	302.17	302.09	301.91	301.67	301.58	302.01	301.96	301.82	302.37
HGW [m NN] sim_BR-WE56	301.01	301.10	301.55	301.84	301.63	301.51	301.27	301.02	300.91	301.37	301.33	301.17	301.84
HGW-Differenz [m]	-0.61	-0.56	-0.55	-0.53	-0.54	-0.58	-0.63	-0.65	-0.68	-0.64	-0.64	-0.65	-0.53
MGW [m NN] Ist_BR-WE56	300.99	300.92	300.90	300.93	300.84	300.76	300.72	300.67	300.67	300.77	300.85	300.99	300.83
MGW [m NN] sim_BR-WE56	300.52	300.43	300.39	300.42	300.32	300.22	300.17	300.12	300.12	300.23	300.33	300.47	300.31
MGW-Differenz [m]	-0.47	-0.49	-0.50	-0.51	-0.52	-0.54	-0.54	-0.55	-0.55	-0.54	-0.53	-0.52	-0.52

Grundwasserspiegellage, die im Mittel an n Tagen im Jahr überschritten wird

Dauerwerte n Tage	30 d	60 d	90 d	120 d	150 d	180 d	210 d	240 d	270 d	300 d	330 d	347 d	360 d
GWSP [m NN] Ist_BR-WE56	301.01	300.95	300.92	300.90	300.87	300.86	300.82	300.76	300.73	300.70	300.67	300.66	300.65
GWSP [m NN] sim_BR-WE56	300.50	300.46	300.42	300.40	300.37	300.33	300.29	300.22	300.19	300.16	300.13	300.11	300.10
Differenz [m]	-0.51	-0.49	-0.50	-0.50	-0.50	-0.52	-0.53	-0.54	-0.54	-0.54	-0.55	-0.55	-0.55

Des weiteren wurde die Auswirkung der Simulationsvariante im Vergleich zur Ist Variante anhand einer Häufigkeitsverteilung der Grundwasserspiegellage über den auftretenden Grundwasserspiegelschwankungsbereich mit einer Klassenteilung von 5 cm berechnet und dargestellt (Abbildung 42). Abbildung 43 zeigt schließlich den Vergleich der Grundwasserstandsganglinien für die diskutierten Varianten.

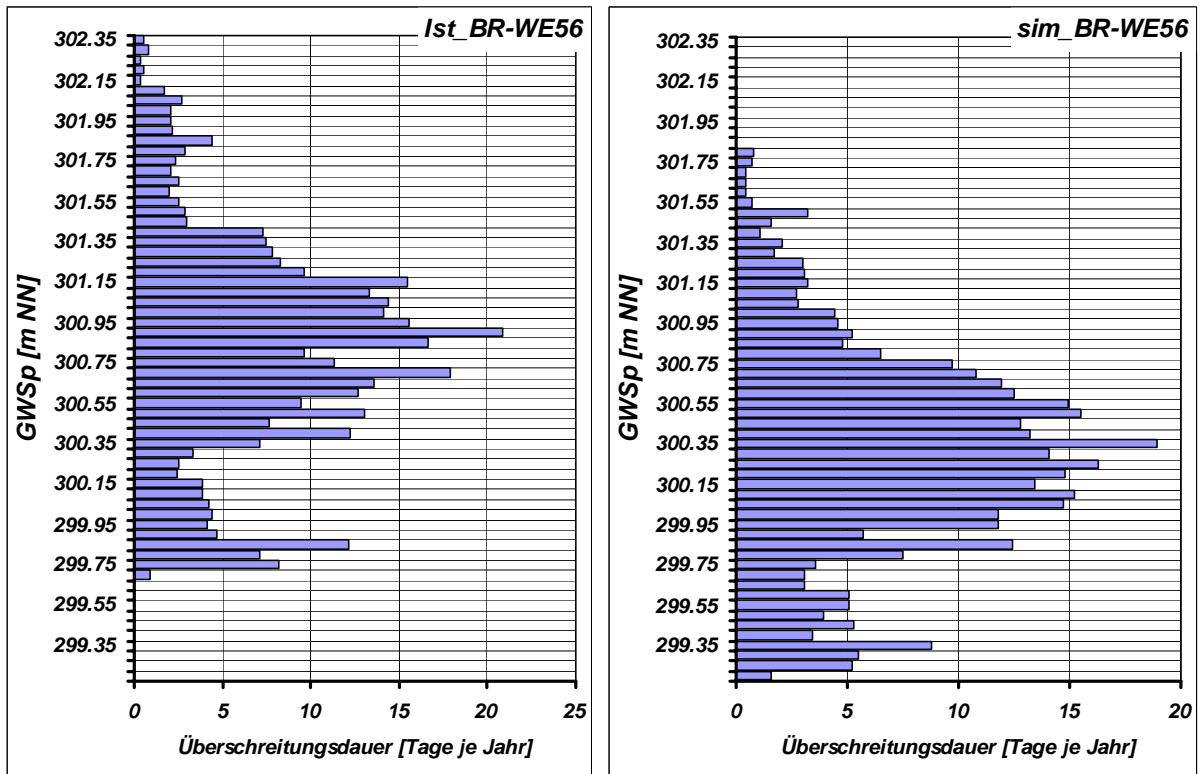


Abbildung 42: Häufigkeitsverteilung der Grundwasserspiegellagen über den Grundwasserschwankungsbereich an der Beobachtungsstelle BR_WE56 im Vergleich der Ist Variante zur Sim Variante

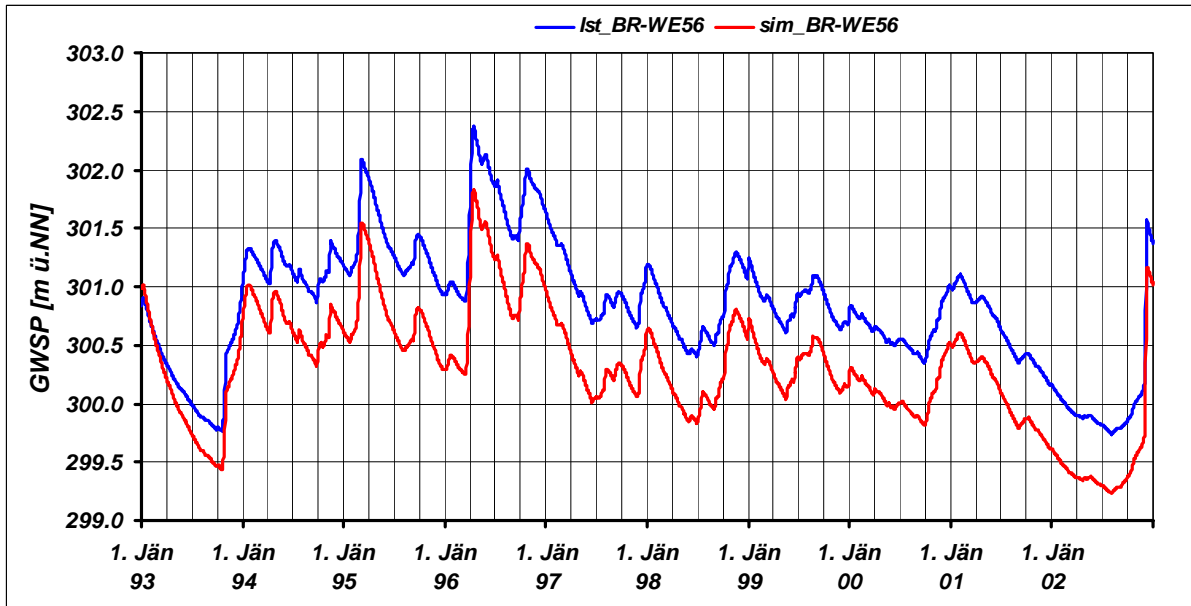
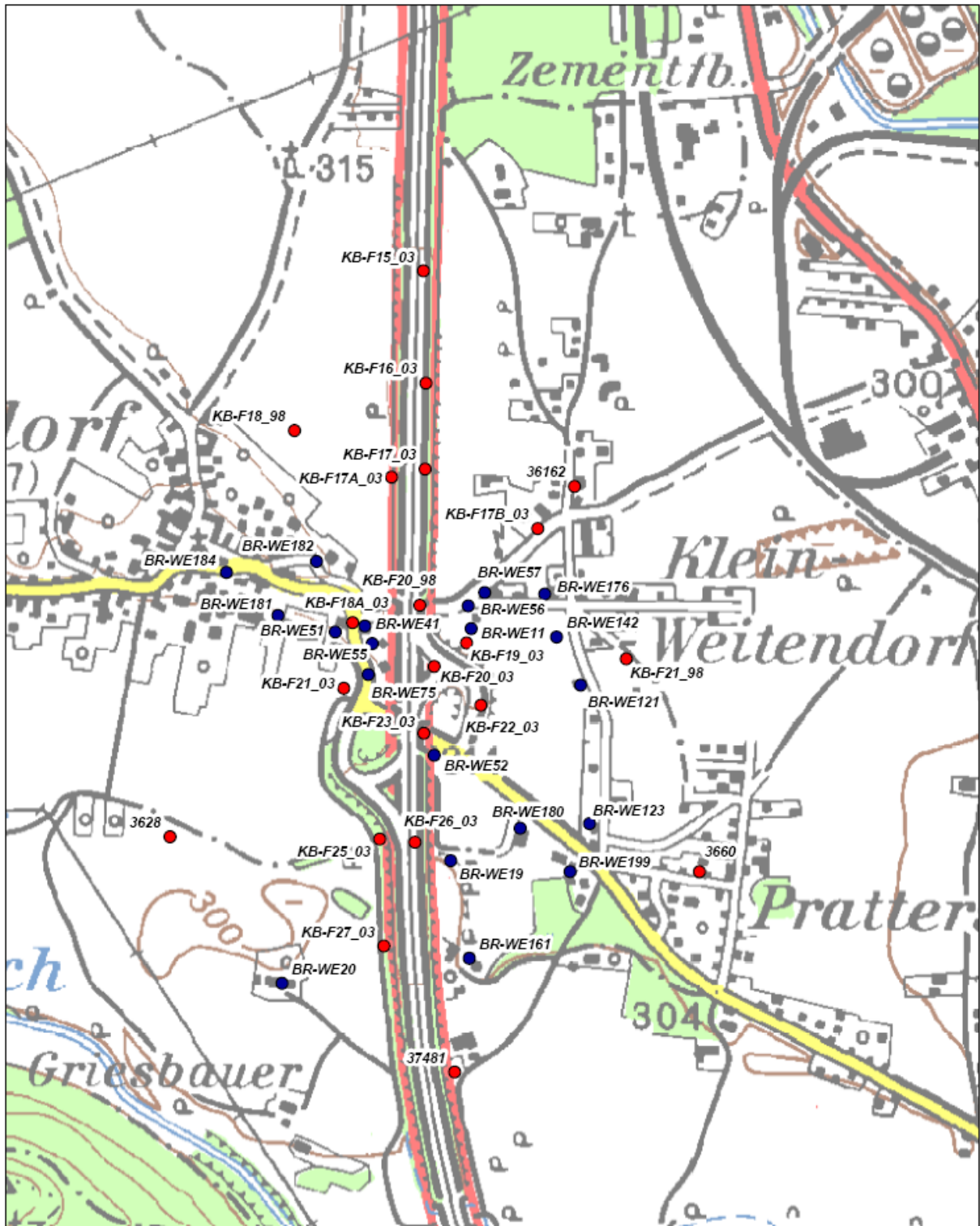


Abbildung 43: Vergleich der Ganglinien der Grundwasserspiegellagen an der Beobachtungsstelle BR-WE56 zwischen Ist Variante und Sim Variante

Diese Auswertungen wurden für alle in Abbildung 44 dargestellt Beobachtungspunkte durchgeführt. Die Ergebnisse sind zusammenfassend in Tabelle 9 dargestellt.



Observation Points

- HL_AG
- BGG



Abbildung 44: Lage der Observation Points zur punktuellen Beurteilung der Auswirkung der geplanten Wanne auf die Grundwasserspiegellage im Raum Weitendorf – Werndorf.

Tabelle 9: Zusammenfassung der Auswertung der Auswirkung (negative Werte = Absenkung, positive Werte = Aufspiegelung) der Wanne Weitendorf auf die Grundwasserspiegellagen an den Beobachtungspunkten in Abbildung 44 zu unterschiedlichen hydrologischen Zuständen (NGW, HGW, MGW).

Observation Point	Auswirkung [m]		
	NGW	HGW	MGW
BR-WE11	-0.44	-0.54	-0.48
BR-WE19	-0.25	-0.27	-0.27
BR-WE20	0.06	0.08	0.07
BR-WE41	0.19	1.07	0.79
BR-WE51	0.03	0.98	0.70
BR-WE52	-0.33	-0.49	-0.48
BR-WE55	0.04	0.59	0.44
BR-WE56	-0.51	-0.53	-0.52
BR-WE57	-0.18	-0.24	-0.20
BR-WE75	0.30	0.86	0.67
BR-WE121	-0.04	-0.08	-0.06
BR-WE123	-0.08	-0.11	-0.10
BR-WE142	-0.05	-0.08	-0.06
BR-WE161	-0.05	-0.06	-0.06
BR-WE176	-0.04	-0.07	-0.05
BR-WE180	-0.14	-0.16	-0.16
BR-WE181	0.07	0.20	0.14
BR-WE182	0.00	0.38	0.31
BR-WE184	0.04	0.06	0.04
BR-WE199	-0.09	-0.11	-0.10
KB-F27_03	0.06	0.07	0.06
KB-F26_03	-0.44	-0.48	-0.48
KB-F25_03	0.56	0.68	0.61
KB-F23_03	-0.17	-0.38	-0.35
KB-F22_03	-0.14	-0.24	-0.18
KB-F21_03	0.13	0.45	0.38
KB-F20_03	-0.45	-0.51	-0.59
KB-F19_03	-0.38	-0.55	-0.47
KB-F18A_03	0.00	0.81	0.58
KB-F17B_03	-0.02	-0.04	-0.03
KB-F17A_03	0.07	0.42	0.30
KB-F17_03	0.12	0.39	0.13
KB-F/6_03	0.00	0.03	0.00
KB-F21_98	-0.03	-0.06	-0.05
KB-F20_98	0.42	2.78	2.16
KB-F18_98	0.04	0.06	0.05
37481	0.00	0.00	-0.01
36162	-0.01	-0.02	-0.02
3660	-0.05	-0.06	-0.06
3628	0.08	0.12	0.10

4.4 Auswirkung der Versickerungsbecken

Die im Rahmen der Errichtung der Koralmbahn anfallenden Meteorwässer sollen über humusierte und bewachsene Versickerungsbecken in das Grundwasser rückversickert werden, um die Grundwasserbilanz des Grazer Feldes nicht negativ zu beeinflussen. Da diese im regionalen Maßstab punktuelle Versickerung Auswirkungen auf den Grundwasserspiegel hat, war es erforderlich, diese auf Basis des Grundwassermodells quantitativ zu prognostizieren. Seitens der Planung wurden die Lage der Becken, die Größe der Becken und des zugehörigen Einzugsgebietes, die Höhenlage der Beckensohle sowie das Bemessungs-Niederschlagsereignis vorgegeben. Die Lage der Versickerungsbecken ist in Beilage 1 dargestellt.

4.4.1 Grundlagen zur Bewertung

4.4.1.1 Versickerungsleistung der Becken

Im Zuge der Errichtung der Eisenbahntrasse für die Koralmbahn im Streckenabschnitt zwischen Feldkirchen und Weitendorf sind 9 Versickerungsbecken mit einer Fläche zwischen 130 und 3240 m² zur Verbringung von Niederschlagswässern in den Untergrund geplant. Zur Beurteilung der Auswirkungen der Versickerung auf den Grundwasserspiegel wurde der zeitliche Verlauf des Wasseraustritts an der Unterkante der Versickerungsbecken mit Hilfe des Finite Elemente Modells HYDRUS-2D (SIMUNEK et al., 1992) berechnet. Da die Wasserleitfähigkeit des Bodens mit dem Wassergehalt variiert, der wiederum von der Saugspannung abhängt, ergibt sich eine nichtlineare Gleichung für die Beschreibung der Wasserbewegung in Medien mit variabler Sättigung. In HYDRUS-2D wird zu diesem Zweck die RICHARD'S Gleichung gelöst.

Als Grundlage für die Ermittlung des Versickerungsverlaufs in den Becken wurde der Bemessungsniederschlag nach dem Modell von Lorenz-Skoda mit einer 100-jährigen Eintrittswahrscheinlichkeit in der Höhe von 159 mm/12h (Mittelwert von den Stationen Graz Gries, Werndorf, Hengsberg, Wettmannstätten) verwendet. Je nach Verhältnis zwischen Beckenfläche und zugehörigem Einzugsgebiet ergibt sich daraus der Zufluss der Niederschlagswässer sowie die gesamte zu versickernde Niederschlagsmenge. Der zeitliche Verlauf des Zuflusses wurde analog der Abhängigkeit der Regenspende von der Regendauer mit einer exponentiellen Funktion 3. Ordnung nachgebildet. Berechnet wurde die vertikale Wasserbewegung durch eine 40 cm mächtige Humusschicht. Die Parametrisierung der hydraulischen Eigenschaften des Bodens erfolgte nach dem Modell von VAN GENUCHTEN-MUALEM (VAN GENUCHTEN, 1980). Die der Berechnung zugrunde liegenden wichtigsten Bodenparameter sind:

- Residualer Bodenwassergehalt 5 %
- Gesättigter Bodenwassergehalt 40 %
- Gesättigte hydraulische Leitfähigkeit 0.06 cm/min
- Ungesättigte hydraulische Leitfähigkeit 0.00054 cm/min

Zu Beginn der Versickerung wurde ein Wassergehalt der Bodenschicht nahe der Feldkapazität angenommen, so dass das infiltrierende Niederschlagswasser sofort zur Grundwasserneubildung beiträgt. Als Randbedingungen wurden der variable Zufluss in das Versickerungsbecken (variable flux condition) und an der Unterkante freies Ausfließen (free drainage) verwendet.

Wenn die Zuflussrate des Niederschlagswassers die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit des Bodens übersteigt, kommt es im Versickerungsbecken zu einem Überstau, der zu einem größeren hydraulischen Gradienten führt, welcher wiederum eine höhere Versickerungsleistung bewirkt. Abbildung 45 zeigt die berechnete Entwicklung der Versickerungsmenge pro Versickerungsbecken. Für jedes Versickerungsbecken wird die größte Versickerungsleistung aufgrund der exponentiellen Zulauffunktion und der resultierenden Steigerung des hydraulischen Gradienten ca. 4 Stunden nach Beginn (am 11.8.2002 um 00:00 Uhr) des Regenereignisses erreicht. Bis zum Ende des Regenereignisses nach 12 Stunden fällt die Versickerungsleistung moderat ab. Nach diesem Zeitpunkt wird der verbleibende Überstau in jedem Versickerungsbecken rasch abgebaut, was beim Becken GSA2 mit 13,5 Stunden am längsten dauert.

Jede der in Abbildung 45 dargestellten Versickerungsganglinien wird als Infiltrationsrandbedingung bei der regionalen Grundwassermodellierung angesetzt. Wenn der Grundwasserspiegel die Unterkante des Versickerungsbeckens erreicht, kann für diesen Zeitraum kein Wasser aus dem Versickerungsbecken in den Untergrund abgegeben werden. Die Fließzeit des Regenwassers vom Ort des Niedergangs bis zum Versickerungsbecken wurde nicht berücksichtigt.

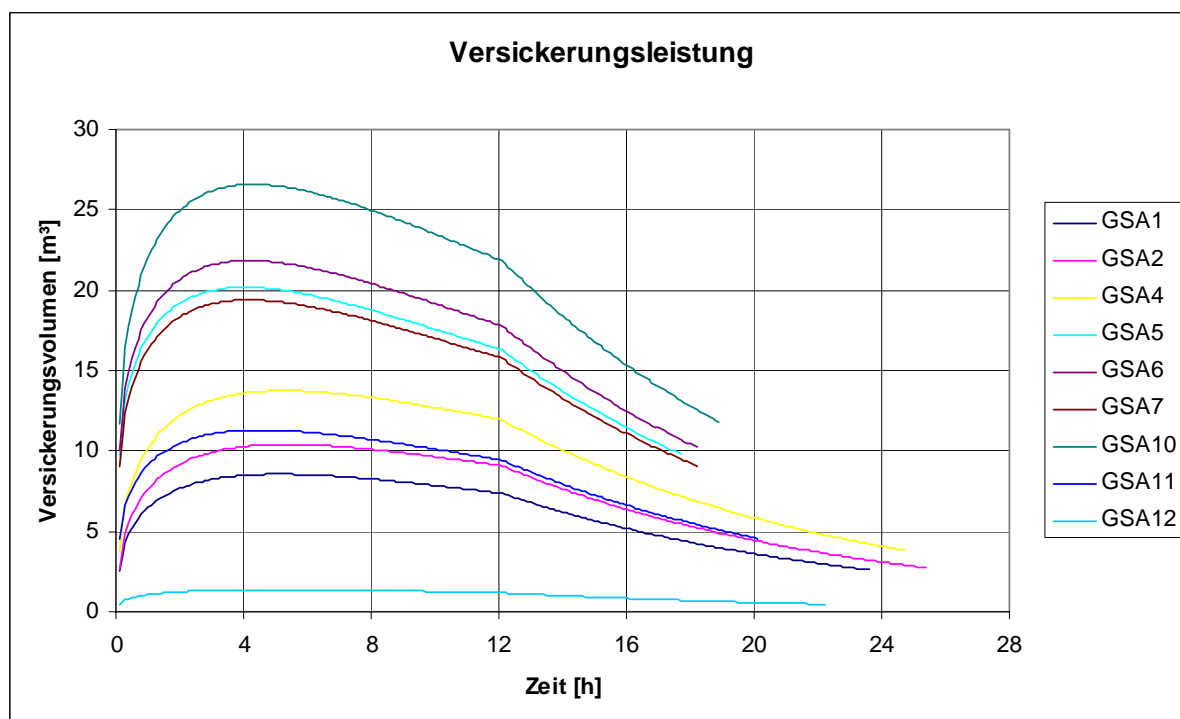


Abbildung 45: Versickerungsganglinien der 9 Versickerungsbecken

4.4.1.2 Starkniederschlagsereignis und flächenhafte Grundwasserneubildung

Geht man einem extremen Niederschlagsereignis als Grundlage für die Bemessung der Versickerungsbecken aus, so ist hinsichtlich der Auswirkung auf die Grundwasserverhältnisse zu berücksichtigen, dass dieses Niederschlagsereignis nicht nur auf die Becken- und deren Einzugsgebietsfläche wirkt, sondern im gesamten Bereich des Grundwassergebietes zu einer erhöhten Grundwasserneubildung führt, die den Grundwasserspiegel anhebt. Die Auswirkung eines Niederschlagsereignisses auf die Grundwasserneubildung ist aber entscheidend vom Bodenwasserhaushalt zum Ereigniszeitraum abhängig.

Zur Beurteilung dieser Rahmenbedingungen wurden seitens der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik – Regionalstelle Steiermark eine Auswertung der Starkregenereignisse für den Zeitraum 1971 – 2000 an den Stationen Graz/Uni und Graz/Thalerhof durchgeführt und zur Verfügung gestellt. Eine Auswertung dieser Statistiken zeigt, dass Starkniederschlagsereignisse mit Tagessummen > 60 mm in größerer Häufigkeit ausschließlich in den Sommermonaten Juli bis September auftreten.

Mit Hilfe des Einschicht – Bodenwasserhaushaltsmodells (FANK, 1999) wurde, für eine für das Grazer Feld typische nutzbare Feldkapazitäten von 175 mm der Bodenwasserhaushalt für den Zeitraum 1992 bis 2003 und daraus die mittlere Jahresganglinie berechnet und in Abbildung 46 dargestellt. Diese Auswertung zeigt, dass Anfang August, wo am häufigsten Starkregenereignisse auftreten ein Bodenwasserhaushaltsdefizit von etwa -90 mm zu erwarten ist.

In weiterer Folge wurde aus der Niederschlagsganglinie der Station Graz/Thalerhof ein Zeitraum ermittelt, an dem das Bodenwasserdefizit in etwa dem mittleren entsprach und auch ein reales Niederschlagsereignis stattfand. Schlussendlich wurde der Niederschlag des 11.08.2002 (58 mm) durch das Bemessungsniederschlagsereignis ersetzt. Das Bodenwasserdefizit an diesem Tag lag bei -92 mm. Mit Hilfe des Einschicht – Bilanzmodells wurde danach die Grundwasserneubildungsganglinie für diesen typischen Boden berechnet und als Randbedingung für das Grundwassermodell zur Verfügung gestellt.

Die Auswirkung eines derartigen Starkregenereignisses auf die Grundwasserneubildung ist naturgemäß nicht auf den Ereigniszeitpunkt beschränkt, wie dies in Abbildung 47 dargestellt ist. Unter den hier definierten Randbedingungen bewirkt das Starkniederschlagsereignis vom 11.08.2004 einen raschen Anstieg des Bodenwassergehaltes und eine Neubildung von etwa 75 mm. In der Folge bleibt der Bodenwassergehalt naturgemäß sehr hoch (nahe Sättigung) und darauf folgen kleinere Niederschlagsereignisse, die im Normalfall zu geringfügigen Erhöhungen des Bodenwassergehaltes führen, schlagen sich in weiteren Neubildungsereignissen nieder. Erst die Niederschläge in der 2. Septemberhälfte bewirken auch unter natürlichen Rahmenbedingungen den Anstieg des Bodenwassergehaltes bis nahe Sättigung. Unter der Annahme des Extremereignisses im August schlagen diese Niederschläge in weiteren bedeutsamen Neubildungsereignissen durch. Ab Oktober sind dann die Auswirkungen des Starkregenereignisses vorbei, die zeitliche Entwicklung von Bodenwasserhaushaltsdefizit und Neubildungsverteilung verläuft in beiden Varianten ident.

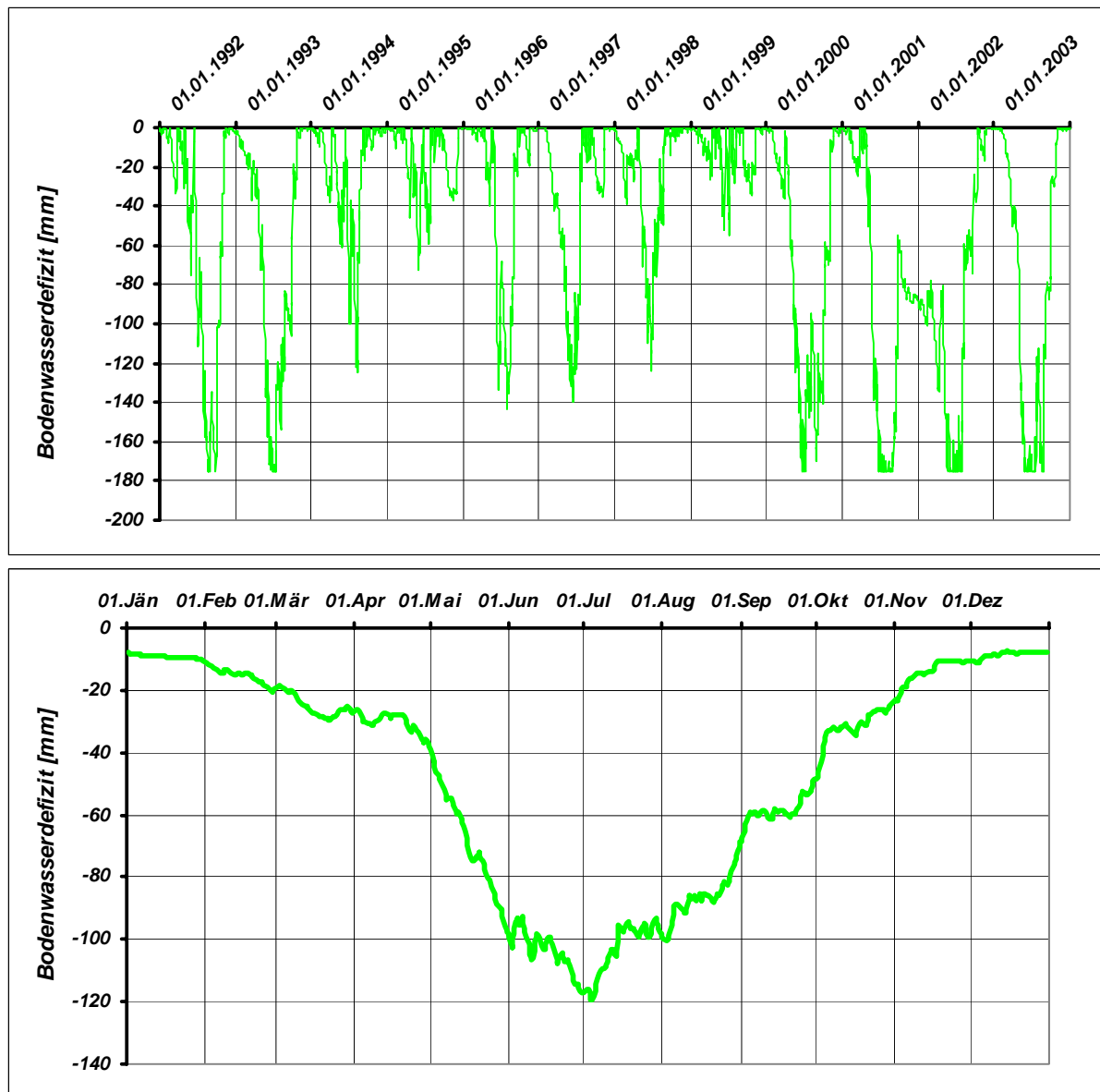


Abbildung 46: Ganglinie des Bodenwasserhaushaltsdefizits für einen typischen Boden im Grazer Feld: Ganglinie 1992 – 2003 (oben) und mittlere Jahresganglinie (unten)

Aus diesen Auswertungen wird klar, dass ein derartiges Extremereignis

- jedenfalls auch hinsichtlich der flächenhaften Grundwasserneubildung zu bewerten ist
- die Bewertung hinsichtlich der Auswirkung auf die Grundwasserverhältnisse ausschließlich durch eine instationäre Berechnung unter Einbindung der zeitlich differenzierten Grundwasserneubildung vorgenommen werden kann.

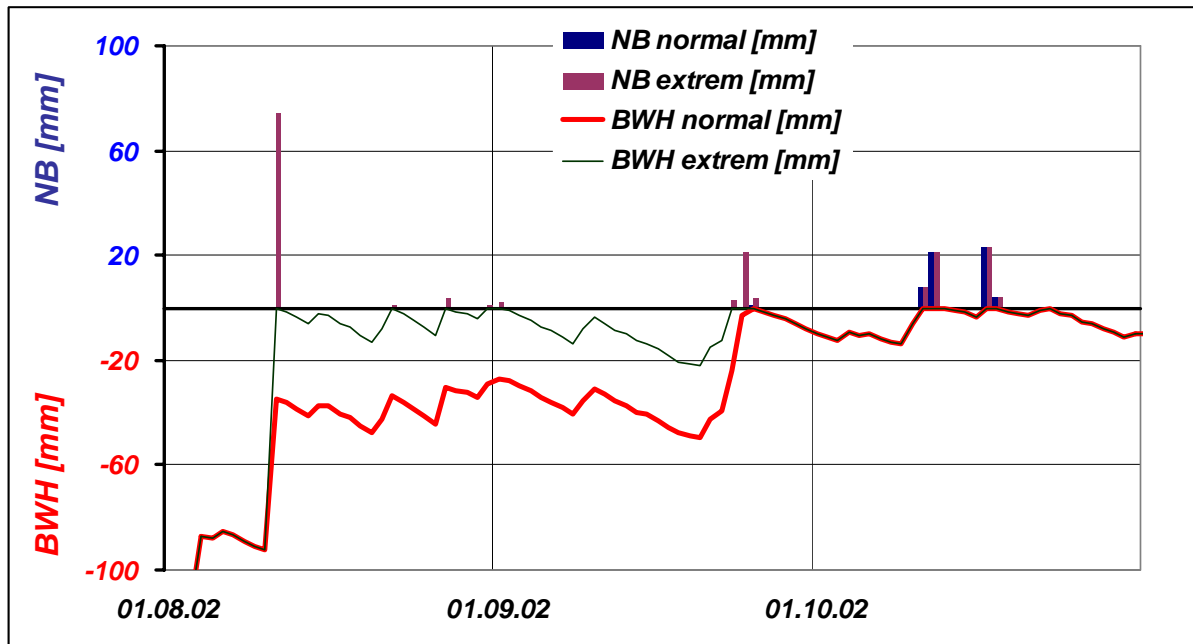


Abbildung 47: Auswirkung des Starkregenereignisses auf die flächenhafte Grundwasserneubildung im Grazer Feld. Vergleich von Bodenwasserhaushaltsdefizit (BWH) und Tagessummen der Grundwasserneubildung (NB) zwischen normaler Niederschlagsverteilung und Einbindung eines Extremereignisses

4.4.2 Grundwassermodell - Simulationsrechnungen und deren Ergebnisse

Im Bereich der Versickerungsbecken wurde das FE-Netz verfeinert und FE-Netzknoten soweit verschoben, dass mindestens ein Netzknoten in jedem Becken vorhanden ist. An diesem Knoten wurde die Zuflussganglinie für die Simulation der Versickerungsmenge als Randbedingung definiert. Für die Ermittlung der Auswirkung der Versickerungen wurden zwei Simulationen mittels des instationären Modells durchgeführt und mit dem Istzustand verglichen. Die Variante „Starkregen ohne Becken“ simuliert die Auswirkung des Bemessungsstarkregens ohne die Versickerungen in den Versickerungsbecken. Dabei wurde in die Ganglinien der Grundwasserneubildung das Starkregenereignis am 11.8.2002 integriert (vgl. Kap. 4.4.1.2). Das Niederschlags-Extremereignis von 159 mm in 12 Stunden verursacht dabei am 11.8.2002 eine Grundwasserneubildung von 75 mm. Die Variante „Starkregen mit Becken“ simuliert die Auswirkung des Starkregenereignisses inklusive der Versickerung in den Versickerungsbecken. Für die Darstellung der Auswirkungen der Versickerungen wurden für jedes Becken die Grundwasserganglinien der beiden Simulationsvarianten ermittelt und gemeinsam mit der Grundwasserganglinie im Istzustand und der Höhe der Beckensohle dargestellt (Abbildung 48 bis Abbildung 56). Für den Fall, dass die berechneten Grundwasserspiegelganglinien die Sohlhöhenlage der Becken überschreiten, wird diese naturgemäß nicht mehr dargestellt, da über die Aufspiegelung in den Becken aus dem Grundwassermodell heraus keinerlei Aussagen getroffen werden können.

Die Kenndaten der Becken-Versickerung sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Kenndaten der Versickerungsbecken, der Becken – Versickerungsrate und des Grundwasserspiegels als Grundlage für die Simulation der Auswirkung der Versickerungsbecken auf die Grundwassersituation

Becken	Fläche [m ²]	EZG [m ²]	Sohl- höhe [m ü.A.]	GWSP 11.8.02 [m ü.A.]	Differenz GWSP 11.8.02- Sohle [m]	HGW 1993-2003 [m ü.A.]
GSA1	715	9256	334.60	327.50	7.10	328.05
GSA2	750	11621	333.80	327.18	6.62	327.76
GSA4	1050	15179	324.75	321.34	3.41	322.50
GSA5	2700	18518	321.20	319.47	1.73	320.88
GSA6	2800	20472	318.50	316.54	1.96	317.80
GSA7	2500	18129	315.80	314.76	1.04	315.75
GSA10	3240	25490	303.80	303.80	0.00	304.15
GSA11	1250	11260	303.40	303.40	0.00	303.01
GSA12	130	2725	305.50	305.50	0.00	305.26

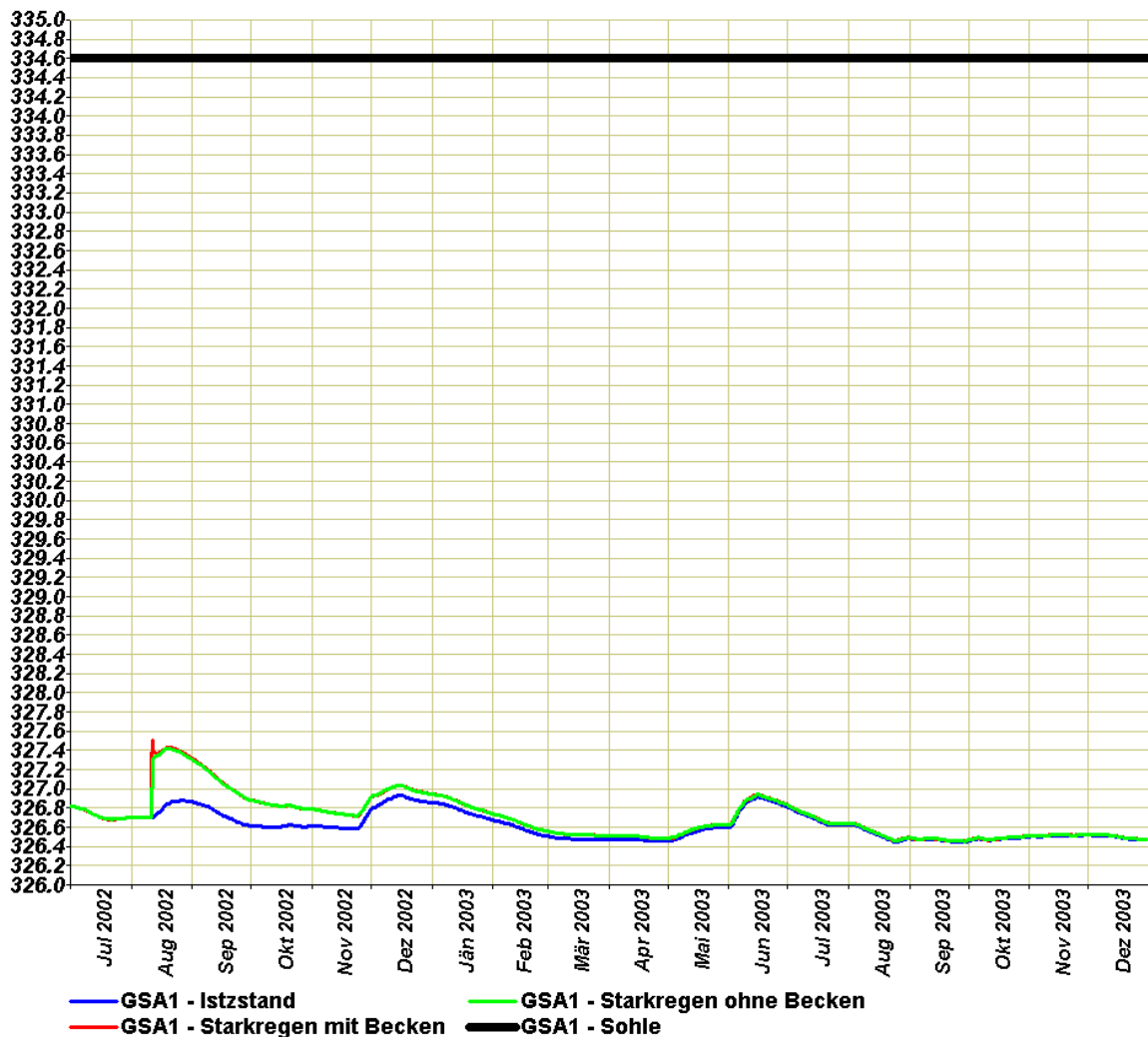


Abbildung 48: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA1.

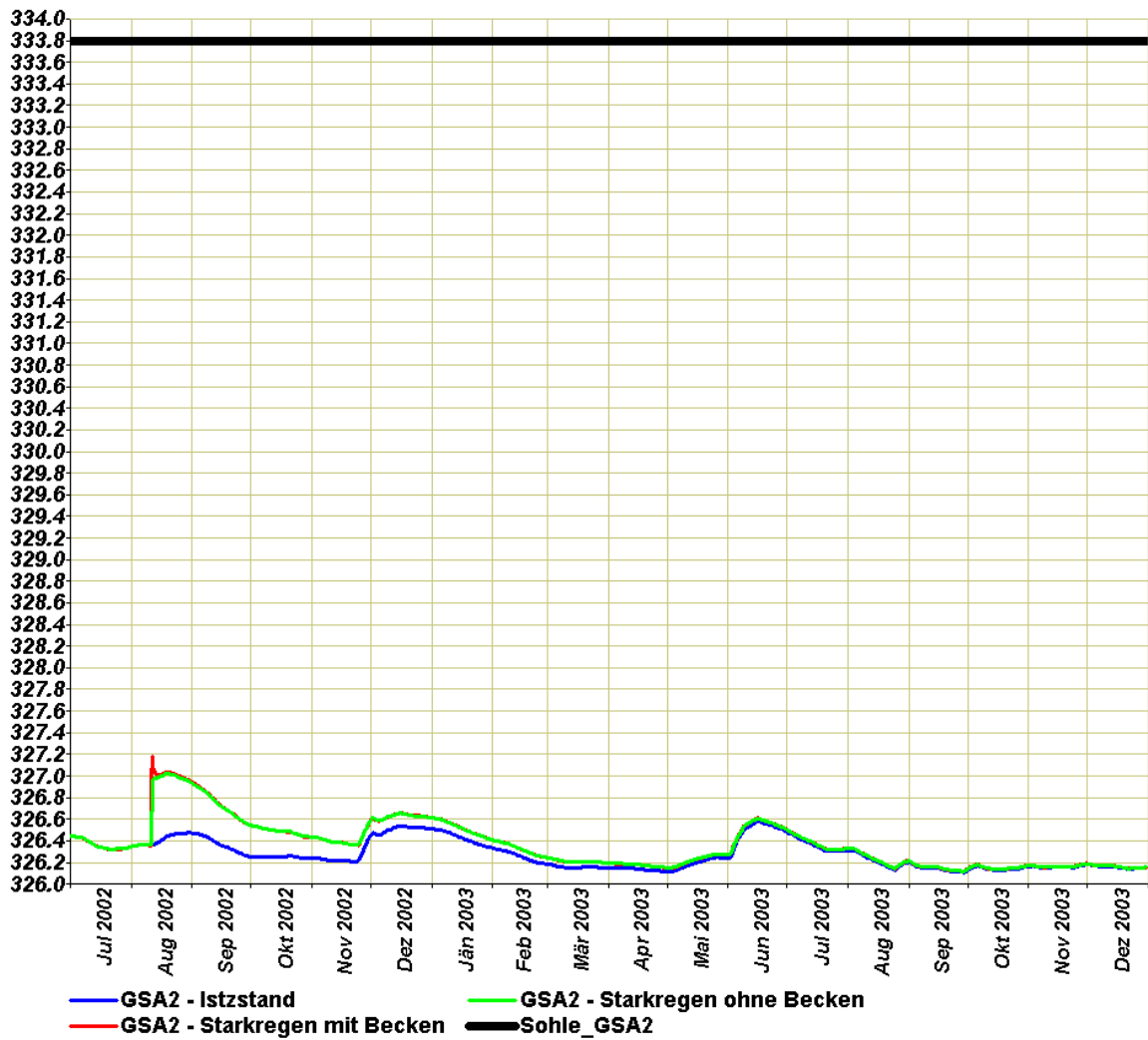


Abbildung 49: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA2.

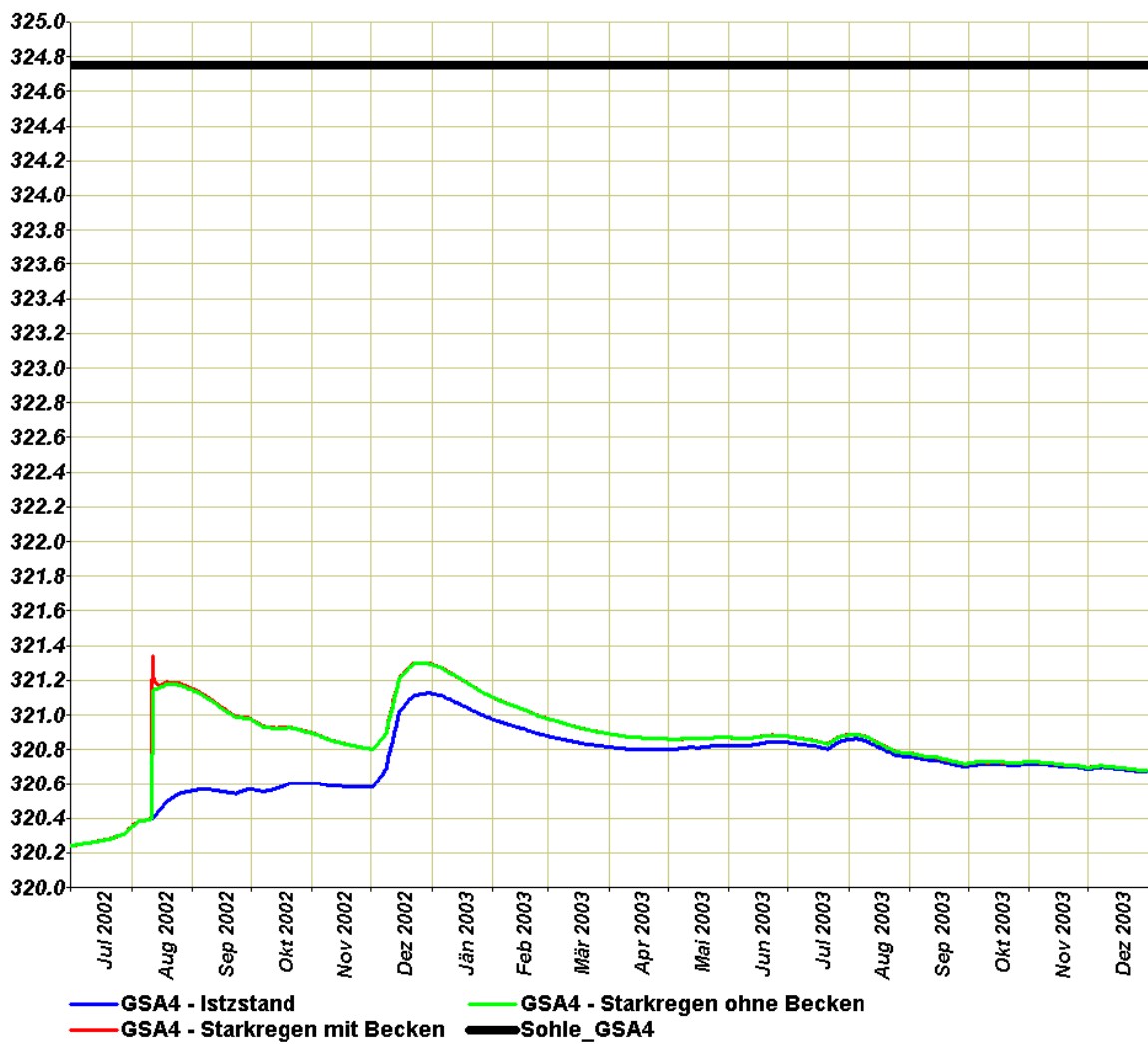


Abbildung 50: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA4.

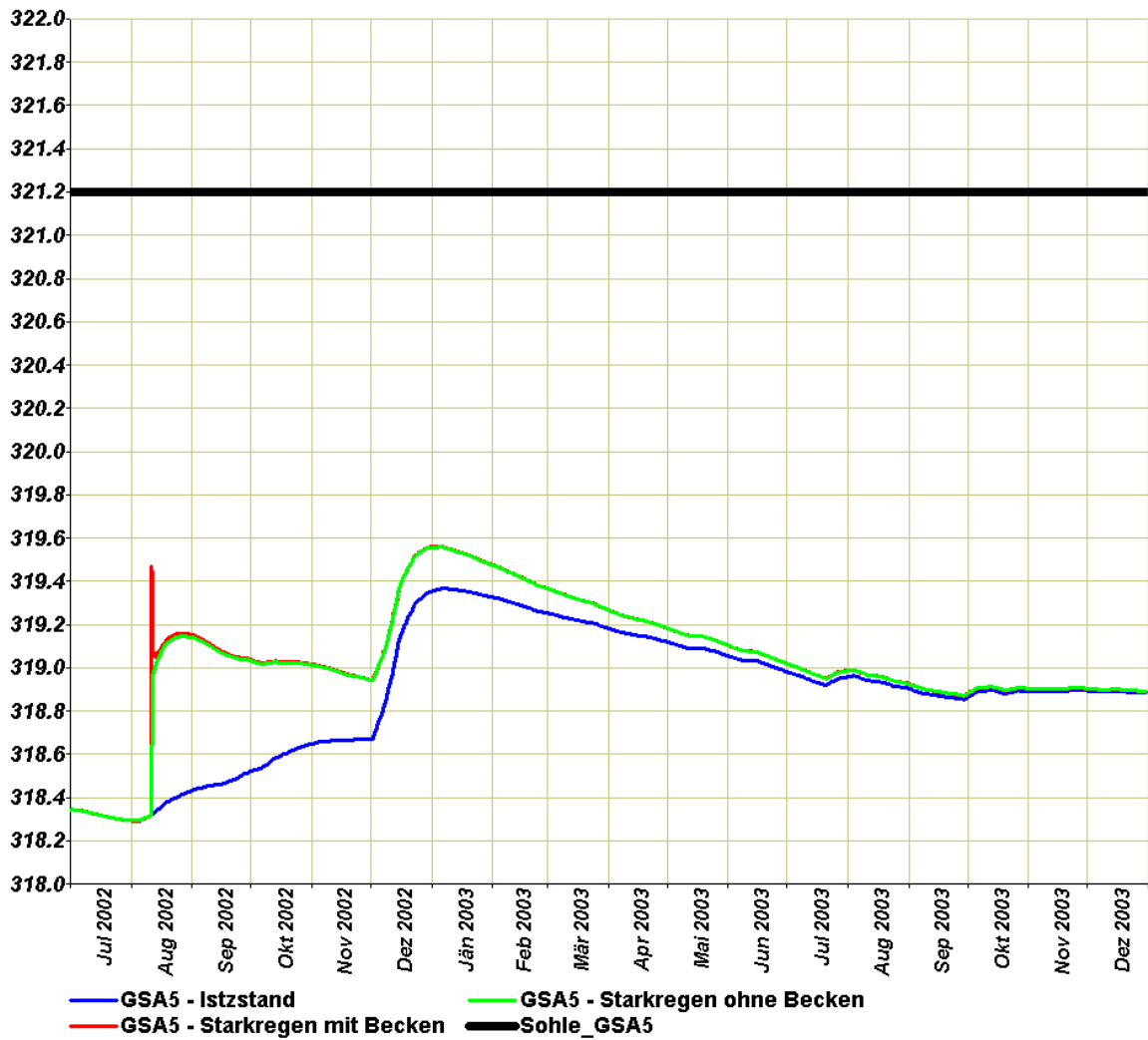


Abbildung 51: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA5.

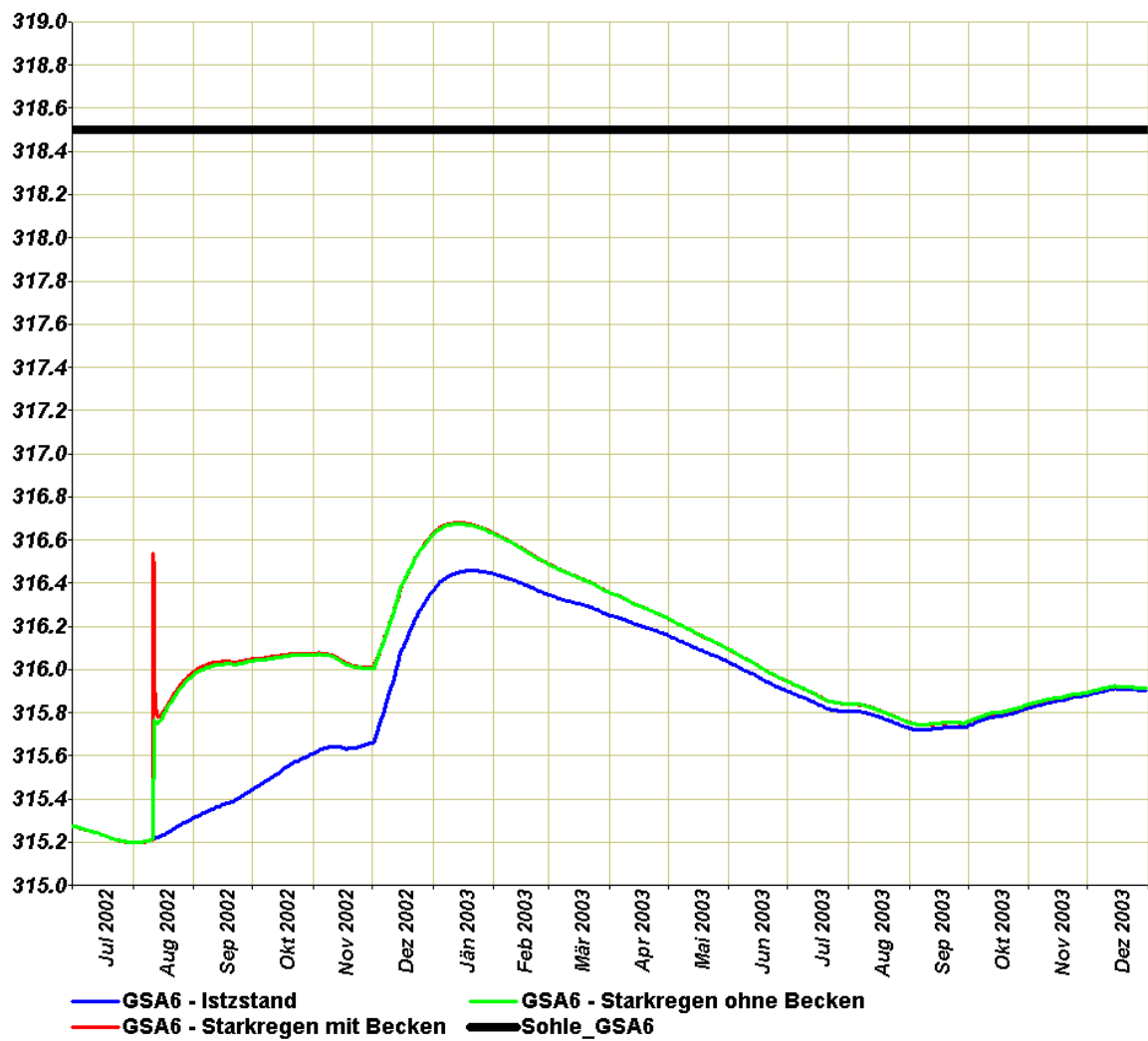


Abbildung 52: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA6.

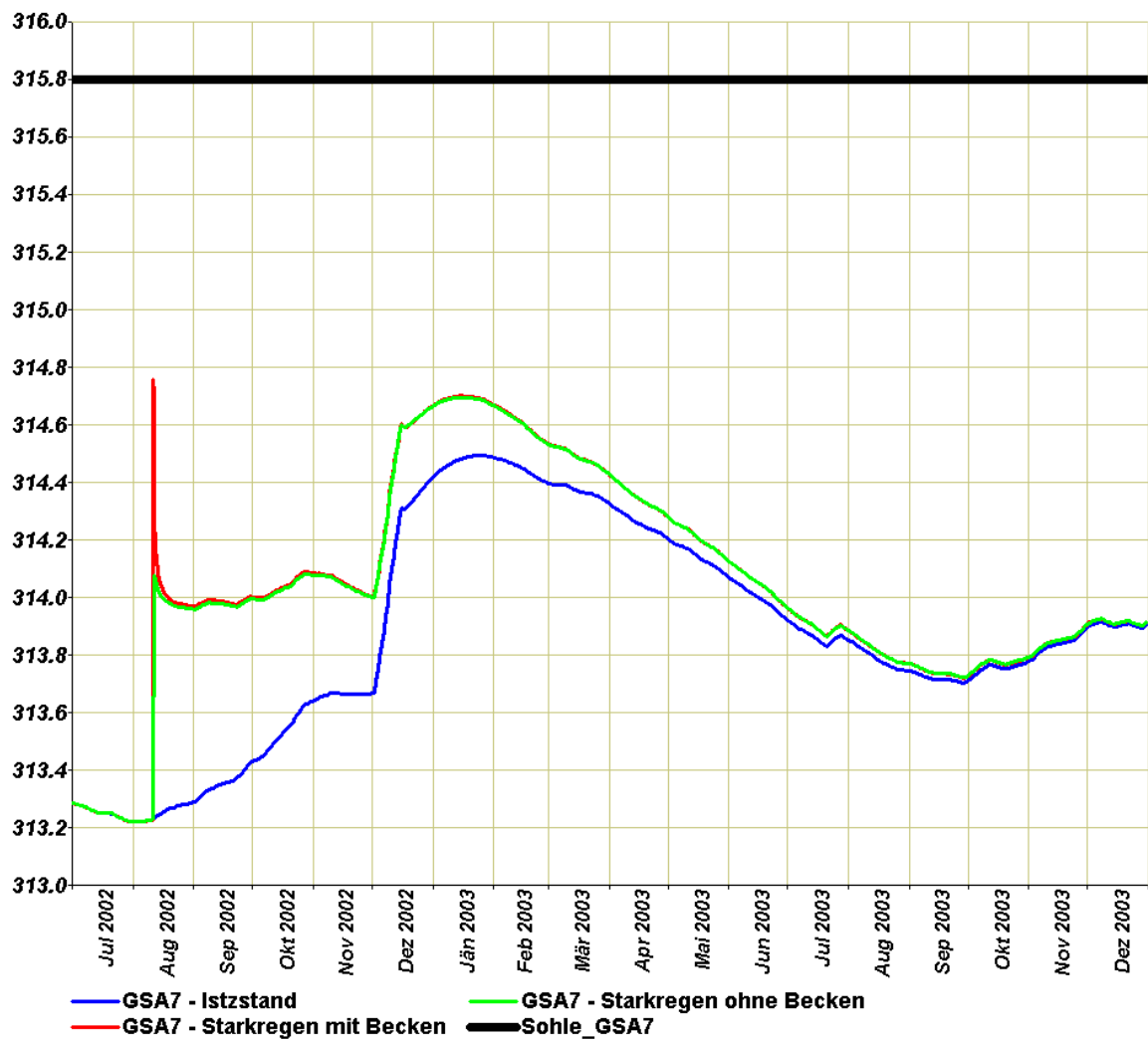


Abbildung 53: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA7.

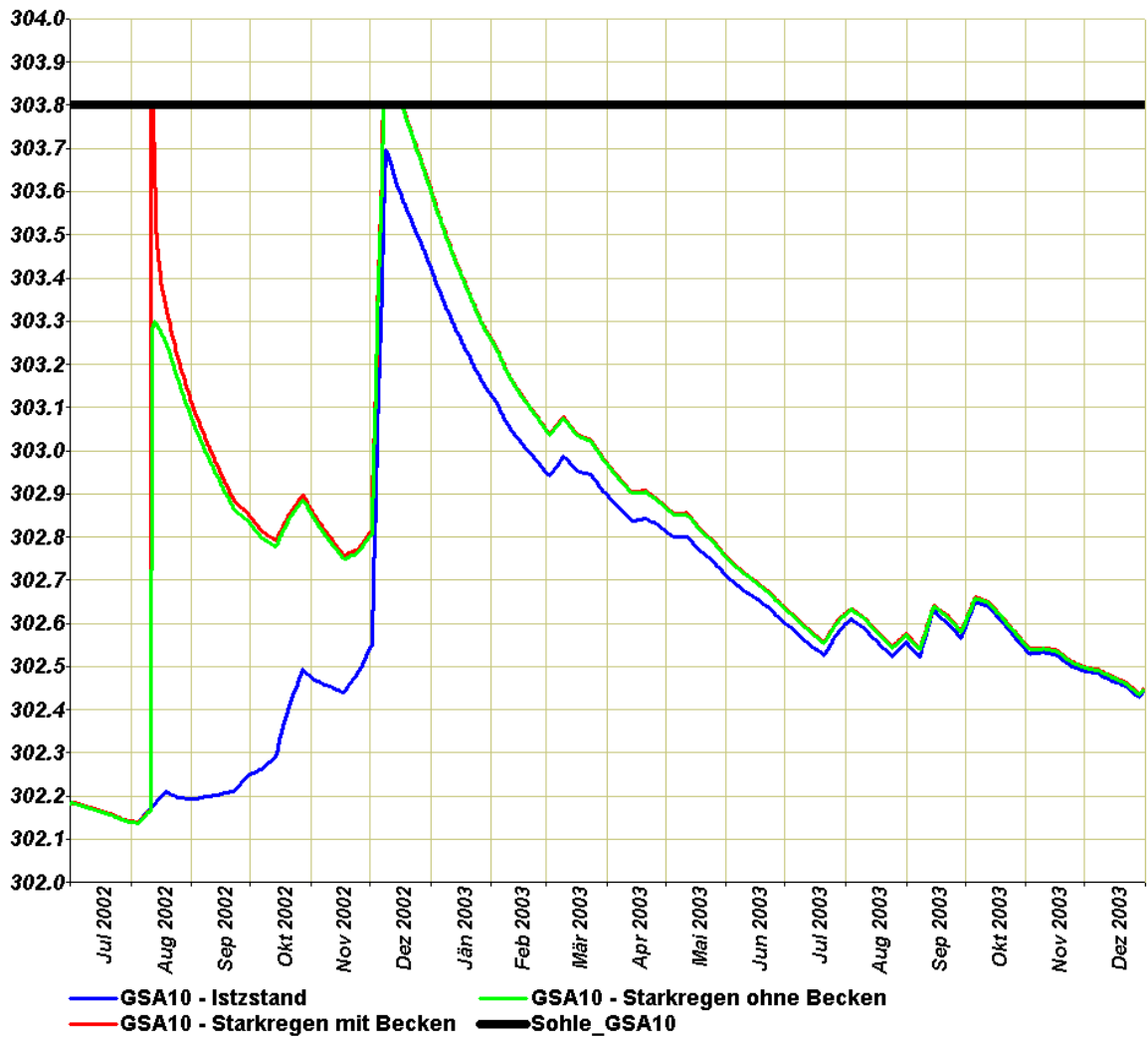


Abbildung 54: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA10.

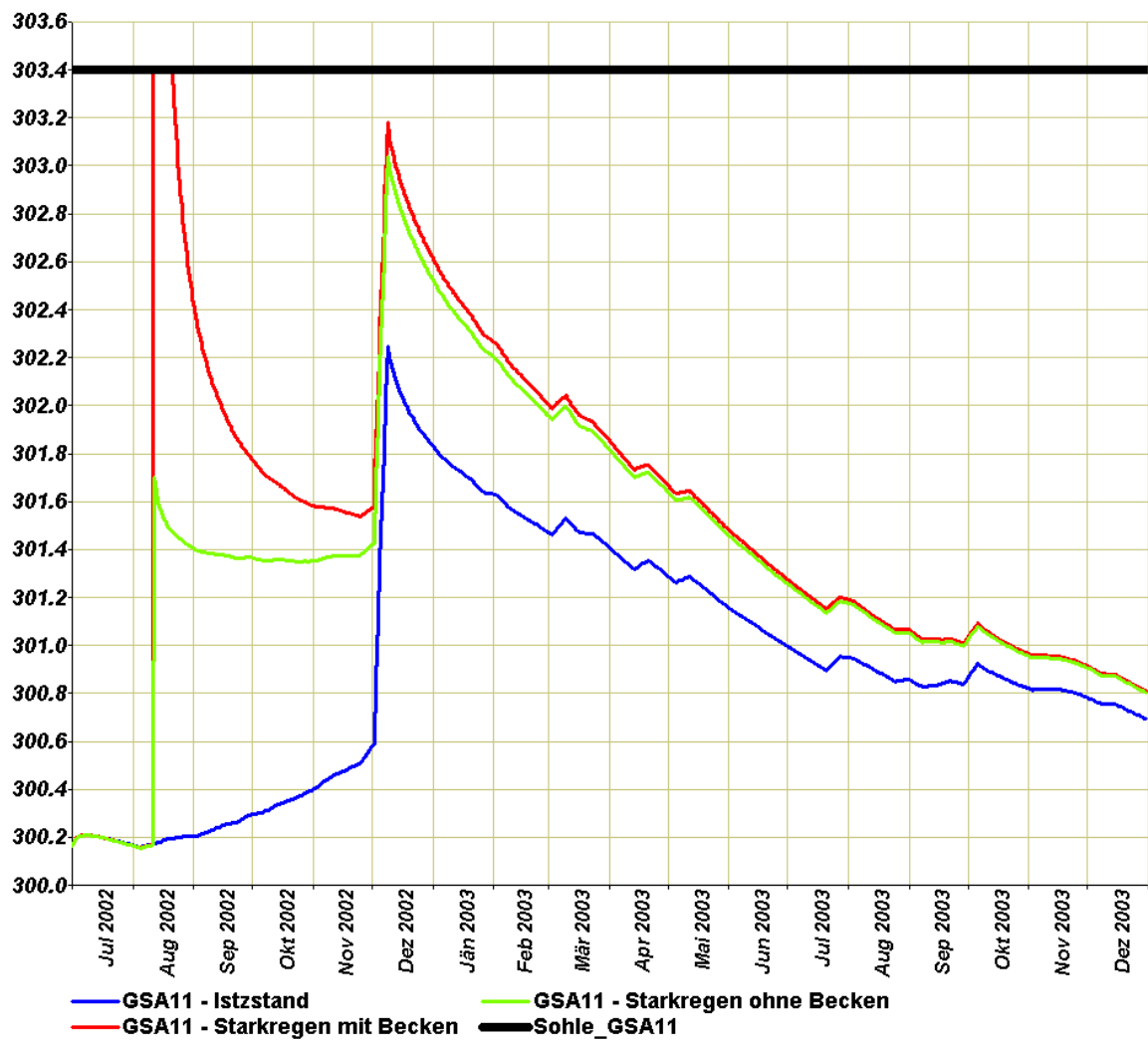


Abbildung 55: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA11.

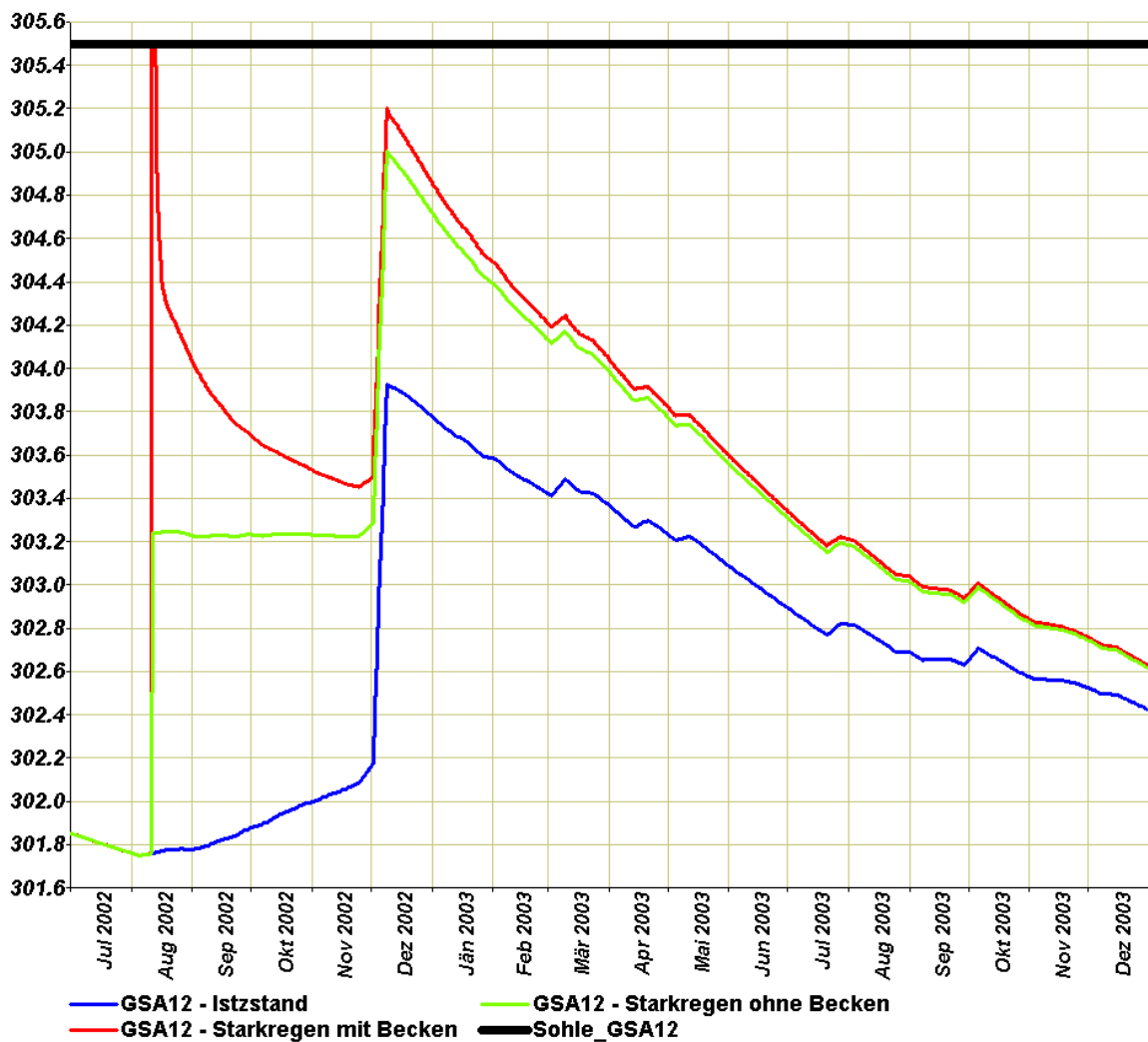


Abbildung 56: Ganglinienvergleich zwischen Istzustand, Simulation des Starkregenereignisses mit und ohne Versickerungsbecken für das Sickerbecken GSA12.

Die Auswirkung der Versickerung der Meteorwässer über Versickerungsbecken auf die regionalen Grundwasserverhältnisse sind als Grundwasserspiegeldifferenzen- und Grundwasserschichtenlinienpläne in Abbildung 57 für den nördlichen Bereich und in Abbildung 58 für den südlichen Bereich des Untersuchungsgebietes dargestellt. Die Auswirkung auf die Spiegellage ist als Differenz zwischen den Varianten „Starkregen mit Becken“ minus „Starkregen ohne Becken“ farblich hervorgehoben, die Relevanz für die Strömungsverhältnisse als Gegenüberstellung der bezughabenden Grundwasser – Isolinien für den 11.08.2002. Daraus ist ersichtlich, dass sich sowohl die Anhebung des Grundwasserspiegels als auch die Veränderung der Grundwasserströmungsverhältnisse nur in einem sehr begrenzten Bereich im Umfeld der Sickerbecken auswirken wird. Aufgrund der Kleinräumigkeit sind Auswirkungen auf die Grundwasserströmungsverhältnisse in den Isoliniendarstellungen des regionalen Modells nicht bzw. nur im nächsten Umgebungsbereich der Versickerungsbecken erkennbar.

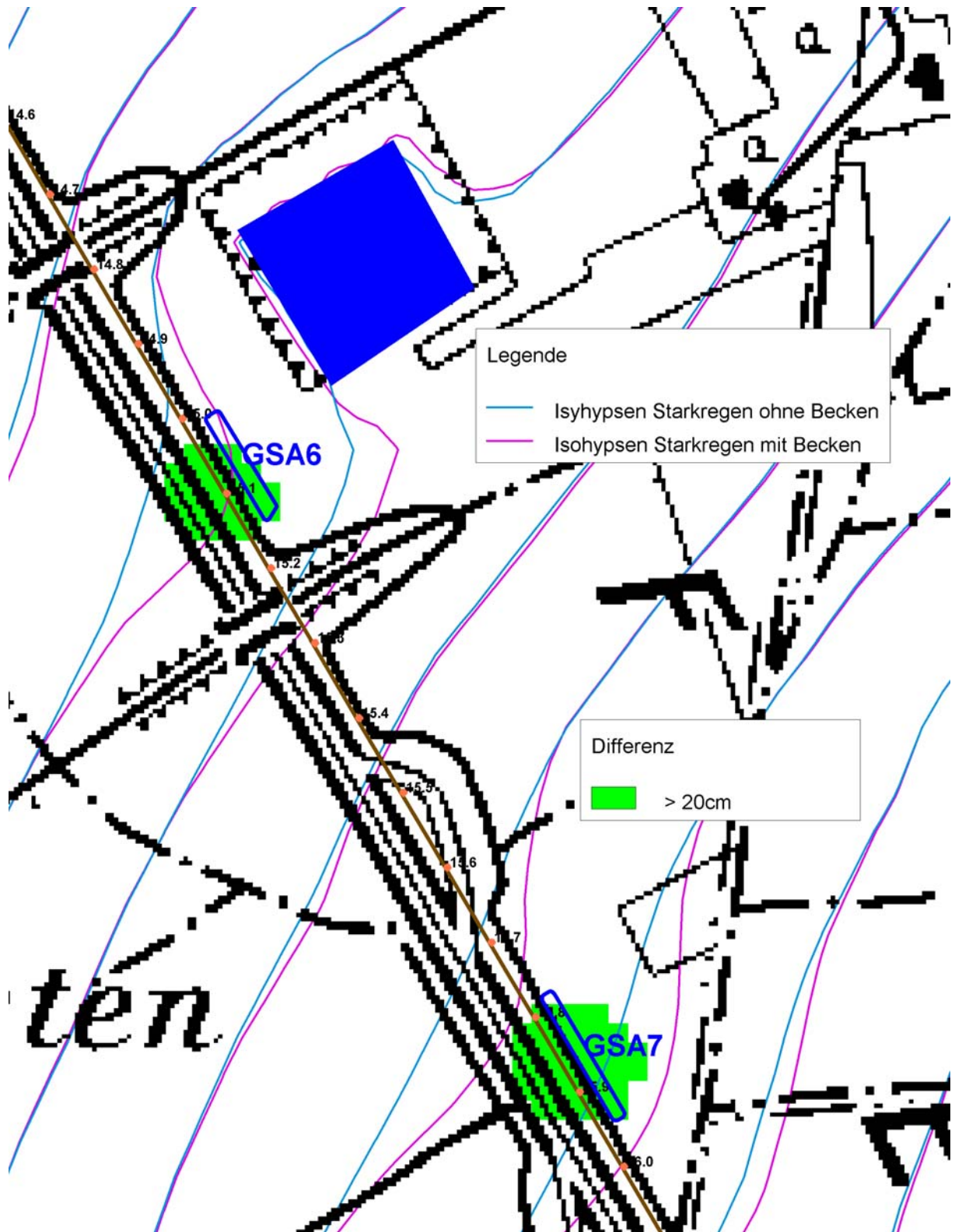


Abbildung 57: Auswirkung der Versickerung der Meteorwässer über die Versickerungsbecken GSA6 und GSA7 im Nordteil des Untersuchungsgebietes auf die regionalen Grundwasserstands- und -strömungsverhältnisse als Differenzenplan zwischen den Varianten „Starkregen mit Becken“ minus „Starkregen ohne Becken“ und den entsprechenden Grundwasserschichtenliniendarstellungen für den 11.08.2002.

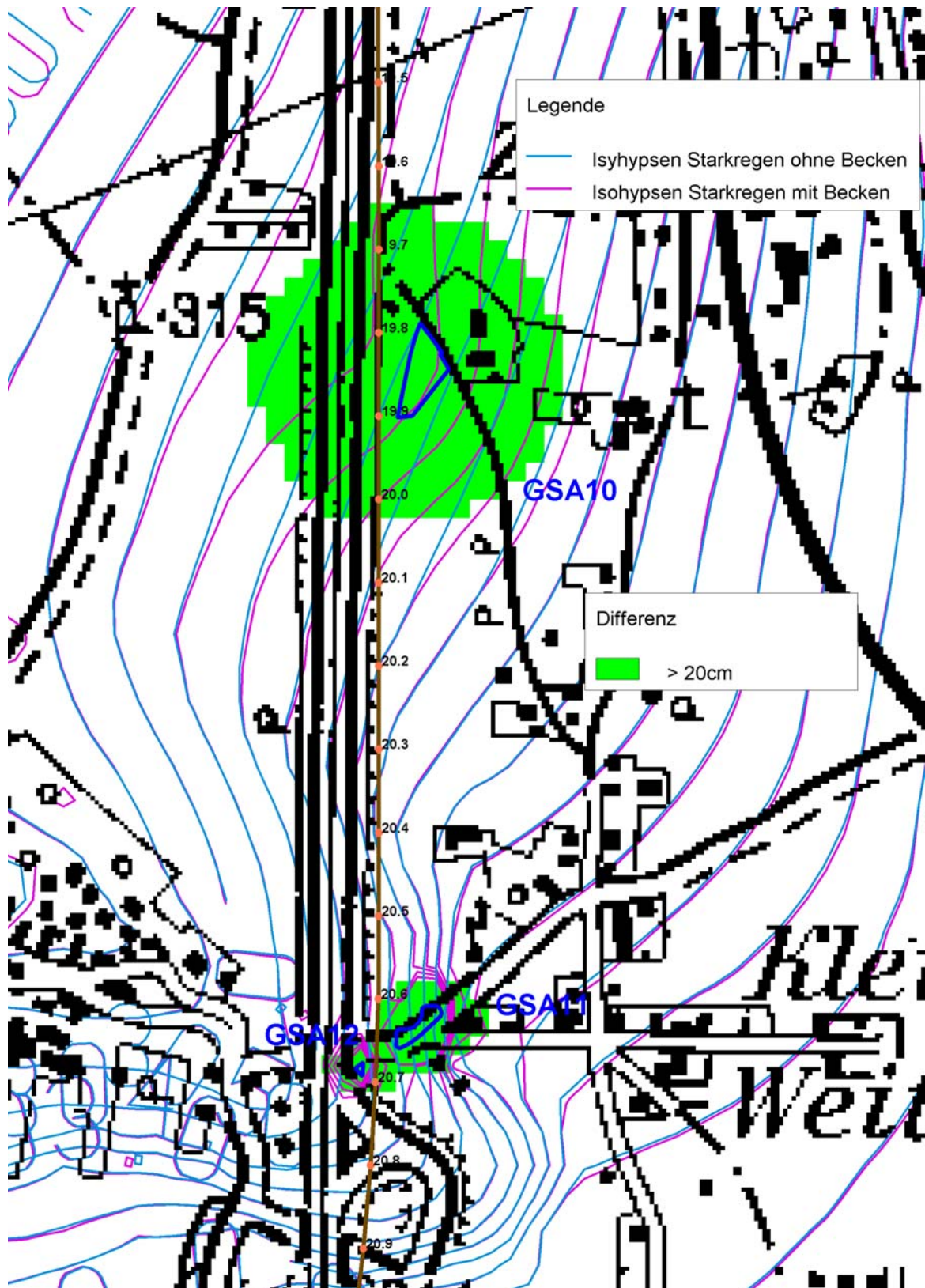


Abbildung 58: Auswirkung der Versickerung der Meteorwässer über die Versickerungsbecken GSA10, GSA11 und GSA12 im Südteil des Untersuchungsgebietes auf die regionalen Grundwasserstands- und –strömungsverhältnisse als Differenzenplan zwischen den Varianten „Starkregen mit Becken“ minus „Starkregen ohne Becken“ und den entsprechenden Grundwasserschichtenliniendarstellungen für den 11.08.2002.

Die Bewertung der Auswirkung der Versickerung der Meteorwässer eines extremen Starkregenereignisses über Versickerungsbecken unter Berücksichtigung der durch dieses Ereignis hervorgerufenen erhöhten Grundwasserneubildungsrate im Bereich der Becken zeigt, dass im Nordteil des Untersuchungsgebietes (GSA1 bis GSA6) die Grundwasserüberdeckung so mächtig und die Sedimentdurchlässigkeit so hoch ist, dass der Grundwasserspiegel auch in Extremsituationen deutlich unterhalb des Beckens verbleibt. Im südlichen Bereich werden die Durchlässigkeitsbeiwerte und daran gekoppelt auch die speichernutzbaren Porenvolumina deutlich niedriger, sodass bei punktueller Zufuhr von Wasser einerseits eine sehr rasche und hohe Aufspiegelung erfolgt und andererseits der horizontale Abtransport des Wassers deutlich gehemmt ist – d.h. die Auswirkung des Spiegelanstiegs ist deutlich länger zu bemerken. Daraus resultiert, dass im Becken GSA10 bei Eintreten des Extremereignisses unter den hier diskutierten Randbedingungen zum Aufspiegeln des Grundwassers bis zur Beckensohle zu rechnen ist. In den Becken GSA11 und GSA12 ist davon auszugehen, dass bereits das Nachfolgeereignis vom Dezember 2002, das hier im Grundwasserbereich noch deutlich durch das Starkregenereignis vom August 2002 überprägt ist, bis an die Beckensohle aufspiegelt. Es ist damit zu rechnen, dass beim Starkregenereignis selbst der Grundwasserspiegel im nächsten Umgebungsbereich über Beckensohle ansteigt und somit die Versickerung aus den Becken für eine bestimmte Zeit unterbunden ist. Es wird vorgeschlagen, durch eine ausreichende Dimensionierung der Becken dafür Sorge zu tragen, dass das gesamte Volumen des Starkregenereignisses in den Becken zwischengespeichert werden kann und somit trotz des zeitlich befristeten Fehlens der Versickerungsmöglichkeit keine Überflutungen möglich sind.

5 Zusammenfassung

Die von mir getätigten Aussagen im synthetischen Bericht zur Umsetzung der Maßnahmen aus dem UVG (0083 und 0084) entsprechen den Aussagen im vorliegenden Gutachten.

Im Bereich des Grazer Feldes treten aufgrund der strukturellen Entwicklung in immer stärker werdendem Maße Wechselwirkungen zwischen geplanten infrastrukturellen Maßnahmen und der Nutzung naturräumlicher Ressourcen auf. Um eventuellen Konfliktpotentialen von vornherein wirksam entgegenwirken zu können, müssen die Auswirkungen von anthropogenen Eingriffen in unterschiedliche Kompartimente von Ökosystemen vor deren Realisierung prognostiziert und hinsichtlich einer Minimierung optimiert werden. Hinsichtlich der Ressourcen im Grundwasserbereich bieten sich dafür numerische Modelle unterschiedlicher Art an.

Hinsichtlich aktuell anstehender Detailplanungsvorhaben im Rahmen der Planung der Koralmbahn im Grazer Feld wurde das Institut für WasserRessourcenManagement – Hydrogeologie und Geophysik der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, beauftragt, notwendige Modellerweiterungen und Szenario-Berechnungen zu einer optimalen Planungsdurchführung vorzunehmen und über die Auswirkung geplanter Maßnahmen ein grundwasserhydrologisches Gutachten zu erarbeiten.

Aus hydrogeologischer Sicht ergaben sich folgende Detailfragestellungen, die durch die Kalibration unterschiedlicher numerischer Modelle und folgender Simulationsrechnungen beantwortet werden mussten:

- Auswertung des vom Büro WAIBEL (BGG) durchgeführten Pump- und Versickerungsversuchs im Bereich der Unterflurtrasse des Flughafenastes der Koralmbahn
- Bewertung unterschiedlicher Wasserhaltungsvarianten im Rahmen der Errichtung der Unterflurtrasse des Flughafenastes der Koralmbahn
- Erstellung eines instationär kalibrierten Grundwasserströmungsmodells für den Bereich Weitendorf durch Erweiterung und Neukalibration des bestehenden instationären Grundwasserströmungsmodells Kalsdorf zur Beurteilung der Auswirkung von Unterflurtrassen im Raum Feldkirchen und Weitendorf auf Grundwasserströmung und -spiegellage
- Bewertung der Versickerung von Meteorwässern entlang der Koralmbahn unter Berücksichtigung der Wechselwirkung mit der Meteorwasserversickerung im Bereich des Terminals Werndorf – Nord und dem Grundwassersystem

Als Grundlage für die Beantwortung dieser Fragestellungen wurde ein Grundwasserströmungsmodell für das gesamte südliche Grazer Feld (südlich von Feldkirchen) westlich der Mur unter Einbeziehung des Unterlaufes des Kainachtales instationär über den Zeitraum von 01.01.1993 bis 31.12.2003 auf Tagesbasis kalibriert wobei neben den zeitlich differenzierten Entnahmedaten aus den Brunnen des

Wasserwerkes Kalsdorf auch die räumlich und zeitlich differenzierte flächenhafte Grundwasserneubildung sowie die Interaktion des Grundwassers mit den bezughabenden Oberflächengewässern in die Modellbildung einbezogen wurden.

Generell kann die Kalibrationsqualität des Grundwasserströmungsmodells unter Berücksichtigung der Messstellendichte und deren Verteilung sowie der Unsicherheiten bei der Definition der Randbedingungen als sehr gut bezeichnet werden. Gerade im spezifisch interessierenden Bereich des Verlaufes der Koralntrasse im südlichen Grazer Feld und ihrer Umgebung ist die Aussagesicherheit als außerordentlich hoch zu werten.

Die aus der Modellkalibration resultierende Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte zeigt in großen Bereichen mit Werten zwischen $k_f = 1 \cdot 10^{-3}$ und $k_f = 5 \cdot 10^{-3}$ m/s für derartige Aquifere typische Größenordnungen. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Zonierung der Durchlässigkeitsverteilung. Im Nordteil des Untersuchungsgebietes (nördlich der Linie Wundschuh – Werndorf) liegen die Durchlässigkeiten im Bereich von $3 \cdot 10^{-3}$ bis $5 \cdot 10^{-3}$ m/s, südlich dieser Linie liegen die Durchlässigkeiten im Bereich von $1 \cdot 10^{-3}$ bis $3 \cdot 10^{-3}$ m/s, im Bereich Weitendorf (westlich der Autobahn) sind sie noch geringer und erreichen minimale Werte von bis zu $1 \cdot 10^{-5}$ m/s.

Ausgehend von Untersuchungen der auslauffähigen Porenvolumina im Leibnitzer Feld wurde die flächenhafte Verteilung im Rahmen der Kalibration des instationären Verlaufes der Grundwasserstandsganglinien gewonnen. Die resultierenden Ergebnisse weisen speichernutzbare (auslauf- und auffüllfähige) Porositäten zwischen 5 und 16 % aus. Im Bereich Weitendorf liegen diese bei nur 0.5 %. Die geringeren Werte sind grundsätzlich im westlichen Teil des Grundwasserfeldes (entlang des Beckenrandes zur Kaiserwaldterasse) und im Kainachtal zu finden.

Das Grundwasser im südwestlichen Grazer Feld strömt im Allgemeinen vom westlichen Talrand (Kaiserwaldterasse) in südöstliche Richtung und entwässert in die Mur. Der Mühlgang hat bis etwa Kalsdorf eine geringe Auswirkung auf das Grundwasserströmungsverhalten, südlich davon hat er zusammen mit Augewässern eine erhebliche Vorflutwirkung und entwässert den Großteil des anströmenden Grundwassers. Die Stauerhochlage im Bereich Weitendorf mit den gering durchlässigen Materialien bewirkt eine starke lokale Ablenkung der Grundwasserströmung in Richtung Osten. Im Nahbereich der Kainach exfiltriert das Grundwasser in die Kainach, nördlich davon herrscht vorwiegend eine zur Kainach parallele Strömung in Richtung Mur vor. Die Strömungsrichtung verändert sich zwischen niedrigen, mittleren und hohen Grundwasserspiegellagen nur sehr gering.

Das gegenständliche Modell wurde über einen Zeitraum von 11 Jahren kalibriert. Der gewählte Modellzeitraum umfasste unterschiedlichste hydrologische Zustände. Aus diesen Gründen ist es zulässig, unterschiedliche Maßnahmen, die auf das Grundwasser des südwestlichen Grazer Feldes wirken, über den gesamten Modellzeitraum zu berechnen und daraus Aussagen über die Auswirkung auf das Grundwasser hinsichtlich der Spiegellagenverteilung, der Strömungsverhältnisse und auch der Durchflüsse abzuleiten.

Im November 2003 wurde im Bereich des Portals der Unterflurtrasse Feldkirchen seitens der BGG ein Pump- und Versickerungsversuch mit einer maximalen Pump- und Versickerungsleistung von 50 l/s durchgeführt, um experimentell die Möglichkeiten der Wasserhaltung in diesem Bereich abzuklären und um Aquiferkennwerte aus dem durch die Wasserhaltung beanspruchten Bereich zu erhalten. Der Versuch und die daran gekoppelte Modellrechnung belegen, dass aufgrund der vorliegenden guten Durchlässigkeitsbeiwerte durch die Entnahme- und Wiederversickerung von Grundwasser ein relativ großer Bereich beeinflusst wird. Zur Bewertung der Auswirkung der Wechselwirkung zwischen Entnahme und Wiederversickerung auf die analytische Auswertung des Pumpversuchs und die daraus gewonnenen Aquiferparameter wurde sowohl die gemessene Ganglinie der Messstelle HB-F01a_03 als auch die simulierte Ganglinie ohne Wiederversickerung nach dem Verfahren von COOPER & JACOS instationär (Zeit – Absenkung – Verfahren) analytisch ausgewertet. Der Vergleich der Auswertergebnisse zeigt eine Überschätzung der Transmissivitätsbeiwerte um etwa $2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Die resultierenden Durchlässigkeitsbeiwerte unter Berücksichtigung dieser Überschätzung aus der Pumpversuchsauswertung korrelieren sehr gut mit den Kalibrierungsergebnissen des Modells.

Für die Bauarbeiten der Unterflurtrasse Feldkirchen im Abschnitt Km 8.70 bis 9.20 ist eine offene Wasserhaltung geplant. Das instationäre Modell konnte für die Simulation dieser Fragestellung nicht verwendet werden, weil die gegenseitige Beeinflussung zwischen Wiederversickerung und anfallenden Pumpmengen bei der Wasserhaltung nicht definierbar ist. Die Simulation der Auswirkungen dieser Wasserhaltungsmaßnahmen wurde deshalb mittels eines speziell dafür erstellten stationären Strömungsmodells durchgeführt, das Gleichgewicht zwischen Entnahme und Wiederversickerung über eine Vielzahl von Simulationen manuell hergestellt. Als Ausgangszustand für die Simulation der Wasserhaltung wurde der sogenannte Bauwasserspiegel (RHHGW abzüglich 1.5m) vorgegeben. Die Auswirkung der Wasserhaltung auf die Grundwasserspiegellage ist relativ eng begrenzt (in etwa in einem Radius von 150 m um Entnahme und Versickerungsbrunnen), die Aufspiegelungs- und Absenkungsbeträge schwanken in Abhängigkeit von der gewählten Variante, erreichen aber generell nirgends Werte von $>1.0 \text{ m}$ und sind in Relation zu vorhandenen Grundwasserressourcen nicht relevant. Eine Auswirkung auf die Grundwasserströmungsverhältnisse außerhalb des direkten Einflussbereiches ist praktisch nicht nachweisbar, eine Einflussnahme auf das Einzugsgebiet der Wasserversorgungsanlage Kalsdorf ist keinesfalls zu erwarten.

Unterflurtrassen in der gesättigten Zone des Aquifers verringern den Durchflussquerschnitt. Grundsätzlich entsteht ein Aufstauereffekt im anströmenden Bereich, sowie eine Absenkung im abströmenden Bereich. Die Größenordnung von Aufstau und Absenkung ist von den hydraulischen Parametern wie Durchflussmenge, Lage des Bauwerks zur Strömungsrichtung, Breite des Bauwerks, Durchlässigkeitsbeiwerte des Aquifers, vor allem aber vom Prozentsatz der Querschnittverringerng abhängig.

Die Auswirkung der Unterflurtrasse Feldkirchen auf die Grundwasserströmung wurde durch die Definition der Bauwerksunterkante als obere Begrenzung des Aquifers mit Hilfe des instationär

kalibrierten Grundwasserströmungsmodells simuliert. Dies bewirkt die Simulation von gespannten Verhältnissen, wenn der Wasserspiegel auf die vorgegebene Höhe steigt und entspricht damit den realen, in der Natur gegebenen Verhältnissen. Die Bauwerksunterkanten der Unterflurtrasse Feldkirchen wurden seitens der technischen Planung bekanntgegeben.

Durch die geringe Reduktion des Querschnittes (aufgrund der geringen Einbautiefe in das Grundwasser und der verbleibenden großen Restmächtigkeit des gesättigten Aquifers) und wegen der geringen Breite des Bauwerkes in Relation zu den Dimensionen des Grundwassersystems, ist die Beeinflussung der Grundwasserströmung sehr gering bis nicht nachweisbar. Es sind de facto keinerlei negative Auswirkung des Unterflurbauwerkes auf Grundwasserstand und Grundwasserströmung zu erwarten.

Im Bereich der Unterflurtrasse Weitendorf erfolgt die Einbindung der Wanne teilweise in den dichten Grundwasserstauer, sodass im Längsschnitt Bereiche entstehen, die hinsichtlich des Grundwasserabstroms vollkommen abgeschlossen werden. Daran anschließend liegen Teilbereiche vor, in denen zwischen Bauwerksunterkante und Grundwasserstauer ein durchflusswirksamer Restquerschnitt verbleiben wird. Die Auswirkung der Unterflurtrasse Weitendorf auf die Grundwasserströmung wurde durch das Definieren von praktisch undurchlässigen Bereichen in den Abschnitten ohne durchflusswirksamen Restquerschnitt und einer oberen Begrenzung des Aquifers in den Abschnitten mit Restquerschnitt simuliert. Wie aus den Angaben im Istzustand zu erkennen ist, ist auch bei derzeitigen Strömungszuständen im Bereich der Trassenführung zwischen Kilometer 20.4 und 21.0 praktisch kein Grundwasserabstrom vorliegend. Durch den Einbau der Wanne werden sich diese Durchflüsse praktisch nicht verändern, in den Randbereichen zu den dann verlängerten Bereichen ohne Durchströmungsmöglichkeit werden die Durchflussmengen leicht ansteigen. Die Auswirkungen bleiben hinsichtlich der Durchflüsse aber jedenfalls auf den Bereich des Wannensbauwerkes selbst beschränkt. Die maximal zu erwartenden Auswirkungen auf die Grundwasserspiegellagen sind im Bereich der Autobahn Aufspiegelungen im Anstrombereich (westlich) und Absenkungen im Abstrombereich (östlich) von etwa 1 m. Der Bereich der Auswirkung mit Werten > 0.2 m ist nur kleinräumig und praktisch auf den Bereich der Autobahnauf- und -abfahrt beschränkt. Die Auswertung der zu erwartenden Auswirkung der Wanne Weitendorf zeigt, dass aufgrund der äußerst geringen Grundwasserabstrommengen, die aus der hydrogeologischen Situation in diesem Bereich resultiert (geringe gesättigte Mächtigkeit und geringe Sedimentdurchlässigkeiten) und der engen Begrenzung der Beeinflussung des Grundwasserspiegels Grundwasser-Kommunikationsmaßnahmen zwischen dem oberstromigen Aufstaubereich (westlich der Trasse) zum abstromigen Absenkungsbereich (östlich der Trasse) aus grundwasserhydrologischer Sicht nicht erforderlich sind. Hinsichtlich der Bauphase ist aufgrund der angeführten hydrogeologischen Randbedingungen bei offener Wasserhaltung nur mit sehr geringen Entnahmemengen zu rechnen. Die Absenkbereiche um die Entnahmebrunnen werden lokal begrenzt bleiben. Ein Problem kann dabei die Rückversickerung des entnommenen Wassers im Bereich der Stauerhochlage beim Weitendorfer Sporn darstellen. Diesbezüglich wird vorgeschlagen, das Wasser

aus der Wasserhaltung entweder östlich der Trasse nördlich Klein-Weitendorf in das Grundwasser der Würmterrasse des Grazer Feldes zu versickern oder wenn möglich entlang der Trasse in ein Oberflächengewässer nach Süden auszuleiten.

Die im Rahmen der Errichtung der Koralmbahn anfallenden Meteorwässer sollen über humusierte und bewachsene Versickerungsbecken in das Grundwasser rückversickert werden, um die Grundwasserbilanz des Grazer Feldes nicht negativ zu beeinflussen. Da diese im regionalen Maßstab punktuell Versickerung Auswirkungen auf den Grundwasserspiegel hat war es erforderlich, diese auf Basis des Grundwassermodells quantitativ zu prognostizieren. Seitens der Planung wurden die Lage der Becken, die Größe der Becken und des zugehörigen Einzugsgebietes, die Höhenlage der Beckensohle sowie das Bemessungs-Niederschlagsereignis vorgegeben.

Für die Ermittlung der Auswirkung der Versickerungen wurden zwei Simulationen mittels des instationären Modells durchgeführt und mit dem Istzustand verglichen. Die Variante „Starkregen ohne Becken“ simuliert die Auswirkung des Bemessungsstarkregens ohne die Versickerungen in den Versickerungsbecken. Dabei wurde in die Ganglinien der Grundwasserneubildung das Starkregenereignis am 11.8.2002 integriert. Das Niederschlags-Extremereignis von 159 mm in 12 Stunden verursacht dabei am 11.8.2002 eine Grundwasserneubildung von 75 mm. Die Variante „Starkregen mit Becken“ simuliert die Auswirkung des Starkregenereignisses inklusive der Versickerung in den Versickerungsbecken.

Die Ergebnisse der Auswertung zeigen, dass im Nordteil des Untersuchungsgebietes (GSA1 bis GSA7) die Grundwasserüberdeckung so mächtig und die Sedimentdurchlässigkeit so hoch ist, dass der Grundwasserspiegel auch in Extremsituationen deutlich unterhalb des Beckens verbleibt. Im südlichen Bereich werden die Durchlässigkeitsbeiwerte und daran gekoppelt auch die speichernutzbaren Porenvolumina deutlich niedriger, sodass bei punktueller Zufuhr von Wasser einerseits eine sehr rasche und hohe Aufspiegelung erfolgt und andererseits der horizontale Abtransport des Wassers deutlich gehemmt ist – d.h. die Auswirkung des Spiegelanstiegs ist deutlich länger zu bemerken. Daraus resultiert, dass im Becken GSA10 bei Eintreten des Extremereignisses unter den hier diskutierten Randbedingungen zum Aufspiegeln des Grundwassers bis zur Beckensohle zu rechnen ist. In den Becken GSA11 und GSA12 ist davon auszugehen, dass bei einem extremen Starkregenereignis der Grundwasserspiegel im nächsten Umgebungsbereich über Beckensohle ansteigt und somit die Versickerung aus den Becken für eine bestimmte Zeit unterbunden ist. Es wird vorgeschlagen, durch eine ausreichende Dimensionierung der Becken dafür Sorge zu tragen, dass das gesamte Volumen des Starkregenereignisses in den Becken zwischengespeichert werden kann und somit trotz des zeitlich befristeten Fehlens der Versickerungsmöglichkeit keine Überflutungen möglich sind. Aus der Darstellung der Auswirkung der Versickerung der Meteorwässer auf die regionalen Grundwasserverhältnisse ist ersichtlich, dass sich sowohl die Anhebung des Grundwasserspiegels als auch die Veränderung der Grundwasserströmungsverhältnisse nur in einem sehr begrenzten Bereich im Umfeld der Sickerbecken auswirken wird.

6 Literatur

- DARCY, H. (1856): Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon, Dalmont, Paris.
- FANK, J. (1999): Die Bedeutung der ungesättigten Zone für Grundwasserneubildung und Nitratbefruchtung des Grundwassers in quartären Lockersediment-Aquiferen am Beispiel des Leibnitzer Feldes (Steiermark, Österreich). Beiträge zur Hydrogeologie, **49/50**, 101-388, Graz.
- HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. Mitt. dt. Wetterdienst, 2, 11.
- HUBBERT, M. K. (1940): The theory of ground-water motion. J. Geol. **4**, 785-944.
- MATTHESS, G. & K. UBELL (1983): Allgemeine Hydrogeologie, Grundwasserhaushalt; Lehrbuch der Hydrogeologie, Bd. 1, 438 S., (BORNTRAEGER) Berlin-Stuttgart.
- MEINZER, O. E. (1942): Hydrology, Dover, New York.
- SIMUNEK, J., T. VOGEL & M. Th. VAN GENUCHTEN (1992): The SWMS_2D code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media, Version 1.1. Research Report **126**, 169 p., U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California
- TERZAGHI, K. (1925): Erdbaumechanik auf Bodenphysikalische Grundlage, Deuticke, Wien.
- VAN GENUCHTEN, M. TH. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc Am. J. **44**, 892-898.

Graz, im November 2004

(Univ.- Doz. Dr. Johann Fank)