

Gekoppelte Grundwasserströmungs- und Nitrattransportmodelle in den Grundwasserkörpern Leibnitzer Feld und Unteres Murtal

J. Mach, G. Rock, G. Klammler, J. Draxler, H. Kupfersberger, J. Fank

Auftraggeber:

Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 14 - Wasserwirtschaft,
Ressourcen und Nachhaltigkeit

Freigegeben: Univ. Doz. Dr. Johann Fank, CEO



Graz, 25.10.2019



Kurzbeschreibung / Abstract

/Conclusions

Für die Grundwasserkörper Leibnitzer Feld (unterteilt durch die Mur in Westliches und Östliches Leibnitzer Feld) und Unteres Murtal wurden zwischen der ungesättigten und der gesättigten Zone sequentiell gekoppelte Grundwasserströmungs- und Nitrattransportmodelle im Zeitraum zwischen 1993 und 2017 (im Leibnitzer Feld bis 2018) erstellt und an den Messstellen des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung kalibriert. Die diffuse Grundwasserneubildung sowie die Interaktion zwischen Grundwasser und Oberflächengewässern und die damit einhergehenden Stickstoffeinträge stellen die Hauptprozesse für die Grundwasserströmung und den Nitrattransport in den Grundwasserkörpern dar. Beide Mechanismen variieren hochgradig in Raum und Zeit.

Die Sickerwasserbewegung und die Stickstoffumsetzung in der ungesättigten Zone wurden mit dem Programmpaket SIMWASER/STOTRASIM berechnet. Die Umsetzung erfolgte auf Basis von Hydrotopen, welche einmalige Kombinationen aus Bodentyp, Bewirtschaftungsform und meteorologischen Parametern darstellen. Die fehlenden Detailinformationen über die angebauten Kulturen auf den einzelnen landwirtschaftlichen Parzellen wurden mit der Berechnungsroutine STOTRAPGEN auf statistischer Basis generiert. Als Ergebnis wurden pro Hydrotop Zeit-Tiefen-Profile der Grundwasserneubildung und des Stickstoffaustrags zur Verwendung als Randbedingungen bei der Berechnung der Verhältnisse in der gesättigten Zone erstellt. Die Ergebnisauswertung für die jeweiligen Modellgebiete erfolgte in Form der mittleren Stickstoffkonzentrationen im Sickerwasser, der mittleren Stickstoffausträge und der mittleren Grundwasserneubildungen sowie der mittleren Nitratkonzentrationen im Sickerwasser, der Summe der Grundwasserneubildung und der Summe des Stickstoffaustrags für jedes Einzeljahr. Die mittlere jährliche Grundwasserneubildung schwankt zwischen 283 mm und 381 mm, die mittlere jährliche Nitratauswaschung zwischen 32 kg/ha und 38 kg/ha und die mittleren Nitratkonzentrationen im Sickerwasser zwischen 38 mg/L und 53 mg/L in den einzelnen Modellgebieten.

Die Berechnungen der Grundwasserströmung und des Nitrattransports in der gesättigten Zone der Grundwasserkörper wurden mit der Modellsoftware FEFLOW durchgeführt. Aufgrund der zeitweise geringen Grundwassermächtigkeiten im Bereich der Jößer und der Helfbrunner Terrasse in Kombination mit einem steilen Grundwassergefälle beim Übergang zur Niederterrasse entstehen numerische Auswirkungen auf die berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser, so dass diese Bereiche in den gesättigten Modellgebieten ausgeschnitten wurden. Für jede Messstelle des Grundwasserspiegels erfolgte die Dokumentation der Kalibrationsgüte in Form von unterschiedlichen statistischen Kennzahlen.

Wegen des häufigen Einflusses von Oberflächengewässern durch Anreicherung auf die Nitratkonzentration im Grundwasser wird im Unteren Murtal die divergente Form der Transportgleichung verwendet. Dennoch weisen die Nitratkonzentrationen im Grundwasser im Nahbereich von manchen Gewässerabschnitten eine numerische Beeinflussung auf. Aufgrund der hohen Unsicherheiten beim Stickstoffeintrag konnten mit den regionalen Nitrattransportmodellen nur in seltenen Fällen die gemessenen Nitratkonzentrationen im Grundwasser im Detail nachgebildet

werden. Der Schwerpunkt bei der Nitrattransportmodellierung lag daher auf der Nachbildung von Trends und dem mittleren Niveau der Nitratkonzentrationen in einzelnen Phasen.

Die Ergebnisauswertung für die Grundwasserströmung in den jeweiligen Modellgebieten erfolgte in Form von Isolinien für verschiedene aussagekräftige Grundwasserspiegellagen (P2,5, P50 und P97,5) sowie den Verteilungen der zugehörigen Grundwassermächtigkeiten und Flurabständen. Die Grundwassermächtigkeiten schwanken je nach Grundwasserspiegellage im Unteren Murtal zwischen 0 m und über 9 m und im Leibnitzer Feld bis lediglich über 7 m. Die Flurabstände variieren in beiden Grundwasserkörpern zwischen 0 m und über 10 m. Außerdem wurden Bahnlinien zur Veranschaulichung der Grundwasserströmungsrichtung berechnet.

Zur Visualisierung der Ergebnisse des Nitrattransports erfolgte die Ermittlung der minimalen, mittleren und maximalen Nitratkonzentrationen im Grundwasser in den Einzeljahren und für den Gesamtzeitraum in den jeweiligen Grundwasserkörpern. Im gesamten Simulationszeitraum erreichen die minimalen Nitratkonzentrationen im Grundwasser Werte bis kleiner 50 mg/L, die mittleren Nitratkonzentrationen Werte bis kleiner 75 mg/l und die maximalen Nitratkonzentrationen Werte bis über 100 mg/l. Generell sind die Nitratkonzentrationen im Unteren Murtal leicht höher als die im Leibnitzer Feld.

Zusätzlich wurden die Auswirkungen der Differenz zwischen Real- und Konsensentnahme aus dem Grundwasser auf den Grundwasserspiegel und die Nitratkonzentrationen im Grundwasser ausgewertet. Dabei zeigt sich, dass die jeweiligen Auswirkungen nur lokal auf den Bereich der Brunnenstandorte beschränkt bleiben. Die maximalen zusätzlichen Absenkungen sind im Leibnitzer Feld mit bis über 75 cm stärker ausgeprägt als im Unteren Murtal, da im Unteren Murtal die tatsächlichen Brunnenförderungen näher bei der Konsensmenge liegen. Die maximalen Änderungen bei der Nitratkonzentration im Grundwasser liegen in beiden Grundwasserkörpern unter 20 mg/L.

Abschließend wurden die HGW100- und NGW100-Grundwasserspiegellagen durch Anwendung des Gumbel-Verfahrens auf Basis der an den FE-Knoten der Grundwassermodelle berechneten Grundwasserspiegelganglinien ermittelt. In einem zweiten Schritt wurden die Abweichungen zwischen den an den Messpegeln auf Basis von Messwerten und von Rechenwerten des Grundwasserspiegels ermittelten HGW100- bzw. NGW100-Grundwasserspiegellagen berechnet und diese Werte innerhalb der Modellgebiete geostatistisch interpoliert und zu den HGW100- bzw. NGW100-Grundwasserspiegellagen an den FE-Knoten addiert. Auf diese Weise können hydraulische Auswirkungen auf die Extremlagen des Grundwasserspiegels (z.B. durch Oberflächengewässer oder Brunnen) zwischen den Beobachtungspegeln physikalisch basiert berücksichtigt werden. Durch die Interpolation der Residuen an den Messstellen wird der Tatsache Rechnung getragen, dass regionale Grundwassermodelle in der Regel nicht auf die Reproduktion von beobachteten Grundwasserextremwerten ausgerichtet sind.

Die Isolinien der HGW100- und NGW100-Grundwasserspiegellagen in den Grundwasserkörpern Leibnitzer Feld und Unteres Murtal werden gemeinsam mit den zugehörigen Verteilungen der Grundwassermächtigkeiten und der Flurabstände dargestellt. Dabei hat sich ergeben, dass der HGW100-Grundwasserspiegel in weiten Teilen des zentralen und östlichen Unteren Murtals über Gelände liegt, wobei dies im Leibnitzer Feld in den Auegebieten und im Sulmspitz der Fall ist. Die Grundwassermächtigkeiten liegen bei HGW100 großflächig über 6 m. Bei NGW100 fällt der

Grundwasserspiegel lokal begrenzt am Rand des Östlichen Leibnitzer Feldes unter den Grundwasserstauer, was im Unteren Murtal nicht der Fall ist. Die Grundwassermächtigkeiten schwanken bei NGW100 zwischen 2 m und 4 m und die Flurabstände variieren zwischen 1 m und 9 m, wobei sich im Leibnitzer Feld die Auegebiete deutlich von den Niederterrassen unterscheiden lassen.



Inhalt

1	Einleitung und Problemstellung	17
1.1	Begrenzung des Untersuchungsgebiets	17
2	Datengrundlagen	19
2.1	Basisdaten	19
2.2	Öffentliches hydrologisches Messnetz.....	19
2.2.1	Grundwasserspiegel	19
2.2.2	Wasserspiegellagen an Oberflächengewässern	19
2.2.3	Nitratkonzentrationen im Grundwasser	19
2.3	Grundwasserentnahmen.....	20
2.4	Meteorologische Daten.....	21
3	Hydrogeologisches Konzeptmodell	23
3.1	Morphologie des Grundwassergebietes und Grundwasserstauer.....	23
3.2	Verteilung der aktuellen Landnutzung.....	26
3.3	Verteilung der Bodentypen	29
4	Wasserbewegung und Stickstofftransport in der ungesättigten Zone	33
4.1	Definition von Hydrotopen.....	33
4.2	Beschreibung der Modelle SIMWASER und STOTRASIM zur Berechnung der Grundwasserneubildung und der Stickstoffauswaschung unter landwirtschaftlich genutzten Flächen	36
4.2.1	Charakteristische Fruchtfolgen und Düngemengen.....	37
4.3	Berechnung der Grundwasserneubildung unter Wald	38
4.4	Berechnung der Grundwasserneubildung unter versiegelten Flächen.....	38
4.5	Verteilung der mittleren Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet.....	39
4.6	Verteilung des mittleren Stickstoffaustrags im Untersuchungsgebiet	42
4.7	Verteilung der mittleren Nitratkonzentration im Sickerwasser im Untersuchungsgebiet .	45
5	Erstellung des Grundwasserströmungs- und des Nitrattransportmodells.....	49
5.1	Sequentiell gekoppelter Modellansatz.....	49
5.2	Mathematisches Modell.....	49
5.2.1	Die Interaktion von Oberflächengewässern und Grundwasser	50
5.2.2	Modellumsetzung der Interaktion zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser.....	50
5.2.3	Rand- und Anfangsbedingungen für Strömungs- und Transportmodell	51
5.2.4	Lösung des mathematischen Modells mit numerischer Methoden	51

5.3	Beschreibung der Modellsoftware FEFLOW.....	52
5.3.1	Lösungsverfahren für die Transportgleichung	52
5.3.2	Adaptierung Modellgebiet für Transportmodellierung.....	53
5.4	Maßzahlen zur Bewertung der Kalibrationsgüte	53
6	Instationäre Kalibration des Grundwasserströmungs- und Nitrattransportmodells	57
6.1	Allgemeines	57
6.2	Grundwasserströmung.....	57
6.2.1	Definition der Randbedingungen, Materialeigenschaften und Anfangswerte für die Kalibration	57
6.2.2	Implementierung von einzelnen Gewässern.....	58
6.2.3	Kalibrationsergebnisse Grundwasserströmung	60
6.2.4	Verteilung der Durchlässigkeiten	71
6.2.5	Porenvolumina	74
6.3	Nitrattransport	77
6.3.1	Randbedingungen.....	77
6.3.2	Überblick Kalibrationsqualität	79
6.3.3	Veranschaulichung der Kalibrationsqualität an ausgewählten Messstellen.....	83
7	Ergebnisse des Grundwasserströmungs- und des Nitrattransportmodells	89
7.1	Verteilung von Flurabstand und Grundwassermächtigkeit bei relevanten Grundwasserspiegellagen (P2.5, P50 und P97.5) im Modellzeitraum	89
7.2	Grundwasserströmungsrichtung bei mittlerer Grundwasserspiegellage	104
7.3	Verteilung der minimalen, und maximalen Nitratkonzentration im Grundwasser im Modellzeitraum	108
8	Vergleich zwischen Istzustand und der bewilligten Konsensentnahme.....	113
9	Ermittlung von Extremlagen des Grundwasserspiegels mit einer 100-jährigen Auftretenswahrscheinlichkeit.....	119
9.1	Fachlich – wissenschaftlicher Hintergrund.....	119
9.1.1	Einleitung.....	119
9.1.2	Statistische Extremwertanalyse nach der GUMBEL - Methode	122
9.2	Berechnung und Darstellung der HGW100 und der NGW100 – Werte für die Modellgebiete Östliches Leibnitzer Feld, Westliches Leibnitzer Feld und Unteres Murtal	123
9.3	Verteilung der HGW100- und NGW100-Grundwasserspiegellagen sowie des resultierenden Flurabstandes und der gesättigten Mächtigkeit.....	140
10	Literatur	151

11	Beschreibung der digitalen Anhänge.....	155
11.1	Ergebnisdatei-Struktur Simulationen Ungesättigte Zone	155
11.2	Kalibrationsauswertung an den Messpegeln für Grundwasserspiegel.....	158
11.2.1	Erläuterung der Auswertung	158
11.3	GIS – Daten	161
11.4	Liste der Karten im PDF-Format und im JPG-Format	164



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersuchungsgebiet und die Aufteilung in die einzelnen Grundwasser- Modellgebiete.....	18
Abbildung 2: Isolinien der Höhen des Grundwasserstauers im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld	24
Abbildung 3: Isolinien der Höhen des Grundwasserstauers im Grundwasserkörper Unteres Murtal	25
Abbildung 4: Verteilung der Landnutzungen im Leibnitzer Feld.....	27
Abbildung 5: Verteilung der Landnutzungen im Unteren Murtal	28
Abbildung 6: Verteilung der Bodentypen im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld.....	30
Abbildung 7: Verteilung der Bodentypen im Grundwasserkörper Unteres Murtal.....	31
Abbildung 8: Verteilung der Hydrotope im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld	34
Abbildung 9: Verteilung der Hydrotope im Grundwasserkörper Unteres Murtal	35
Abbildung 10: Verteilung der mittleren Grundwasserneubildung im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld.....	40
Abbildung 11: Verteilung der mittleren Grundwasserneubildung im Grundwasserkörper Unteres Murtal	41
Abbildung 12: Verteilung des mittleren jährlichen Stickstoffaustrags aus der ungesättigten Zone im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld.....	43
Abbildung 13: Verteilung des mittleren jährlichen Stickstoffaustrags aus der ungesättigten Zone im Grundwasserkörper Unteres Murtal	44
Abbildung 14: Verteilung der mittleren Nitratkonzentration im Sickerwasser im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld	47
Abbildung 15: Verteilung der mittleren Nitratkonzentration im Sickerwasser im Grundwasserkörper Unteres Murtal	48
Abbildung 16: Mittlere Residuen zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln an den bezeichneten Grundwassermessstellen im Leibnitzer Feld	61
Abbildung 17: Mittlere Residuen zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln an den bezeichneten Grundwassermessstellen im Unteren Murtal.....	62
Abbildung 18: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln an den Beobachtungspiegeln uw37633, uw3803, uw3769, uw3781 und uw37635 im östlichen Leibnitzer Feld	65
Abbildung 19: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln an den Beobachtungspiegeln uw3778, uw3808, uw3812, uw37864, uw38105 und uw38203 im westlichen Leibnitzer Feld	67
Abbildung 20: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln an den Beobachtungspiegeln uw3829, uw3927, uw8511, uw39114 und uw39157 im Unteren Murtal.....	70
Abbildung 21: Verteilung der kalibrierten Durchlässigkeitsbeiwerte im Leibnitzer Feld.....	72
Abbildung 22: Verteilung der kalibrierten Durchlässigkeitsbeiwerte im Unteren Murtal.....	73
Abbildung 23: Verteilung der kalibrierten Porosität im Leibnitzer Feld	75
Abbildung 24: Verteilung der kalibrierten Porosität im Unteren Murtal.....	76

Abbildung 25: Verteilung der mittleren Nitratkonzentration (Median) im Grundwasser sowie der mittleren Residuen zwischen gemessen und berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser an den bezeichneten Messstellen im Leibnitzer Feld.....	81
Abbildung 26: Verteilung der mittleren Nitratkonzentration (Median) im Grundwasser sowie der mittleren Residuen zwischen gemessen und berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser an den bezeichneten Messstellen im Unteren Murtal.....	82
Abbildung 27: Vergleich zwischen berechneten (rote Linie) und gemessenen (schwarze Linie) Nitratkonzentrationen im Grundwasser des Östlichen Leibnitzer Feldes an den Messpegeln GA377380 (obere Darstellung), GA377180 (mittlere Darstellung) und uw3803 (untere Darstellung).....	85
Abbildung 28: Vergleich zwischen berechneten (rote Linie) und gemessenen (schwarze Linie) Nitratkonzentrationen im Grundwasser des Westlichen Leibnitzer Feldes an den Messpegeln uw3796 (obere Darstellung), uw37925 (mittlere Darstellung) und uw3826 (untere Darstellung).....	86
Abbildung 29: Vergleich zwischen berechneten (rote Linie) und gemessenen (schwarze Linie) Nitratkonzentrationen im Grundwasser des Unteren Murtales an den Messpegeln uw38992 (obere Darstellung), GA38654 (mittlere Darstellung) und uwPG61506152 (untere Darstellung).....	87
Abbildung 30: Grundwasserspiegellagen bei mittlerem Grundwasserstand und resultierende Grundwassermächtigkeit im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld.....	91
Abbildung 31: Grundwasserspiegellagen bei mittlerem Grundwasserstand und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld.....	92
Abbildung 32: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 2,5% Perzentil und resultierende gesättigte Mächtigkeit im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld.....	93
Abbildung 33: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 2,5% Perzentil und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld.....	94
Abbildung 34: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 97,5% Perzentil und resultierende gesättigte Mächtigkeit im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld.....	95
Abbildung 35: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 97,5% Perzentil und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld.....	96
Abbildung 36: Grundwasserspiegellagen bei mittlerem Grundwasserstand und resultierender Grundwassermächtigkeit im Grundwasserkörper Unteres Murtal.....	98
Abbildung 37: Grundwasserspiegellagen bei mittlerem Grundwasserstand und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Unteres Murtal.....	99
Abbildung 38: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 2,5% Perzentil und resultierende gesättigte Mächtigkeit im Grundwasserkörper Unteres Murtal.....	100
Abbildung 39: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 2,5% Perzentil und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Unteres Murtal.....	101
Abbildung 40: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 97,5% Perzentil und resultierende gesättigte Mächtigkeit im Grundwasserkörper Unteres Murtal.....	102
Abbildung 41: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 97,5% Perzentil und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Unteres Murtal.....	103

Abbildung 42: Grundwasserströmungsrichtung bei mittlerer Grundwasserspiegellage im Leibnitzer Feld.....	105
Abbildung 43: Grundwasserströmungsrichtung bei mittlerer Grundwasserspiegellage im Unteren Murtal.....	107
Abbildung 44: Verteilung der minimalen Nitratkonzentration Im Grundwasser in der Periode zwischen 1995 und 2018 im Leibnitzer Feld.....	109
Abbildung 45: Verteilung der maximalen Nitratkonzentration Im Grundwasser in der Periode zwischen 1995 und 2018 im Leibnitzer Feld.....	110
Abbildung 46: Verteilung der minimalen Nitratkonzentration im Grundwasser in der Periode zwischen 1995 und 2017 im Unteren Murtal.....	111
Abbildung 47: Verteilung der maximalen Nitratkonzentration im Grundwasser in der Periode zwischen 1995 und 2017 im Unteren Murtal.....	112
Abbildung 48: Differenz zwischen der mittleren Grundwasserspiegellage bei Real- und Konsensentnahme im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld.....	114
Abbildung 49: Differenz zwischen der mittleren Grundwasserspiegellage bei Real- und Konsensentnahme im Grundwasserkörper Unteren Murtal.....	115
Abbildung 50: Differenz zwischen der mittleren Nitratkonzentration im Grundwasser bei Real- und Konsensentnahme im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld.....	116
Abbildung 51: Differenz zwischen der mittleren Nitratkonzentration im Grundwasser bei Real- und Konsensentnahme im Grundwasserkörper Unteren Murtal.....	117
Abbildung 52: Berechnung von extremen Grundwasserspiegelhochständen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Darstellung der Autokorrelationsfunktion der Jahresextremwerte nach dem Verfahren in Fank & Fuchs (1999), beispielhaft für die Messstelle uw37672 im Östlichen Leibnitzer Feld.....	125
Abbildung 53: Berechnung von extremen Grundwasserspiegeltiefständen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Darstellung der Autokorrelationsfunktion der Jahresextremwerte nach dem Verfahren in Fank & Fuchs (1999), beispielhaft für die Messstelle uw37672 im Östlichen Leibnitzer Feld.....	126
Abbildung 54: Berechnung von extremen Grundwasserspiegelhochständen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Darstellung der Autokorrelationsfunktion der Jahresextremwerte nach dem Verfahren in Fank & Fuchs (1999), beispielhaft für die Messstelle uw38085 im Westlichen Leibnitzer Feld.....	127
Abbildung 55: Berechnung von extremen Grundwasserspiegeltiefständen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Darstellung der Autokorrelationsfunktion der Jahresextremwerte nach dem Verfahren in Fank & Fuchs (1999), beispielhaft für die Messstelle uw38085 im Westlichen Leibnitzer Feld.....	128
Abbildung 56: Berechnung von extremen Grundwasserspiegelhochständen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Darstellung der Autokorrelationsfunktion der Jahresextremwerte nach dem Verfahren in Fank & Fuchs (1999), beispielhaft für die Messstelle uw38415 im Unteren Murtal.....	129
Abbildung 57: Berechnung von extremen Grundwasserspiegeltiefständen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Darstellung der Autokorrelationsfunktion der Jahresextremwerte nach dem Verfahren in Fank & Fuchs (1999), beispielhaft für die Messstelle uw38415 im Unteren Murtal.....	130

Abbildung 58: Interpolierter Korrekturraster für den Abgleich der HGW100 Werte aus dem Grundwassermodell mit den HGW100 Werten an den Grundwasserstandsmessstellen in den Modellgebieten.....	139
Abbildung 59: Interpolierter Korrekturraster für den Abgleich der NGW100 Werte aus dem Grundwassermodell mit den NGW100 Werten an den Grundwasserstandsmessstellen in den Modellgebieten.....	140
Abbildung 60: Grundwasserspiegellagen bei HGW100 und resultierende Grundwassermächtigkeit im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld	142
Abbildung 61: Grundwasserspiegellagen bei HGW100 und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld.....	143
Abbildung 62: Grundwasserspiegellagen bei NGW100 und resultierende Grundwassermächtigkeit im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld	144
Abbildung 63: Grundwasserspiegellagen bei NGW100 und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld.....	145
Abbildung 64: Grundwasserspiegellagen bei HGW100 und resultierende Grundwassermächtigkeit im Grundwasserkörper Unteres Murtal	146
Abbildung 65: Grundwasserspiegellagen bei HGW100 und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Unteres Murtal	147
Abbildung 66: Grundwasserspiegellagen bei NGW100 und resultierende Grundwassermächtigkeit im Grundwasserkörper Unteres Murtal	148
Abbildung 67: Grundwasserspiegellagen bei NGW100 und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Unteres Murtal	149
Abbildung 68: Vergleich der berechneten Grundwasserstandsganglinie mit dem Messdaten beispielhaft an der Grundwassermessstelle uw3769 im Östlichen Leibnitzer Feld (siehe auch Abbildung 18)	158
Abbildung 69: Scatterplot der gemessenen Grundwasserspiegellagen im Vergleich zu den zeitgleichen berechneten Grundwasserständen beispielhaft an der Grundwassermessstelle uw3769 im Östlichen Leibnitzer Feld	158
Abbildung 70: Zeitlicher Verlauf der Differenzen zwischen den gemessenen und den zeitgleichen berechneten Grundwasserständen beispielhaft an der Grundwassermessstelle uw3769 im Östlichen Leibnitzer Feld	159
Abbildung 71: Doppelsummenkurve der Absolutwertänderungen der Grundwasserspiegellage der gemessenen und der zeitgleichen berechneten Grundwasserstände beispielhaft an der Grundwassermessstelle uw3769 im Östlichen Leibnitzer Feld	159

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Entnahmen von Grundwasser aus dem Grundwasserkörper Leibnitzer Feld	20
Tabelle 2: Entnahmen von Grundwasser aus dem Grundwasserkörper Unteres Murtal	20
Tabelle 3: Grundwasserneubildung, Stickstoffaustrag und Nitratkonzentration im Sickerwasser in den jeweiligen Untersuchungsgebieten (von oben nach unten: östliches Leibnitzer Feld, westliches Leibnitzer Feld, Unteres Murtal) flächengewichtet nach Landnutzungskategorie	45
Tabelle 4: Stauziele der Kraftwerke als Ausgangswasserspiegel für die Wasserspiegelberechnung	59
Tabelle 5: Modellgebiet Östliches Leibnitzer Feld: berechnete HGW100 - Werte an den geeigneten Messstellen aus den Messdaten des Hydrografischen Dienstes und Differenzen zu Grundwasserextremwerten aus den Modellberechnungsergebnissen ...	131
Tabelle 6: Modellgebiet Östliches Leibnitzer Feld: berechnete NGW100 - Werte an den geeigneten Messstellen aus den Messdaten des Hydrografischen Dienstes und Differenzen zu Grundwasserextremwerten aus den Modellberechnungsergebnissen ...	132
Tabelle 7: Modellgebiet Westliches Leibnitzer Feld: berechnete HGW100 – Werte an den geeigneten Messstellen aus den Messdaten des Hydrografischen Dienstes und Differenzen zu Grundwasserextremwerten aus den Modellberechnungsergebnissen ...	133
Tabelle 8: Modellgebiet Westliches Leibnitzer Feld: berechnete NGW100 – Werte an den geeigneten Messstellen aus den Messdaten des Hydrografischen Dienstes und Differenzen zu Grundwasserextremwerten aus den Modellberechnungsergebnissen ...	134
Tabelle 9: Modellgebiet Unteres Murtal: berechnete HGW100 – Werte an den geeigneten Messstellen aus den Messdaten des Hydrografischen Dienstes und Differenzen zu Grundwasserextremwerten aus den Modellberechnungsergebnissen	135
Tabelle 10: Modellgebiet Unteres Murtal: berechnete NGW100 – Werte an den geeigneten Messstellen aus den Messdaten des Hydrografischen Dienstes und Differenzen zu Grundwasserextremwerten aus den Modellberechnungsergebnissen	137
Tabelle 11: Instationäre Modellkalibration: Kennwerte der Modellkalibration beispielhaft dargestellt an der Grundwasserstandsmessstelle uw3769 im Östlichen Leibnitzer Feld	160



1 Einleitung und Problemstellung

Die JR-AquaConSol GmbH wurden mit Schreiben vom 11.11.2016 vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Abteilung 14 mit der Erstellung von zwischen der ungesättigten und gesättigten Zone gekoppelten Grundwasserströmungs- und Nitrattransportmodellen für die Grundwasserkörper Leibnitzer Feld (Teile westlich und östlich der Mur) und Unteres Murtal im Zeitraum zwischen 1993 und 2017 beauftragt. Die Beauftragung erfolgte über Zuschlagserteilung im Zuge des Vergabeverfahrens „EU-Projekt SI-MUR-AT, Grundwassersituation“. Über diese Arbeiten wird hiermit der zugehörige Endbericht gelegt.

1.1 Begrenzung des Untersuchungsgebiets

Über den wasserstauenden jungtertiären Ablagerungen bilden die jungquartären Lockergesteinsablagerungen den Grundwasserkörper Leibnitzer Feld. Dieser Aquifer wird von der Mur, die das würmzeitliche Schotterfeld von der Berandung im Westen (Wildoner Schloßberg) bis zum Ostrand (tertiäres Hügelland) quert, in das nordöstliche und in das westliche Leibnitzer Feld geteilt. Vom westlichen Leibnitzer Feld teilt sie sodann auf ihrem Weg nach Süden das südliche Leibnitzer Feld im Raum Vogau - St. Veit ab. Laßnitz und Sulm bilden die Westgrenze des Leibnitzer Feldes und wirken auf den Aquifer durch Infiltrations- und Exfiltrationsstrecken ein.

Als natürlicher Rand fungiert die Mur in ihrem Verlauf zwischen Werndorf im Norden und Gabersdorf im Süden als südwestliche Berandung des Modellgebietes. Die Kraftwerke Lebring – St. Margarethen, Gralla, Hasendorf und Gabersdorf nehmen mit den Abdichtungsmaßnahmen in den Stauräumen, ihren Stauspiegellagen und Unterwassereintiefungen einen entscheidenden Einfluss auf das Grundwassersystem des nordöstlichen Leibnitzer Feldes, spezifisch auf den Bereich zwischen Mühlgang und Mur. Die Nord- und Ostgrenze des Untersuchungsgebietes wird durch den Übergang der quartären Murtafüllung zum neogenen Hügelland gebildet.

Die geologischen Verhältnisse und der sedimentologische Aufbau der Talfüllung im Unteren Murtal wurden im Rahmen der Grundlagenenerhebung in Fank et al. (1994) im Detail dargelegt. Demnach besteht die quartäre Basis im Unteren Murtal aus mächtigen jungtertiären Ablagerungen des Baden bis Pannon, die als Grundwasserstauer fungieren. Diese jungtertiären Sedimente wurden von der Mur oberflächennah erodiert und mit quartären Sedimenten bedeckt.

Die Südgrenze des Grundwasserkörpers Unteres Murtal wird durch die Mur gebildet, die Nordgrenze liegt am Übergang von der Niederterrasse zur Hochterrasse. Richtung Westen und Osten entspricht das Untersuchungsgebiet den Grenzen des Grundwasserkörpers Unteres Murtal nach der Wasserrahmenrichtlinie (im Westen dabei einschließlich der Helfbrunner Terrasse). Im Bereich der einmündenden Grabenlandbäche (z.B. Saßbach, Ottersbach) wurde das Untersuchungsgebiet leicht in Richtung der zugehörigen Talbereiche erweitert.

Aufgrund der naturräumlichen Gegebenheiten und der natürlichen Grenzen, die aus hydrogeologischer Sicht durch die Talränder bzw. durch angrenzende ältere Terrassenlandschaften gebildet werden, sowie der Mur, die einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung der Grundwasserverhältnisse leistete und leistet, wurde das Untersuchungsgebiet in drei Modellgebiete gegliedert: Westliches Leibnitzer Feld, Östliches Leibnitzer Feld und Unteres Murtal (Abbildung 1).

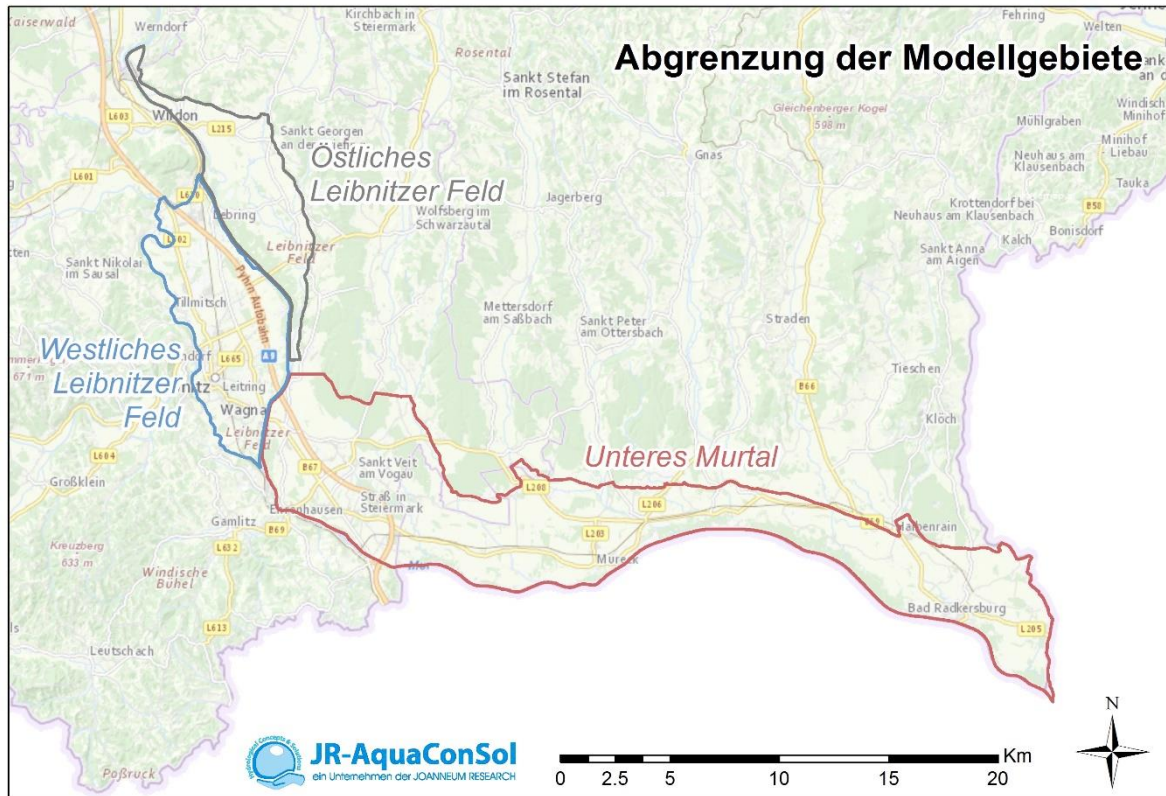


Abbildung 1: Untersuchungsgebiet und die Aufteilung in die einzelnen Grundwasser-Modellgebiete

2 Datengrundlagen

2.1 Basisdaten

Die nachfolgend angeführten Datensätze werden in den jeweils angeführten Kapiteln im Detail beschrieben:

- Hydrologische Daten (Grundwasser- und Oberflächengewässerspiegel) in Kapitel 2.2
- Entnahmedaten in Kapitel 2.3,
- meteorologische Daten in Kapitel 2.4,
- Bohrdaten in Kapitel 3.1,
- Landnutzungsdaten in Kapitel 3.2,
- Bodendaten in Kapitel 3.3,
- Katastralgemeinden für Ermittlung Hydrotope in Kapitel 4.1
- Fruchtfolgen in Kapitel 4.2.1.

Die Verteilungen von Flurabständen wurden mit dem Oberflächengeländemodell (1*1 m Laserscan; am 27.3.2017 als Geodaten aus dem GIS Steiermark bestellt unter <http://www.landesentwicklung.steiermark.at/cms/beitrag/12652215/141979661/>) für das jeweilige Untersuchungsgebiet berechnet. In den einzelnen Gebieten wurden schon Grundwasserströmungsmodelle und auch Nitrattransportmodelle zu früheren Zeitpunkten und mit anderen methodischen Ansätzen erstellt (z.B. Fank & Rock (2011) im östlichen Leibnitzer Feld, Klammler et al. (2013) und Mach (2017) im westlichen Leibnitzer Feld bzw. Fank et al. (2002) und Kupfersberger et al. (2015) im Unteren Murtal). Die in diesen Arbeiten gewonnen Erkenntnisse wurden auch im Verlauf der gegenständlichen Modellierungen berücksichtigt.

2.2 Öffentliches hydrologisches Messnetz

2.2.1 Grundwasserspiegel

Der Grundwasserspiegel in den Grundwasserkörpern Leibnitzer Feld und Unteres Murtal wird vom Hydrografischen Dienst des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung an 175 Messpegeln beobachtet. Detailinformationen der Messstellen können im digitalen Atlas Steiermark (www.gis.stmk.gv.at) unter dem Menüpunkt Grundwasser-Messstellen abgefragt werden. Die im Zuge der Erstellung und Kalibration der Grundwassermodelle verwendeten Messpegel sind in Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellt.

2.2.2 Wasserspiegellagen an Oberflächengewässern

Die im digitalen Atlas Steiermark (www.gis.stmk.gv.at) unter dem Menüpunkt Oberflächenwasser-Pegel angezeigten Pegel an der Mur und den Nebengewässern in den Untersuchungsgebieten wurden bei der Erstellung der Grundwassermodelle berücksichtigt. Eine weitergehende Beschreibung der verwendeten Wasserspiegellagen an Oberflächengewässern bei der Erstellung der Grundwassermodelle befindet sich in Kapitel 6.2.2.

2.2.3 Nitratkonzentrationen im Grundwasser

Die Nitratkonzentration im Grundwasser in den Grundwasserkörpern Leibnitzer Feld und Unteres Murtal wird vom Referat Gewässeraufsicht und Grundwasserschutz des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung an 114 Messpegeln beobachtet. Detailinformationen zu den Messstellen können in

der H2O Fachdatenbank im Wasserinformationssystem Austria (www.umweltbundesamt.a7/h2odb) des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus entnommen werden. Die im Zuge der Erstellung und Kalibration der Grundwassermodelle verwendeten Messpegel sind in Abbildung 25 und Abbildung 26 dargestellt.

2.3 Grundwasserentnahmen

Die Entnahmen aus den Wasserversorgungsbrunnen im Leibnitzer Feld sind in Tabelle 1 und für das Untere Murtal in Tabelle 2 zusammengestellt. Die Daten liegen in unterschiedlichen Aufzeichnungsintervallen vor (Tages-, Monats- oder Jahressummen). Bei Monats- oder Jahressummen wurden die Entnahmen gleichmäßig auf Tagessummen aufgeteilt. Sind für eine Periode innerhalb des angegebenen Zeitraums keine Daten vorhanden, wurde für den Zeitraum ein Ersatzwert aus den vorhandenen Daten geschätzt.

Tabelle 1: Entnahmen von Grundwasser aus dem Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

Brunnen	Zeitraum	Mittl. Entnahme [l/s]
Wildon Br2	1993-2017	3,4
Wildon Br3	2000-2017	2,7
St. Georgen 1	1993-2017	4,3
St. Georgen 2	1993-2017	10,1
Ragnitz Ort	2002-2017	1,3
Ragnitz Au	2004-2017	4,7
Haslach 1	1993-2017	19,1
Haslach 2	1996-2017	17,6
Haslach 3	2004-2017	17,0
Kaindorf 1	1993-2018	7,4
Kaindorf 2	1993-2018	4,3
Kaindorf 3	1993-2018	8,4
Leibnitz 1+2	1993-2018	5,9
Leitring	1993-2018	2,5
Baumhackl	1993-2018	5,5
Peterl 1 & 2	1993-2018	4,1
Lebring Süd	1993-2018	5,1
Retznei	1993-2018	2,0

Tabelle 2: Entnahmen von Grundwasser aus dem Grundwasserkörper Unteres Murtal

Brunnen	Zeitraum	Mittl. Entnahme [l/s]
Mureck VFB1	2005-2016	4,9
Mureck VFB2	2005-2016	4,0
Mureck VFB3	2005-2016	3,6
Gosdorf VFB1	1993-2016	12,2
Gosdorf VFB2	1996-2016	5,2
Fluttendorf1	2003-2016	3,4
Fluttendorf2	2003-2016	11,8

Brunnen	Zeitraum	Mittl. Entnahme [l/s]
Donnersdorf1	2003-2016	8,2
Donnersdorf2	2003-2016	9,4
GWA_VFB1	2011-2016	5,3
GWA_VFB2	2011-2016	3,2
GWA_V1	2011-2016	-3,7
GWA_V2	2012-2016	-4,3
Leibnitzerfeld Süd Br1	1993-2017	9,3
Leibnitzerfeld Süd Br2	1993-2017	3,2
Leibnitzerfeld Süd Br3	2000-2017	7,7
Halbenrain VFB1+VFB3	1993-2017	1,1
Bad Radkersburg	1993-2017	12,9
Dedenitz	1998-2017	3,0

2.4 Meteorologische Daten

Als Eingangsdaten für die in Kapitel 0 beschriebenen Simulationen der Sickerwasserbewegung wurden die Wetterdaten der Stationen Lysimeter Wagna für den Grundwasserkörper Leibnitzer Feld und Fluttendorf für das Untere Murtal verwendet. Im Jahr 2011 wurde in der Nähe der künstlichen Grundwasseranreicherungsanlage Fluttendorf eine Wetterstation errichtet, welche vom Wasserverband Vulkanland betrieben wird. Da der Modellierungszeitraum jedoch bis 1993 zurückreicht, wurden die benötigten Wetterdaten vor 01.07.2011 von der Wetterstation in Wagna abgeleitet. Grünwald (2013) hat dabei entsprechende Zusammenhänge für diese Ableitung definiert, und dabei auch einen engeren Zusammenhang der Station Fluttendorf mit der Station Wagna als mit der Station Bad Radkersburg gefunden.

Grundsätzlich wurden für die Modellierung des Bodenwasserhaushalts und des Stickstoffaustrags aus der Ungesättigten Zone folgende Wetterdaten auf Tagesbasis aus den verfügbaren Wetterinformationen abgeleitet:

- Lufttemperatur: Tagesmaximum, Tagesminimum sowie 7:00, 14:00 und 19:00 Uhr Momentanwerte in [°C]
- relative Feuchte: 7:00, 14:00 und 19:00 Uhr Momentanwerte in [%]
- Windgeschwindigkeit: Tagesmittel in [m/s]
- Globalstrahlung: Tagessumme in [J/cm²/d]
- Niederschlag: Tagessumme in [mm/d]



3 Hydrogeologisches Konzeptmodell

In den beiden Grundwasserkörpern sind die diffuse Grundwasserneubildung gemeinsam mit dem Austausch von Wasser zwischen dem Grundwasserleiter und den Oberflächengewässern die dominanten hydrologischen Prozesse. Beide Vorgänge sind hochgradig zeitlich und räumlich variabel. Mit dem Sickerwasser bzw. dem Austauschwasser gelangt auch Nitrat in den Grundwasserleiter bzw. verlässt diesen auch wieder, wenn Oberflächengewässer den Grundwasserleiter drainieren.

Die Grundwasserspiegellagen werden zusätzlich von den Realentnahmen der Brunnen sowie den zahlreichen Nassbaggerungen beeinflusst. Ebenso wirkt sich das Relief des Grundwasserstauer auf die Grundwasserspiegellagen aus, was besonders an den Übergängen von Reißterrassen zu den Niederterrassen zu starken Grundwasserspiegelgefällen führt (siehe Kapitel 3.1). Die Randzuflüsse in die Grundwasserkörper sind hydrologisch eher von untergeordneter Bedeutung, die zugehörigen Nitratkonzentrationen für den Stoffeintrag aber durchaus relevant.

Die Zu- und Abflüsse von Wässern in die Grundwasserkörper werden über Randbedingungen beschrieben. Die Berechnung der Grundwasserneubildung und des Nitrateintrags inklusive der dafür notwendigen naturräumlichen Parameter wird in den Kapiteln 4.1 bis 4.4 erläutert. Die Umsetzung der Interaktion zwischen Grundwasser und Oberflächengewässern wird in den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.2 beschrieben.

3.1 Morphologie des Grundwassergebietes und Grundwasserstauer

Die wasserführenden Lockergesteine des Leibnitzer Feldes überlagern ein Relief, das im Wesentlichen in wasserstauende Gesteine des Jungtertiär eingekerbt ist und als Sohle des seichten Grundwassers zu betrachten ist. Zumeist handelt es sich um schluffig-sandige bzw. tonige Gesteine (Sand, Sandstein, Schluff, Ton, Mergel, Tonmergel, "Tegel"). Insgesamt zeigt die Grundwassersohle eine ziemlich einheitliche Konfiguration. Sie liegt beim Kraftwerk Werndorf in ca. 295 m und in Gersdorf bei 243 m Seehöhe, was einen Höhenunterschied von 52 m ergibt. Der heutige Verlauf der Mur überwindet auf der gleichen Strecke ebenfalls 52 m. Ausgeprägte und auf weite Strecken anhaltende Tiefenrinnen können nicht festgestellt werden; es ergibt sich eher ein flachwelliges Relief mit durchwegs seichten und breiten Muldenzonen.

Die untere Berandung der quartären Talfüllung stellt der Grundwasserstauer dar, welcher durch unterlagernde ältere, teilweise verdichtete neogene Feinsande und Schluffe gebildet wird. Die flächenhafte Darstellung für das Leibnitzer Feld (Abbildung 2) basiert auf FANK & ROCK (2011) und wurde durch die Ergebnisse neuer Bohraufschlüsse im Untersuchungsgebiet ergänzt. Im Norden wurde ein Anschluss an den Grundwasserstauer des Grazer Feldes auf Basis der geologischen Karte der Steiermark berücksichtigt. Die Morphologie des Grundwasserstauer ist durch Rinnenstrukturen gekennzeichnet, welche die Lage alter Flussläufe repräsentieren. Dabei lässt sich eine Hauptrinne identifizieren, die von St. Georgen an der Stiefing parallel zur östlichen Modellgrenze verläuft und sich im Bereich Haslach mit einer Nebenrinne aus der Region um Lebring vereinigt. Im Westlichen Leibnitzer Feld sind ebenfalls 2 Rinnen am westlichen und östlichen Modellrand zu erkennen. Besonders ausgeprägt ist das Stauerrelief beim Übergang der Jößer Hochterrasse zur Niederterrasse. Zwischen Leitring und der Mur besteht eine lokale Stauerhochlage, die ebenfalls zu einem größeren Gefälle des Stauer führt.

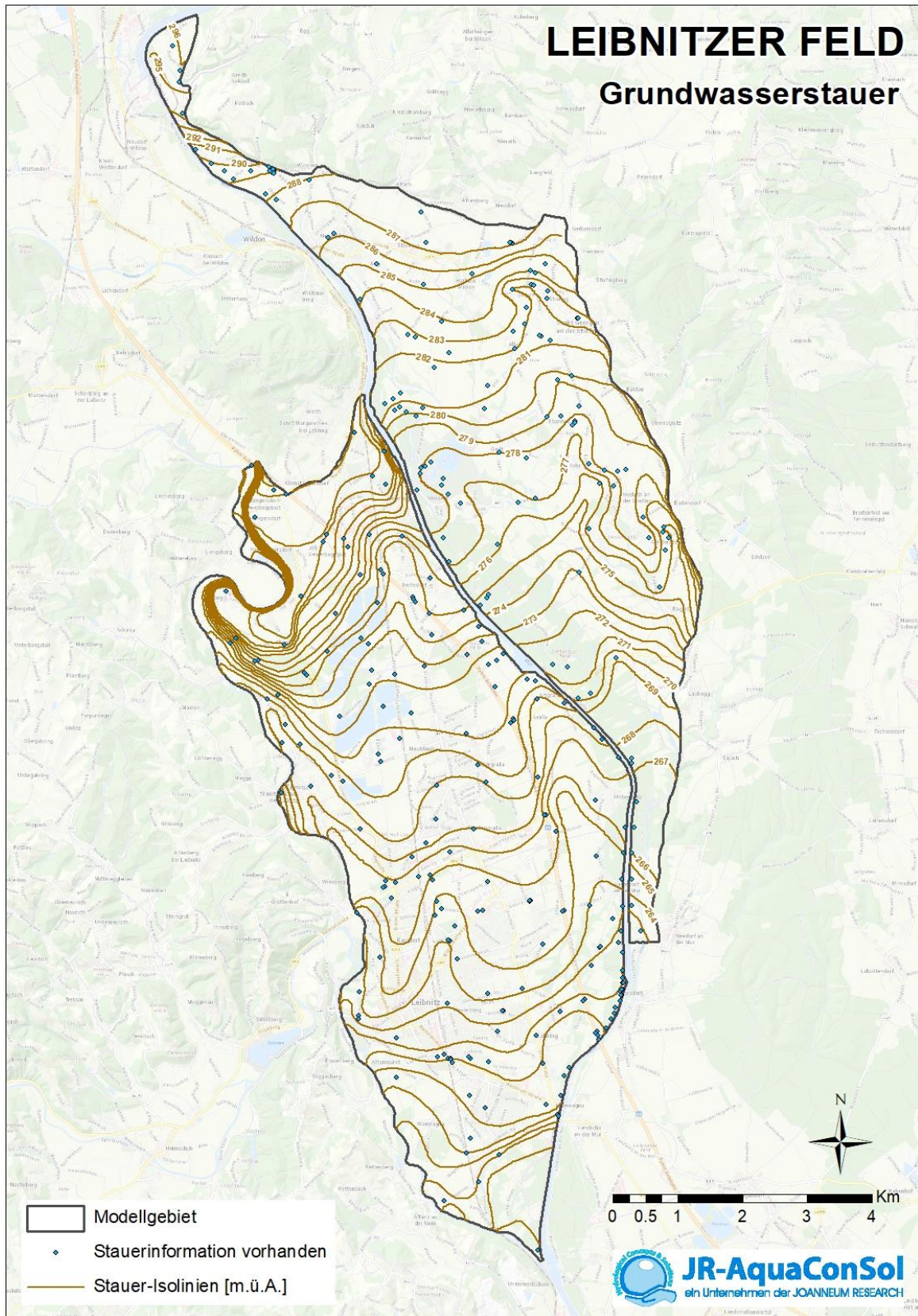


Abbildung 2: Isolinien der Höhen des Grundwasserstauers im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

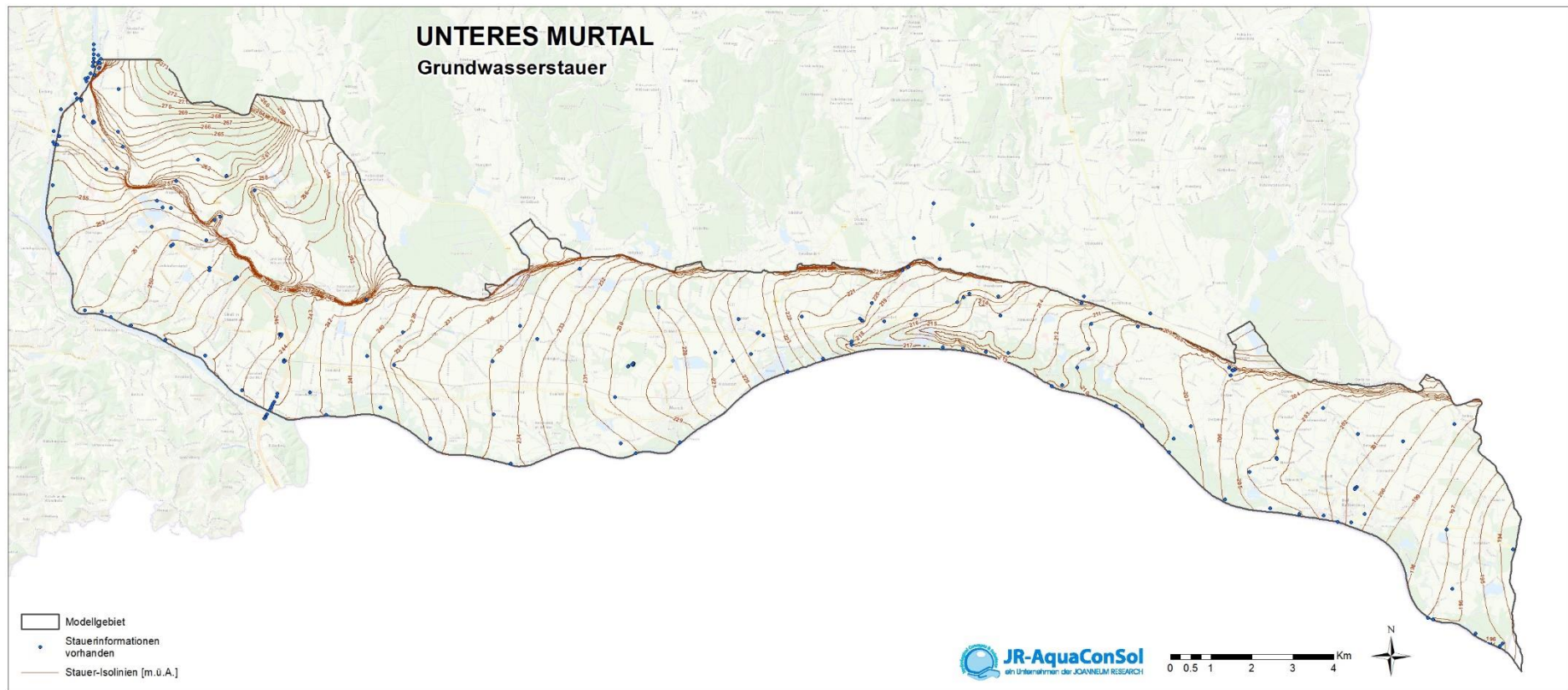


Abbildung 3: Isolinien der Höhen des Grundwasserstauers im Grundwasserkörper Untereres Murtal

Der Grundwasserstauer im Unteren Murtal zeigt im Wesentlichen ein relativ unbewegtes Relief, das nur im Bereich von Mureck und Fluttendorf auf eine Rinnenstruktur in der Oberfläche hinweist (siehe Abbildung 3). Auffallend ist der Nordrand am Übergang zur Helfbrunner Terrasse. Hier kann man, neben einem sehr steilen Anstieg des Stauerreliefs, Rinnenstrukturen erkennen, die mehr oder minder parallel zur Helfbrunner Terrasse bzw. dem Nordrand des Modellgebietes verlaufen und sich möglicherweise bis in die Täler der Grabenlandbäche fortsetzen. Der steile Anstieg (ca. 7.8 ‰) des Stauerreliefs ist nördlich von Eichfeld sehr gut mit Aufschlüssen belegt, wohingegen das West-Ost Gefälle des Grundwasserstauers im unmittelbaren Talbereich mit etwa 1.6 ‰ gering ausfällt.

Die Darstellung der Morphologie ist aufgrund der geringen Aufschlussdichte naturgemäß großen Unsicherheiten unterworfen, sodass im Detail davon ausgegangen werden kann, dass auch stärker akzentuierte Verhältnisse vorliegen können.

3.2 Verteilung der aktuellen Landnutzung

Eine Unterscheidung der Landnutzung im Projektgebiet kann generell in Ackerflächen, Siedlungsgebiet, Wald und Oberflächengewässer vorgenommen werden. Die räumliche Verteilung dieser Landnutzungsarten wurde auf Basis von Orthofotos digitalisiert und ist in Abbildung 4 und Abbildung 5 dargestellt. Die Ackerflächen wurden für die Simulationsrechnungen zusätzlich noch in die einzelnen Katastralgemeinden unterteilt. Dies ist erforderlich, um räumliche Unterschiede in den Kulturenverteilungen zu berücksichtigen. Dazu muss jedoch erwähnt werden, dass die Kulturenverteilungen innerhalb der INVEKOS-Datenbank, eine Datenbank der AMA zur Erfassung der Kulturartenverteilung, zwar generell schlagbezogen erhoben werden, jedoch für die hiesigen Anwendungen nur gemittelt auf Ebene von Katastralgemeinden zur Verfügung standen. Die prozentuale Aufteilung der Landnutzungen im Westlichen Leibnitzer Feld beträgt: 54 % Landwirtschaft, 28 % Siedlung und Gewerbe, 14 % Wald, 3 % Rekultivierungsflächen und 1% Wasserflächen.

Abbildung 5 zeigt die Landnutzung im Grundwasserkörper Unteres Murtal, welche deutlich von der Landwirtschaft (64% Flächenanteil) geprägt wird, wohingegen der Anteil mit Siedlungen und Gewerbe nur 10% beträgt. Die prozentuale Verteilung der unterschiedlichen Landnutzungsklassen in den jeweiligen Grundwasserkörpern ist in Tabelle 3 zusammengefasst.

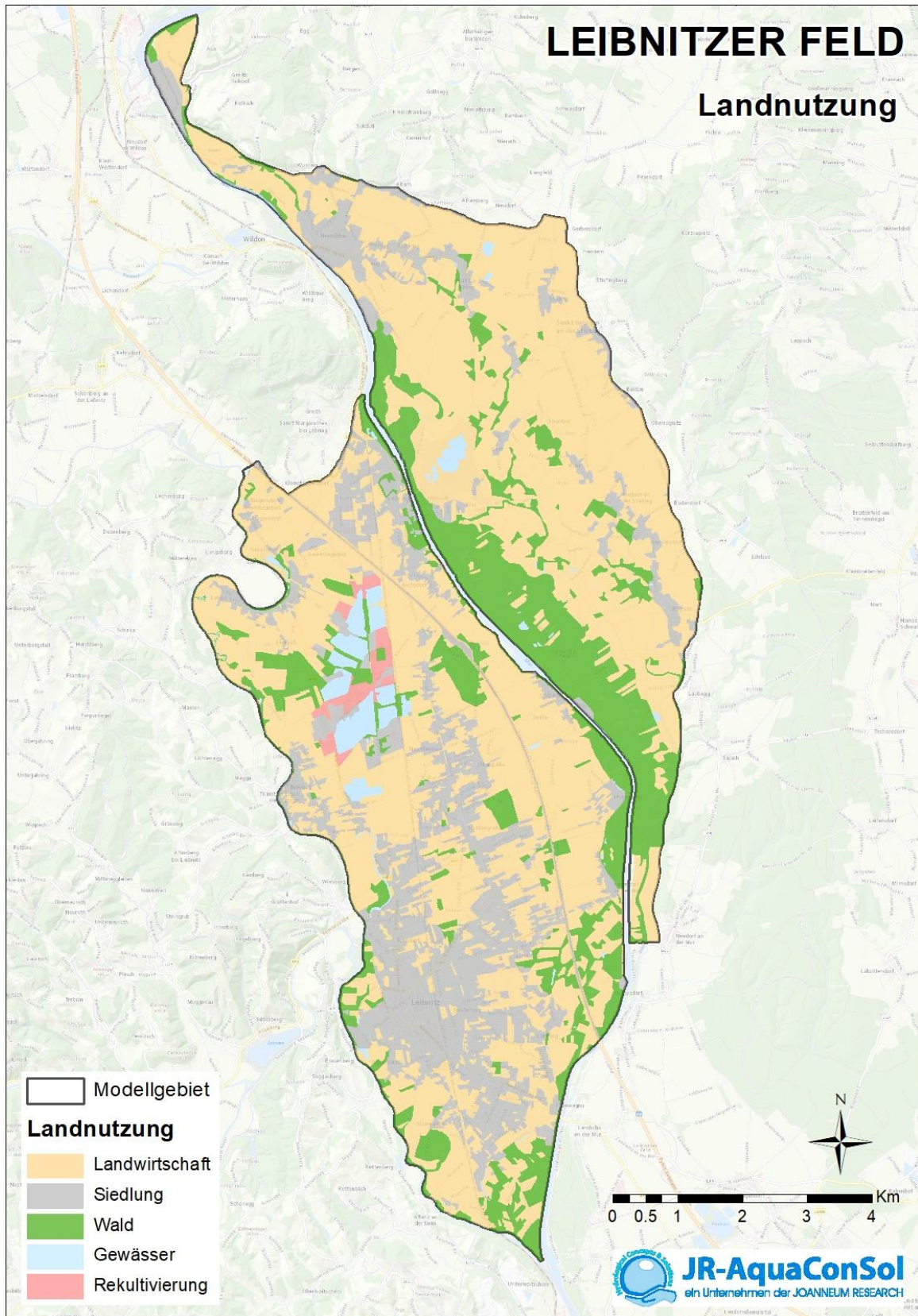


Abbildung 4: Verteilung der Landnutzungen im Leibnitzer Feld

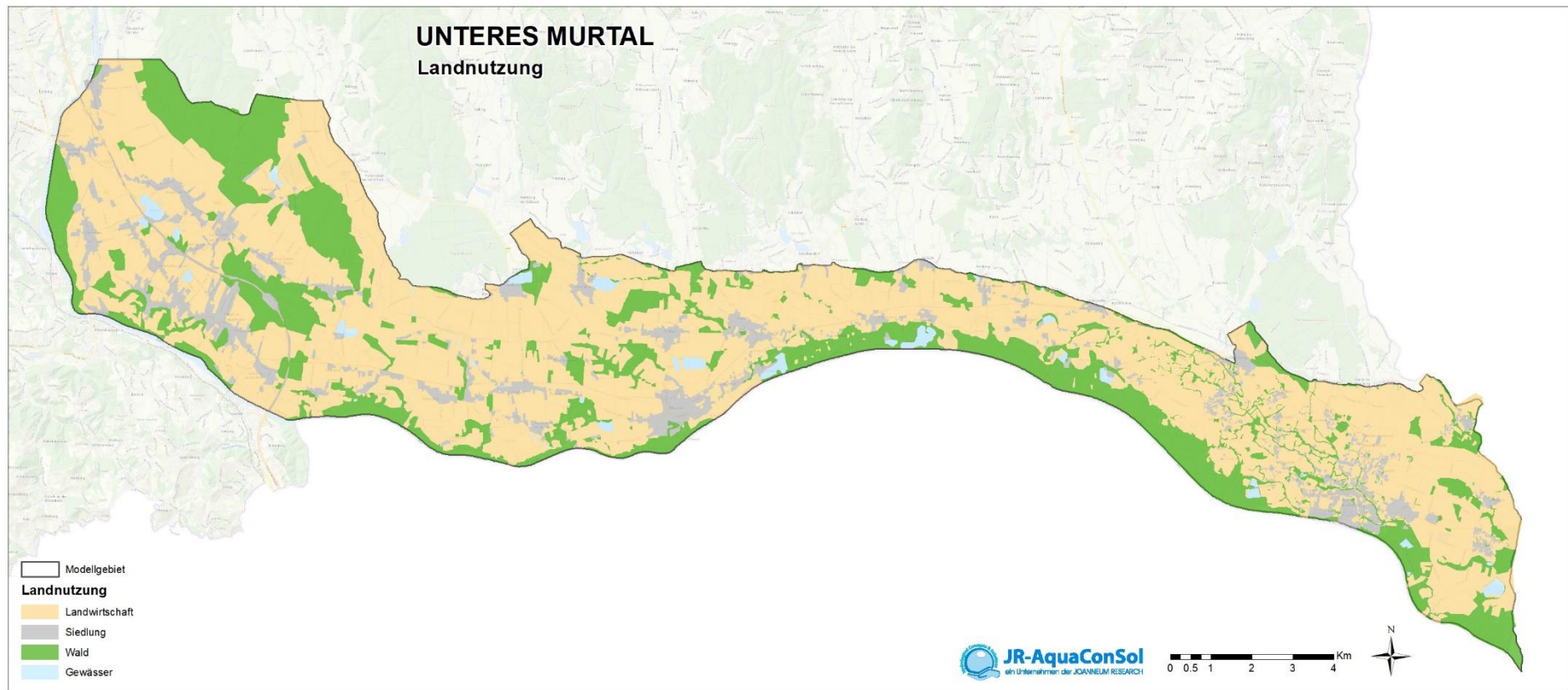


Abbildung 5: Verteilung der Landnutzungen im Unteren Murtal

3.3 Verteilung der Bodentypen

Die Basis für die modellhafte Charakterisierung der Böden in den Untersuchungsgebieten bildet die Österreichische Bodenkartierung (eBOD, 2004). Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die Verteilungen der Bodentypen in den beiden Untersuchungsgebieten.

Die flächendeckende Beschreibung der Bodeneigenschaften von Agrar- und Waldflächen im Projektgebiet ging von den Unterlagen der Österreichischen Bodenkartierung (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 1974) aus, welche bis maximal 140 cm unter Geländeoberfläche reicht. Der weitere Profilaufbau bis zum tiefsten Grundwasserstand wurde durch Verschnitt der Kartierangaben mit Aufschlüssen aus der Region festgelegt. Forstbereichen, zu denen keine Bodeninformation vorlag, wurden die Daten jener Bodenform zugewiesen, die im Umfeld der Forstfläche dominant ist. Für das Untere Murtal liegt bereits aus Vorprojekten das Ergebnis der Kartierung von Waldflächen im Aubereich vor, welches in die Ableitung von Bodeneigenschaften einbezogen wurde.

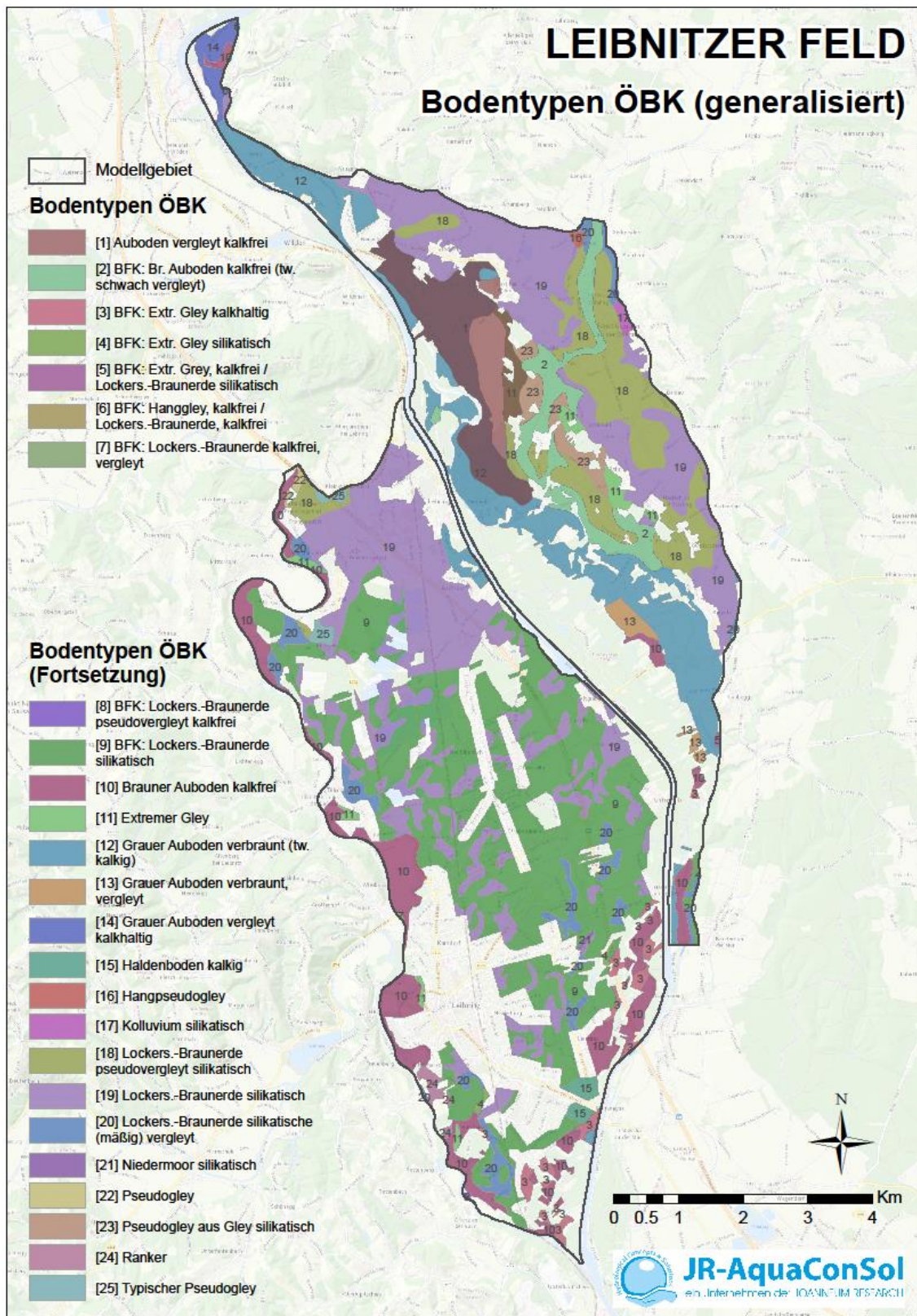


Abbildung 6: Verteilung der Bodentypen im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

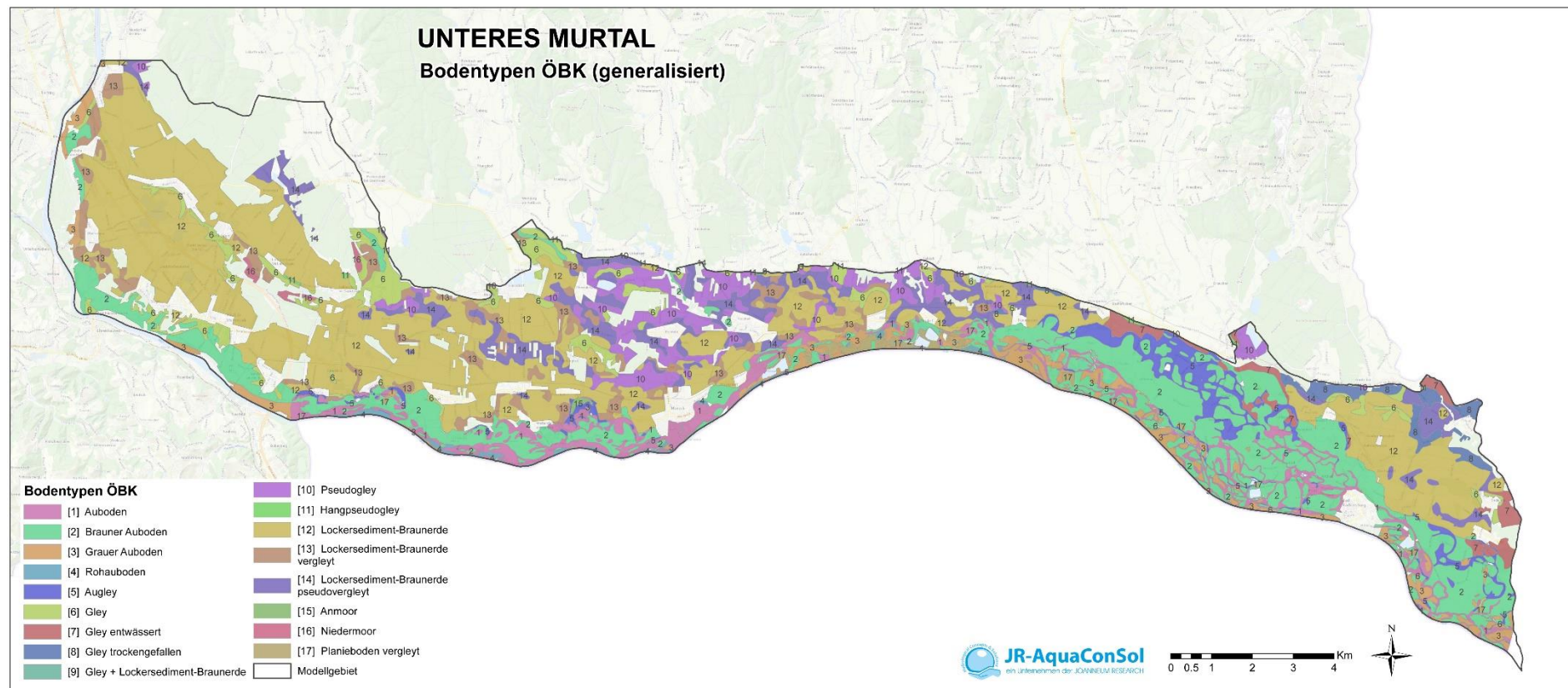


Abbildung 7: Verteilung der Bodentypen im Grundwasserkörper Untereres Murtal



4 Wasserbewegung und Stickstofftransport in der ungesättigten Zone

Die Berechnung der Grundwasserneubildung (GWN) erfolgte – je nach Landnutzungsart – auf Basis unterschiedlicher Ansätze. Dabei wurde zwischen landwirtschaftlichen Ackerflächen, Siedlungsgebiet, Wald und Oberflächengewässer unterschieden. Während die Grundwasserneubildung für Ackerflächen mit dem numerischen Simulationsmodell SIMWASER/STOTRASIM/STOTRAPGEN berechnet wurde, kam für die Bewertung der Grundwasserneubildung für Wald und Oberflächengewässer ein erweiterter Ansatz basierend auf FAO-Penman-Monteith zum Einsatz. Siedlungsgebiete wurden nach einem kombinierten Ansatz von SIMWASER/STOTRASIM (für Grasversickerung), direkter Versickerung (für gesammeltes Regenwasser) und Wasserableitung (z.B. Regenwassereinleitung in Oberflächengewässer) berechnet. Die räumliche Diskretisierung für die Berechnung der Grundwasserneubildung basiert dabei auf sogenannten Hydrotopen.

4.1 Definition von Hydrotopen

Ein Hydrotop ist eine räumliche Einheit bestehend aus gleichen Boden-, Wetter- und Landnutzungseigenschaften. Zusätzlich zu der Unterscheidung der Landnutzung in Ackerflächen, Siedlungsgebiet, Wald und Oberflächengewässer werden die Ackerflächen noch nach ihrer Lage in den einzelnen Katastralgemeinden unterschieden. Dies ist erforderlich, da die prozentuelle Verteilung von Ackerkulturen in den einzelnen Jahren von Katastralgemeinde zu Katastralgemeinde unterschiedlich ist. Aus technischer Sicht werden die Hydrotope schlussendlich über eine räumliche Verschneidung in einem Geographischen Informationssystem (GIS) gebildet. Abbildung 8 und Abbildung 9 geben einen Überblick über die räumliche Verteilung der generierten Hydrotope in den Untersuchungsgebieten.

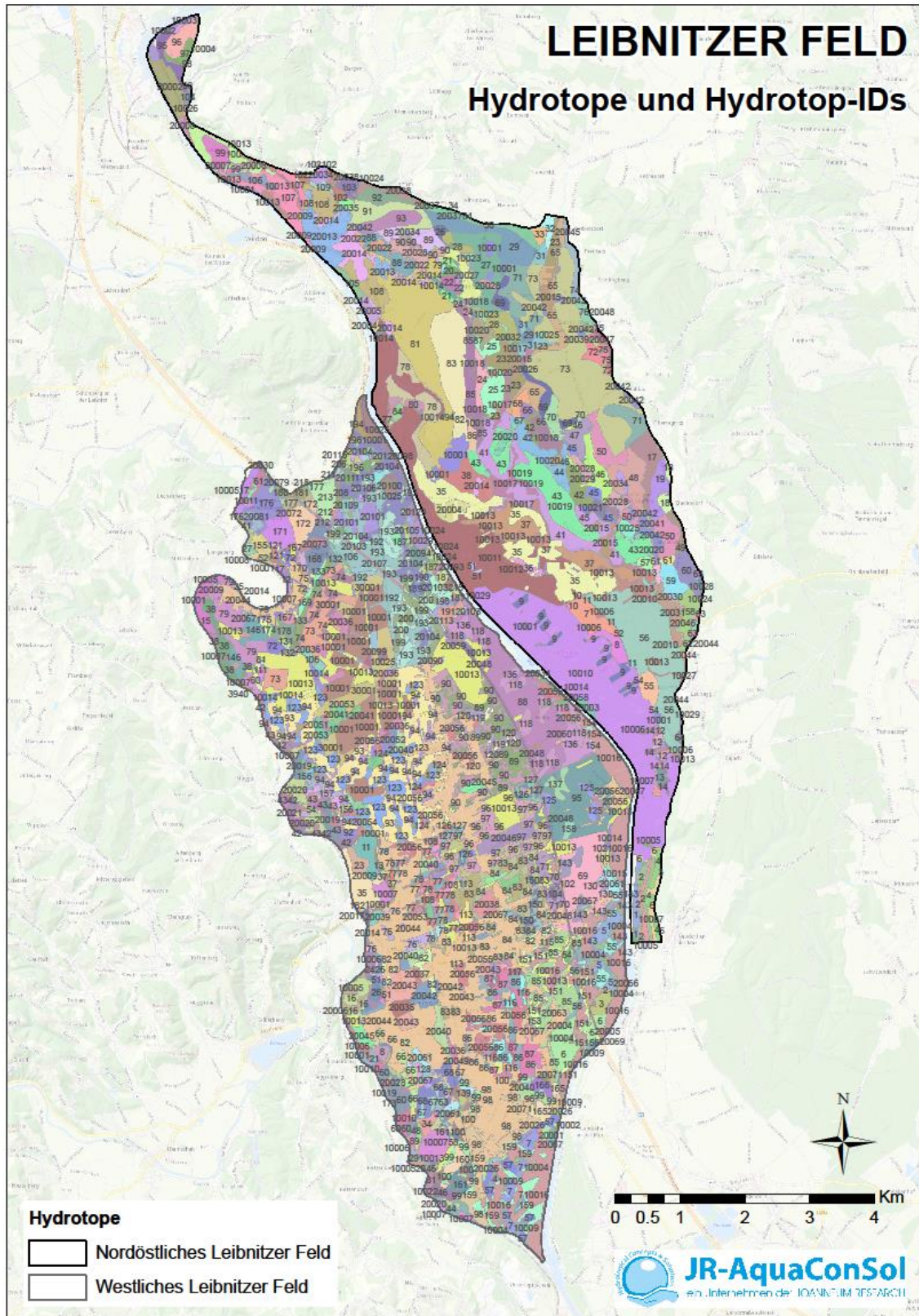


Abbildung 8: Verteilung der Hydrotupe im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

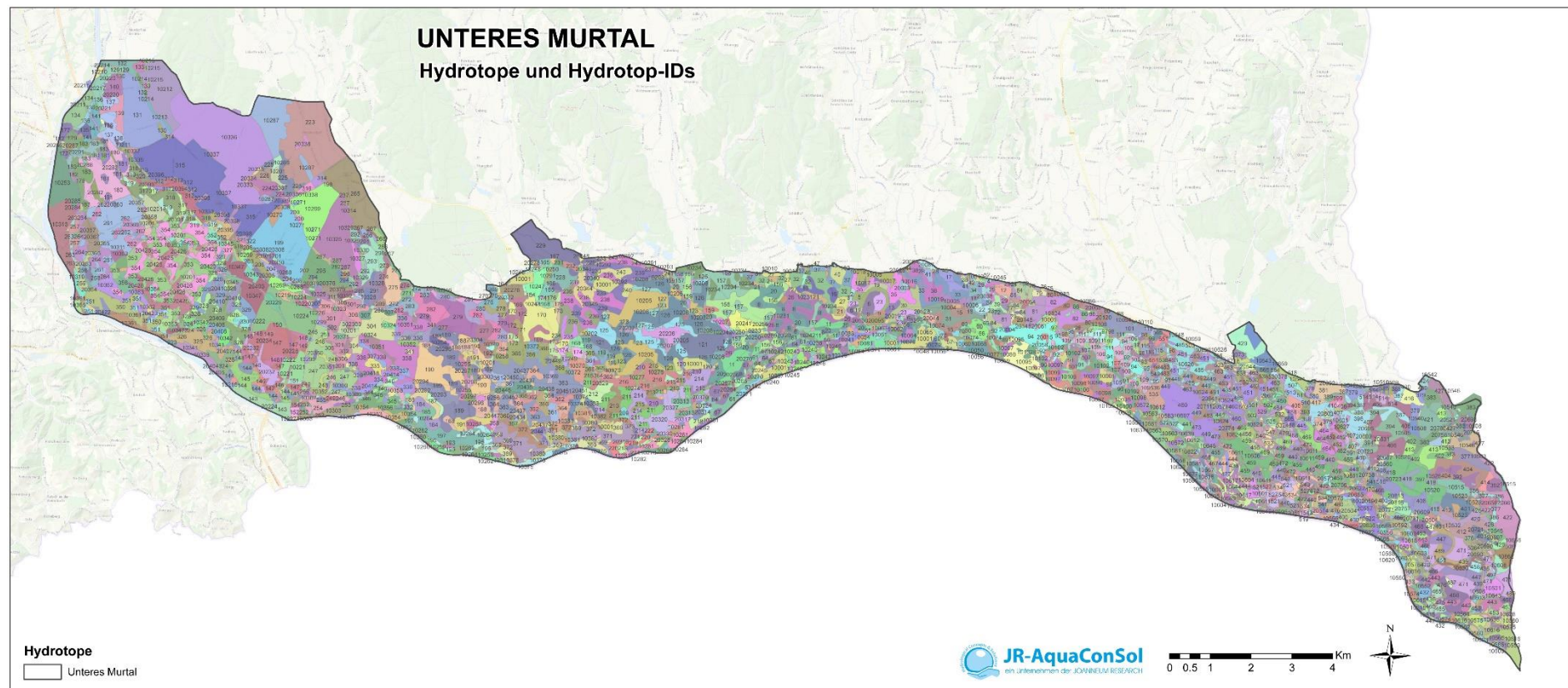


Abbildung 9: Verteilung der Hydrotöpe im Grundwasserkörper Untereres Murtal

4.2 Beschreibung der Modelle SIMWASER und STOTRASIM zur Berechnung der Grundwasserneubildung und der Stickstoffauswaschung unter landwirtschaftlich genutzten Flächen

Das Modell SIMWASER/STOTRASIM beschreibt die Wasserflüsse und die Stickstoffdynamik in der ungesättigten Zone (Bereich zwischen Geländeoberfläche und Grundwasserspiegel) von ackerbaulich genutzten Flächen. Dabei werden die Wasserflüsse und die Vegetationsentwicklung mit dem Modell SIMWASER (Stenitzer, 1988) kalkuliert und STOTRASIM (Feichtinger, 1998) ist die entsprechende Erweiterung zur Beschreibung der Stickstoffdynamik; die Flüsse werden in eindimensionaler, vertikaler Richtung bewertet.

SIMWASER berechnet die Wasserbilanz und das Pflanzenwachstum für eine beliebig lange Fruchtfolge einer Agrarfläche auf Tagesbasis. An der Bodenoberfläche werden Niederschlag und Beregnung als Eintrag und die Evapotranspiration als Wasserentzug in Rechnung gestellt. Interzeption wird berücksichtigt. Die Kalkulation der Wasserbewegung im Boden folgt dem Darcy-Buckingham Gesetz. Die Untergrenze des Bodenprofils ist durch die Grundwasseroberfläche festgelegt oder wird bei einem grundwasserfernen Standort in einer Tiefe angesetzt, in der kein Einfluss durch Wurzelentzug gegeben ist. Der Wasserfluss an der Profiluntergrenze ergibt die Tiefensickerung oder Grundwasserneubildung bzw. den kapillaren Aufstieg. Die Beschreibung der Prozesse, welche im Modell SIMWASER berücksichtigt werden, ist in neuerer Literatur (Stenitzer & Murer 2003, Stenitzer et al. 2007a, Stenitzer et al. 2007b) auszugsweise und in allen Details in Stenitzer (1988) vorgenommen.

Im Modellteil **STOTRASIM** werden die Stickstoff- und partiell die Kohlenstoffdynamik eines landwirtschaftlich genutzten Bodens in eindimensionaler vertikaler Richtung beschrieben, wobei das Hauptaugenmerk auf der Quantifizierung der Nitratauswaschung in den Untergrund liegt. Das Modell errechnet für das jeweilige Bodenprofil Tagesbilanzen des Stickstoffhaushaltes unter folgenden Annahmen:

- Der Stickstofftransport im Boden ist zur Gänze an die Wasserbewegung gebunden (Konvektion + Diffusion/Dispersion).
- Stellvertretend für alle löslichen Stickstoffverbindungen ist ausschließlich Nitrat im Bodenwasser gelöst, dies jedoch vollständig und daher müssen alle anderen Stickstoffkomponenten ($\text{NH}_4\text{-N}$, N_{org}) zuerst in Nitrat umgewandelt werden, um im Boden Mobilität zu erlangen.
- Im Gegenzug wird jedoch jeglicher Stickstoffbedarf (Vegetationsentzug, Immobilisation) durch $\text{NO}_3\text{-N}$ abgedeckt.
- Eingeschränktes Pflanzenwachstum wird bei Wasser- oder Stickstoffmangel in Rechnung gestellt; Pflanzenkrankheiten oder das Fehlen sonstiger Pflanzennährstoffe werden nicht ertragswirksam.
- Makroporenfluss oder Interflow bleiben unberücksichtigt.

Die Berechnung der Grundwasserneubildung von landwirtschaftlich genutzten Ackerflächen wurde mit Hilfe der Modellkette SIMWASER/STOTRASIM in Kombination mit STOTRAPGEN (Klammler et al., 2012) durchgeführt. STOTRAPGEN ist ein Zusatzmodul zu SIMWASER/STOTRASIM und dient neben

der Automatisierung des Pre- und Postprocessings vor allem zur Kompensation von nicht verfügbaren schlagbezogenen landwirtschaftlichen Landnutzungsinformationen (man weiß nicht, was wo und wann angebaut wurde). Der Hintergrund für die Notwendigkeit von STOTRAPGEN für Modellsimulationen liegt im unterschiedlichen Verlauf und der unterschiedlichen Höhe von Sickerwasserfluss und Stickstoffauswaschung bei Anbau von verschiedenen Kulturen. Dies resultiert aus den unterschiedlichen Bewirtschaftungsterminen (Anbau im Herbst oder Frühjahr, unterschiedliche Düngetermine, unterschiedliche Düngemengen) der einzelnen Kulturen und den unterschiedlichen Wachstumsentwicklungen (unterschiedliche Transpirations- und Stickstoffaufnahmeleistung) der einzelnen Kulturen in Kombination mit den tatsächlich vorherrschenden Witterungsbedingungen.

Für Leitfruchtfolgen (siehe Kapitel 4.2.1) werden in einem weiteren Schritt – der sogenannten Fruchtfolge-Rotation – zusätzliche Varianten dieser Modellfruchtfolge gebildet, die zwar die gleiche Kulturenabfolge wie die Ausgangsfruchtfolge haben, jedoch immer um ein Jahr zeitversetzt sind. Somit werden aus einer vierschlägigen Fruchtfolge in Summe vier Varianten gebildet, die jeweils mit einem anderen Fruchtfolgeglied beginnen. Der nächste Schritt in STOTRAPGEN ist das sogenannte Fruchtfolge-Mixen, indem alle Teilergebnisse der Fruchtfolge-Rotationsvarianten wieder entsprechend zusammengefügt werden. Dies erfolgt unter Bildung eines gewichteten Mittels aus den Fruchtfolge-Rotationsvarianten, welches auf der tatsächlichen prozentuellen Kulturenverteilung (z.B. abgeleitet aus INVEKOS-Daten für Katastralgemeinden) basiert. Tatsächlich passiert das Fruchtfolge-Mixen anhand der Simulationsergebnisse mit einem Zeitschritt von einem Tag. Für komplexere Abbildungen von angebauten Kulturen innerhalb von Modellgebieten können in STOTRAPGEN auch mehrere Fruchtfolgen (z.B. FF1, FF2, FF3...FFn) berücksichtigt werden.

Die Bodendaten, die als Input für die Modellierung mit SIMWASER/STOTRASIM erforderlich sind (Horizontierung, pF-Kurve, ku-Kurve etc.), sind vom Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt (Bundesamt für Wasserwirtschaft) in Petzenkirchen für zahlreiche Bodenformen nach der Österreichischen Bodenkartierung sowie der Sonderkartierung der Auwaldflächen im Unteren Murtal in den Untersuchungsgebieten verfügbar. Wenn dies nicht der Fall war, erfolgte die Ableitung bodenphysikalischer Modellparameter aus den Kartierangaben nach einem Transferalgorithmus von Murer (1998).

4.2.1 Charakteristische Fruchtfolgen und Düngemengen

Generell werden für eine Anwendung von SIMWASER/STOTRASIM Daten zur Fruchtfolge, zur Stickstoffdüngung, zur Bodenbearbeitung und zur Bewässerung (wenn vorhanden) benötigt. In Abstimmung mit der Landwirtschaftlichen Umweltberatung wurden die folgenden Fruchtfolgen für die Berechnungen in den Untersuchungsgebieten definiert:

- Körnermais-Kürbis-Körnermais-Winterweizen-Körnermais
- Körnermais-Kürbis-Körnermais-Wintergerste-Körnermais
- Körnermais-Körnermais-Sommergetreide-Winterraps
- Körnermais-Körnermais-Sojabohne-Silomais
- Grünland

Dabei wurde nach Kürbis generell eine winterharte Gründedecke angenommen. Im unteren Murtal wurde in Ergänzung zu den oben aufgezählten Fruchtfolgen noch eine weitere Fruchtfolge in Form

von Saatmais berücksichtigt und nach Wintergetreide eine Zwischenfrucht nur auf der Niederterrasse angenommen. Die prozentuelle Kulturenverteilung für die Verwendung in STOTRAPGEN ist von Auswertungen der Invekos-Datenbank für die im Modellgebiet vorkommenden Gemeinden verfügbar.

Die Stickstoffdüngermengen wurden in Anlehnung an die derzeit gültigen Bestimmungen (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2018) definiert.

4.3 Berechnung der Grundwasserneubildung unter Wald

Die Grundwasserneubildung unter Waldstandorten wird mit Hilfe eines Einschicht-Bodenwasserhaushaltsmodelles nach dem Speicherüberlaufprinzip (Fank et al, 2008) berechnet. D.h., Sickerwasserfluss findet nur dann statt, wenn annähernd gesättigte Wasserverhältnisse im Boden vorherrschen. Grundsätzlich wird dabei die Grundwasserneubildung nach der klimatischen Wasserbilanz $GWN = N - ETr - \Delta S$ berechnet, wobei N den Niederschlag, ETr die berechnete reale Evapotranspiration und ΔS die Bodenwasserspeicheränderung von einem Tag auf den anderen darstellen. Die für die Simulation erforderliche Beschreibung der Bodencharakteristik erfolgt dabei in Form der nutzbaren Feldkapazität (nFK). Die nFK ist jene Wassermenge im Boden, die generell den Pflanzen zum Wachstum zur Verfügung steht. Überschreitet die Wassermenge im Boden die nFK, so tritt Sickerwasserfluss ein. Eine Beschreibung der Methode zur Ableitung der nFK ist in Klammler (2008) enthalten. Die reale Evapotranspiration wird in diesem Anwendungsfall nach der FAO-Penman-Monteith-Methode (Allen et al., 1998) berechnet. Dafür sind die meteorologischen Parameter Lufttemperatur, relative Feuchte, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit, sowie ein Pflanzenkoeffizient für Wald erforderlich. Des Weiteren wird für die Berechnung der ETr der Wasserstressfaktor für Pflanzen – also der Punkt, wo die Wassermenge im Boden die nFK unterschreitet und die Pflanzen kein Wasser mehr aufnehmen können – berücksichtigt.

4.4 Berechnung der Grundwasserneubildung unter versiegelten Flächen

Bei Siedlungsflächen spielt der Grad der Versiegelung eine entscheidende Rolle, da darauf fallender Niederschlag meist in Sickerschächten direkt dem Grundwasser zugeführt wird (Annahme von 85% Direktversickerung; Rest wird in Oberflächengewässer abgeleitet). Dieses Verhältnis hängt sehr stark von der Bebauungsstruktur (Einfamilienhäuser, Ortskern, Einkaufszentren, Industrieflächen etc.) ab und kann daher sehr stark schwanken. Durch die geologischen Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet, welche in relativ seichter Tiefe unter GOK einen mächtigen Schotterkörper aufweisen, sind die Versickerungsraten dieser Sickerschächte sehr hoch.

Die nicht versiegelte Fläche wird mit SIMWASER/STOTRASIM (Grasbewuchs; zwischen März und Oktober alle 2 Wochen gemäht) modelliert, welches dafür am Graslysimeter des Versuchsfeldes Wagna kalibriert wurde. Die ungesättigte Sickerwasserbewegung und Nitratverlagerung unter Rekultivierungsflächen werden mit SIMWASER/STOTRASIM unter der Annahme eines geringmächtigen Bodens mit 10 cm Tiefe unter Grasbewuchs (1 Schnitt pro Jahr; Mulchbetrieb; kein Düngereinsatz) berechnet (Klammler et al., 2012).

Die Grundwasserneubildung unter Siedlungsgebiet wird unter der Berücksichtigung der folgenden drei Prozesse berechnet:

- **Grünlandversickerung:** Berechnung der Grundwasserneubildung für nicht versiegelte Flächen mit SIMWASER (Kultur Grünland; Kalibration HYDROLYS Wagna).
- **Direktversickerung:** Niederschlagswasser, das von Dächern und versiegelten Flächen über Sickerschächte direkt in den Aquifer eingeleitet wird
- **Ableitung:** Niederschlagswasser, das von Dächern und versiegelten Flächen in Vorfluter eingeleitet wird

Die prozentuelle Verteilung dieser drei unterschiedlichen Teilprozesse der Grundwasserneubildung von einzelnen Siedlungsgebieten wurde manuell auf Basis einer Orthofoto-Auswertung festgelegt.

4.5 Verteilung der mittleren Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet

Abbildung 10 stellt die Verteilung der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld dar. Die mittleren jährlichen Grundwasserneubildungsraten kategorisiert nach den unterschiedlichen Landnutzungen sind in Tabelle 3 für die drei Untersuchungsgebiete angeführt.

Wie zu erkennen ist, liegen die höchsten Grundwasserneubildungsraten im Östlichen Leibnitzer Feld in Siedlungsflächen (Mittelwert von 514 mm/a), was aufgrund des dort höheren Anteils der Direktversickerung von Dachabwässern bzw. der Abwässer von befestigten Flächen zu erwarten war. Bei den landwirtschaftlichen Nutzflächen beträgt die mittlere Grundwasserneubildung 328 mm/a. Unter Wald beträgt die mittlere jährliche Grundwasserneubildung 208 mm/a, für das gesamte Untersuchungsgebiet errechnet sich ein flächengewichtetes Mittel von 318 mm/a.

Im Westlichen Leibnitzer Feld liegen die höchsten Grundwasserneubildungsraten in Siedlungsflächen (Mittelwert von 550 mm/a). Bei den landwirtschaftlichen Nutzflächen beträgt die mittlere Grundwasserneubildung 337 mm/a. Unter Wald beträgt die mittlere jährliche Grundwasserneubildung 229 mm/a, für das gesamte Untersuchungsgebiet errechnet sich ein flächengewichtetes Mittel von 381 mm/a.

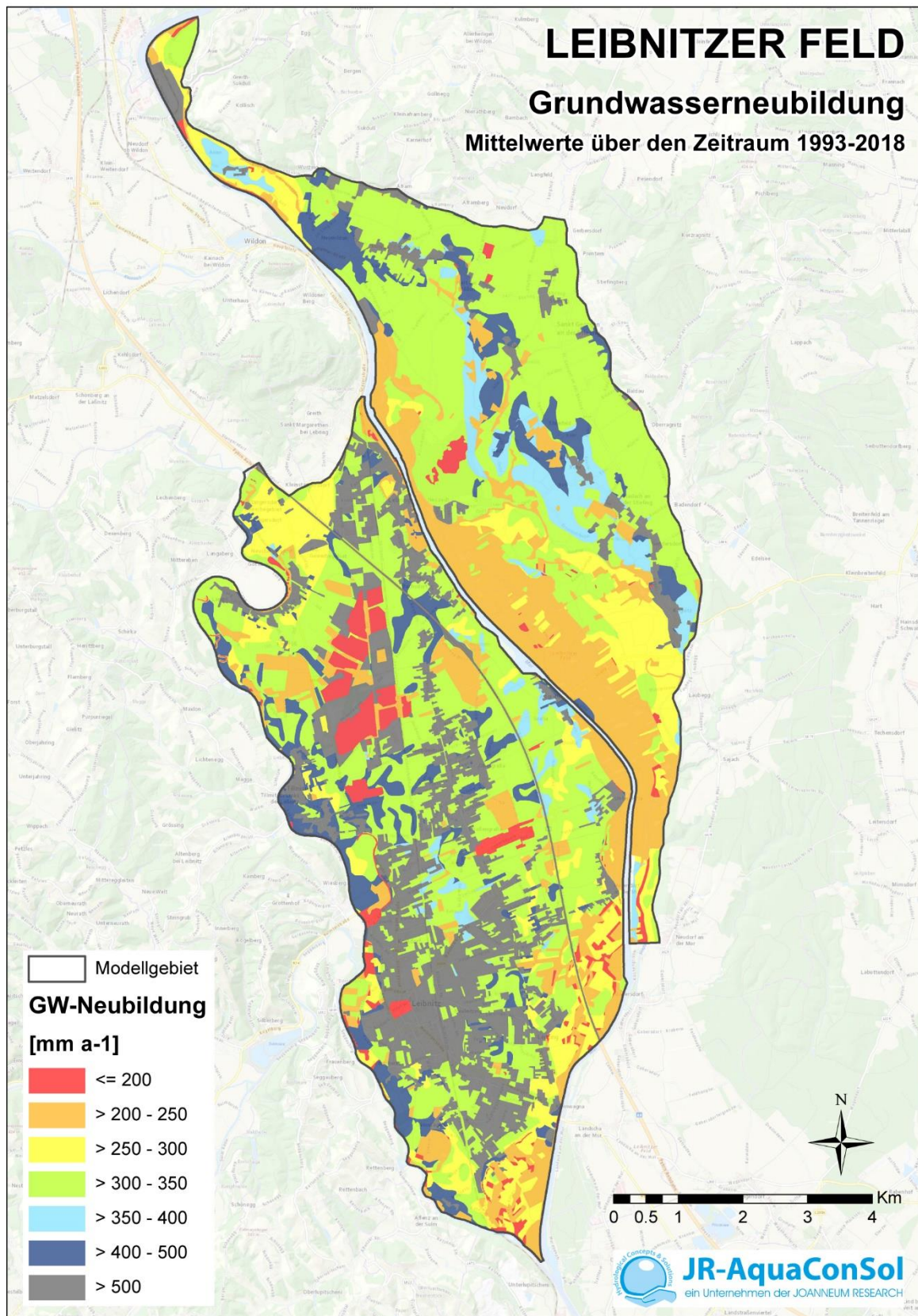


Abbildung 10: Verteilung der mittleren Grundwasserneubildung im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

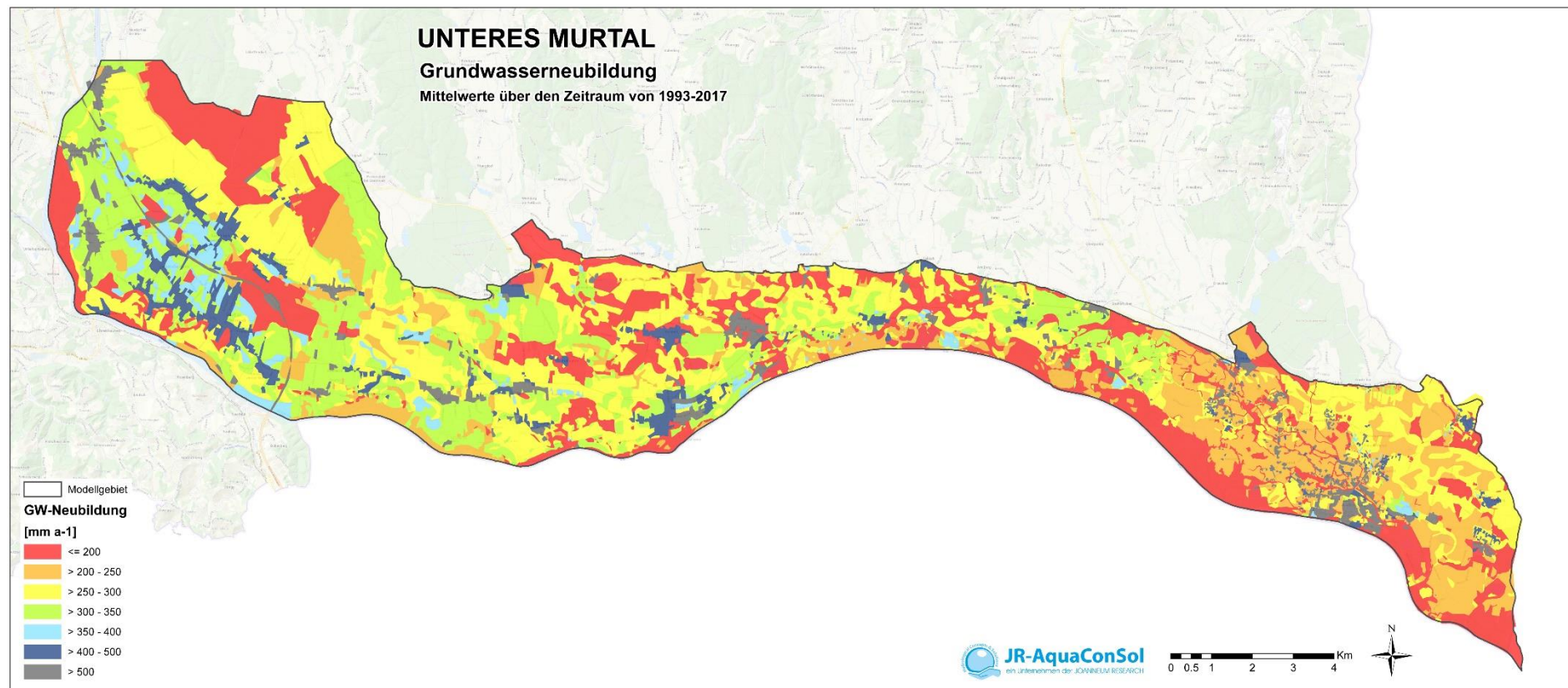


Abbildung 11: Verteilung der mittleren Grundwasserneubildung im Grundwasserkörper Unteres Murtal

Abbildung 11 stellt die Verteilung der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung im Grundwasserkörper Unteres Murtal dar. Wie zu erkennen ist, liegen die höchsten Grundwasserneubildungsraten in Siedlungsflächen (Mittelwert von 538 mm/a). Bei den landwirtschaftlichen Nutzflächen beträgt die mittlere Grundwasserneubildung lediglich 283 mm/a; besonders im Osten des Untersuchungsgebiets gibt es weitläufige Bereiche mit einer Grundwasserneubildung kleiner als 250 mm/a. Unter Wald beträgt die mittlere jährliche Grundwasserneubildung 187 mm/a, für das gesamte Untersuchungsgebiet errechnet sich ein flächengewichtetes Mittel von 283 mm/a, was durch den hohen Anteil an landwirtschaftlicher Fläche bedingt ist.

Die Verteilungen der Grundwasserneubildungssumme wurden auch für jedes Einzeljahr in der Simulationsperiode ermittelt (siehe Anhang 11.4).

4.6 Verteilung des mittleren Stickstoffaustrags im Untersuchungsgebiet

In Abbildung 12 ist deutlich erkennbar, dass die höchsten Stickstoffaustragswerte ($> 100 \text{ kg/ha/a}$) in vereinzelt Bereichen im Östlichen Leibnitzer Feld auftreten, in denen auch eine hohe Grundwasserneubildung berechnet wurde. In den meisten Fällen liegt dabei der Bodentyp silikatische Lockersediment-Braunerde vor. Erwartungsgemäß sind die geringsten Stickstoffaustragswerte ($< 25 \text{ kg/ha/a}$) in Waldgebieten zu finden. Für das Östliche Leibnitzer Feld errechnet sich ein mittlerer Stickstoffaustrag von 38 kg/ha/a .

Im Westlichen Leibnitzer Feld treten Stickstoffaustragswerte größer als 100 kg/ha/a nur in vereinzelt Bereichen auf, in denen auch eine hohe Grundwasserneubildungsrate ($> 400 \text{ mm/a}$) vorliegt. Die geringsten Stickstoffaustragswerte ($< 25 \text{ kg/ha/a}$) sind in Wald- und Siedlungsgebieten zu finden, so dass sich für das Westliche Leibnitzer Feld ein mittlerer Stickstoffaustrag von 32 kg/ha/a errechnet.

In Abbildung 13 ist zu erkennen, dass die höchsten Stickstoffaustragswerte ($> 100 \text{ kg/ha/a}$) in vereinzelt Bereichen im östlichen Teil des Unteren Murtales auftreten, in denen jährliche Grundwasserneubildungsmengen von teilweise größer als 300 mm berechnet wurden. Diese Bereiche stimmen mit den Anbaugebieten von Saatmais im Raum Donnersdorf / Dietzen überein. Die geringsten Stickstoffaustragswerte (jeweils 10 kg/ha/a) werden unter Waldgebieten und Siedlungen errechnet, für den gesamten Grundwasserkörper ergibt sich ein mittlerer Stickstoffaustrag von 32 kg/ha/a .

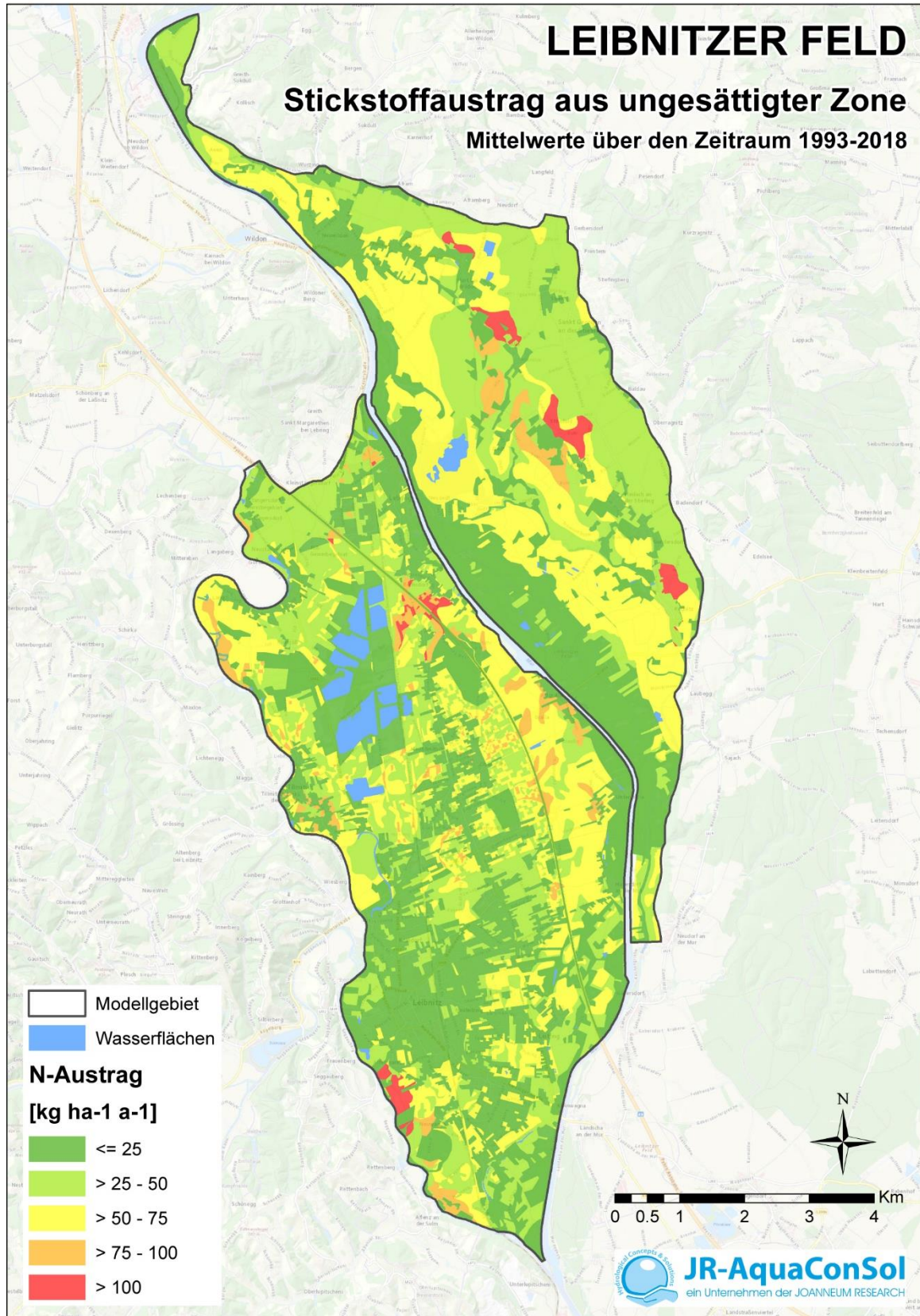


Abbildung 12: Verteilung des mittleren jährlichen Stickstoffaustrags aus der ungesättigten Zone im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

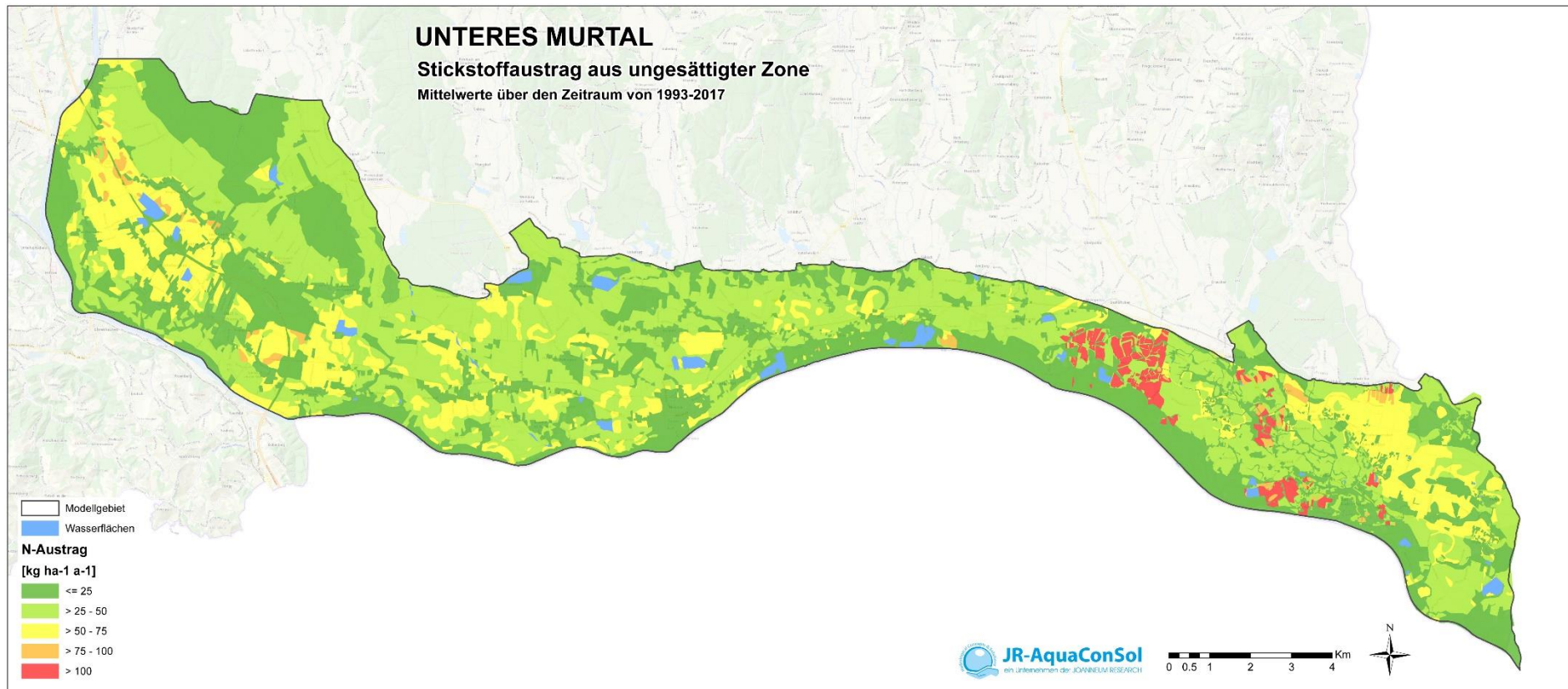


Abbildung 13: Verteilung des mittleren jährlichen Stickstoffaustrags aus der ungesättigten Zone im Grundwasserkörper Untereres Murtal

Die Verteilungen des Stickstoffaustrags aus der ungesättigten Zone wurden auch für jedes Einzeljahr in der Simulationsperiode ermittelt (siehe Anhang 11.4).

4.7 Verteilung der mittleren Nitratkonzentration im Sickerwasser im Untersuchungsgebiet

Die Nitratkonzentration im Sickerwasser ergibt sich aus der Kombination der Grundwasserneubildung mit dem Stickstoffaustrag und zeigt eine ähnliche räumliche Verteilung wie der Stickstoffaustrag. Aufgrund der dominierenden landwirtschaftlichen Nutzung im Östlichen Leibnitzer Feld gibt es nur geringe Teilflächen mit einer mittleren jährlichen Nitratkonzentration im Sickerwasser kleiner als 50 mg/l (siehe Abbildung 14). Im Bereich der landwirtschaftlich genutzten Gebiete ergibt sich eine mittlere Nitratkonzentration von 71 mg/l (mit Spitzenwerten im Jahresmittel von 123 mg/l) und ein Mittel von 53 mg/l über das gesamte Untersuchungsgebiet.

Im östlichen Teil des Westlichen Leibnitzer Feldes dominiert die landwirtschaftliche Nutzung, so dass dort die Teilflächen mit den höchsten mittleren jährlichen Nitratkonzentrationen im Sickerwasser (> 75 mg/l) auftreten. Im Bereich der landwirtschaftlich genutzten Gebiete ergibt sich eine mittlere Nitratkonzentration von 70 mg/l (mit Spitzenwerten im Jahresmittel von 127 mg/l). Für das gesamte Untersuchungsgebiet berechnet sich ein Mittel von 32 mg/l, bedingt durch den hohen Anteil (46 %) von nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Tabelle 3: Grundwasserneubildung, Stickstoffaustrag und Nitratkonzentration im Sickerwasser in den jeweiligen Untersuchungsgebieten (von oben nach unten: östliches Leibnitzer Feld, westliches Leibnitzer Feld, Unteres Murtal) flächengewichtet nach Landnutzungskategorie

	<i>Fläche [ha]</i>	<i>Fläche [%]</i>	<i>GWNB [mm/a]</i>	<i>N-Ausw. [kg/ha/a]</i>	<i>NO3-Konz. [mg/L]</i>
Landwirtschaft	2146	67%	328	52	71
Wald	732	23%	208	10	21
Siedlung	315	10%	514	11	9
Gewässer	33	1%	186	0	0
	3227	100%	318	38	53
	<i>Fläche [ha]</i>	<i>Fläche [%]</i>	<i>GWNB [mm/a]</i>	<i>N-Ausw. [kg/ha/a]</i>	<i>NO3-Konz. [mg/L]</i>
Landwirtschaft	2332	53%	337	53	70
Siedlung	1254	28%	550	9	8
Wald	616	14%	229	10	19
Gewässer	145	3%	186	0	0
Rekultivierung	65	1%	543	7	6
	4412	100%	381	32	38
UMUR	<i>Fläche [ha]</i>	<i>Fläche [%]</i>	<i>GWNB [mm/a]</i>	<i>N-Ausw. [kg/ha/a]</i>	<i>NO3-Konz. [mg/L]</i>
Landwirtschaft	9620	64%	283	44	69
Wald	3652	24%	187	10	24
Siedlung	1487	10%	538	10	9
Gewässer	219	1%	139	0	0
	14978	100%	283	32	50

Wegen des hohen Anteils der landwirtschaftlichen Nutzung im unteren Murtal gibt es nur geringe Teilflächen mit einer mittleren jährlichen Nitratkonzentration im Sickerwasser kleiner als 50 mg/l.

Weite Teile im Osten des Unteren Murtales weisen sogar Sickerwasserkonzentrationen von Nitrat im Jahresmittel von über 75 mg/l auf. Im Bereich der landwirtschaftlich genutzten Gebiete ergibt sich eine mittlere Nitratkonzentration von 69 mg/l (mit Spitzenwerten im Jahresmittel von 191 mg/l) und ein Mittel von 50 mg/l über das gesamte Untersuchungsgebiet.

Tabelle 3 enthält zusammengefasst die Grundwasserneubildung, den Stickstoffaustrag und die Nitratkonzentration im Sickerwasser aufgegliedert nach Landnutzungskategorien für die drei Untersuchungsgebiete.

Die Verteilungen der niedrigsten, mittleren und höchsten Stickstoffkonzentration im Sickerwasser wurden auch für jedes Einzeljahr in der Simulationsperiode ermittelt (siehe Anhang 11.4).

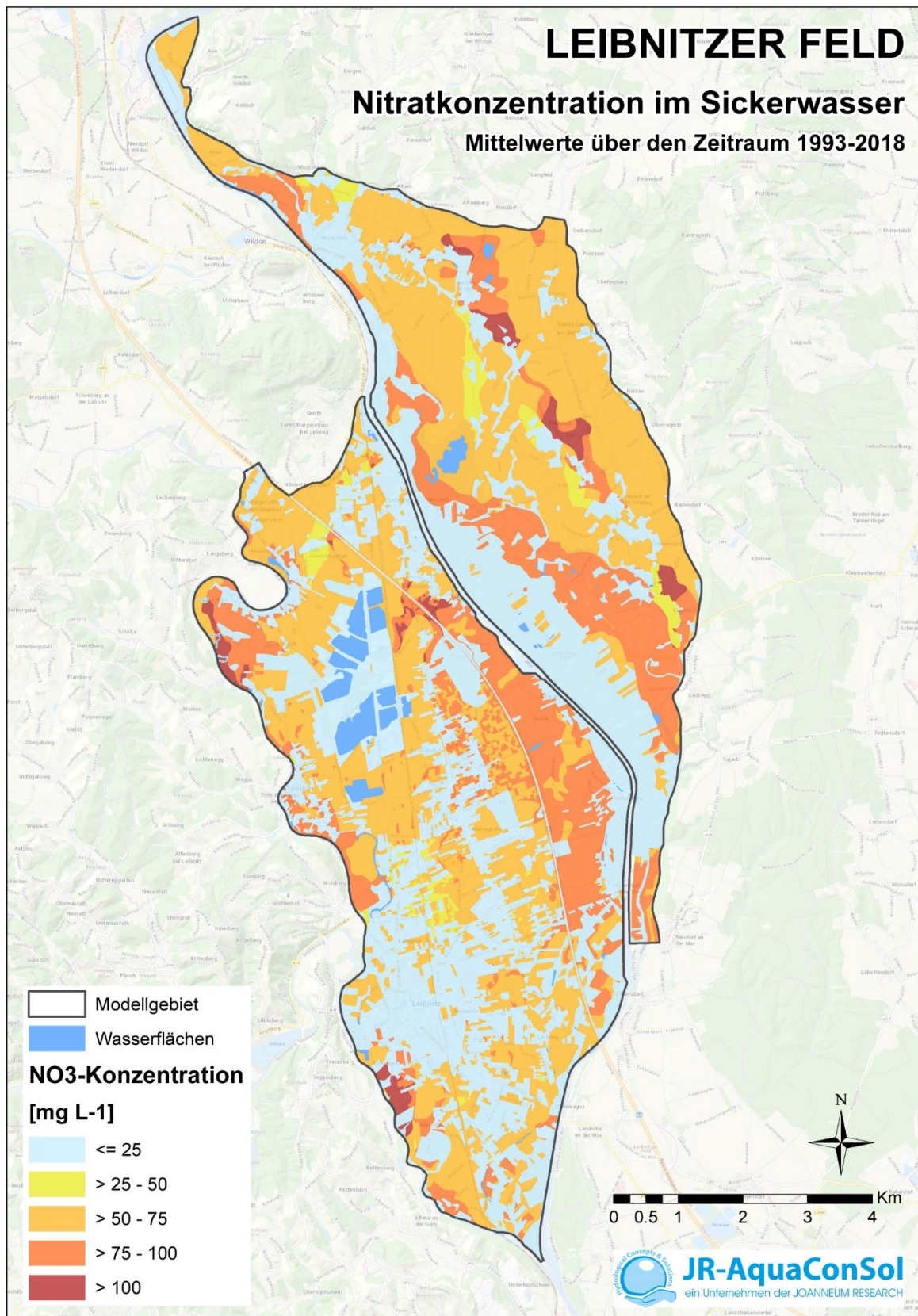


Abbildung 14: Verteilung der mittleren Nitratkonzentration im Sickerwasser im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

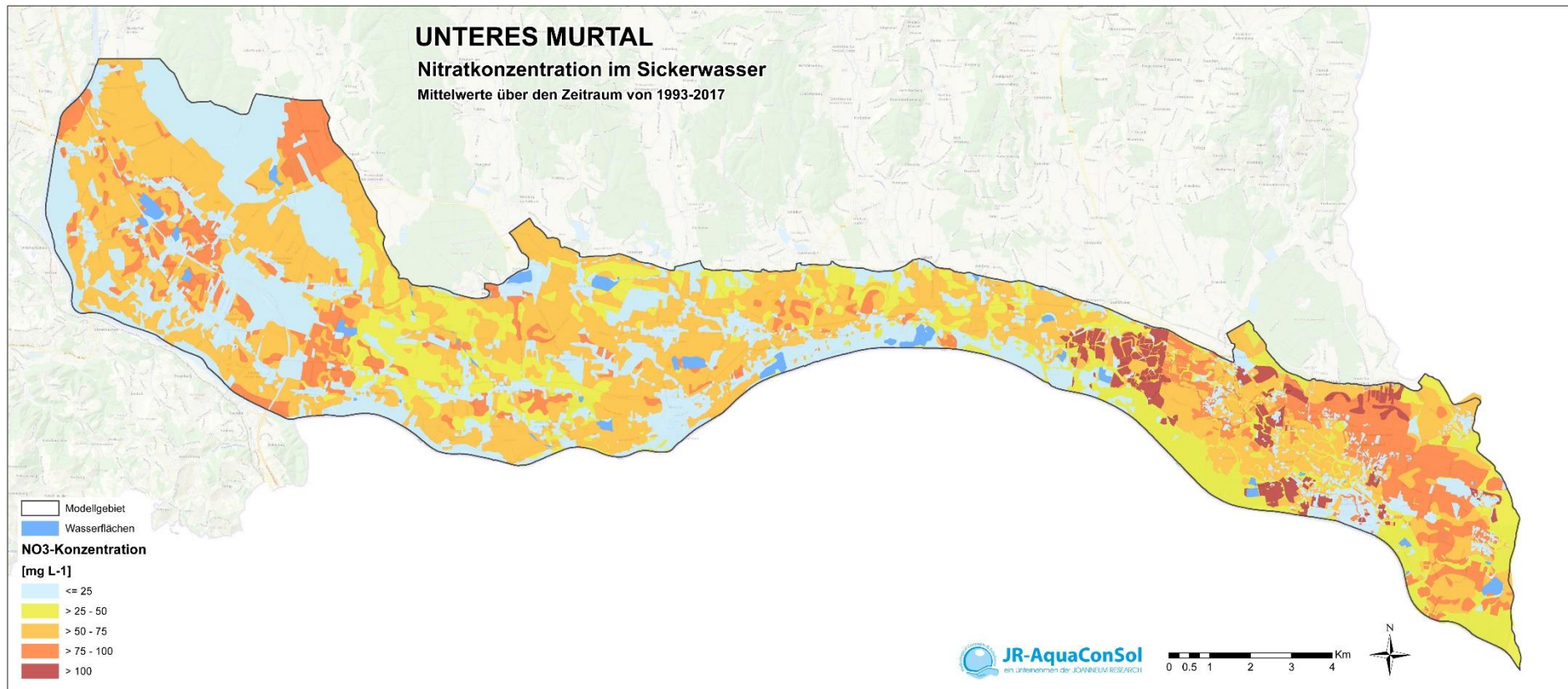


Abbildung 15: Verteilung der mittleren Nitratkonzentration im Sickerwasser im Grundwasserkörper Untereres Murtal

5 Erstellung des Grundwasserströmungs- und des Nitrattransportmodells

5.1 Sequentiell gekoppelter Modellansatz

Als Ergebnis der SIMWASER/STOTRASIM-Berechnung entsteht für jedes Hydrotop ein Zeit-Tiefen-Profil der Grundwasserneubildung [mm/d] und ein Zeit-Tiefen-Profil des Stickstoffeintrags [kg/ha]. Diese Zeit-Tiefenprofile müssen danach um Zeitreihen mit den Berechnungsergebnissen für Siedlungsflächen und Waldflächen ergänzt werden. Um als Eingabedatensatz für das Berechnungsmodul in FEFLOW geeignet zu sein, müssen diese Daten noch in eine spezielle Binärdaten-Datei konvertiert werden, die es ermöglicht, die Daten aller Hydrotope zeitschrittweise zur Verfügung zu stellen. Für diese Konvertierung wurde ein eigenes Softwaretool entwickelt.

In FEFLOW wird vor der Berechnung jeden Zeitschrittes für alle FE-Elemente mittels des Grundwasserspiegels im vorhergehenden Zeitschritt der Flurabstand ermittelt und damit aus dem für das jeweilige FE-Element maßgebenden Zeit-Tiefenprofil für die entsprechende Tiefe die Grundwasserneubildung und der Stickstoffeintrag ausgelesen. Dazu müssen die Zuordnung der Hydrotope zu den FE-Elementen sowie die jeweilige Geländehöhe der FE-Elemente vor Berechnungsbeginn zur Verfügung gestellt werden. Für FEFLOW werden die Daten mittels der integrierten Programmfunktionen zur Programmierung von sogenannten „plugins“ vor jedem Zeitschritt zugewiesen. Dabei wird die Grundwasserneubildung als „Source/sink of flow“ und der Stickstoffeintrag als „Source/sink of mass“ definiert.

5.2 Mathematisches Modell

Die Beschreibung der Grundwasserströmung basiert 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, 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 1

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

an. Die Lösung $h(x, y, z, t)$ beschreibt die Potentialhöhe an jedem Punkt eines Strömungsfeldes zu jedem Zeitpunkt.

Der konservative Stofftransport (d.h. kein Abbau oder Entstehung von Stoff und keine Anlagerung bzw. Lösung von Stoff während der Untergrundpassage) wird durch die Advektions-Dispersionsgleichung wie folgt beschrieben

Gleichung 2

$$D \left(\frac{\delta^2 c}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 c}{\delta y^2} \right) - \left(\frac{\delta c}{\delta v_x} + \frac{\delta c}{\delta v_y} \right) + w = \Theta \frac{\delta c}{\delta t}$$

D gibt den Dispersionstensor wieder, v die Grundwasserströmungsgeschwindigkeit, w Quellen und senken für den Stoff und Θ die Porosität.

5.2.1 Die Interaktion von Oberflächengewässern und Grundwasser

Um die In- bzw. Exfiltration von Oberflächengewässern zu beschreiben, kann das Leakageprinzip verwendet 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 Leakage-Koeffizient bzw. Durchlässigkeits-Koeffizient 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 3

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

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 Leakage-Koeffizient l fasst wieder Durchlässigkeit und Dicke der Trennschicht 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 4

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

5.2.2 Modellumsetzung der Interaktion zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser

Die Implementierung eines Oberflächengewässers über die Cauchy-Randbedingung erfolgt in zwei Schritten: Zunächst werden die Oberflächengewässer als Randbedingung über Modellkanten (Verbindung zwischen zwei Modellknoten) definiert - hierbei können sowohl der Wasserspiegel (mit einer konstanten Gewässerhöhe oder instationär als Ganglinie) als auch die Gewässersohle (zur Begrenzung der Infiltration von Oberflächenwasser in das Grundwasser) definiert werden. Für Fließgewässerabschnitte, deren Sohle in jedem Fall niedriger als der angrenzende Grundwasserspiegel ist, kann die Definition der Gewässersohle entfallen. Anschließend werden für räumlich angrenzende Modellelemente sogenannte Leakage-Koeffizienten (oder Durchlässigkeits-Koeffizienten) definiert, welche den Quotienten zwischen der Durchlässigkeit und der Mächtigkeit der Kolmationsschicht des Gewässerbettes darstellen.

Im Zusammenhang mit der Interaktion zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser wird als Infiltration immer das Fließen von Oberflächenwasser ins Grundwasser und als Exfiltration immer der Übertritt von Grundwasser in das Oberflächengewässer bezeichnet. Typischerweise werden für die Exfiltration des Grundwassers in das Oberflächengewässer höhere Durchlässigkeits-Koeffizienten angenommen, als für die Infiltration. Dies ist dadurch bedingt, dass die aus Feinsedimenten

bestehende Kolmationsschicht, die Sohle und Ufer eines Oberflächengewässers abdichtet, durch Ablagerungen von Feinsedimenten aus dem Oberflächengewässer entsteht und somit für diese Strömungsrichtung, also von Oberflächengewässer zu Grundwasser, dichter ist.

Bei der Integration in das Grundwassermodell ist es entlang aller Gewässer notwendig, die instationären Wasserspiegel im gesamten Modellzeitraum zu ermitteln. Sind keine gemessenen Wasserspiegelganglinien verfügbar und gibt es keine Anhaltspunkte zur Dynamik des Wasserspiegels, ist die Definition der Wasserspiegel in einigen Gewässern oftmals nur mittels eines stationären Wertes, meist aus dem Laserscan, möglich.

5.2.3 Rand- und Anfangsbedingungen für Strömungs- und Transportmodell

Die in Gleichung 1 angeführte Strömungsgleichung ist eine partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung für die unbekannte Piezometerhöhenverteilung als Funktion der Zeit und des Ortes $h(x, y, t)$. Die in Gleichung 2 angeführte Transportgleichung löst die unbekannte Stoffkonzentration im Grundwasser als Funktion der Zeit und des Ortes $c(x, y, t)$. Zu deren Lösung sind Initial- und Randbedingungen erforderlich. Für stationäre Probleme werden nur Randbedingungen benötigt. Die Initialbedingungen bestehen aus einer gegebenen Piezometerhöhen- bzw. Konzentrationsverteilung zum Zeitpunkt, zu dem die Simulation beginnt.

Es gibt mehrere Arten von Randbedingungen:

- Randbedingungen der ersten Art (DIRICHLET-Randbedingungen) schreiben die Piezometerhöhen bzw. Stoffkonzentrationen 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-Randbedingungen) schreiben den Zufluss oder Abfluss von Grundwasser bzw. Stoff über den Rand vor. Im isotropen Aquifer wird damit der Gradient des Grundwasserspiegels senkrecht zum Rand festgelegt. Ein Spezialfall dieser Randbedingung ist der undurchlässige Rand. Wenn Randbahnlinien das Modellgebiet begrenzen, werden diese wie undurchlässige Ränder behandelt.
- Randbedingungen der dritten Art (CAUCHY-Randbedingungen) stellen eine Kombination aus Randbedingungen der ersten und zweiten Art dar. 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.

5.2.4 Lösung des mathematischen Modells mit numerischer Methoden

Die Finite Elemente Methode stellt eine diskrete Beschreibungsmöglichkeit der Grundwasserströmung dar, die direkt von den physikalischen Bedingungen der Grundwasserströmung ausgeht. 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. 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. Somit ergibt sich ein lineares Gleichungssystem.

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 Transportgleichung hat andere mathematische Eigenschaften als die Strömungsgleichung und bedingt daher andere Lösungsverfahren. In diesem Zusammenhang kommen in erster Linie Lagrange'sche und Euler'sche Verfahren zur Anwendung. Um den numerischen Fehler durch die Approximationen bei der Lösung der Transportgleichung zu minimieren, sind dabei das Peclet- und das Courant Kriterium einzuhalten, die Obergrenzen für die räumliche und zeitliche Diskretisierung vorgeben, d.h. das Berechnungssatz darf nicht zu grob und der Zeitschritt nicht zu lang sein (Kinzelbach, 1987).

5.3 Beschreibung der Modellsoftware FEFLOW

Mit FEFLOW (finite element subsurface FLOW simulation system) kann die Gleichung für Strömung-, Stoff- und Wärmetransport in porösen oder geklüfteten Medien, in verschiedenen dimensional Darstellungen und für variabel gesättigte Verhältnisse gelöst werden (Diersch, 2009). Zusätzlich bietet FEFLOW eine Vielzahl von Pre- und Postprocessing Funktionalitäten an und ist gleichzeitig kompatibel mit zahlreichen Datenformaten für den Import und Export von Daten von und zu externen Quellen. Besonders bei den Lösungsverfahren für die Finite Elemente Methode bietet FEFLOW eine hohe Anzahl von alternativen Auswahlmöglichkeiten an, so dass auf spezifische Aspekte der Problemstellung eingegangen werden kann.

5.3.1 Lösungsverfahren für die Transportgleichung

Hinsichtlich der Lösung der partiellen Differentialgleichung für den Stofftransport bietet FEFLOW die Möglichkeit der konvergenten und der divergenten Form. Beide Formen sind physikalisch gleichbedeutend, führen aber aufgrund der unterschiedlichen Formulierung des konduktiven Terms in der Transportgleichung zu einer anderen Beschreibung bei den Randbedingungen. Grundsätzlich ist die konduktive Form einfacher anzuwenden und für die meisten Fragestellungen ausreichend. Die divergente Form ist numerisch aufwendiger, bietet aber Vorteile hinsichtlich der Erhaltung der Massenbilanz, was vor allen bei der Stoffeinbringung über eine innere (d.h. im Inneren des Modellgebiets und nicht am Modellrand) Zufluss- oder eine Cauchy-Randbedingung von Bedeutung ist, da dann der numerische Einfluss bei der Lösung der Transportgleichung vermindert wird. Weiterführende Details können DHI-WASY (2009) entnommen werden.

Für den Grundwasserkörper Unteres Murtal wurden aufgrund der Berücksichtigung des Eintrags von nitrathältigen Oberflächenwässern aus den Grabenlandbächen in das Grundwasser die divergente Form der Lösung der Transportgleichung verwendet. Im Östlichen Leibnitzer Feld wäre diese Lösungsform aufgrund des Nitratreintrags aus der Stiefing und des Weißenegger Mühlkanals ebenfalls zu wählen. Es wurde aber aufgrund von numerischen Effekten entschieden, die Stiefing über eine Randbedingung mit konstanter Stoffkonzentration (RB 1. Art) abzubilden und die konvergente Lösungsform der Transportgleichung anzuwenden (siehe auch Kapitel 6.3.1). Beim Transportmodell für das Westliche Leibnitzer Feld wurde die Standardeinstellung der konvergenten Form in FEFLOW beibehalten.

5.3.2 Adaptierung Modellgebiet für Transportmodellierung

Im Gebiet des Nitrattransportmodells für das Westliche Leibnitzer Feld und das Untere Murtal gibt es jeweils Teilbereiche im Nordwesten (Jößer bzw. Helfbrunner Terrasse), die bei niedrigen Grundwasserständen teilweise trocken fallen bzw. nur mehr eine geringe Restmächtigkeit (in der Größenordnung von ca. 10 cm) aufweisen. Während dieser Umstand bei der Strömungsmodellierung keine weiteren Konsequenzen bei der Berechnung der Grundwasserhöhen nach sich zieht, führt diese Situation bei der Lösung der Transportgleichung zu phasenweise unrealistisch hohen Nitratkonzentrationen im Grundwasser, die eindeutig numerisch bedingt sind. Da diese extern beeinflussten Nitratkonzentrationen auch die Nitratkonzentrationen in den grundwasserstromab gelegenen Gebiete beeinflussen, wurde entschieden, die Bereiche mit den phasenweise geringen Grundwassermächtigkeiten bei der Transportmodellierung nicht zu berücksichtigen. Somit unterschieden sich die Modellgebiete bei der Grundwasserströmungs- und der Nitrattransportmodellierung sowohl im Westlichen Leibnitzer Feld als auch im Unteren Murtal (vergleiche dazu auch Abbildung 16 und Abbildung 25 bzw. Abbildung 17 und Abbildung 26).

5.4 Maßzahlen zur Bewertung der Kalibrationsgüte

Im Zuge der Modellkalibration wurde 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 wird dabei ein Vergleich zwischen Messung und Rechnung in der zeitlichen Entwicklung, ein Vergleich der gemessenen Spiegellagen mit den zeitgleichen berechneten Grundwasserspiegellagen, der zeitliche Verlauf der Differenzen zwischen Messung und zeitgleichen Rechenergebnissen sowie die Doppelsummenkurve der Absolutwertänderungen der Grundwasserspiegellage der gemessenen und der zeitgleichen berechneten Grundwasserstände ausgewertet.

Als Kennwerte der instationären Modellkalibration wurden für jede Messstelle neben Minimum, Mittelwert und Maximum der Messdaten im Vergleich zu den äquivalenten Berechnungsergebnissen 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):

RES_MIN: $\min_{i=1}^n (O_i - P_i)$
größte negative Abweichung [m]:
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:	<p>mittlere Abweichung [m]:</p> <p>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).</p>	$\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{n}$
RES_MAX:	<p>größte positive Abweichung [m]:</p> <p>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.</p>	$\max_{i=1}^n (O_i - P_i)$
RMSQ:	<p>mittlere Residuenquadratsumme [m²]:</p> <p>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, das RES_MEAN² deutlich kleiner ist als RMSQ.</p>	$\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}$
SQR(RMSQ):	<p>Wurzel(RMSQ) [m]:</p> <p>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.</p>	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$
RMSE:	<p>mittlerer Fehler [% von \bar{O}]:</p> <p>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</p>	$\frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}}{\bar{O}} \cdot 100$

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.

CRM: Koeffizient der mittleren Residuenmasse [-]:

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

Der „coefficient of residual mass“ sollte möglichst nahe bei 0 liegen, kann aber auch negative Werte erlangen.

CD: Koeffizient der Modelldetermination [-]:

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

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.

EF: Modelleffizienz [-]:

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

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.

Generell ist festzuhalten, dass die Qualität der Modellkalibration gerade bei über einen längeren Zeitraum instationär geeichten 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.



6 Instationäre Kalibration des Grundwasserströmungs- und Nitrattransportmodells

6.1 Allgemeines

Der Grundwasserkörper Leibnitzer Feld wurde in Form von zwei getrennten, durch die Mur als gemeinsame Randbedingung verbundenen Grundwassermodellen abgebildet. Das Grundwassermodell für das Westliche Leibnitzer Feld besteht aus 61.752 Knoten und 121.540 Elementen, was zu einem durchschnittlichen Knotenabstand von 23 m führt. Das Grundwassermodell für das Östliche Leibnitzer Feld wurde mit 29.681 Knoten und 58.411 erstellt, was einen mittleren Knotenabstand von 29 m bedeutet.

Für den Grundwasserkörper Unteres Murtal unterscheiden sich das Strömungs- und das Transportmodell voneinander, da für letzteres die Knoten auf der Helfbrunner Terrasse inaktiv gesetzt wurden (siehe dazu auch Kapitel 5.3.2). Für die Modellierung der Grundwasserströmung besteht das Berechnungsnetz aus 66.676 Knoten und 130.610 Elementen, was einen mittleren Knotenabstand von 44 m bedeutet, das Transportmodell besteht aus 8.866 Knoten bzw. 16.853 Elementen weniger.

6.2 Grundwasserströmung

6.2.1 Definition der Randbedingungen, Materialeigenschaften und Anfangswerte für die Kalibration

Zur Lösung der Grundwasserströmungsgleichung werden Randbedingungen, Initialbedingungen, sowie Materialeigenschaften benötigt. Randbedingungen beschreiben die Interaktion des Grundwassers im Modellgebiet mit seiner Umgebung. Anfangsbedingungen stellen den Ausgangszustand der modellierten Größe, im Falle eines Grundwasserströmungsmodells ist dies die Höhe des Grundwasserspiegels, zu Beginn der Modellierung dar. Materialeigenschaften beschreiben konstante oder räumlich variable Eigenschaften des Grundwasserleiters, wie zum Beispiel die Lage des Grundwasserstauers, die Geländehöhe oder die hydraulische Leitfähigkeit.

Verwendete Randbedingungen:

- Die Mur stellt eine hydraulische Teilung des Grundwasserkörpers Leibnitzer Feldes dar und bildet die südliche Grenze des Unteren Murtals. Die Interaktion zwischen Fluss und Grundwasserkörper wird über eine Randbedingung 3. Art (CAUCHY-Randbedingung) mit dynamischem Wasserspiegel realisiert. Die detaillierte Umsetzung ist in Kapitel 6.2.2 beschrieben. Nebengewässer der Mur werden ebenfalls über eine Randbedingung 3. Art implementiert, der Wasserspiegel wird hier jedoch zumeist – aufgrund nicht verfügbarer zeitvariabler Daten - als konstant angenommen.
- Die diffusen Randzuflüsse an den Außenrändern beider Modelle haben sich im Verhältnis zu den übrigen Einflussfaktoren als vernachlässigbar gering erwiesen. Im Modell wurden diese Randzuflüsse über eine Randbedingung 2. Art (NEUMANN-Randbedingung) definiert.
- Die oberen Randbedingungen der Grundwassermodelle stellen die Grundwasserneubildung über infiltrierende Niederschläge und der darin enthaltene Nitratreintrag dar. Für die instationäre Kalibration des Modells sind kurzfristig auftretende Spitzen der flächenhaften

Grundwasserneubildung und des Nitratsintrags in ihrer räumlichen und zeitlichen Variabilität von Bedeutung. Die Ableitung dieser Randbedingung mit dem Modellverbund SIMWASER/STOTRASIM und die Übertragung auf das Modellnetz wurden in Kapitel 0 erörtert.

- Die relevanten Grundwasserentnahmen wurden als Zeitreihen berücksichtigt und als Randbedingungen 4. Art (Brunnen-Randbedingung) implementiert.

Materialeigenschaften:

- Die untere Begrenzung des Grundwasserleiters – der Grundwasserstauer – wurde aus Bohrungen punktuell abgeleitet. Die Datengrundlagen und Methoden zur Erstellung des Grundwasserstauers sind Kapitel 3.1 zu entnehmen. Die untere Begrenzung der Grundwassermodelle sind in ihrer flächenhaften Ausprägung als Morphologie des Grundwasserstauers in Abbildung 2 und Abbildung 3 dargestellt.
- Eine vorläufige Verteilung der Durchlässigkeiten im Untersuchungsgebiet wurde entsprechend den geologischen Einheiten definiert.
- Eine vorläufige Verteilung des Porenvolumens im Grundwasserspiegelschwankungsbereich wurde entsprechend der Erfahrung aus der Kalibration anderer Grundwassermodelle in der Region mit 10 % angenommen.

Sowohl die hydraulische Durchlässigkeit als auch das Porenvolumen sind wesentliche Kalibrationsparameter, die für das ursprüngliche Modell angenommene Verteilung beider Parameter stellt also gewissermaßen den Ausgangszustand für die Kalibration dar.

Anfangsbedingung:

- Als Ausgangsspiegellage für die instationäre Modellierung des Grundwassermodells wurde auf Basis der dem Modellstart am 01.01.1993 folgenden Messungen des Grundwasserspiegels an den Hydrografiemessepegeln (siehe Kapitel 2.2.1) interpoliert.
- Als Ausgangsspiegellage für die instationäre Modellierung des Nitrattransportmodells wurde auf Basis der dem Modellstart am 01.01.1993 folgenden Messungen der Nitratkonzentration im Grundwasser an den GZÜV-Messepegeln (siehe Kapitel 2.2.3) interpoliert.

6.2.2 Implementierung von einzelnen Gewässern

Im Leibnitzer Feld liegen die Stauufen des KW-Mellachs, KW-Lebring, KW-Gralla und KW-Gabersdorf mit den in Tabelle 4 aufgelisteten Stauzielen. Für den größten Teil des betroffenen Abschnittes lagen Profile der VERBUND Hydro Power AG vor. Für den Bereich mit den fehlenden Profilen (Fluss-km 155.15 - 159.00) im Oberwasser des KW-Lebring wurden die angrenzenden Profile verschoben. Für alle Abschnitte wurden mittels der Stricklerformel, welche die Fließgeschwindigkeit in einem offenen Gerinne in Bezug zum Wasserspiegelgefälle, den hydraulischen Radius und einen Rauigkeitsbeiwert setzt, die Ganglinien an den vorhandenen Profilen für den gesamten Modellzeitraum ermittelt.

Die Leakagewerte wurden im Zuge der Kalibration ermittelt. Für den Istzustand treten naturgemäß nicht im gesamten Modellbereich sowohl In- als auch Exfiltrationsbedingungen auf (z.B. Infiltration im Unterwasser und Exfiltration im Staubereich). Deshalb können nur jene Leakagewerte des Modells als kalibriert angesehen werden, welche im Istzustand aktiv waren. Die Leakagewerte sind sowohl

entlang eine Stauraumes als auch zwischen In- und Exfiltration sehr unterschiedlich. Die In- und Exfiltration an den einzelnen Murabschnitten zwischen den Kraftwerken ist entsprechend der lokalen GW-Situation sehr unterschiedlich.

Tabelle 4: Stauziele der Kraftwerke als Ausgangswasserspiegel für die Wasserspiegelberechnung

Kraftwerk	STZ [müA]
Mellach	305.50
Lebring	292.00
Gralla	281.00
Gabersdorf	271.50

Die Achse des Mühlganges im östlichen Leibnitzer Feld sowie die Wasserspiegel wurden aus den Laserscandaten über GIS-Methoden ermittelt. Der Mühlgang wird im Modell über eine Linie entlang seiner Achse definiert und als Leakage-Randbedingung mit stationären Wasserspiegeln und Sohle implementiert. Die Sohle wurde aus Aufzeichnungen über den Mühlgang geschätzt. Der Mühlgang weist einige Staustufen mit unterschiedlichen Stauhöhen auf. Die Stauhöhen ergeben sich aus den Wasserspiegeln aus dem Laserscan-Geländemodell.

Die Stiefing wurde über Leakage-Randbedingungen mit geschätzten Wasserspiegelganglinien realisiert. Die Wasserspiegelganglinien wurden durch Verschiebung aus der Wasserspiegelganglinie am Pegel Gerbersdorf erstellt. Die Werte für die Verschiebung der Wasserspiegel wurden aus dem Laserscan abgeleitet. Die Sohle wurde mit 50 cm unter dem Bezugswasserspiegel aus dem Laserscan angenommen. Die Sulm und die Lassnitz wurden über instationäre Leakage-Randbedingungen auf Basis von aus gemessenen Durchflüssen berechneten Wasserspiegelganglinien realisiert. Die Sohle wurde mit 50 cm unter dem Bezugswasserspiegel aus dem Laserscan angenommen.

Die restlichen Oberflächengewässer sowie die Augewässer wurden ebenfalls als Leakage-Randbedingung realisiert. Die Wasserspiegelhöhen sind aus dem Laserscan ermittelt und werden als stationär angenommen. Die Gewässertiefen wurden geschätzt.

Wesentliche Oberflächengewässer im Unteren Murtal sind die Mur (inklusive der Berücksichtigung des Kraftwerks Spielfeld), der Schwarzaubach, der Kirchgrabenbach, der Saßbach, der Ottersbach, der Glauningbach und der Mühlgang. Zusätzlich existieren noch einige temporär wasserführende Nebengewässer, sowie Augewässer in Murnähe. Für die Modellierung standen Schreiblegelaufzeichnungen für den Schwarzaubach, den Saßbach und den Gnasbach zur Verfügung. Die Pegelaufzeichnung für den Saßbach wurde mittels linearer Regression aus den Messungen am Schwarzaubach ergänzt. Die Wasserspiegelganglinien für den Schwarzaubach, den Saßbach und den Gnasbach wurden mit Hilfe der Höhen aus dem Laserscan und den zugehörigen Pegelaufzeichnungen ermittelt. Die restlichen Gewässer wie Kirchgrabenbach, Glauningbach und die zahlreichen drainagierenden Gewässer wurden ausschließlich über die Höhen aus dem Laserscan als konstante Wasserspiegel realisiert.

Die Abflussdynamik im Mühlgang des Unteren Murtals ist im Vergleich zu den Nebengewässerabflüssen sehr unterschiedlich und wird stark anthropogen beeinflusst. Daher war es nicht möglich den Mühlkanal instationär im Grundwassermodell zu berücksichtigen. Stattdessen

wurden stationär definierte Werte für den Wasserspiegel am Mühlgang implementiert, die aus der Auswertung des Laserscan-Höhenmodells, das erst seit 2011 verfügbar ist, abgeleitet wurden. Dabei wurden auch die Veränderungen durch die Ertüchtigung des Mühlganges zwischen Mureck und Bad Radkersburg einbezogen. Einige der Differenzen zwischen den gemessenen und gerechneten Ganglinien an den Pegeln in der Nähe des Mühlkanals können auf dieses Problem zurückgeführt werden.

Die Grundwasserseen wurden aus den Luftbildern neu digitalisiert und in die Modellgeometrie integriert. Modelltechnisch sind diese als Elemente mit hohen Durchlässigkeiten $k_f = 1.0$ m/s und einem effektiven Porenvolumen von 1.0 realisiert (siehe auch Klammler et al., 2013).

6.2.3 Kalibrationsergebnisse Grundwasserströmung

6.2.3.1 Überblick

Abbildung 16 zeigt die Verteilung der mittleren Residuen zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln an den 25 bezeichneten Grundwassermessstellen im östlichen Leibnitzer Feld und an den 48 bezeichneten Grundwassermessstellen im westlichen Leibnitzer Feld. Die Auswertung zeigt, dass die mittlere Abweichung zwischen Modell und Messung für das gesamte Messstellennetz durchweg sehr gering ausfällt. Hierbei bedeuten positive Residuen eine Überschätzung der modellierten Wasserstände gegenüber den gemessenen, während negative eine Unterschätzung andeuten. Für einen Großteil der Messstellen liegt die mittlere Abweichung im Betrag unter 10 cm und keine Messstelle weist eine Abweichung von mehr als 20 cm auf. Es ist des Weiteren festzuhalten, dass es innerhalb des Modellgebietes keine Teilgebiete gibt, welche systematisch über- oder unterschätzt werden.

Abbildung 17 zeigt die Verteilung der mittleren Residuen zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln an den bezeichneten Grundwassermessstellen im Modellgebiet des Unteren Murals. Dabei wurden mehrheitlich solche Messstellen herangezogen, die möglichst den gesamten Modellzeitraum umfassen und eine gleichmäßige Abdeckung des Modellgebiets ermöglichen. Die Auswertung zeigt, dass für einen Großteil der Messstellen die mittlere Abweichung zwischen Modell und Messung kleiner als 0,5 m ausfällt. Im Bereich des nördlichen Zuflussrandes sowie auf der Helfbrunner Terrasse und der zugehörigen Terrassenkante liegen die Abweichungen bisweilen höher. Aufgrund einer höheren Anzahl von Oberflächengewässern im Unteren Murtal im Vergleich zum Leibnitzer Feld, von denen die Wasserspiegellage und deren Fluktuation nur unzureichend bekannt ist, ergibt sich eine geringere Kalibrationsqualität bei der Grundwasserströmung. Dies gilt grundsätzlich auch beim Vergleich der Kalibrationsqualität zwischen Östlichem und Westlichem Leibnitzer Feld, welche beim letzteren besser ist. Dennoch ist festzuhalten, dass es innerhalb des Modellgebietes Unters Murtal keine Teilgebiete gibt, welche systematisch über- oder unterschätzt werden.

In Anhang 11.1 sind die weiteren in Kapitel 5.4 beschriebenen Maßzahlen zur Beschreibung der Kalibrationsgüte der Grundwasserströmungsmodelle an den Messstellen in den Untersuchungsgebieten enthalten.

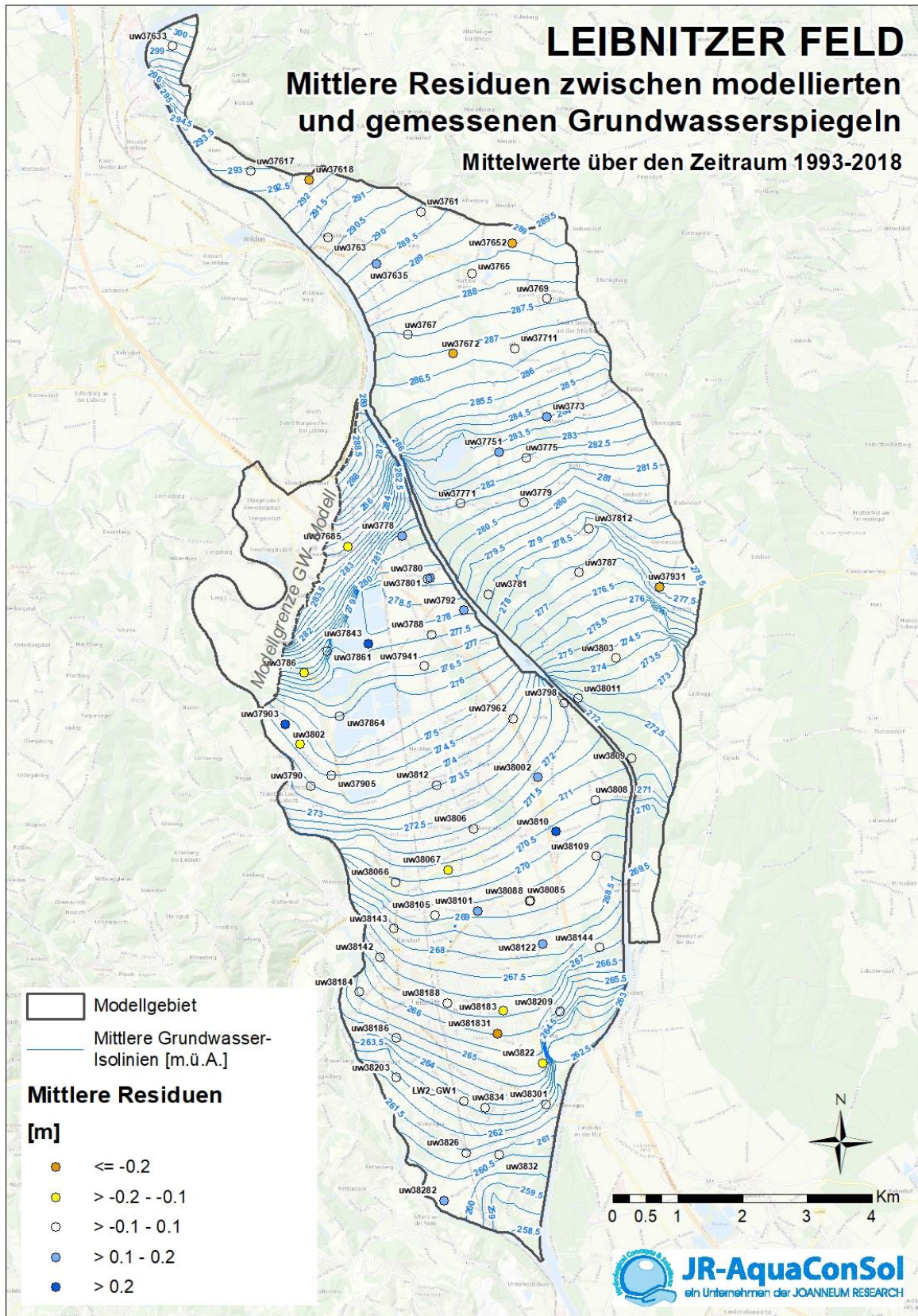


Abbildung 16: Mittlere Residuen zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln an den bezeichneten Grundwassermessstellen im Leibnitzer Feld

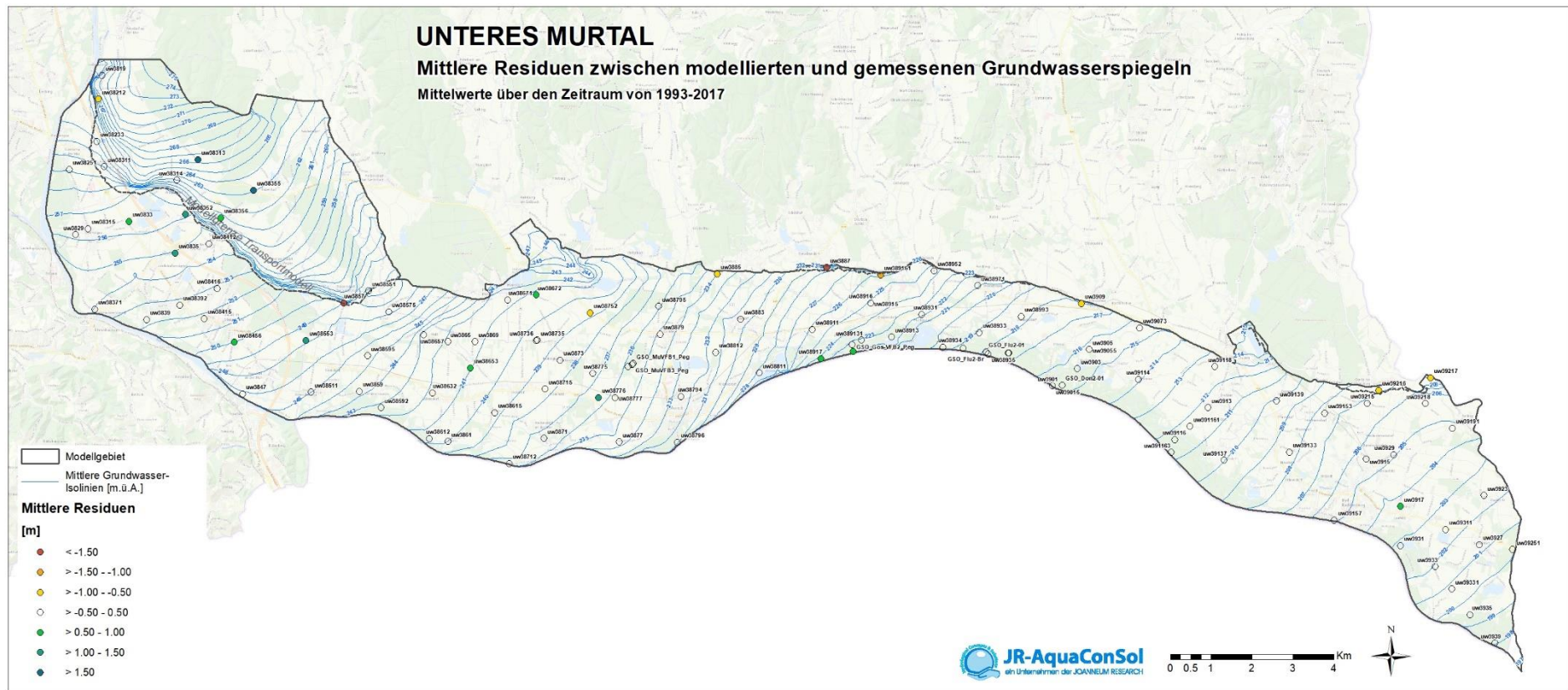
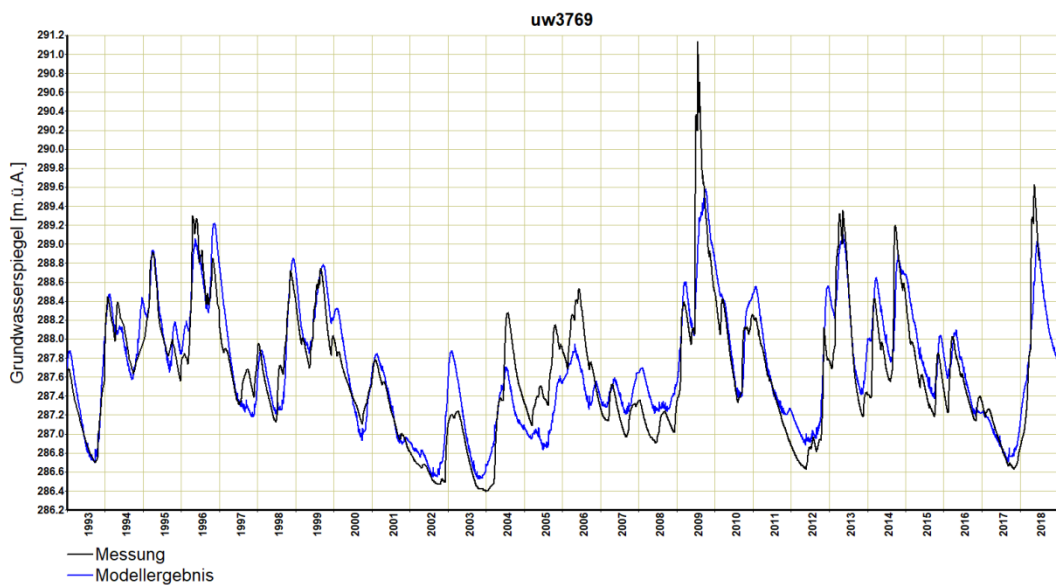
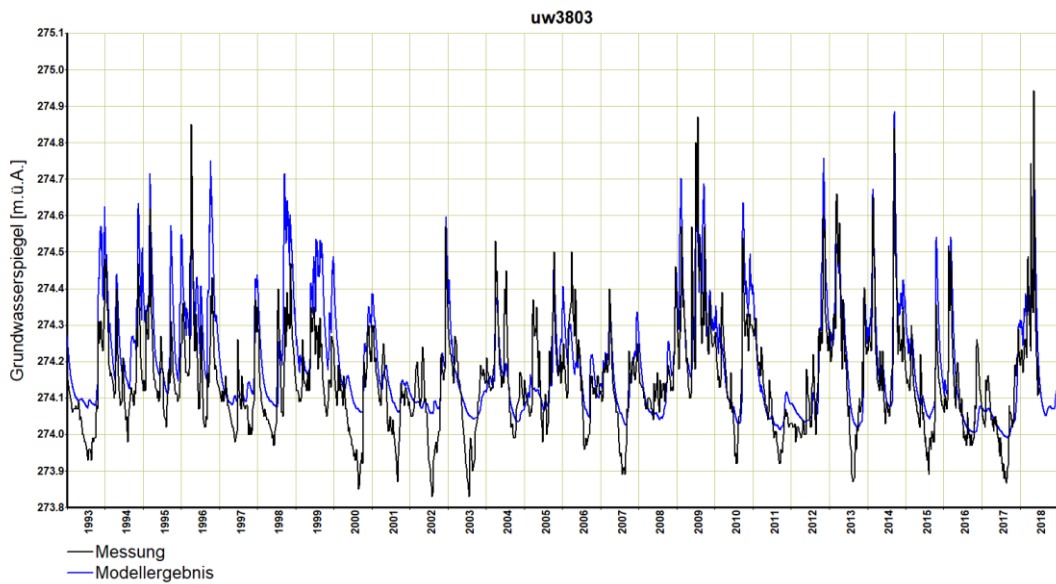
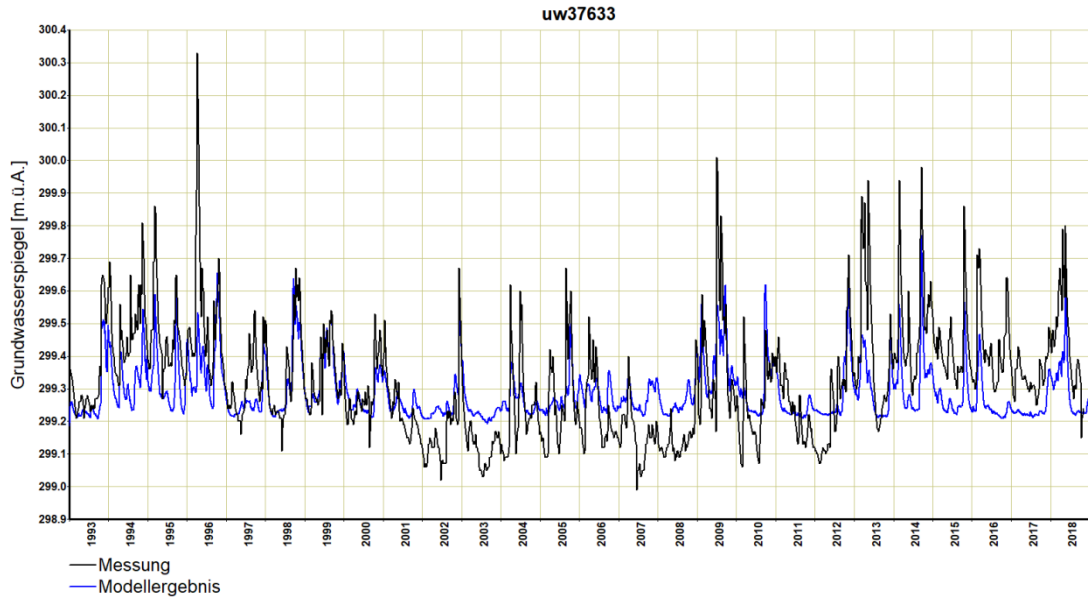


Abbildung 17: Mittlere Residuen zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln an den bezeichneten Grundwassermessstellen im Unteren Murtal

6.2.3.2 Veranschaulichung der Kalibrationsqualität an ausgewählten Messstellen

Da eine Auswertung der mittleren Residuen lediglich einen Vergleich der gemittelten Wasserstände darstellt und somit keine Aussage darüber getroffen werden kann, wie gut die Modellanpassung an die zeitliche Dynamik der gemessenen Wasserstände ausfällt, werden zusätzlich im Östlichen Leibnitzer Feld die gemessenen und modellierten Ganglinien an den Messstellen uw37633, uw3803, uw3769, uw3781 und uw37635 (siehe Abbildung 18) und im Westlichen Leibnitzer Feld die gemessenen und modellierten Ganglinien an den Messstellen uw3778, uw3808, uw3812, uw38105, uw37864 und uw38203 (siehe Abbildung 19) dargestellt.

uw37633 ist die am weitesten nördlich gelegene Messstelle im Östlichen Leibnitzer Feld. Der Grundwasserspiegel ist stark abhängig vom Randzulauf und von den Mur-Randbedingungen. Mit dem Modell können die gemessenen Grundwasserspiegelschwankungen nicht völlig erfasst werden, im Mittel ergibt sich aber eine gute Übereinstimmung. uw3803 stellt ein typisches Beispiel für den Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln im Modellgebiet dar. Generell besteht vor allem ab 2008 eine gute Anpassung, jedoch weist die modellierte Ganglinie im Zeitraum zwischen 2000 und 2008 eine zu niedrige Schwankungsbreite auf. Von 1993 bis 2000 ergeben die modellierten Grundwasserspiegel zu hohe Werte im Vergleich zu den Messungen. Eine bessere Wiedergabe dieser beiden Zeiträume mit einem Parameterset war nicht möglich.



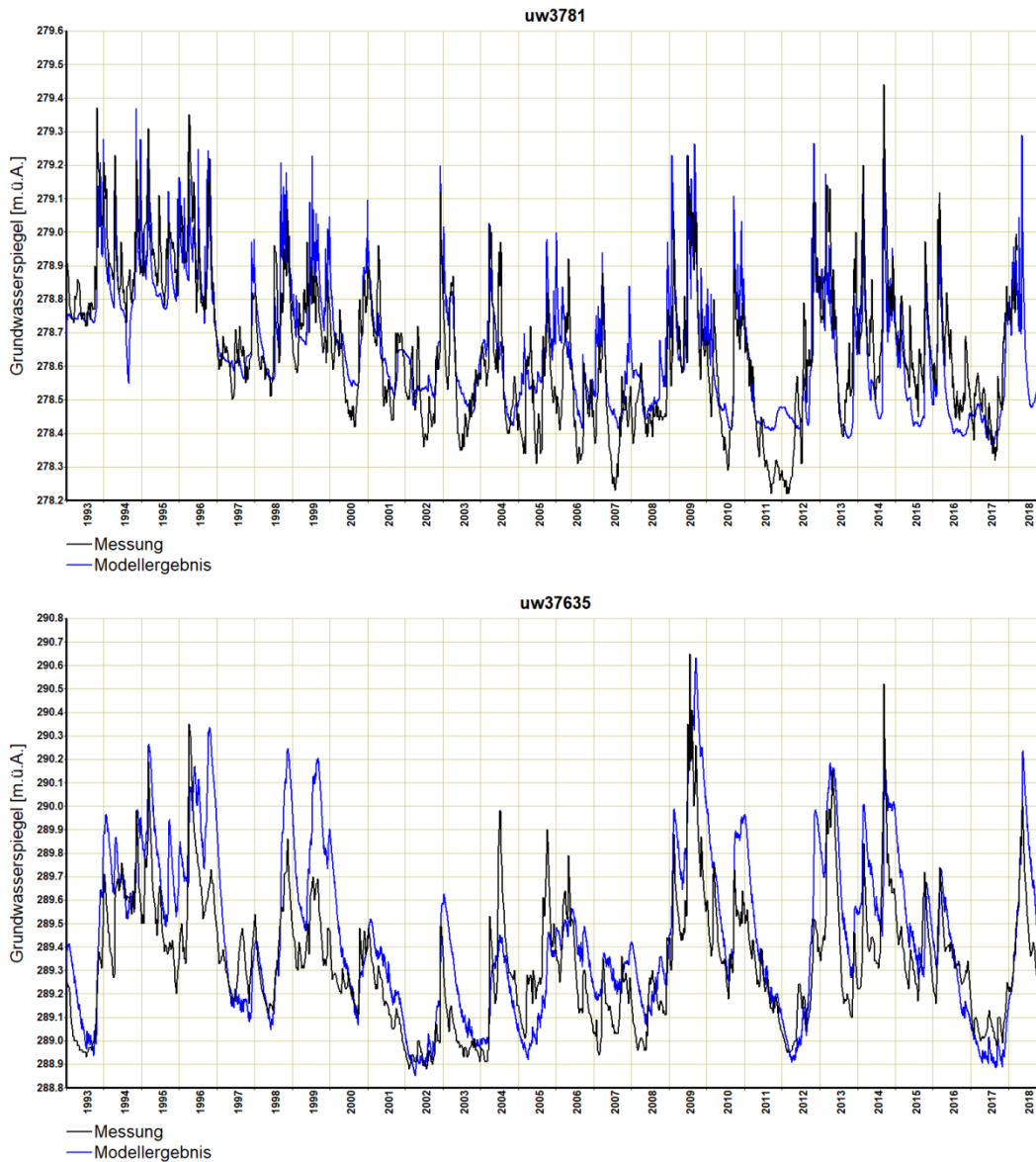
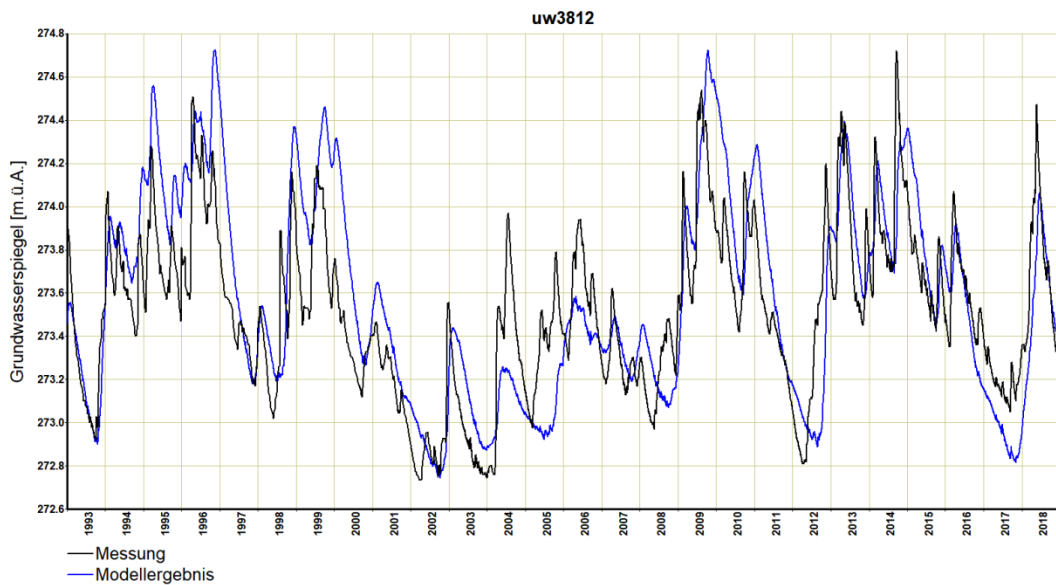
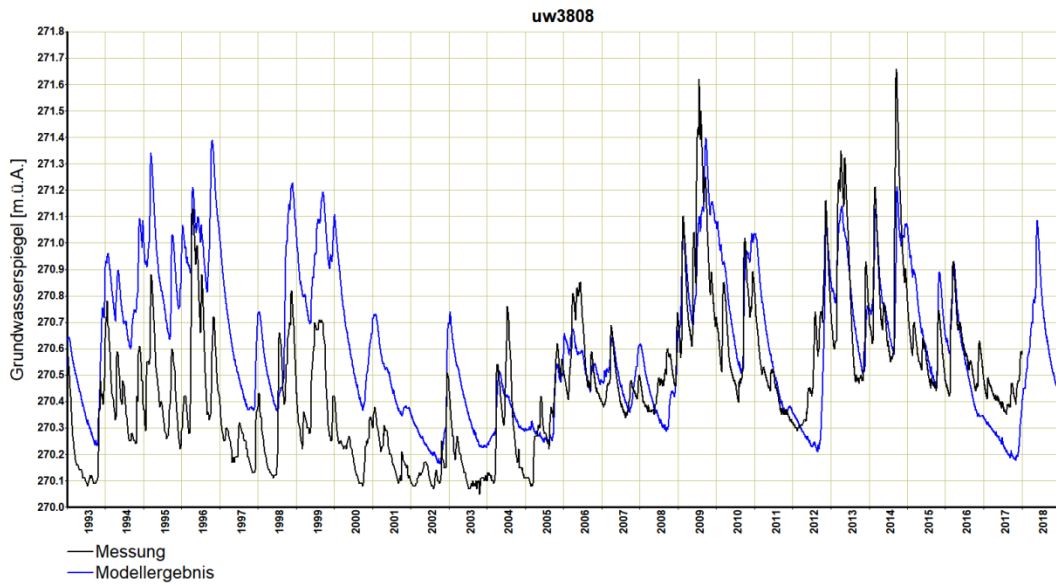
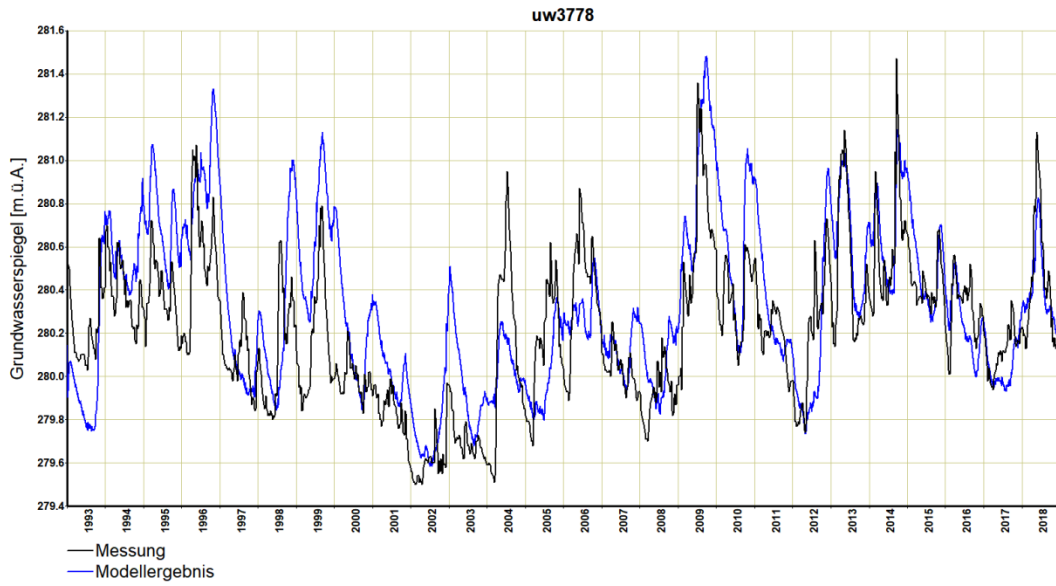


Abbildung 18: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln an den Beobachtungspiegeln uw37633, uw3803, uw3769, uw3781 und uw37635 im östlichen Leibnitzer Feld

Bei der Messstelle uw3769 besteht generell eine gute Anpassung zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln. Der maximale Grundwasserspiegel im Jahr 2009 kann mit dem Modell allerdings nicht wiedergegeben werden. Die Messstelle uw3781 befindet sich in Mur-Nähe oberhalb des Kraftwerkes Gralla, wo der Grundwasserspiegel stark von infiltrierendem Wasser aus der Mur beeinflusst wird. In den Jahren zwischen 2000 und 2012 können die beobachteten Tiefstände des Grundwasserspiegels mit dem Modell nicht nachvollzogen werden, wohingegen die Anpassung der Hochstände über den gesamten Simulationszeitraum besser gelingt. Am Pegel uw37635 lässt sich im Allgemeinen die Anpassung zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln als gut einordnen. Ähnlich wie bei einigen anderen der in Abbildung 18 dargestellten Ganglinienvergleiche können auch bei uw37635 mit dem Grundwassermodell die Tiefstände des Grundwasserspiegels in begrenzten Zeiträumen (z.B. 1999, 2014) nicht erreicht werden.



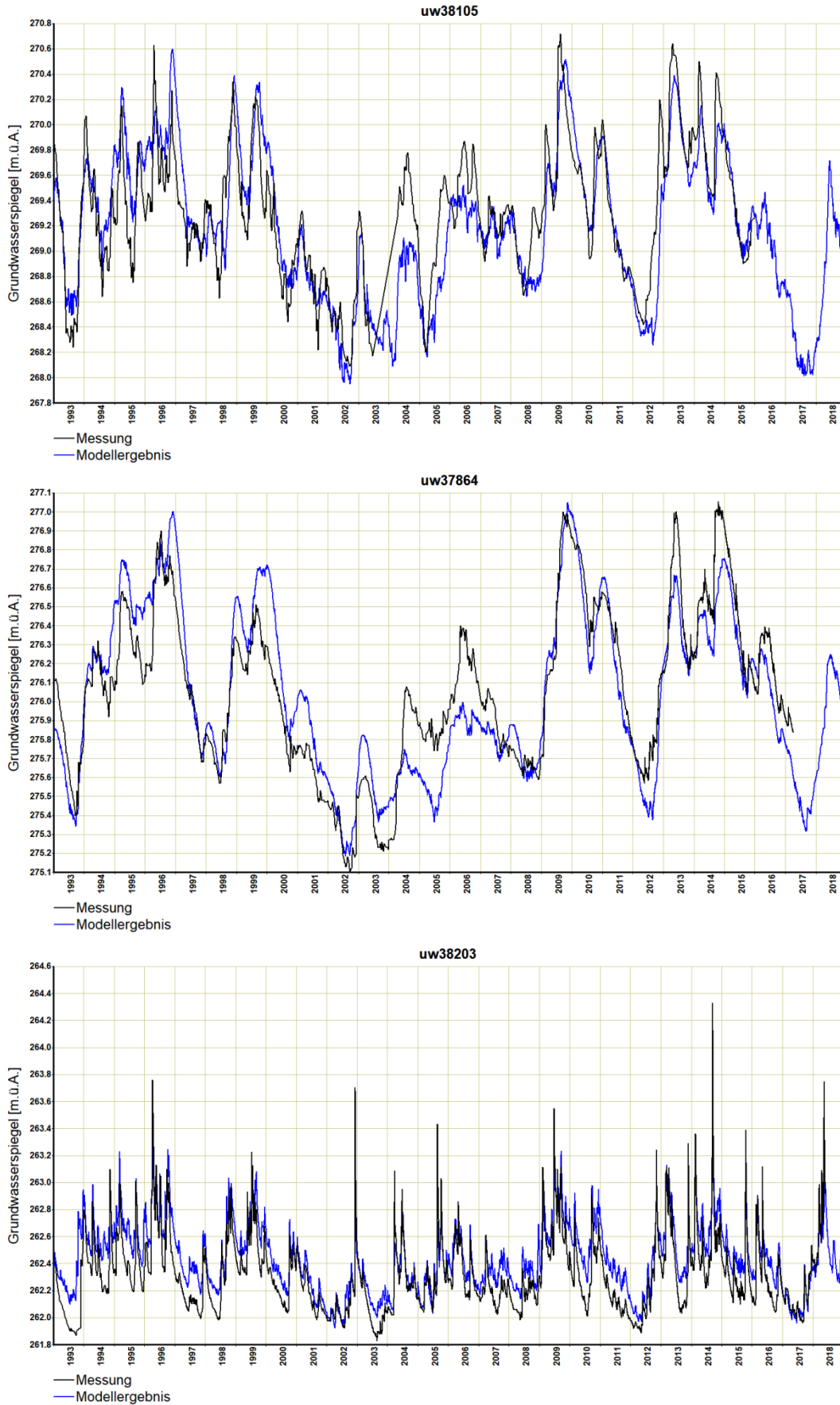


Abbildung 19: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln an den Beobachtungspiegeln uw3778, uw3808, uw3812, uw37864, uw38105 und uw38203 im westlichen Leibnitzer Feld

Die Messstelle uw3778 liegt sehr weit nördlich im Westlichen Leibnitzer Feld und zudem dicht an der Mur. Sie wird somit sowohl vom nördlichen Randzulauf, als auch von infiltrierendem Wasser aus der Mur beeinflusst. Aus dem Vergleich zwischen gemessener und modellierter Grundwasserganglinie geht hervor, dass die Anpassung zwischen Modell und Messung ca. ab 2005 im Mittel gut zusammenpasst, während davor die modellierten Wasserstände eher oberhalb der gemessenen liegen. Hieraus lässt sich schließen, dass irgendwann in diesem Zeitraum eine Systemänderung, zum Beispiel eine Maßnahme an der Mur, oder an einem Nebengewässer zu einer langfristigen Erhöhung des Grundwasserstandes geführt hat. Da in solchen Fällen versucht wird, das Grundwassermodell möglichst an aktuelle Grundwasserstände anzupassen, kann dies über den Gesamtzeitraum zu größeren Residuen führen.

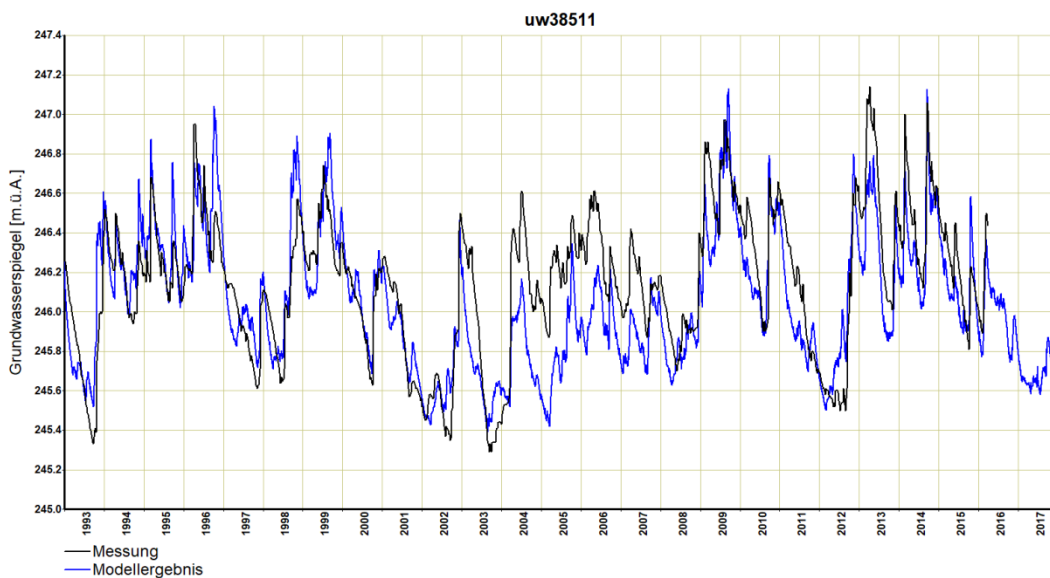
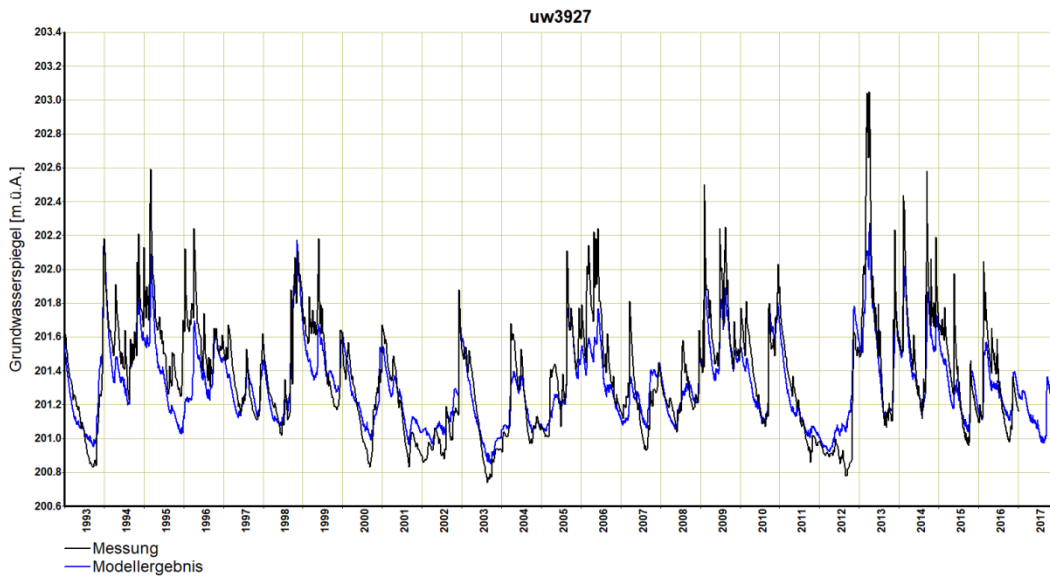
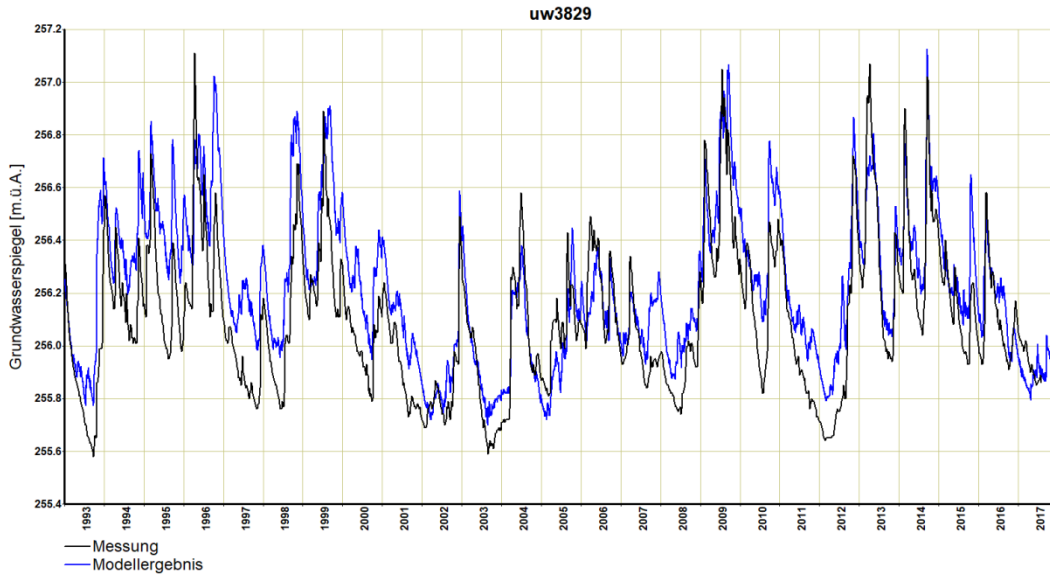
Die Messstelle uw3808 ist ebenfalls durch eine, hier sehr deutlich erkennbare Systemänderung ab ca. 2005 gekennzeichnet. Da die modellierten Grundwasserstände an den aktuellen Zustand angepasst wurden, kommt es in den ersten Jahren zu einer Überschätzung der Grundwasserstände seitens des Modells.

Bei der Messstelle uw3812 handelt es sich um eine typische Messstelle für alle im Zentralbereich des Westlichen Leibnitzer Feldes gelegenen Messstellen, die nicht von Gewässern beeinflusst werden. Insgesamt ist die Anpassung zwischen Modell und Messung recht gut, wobei der Zeitraum von 2003 bis 2008 dadurch charakterisiert ist, dass die Schwankungsbreite des Modells eher geringer ist als die der Messung.

Die Messstelle uw37864 befindet sich im Gebiet der Tillmitscher Teiche, welchen den Grundwasserspiegel relativ konstant halten. Die hier gemessenen Grundwasserstände weisen somit eine deutlich geringere zeitliche Dynamik auf als andere Messstellen. Zwischen 2003 und 2008 kann der beobachtete Verlauf des Grundwasserspiegels durch das Modell nur eingeschränkt wiedergegeben werden, wohingegen die Anpassung im sonstigen Simulationszeitraum bis auf die Unterschätzung der Grundwasserhochstände in 2013 und 2014 sehr gut gelungen ist.

Die Messstelle uw38105 wird stark vom benachbarten Kaindorfer Brunnenfeld beeinflusst. Zwischen 2003 und 2006 kommt es zu einer Unterschätzung der gemessenen Grundwasserspiegellagen durch das Modell, in der restlichen Simulationsperiode werden die Messwerte durch die berechneten Grundwasserspiegellagen gut wiedergegeben.

Die Messstelle uw3802 liegt nahe bei der Sulm und wird daher stark von deren Wasserstand beeinflusst. Anders als bei den weiter nördlich gelegenen Messstellen kommt es hier zu einer Exfiltration des Grundwassers in das Fließgewässer. Die kurzen Grundwasserhochlagen sowie die Grundwassertiefen in manchen Jahren können durch das Modell nicht nachgebildet werden, wohingegen die generelle Dynamik des Grundwasserspiegels durch das Modell gut getroffen wird.



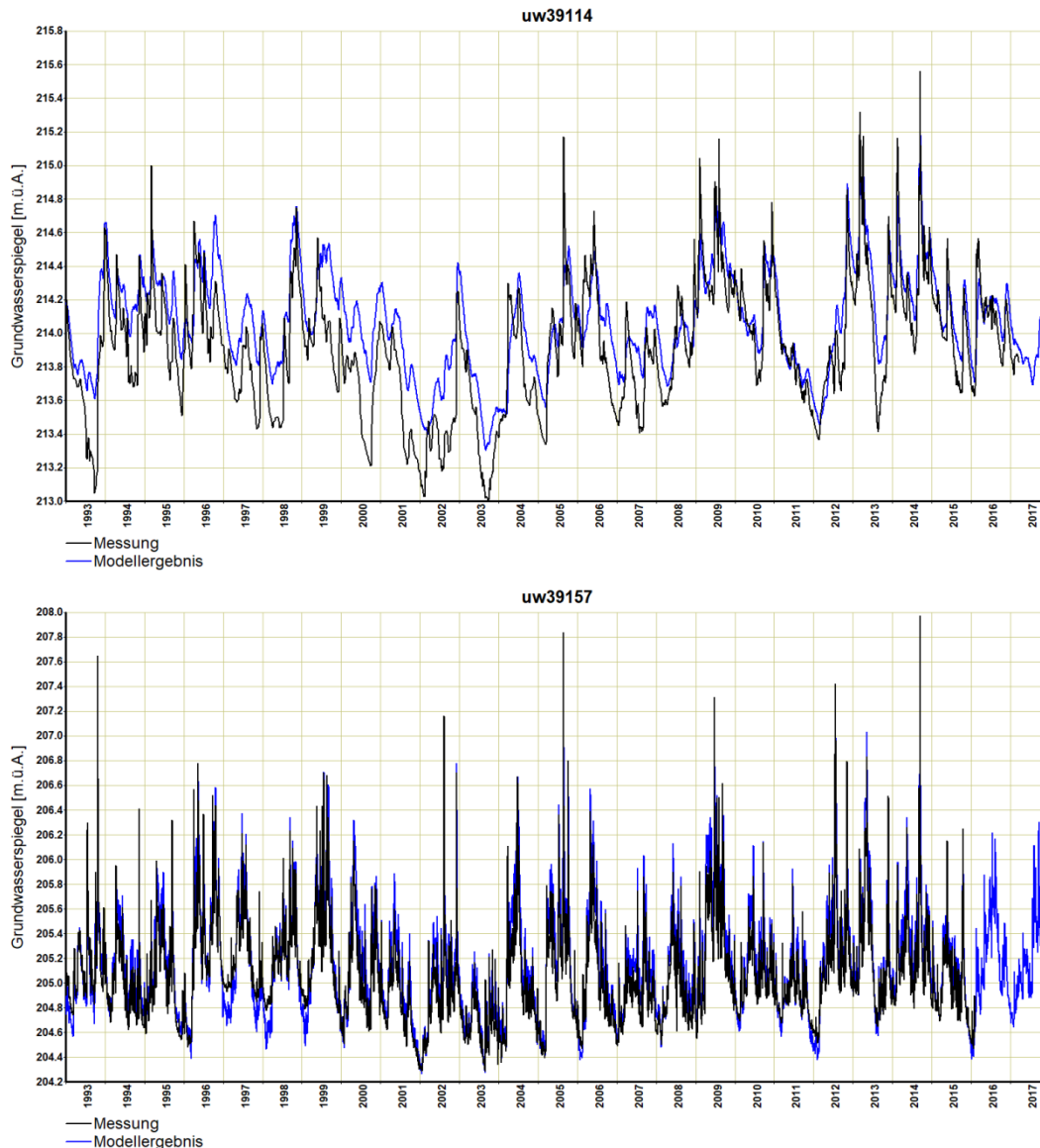


Abbildung 20: Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln an den Beobachtungspunkten uw3829, uw3927, uw8511, uw39114 und uw39157 im Unteren Murtal

Die Messstelle uw3829 liegt ganz im Westen des Unteren Murtals und zeigt eine gute Nachbildung der generellen Dynamik des Grundwasserspiegels, wobei die jährlichen Grundwasserhochstände mit dem Modell gut getroffen, die Grundwassertiefstände aber überwiegend überschätzt werden. Die Messstelle uw3927 liegt ganz im Osten des Modellgebiets und zeigt eine gute Nachbildung der generellen Dynamik des Grundwasserspiegels, wobei die jährlichen Grundwassertiefstände mit dem Modell gut getroffen, die Grundwasserhochstände aber überwiegend unterschätzt werden. Die Messstelle uw38511 befindet sich im Aubereich in der Gemeinde Oberschwarza. Mit dem Modell können die gemessenen Grundwasserspiegel zu Beginn und Ende der Simulationsperiode gut nachgebildet werden, jedoch ist im Zeitraum zwischen 2004 und 2008 eine Unterschätzung der gemessenen durch die beobachteten Grundwasserspiegel zu beobachten, was auf eine zu geringe Grundwasserneubildung in diesem Gebiet schließen lassen könnte.

Die Messstelle uw39114 liegt östlich der Brunnen Donnersdorf ca. in der Mitte des Fließquerschnitts im Unteren Murtal. Ab 2008 besteht eine gute Anpassung zwischen den berechneten und gemessenen Grundwasserspiegeln, obwohl im Zeitraum vor 2008 mit dem Modell vor allem die Grundwassertiefstände überschätzt werden. Der Grundwasserspiegel bei der Messstelle uw39157 im Osten des Modellgebiets ist aufgrund seiner Nahelage stark von den Schwankungen des Wasserspiegels in der Mur beeinflusst. Mit dem Modell gelingt grundsätzlich eine gute Abbildung der hochfrequent variierenden gemessenen Grundwasserspiegel, wobei die kurzzeitigen Grundwasserspitzen nicht erreicht werden.

6.2.4 Verteilung der Durchlässigkeiten

In Abbildung 21 ist als Ergebnis der instationären Kalibration der Grundwasserströmungsmodelle im Leibnitzer Feld die Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte dargestellt. Die resultierende Verteilung zeigt im Östlichen Leibnitzer Feld mit Werten zwischen $k_f \leq 2 \cdot 10^{-3}$ und bis zu $k_f = 8 \cdot 10^{-3}$ m/s für derartige Aquifere typische Größenordnungen. Im überwiegenden Bereich der Niederterrasse liegen die Durchlässigkeiten im Bereich $4 \cdot 10^{-3}$ m/s bis $6 \cdot 10^{-3}$ m/s. Zonen schlechterer Durchlässigkeiten finden sich entlang des Nordrandes zwischen Wurzing und Neudorf nahe dem neogenen Hügelland sowie in kleinen Bereichen am Ostrand im Raum St. Georgen. Hier spielen Sedimenteintragerungen aus dem angrenzenden Bereich, die wesentlich feiner und somit geringer durchlässig sind, eine wesentliche Rolle. Im Bereich der Austufe der Mur liegen die Durchlässigkeitsbeiwerte bei $4 \cdot 10^{-3}$ m/s bis $8 \cdot 10^{-3}$ m/s, mit den höchsten Werten in der Gegend um Haslach.

Beim Westlichen Leibnitzer Feld ist die Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte durch zwei Bereiche mit hoher hydraulischer Leitfähigkeit von bis zu $6 \cdot 10^{-3}$ m/s gekennzeichnet. Vor allem im Bereich der Flussauen gibt es auch Bereiche mit sehr geringer hydraulischer Leitfähigkeit. Bei der Kalibration des Grundwassermodells haben sich im Besonderen zwei Bereiche als problematisch herausgestellt. Zum einen betrifft dies den nordwestlich gelegenen Teil des Grundwasserkörpers, welcher durch die Rinnenstruktur entlang der Laßnitz begrenzt wird. Durch diese stark ausgeprägte Kante im Stauerrelief und dem daraus resultierenden steilen Abfall des Grundwasserspiegels entstehen Bereiche, in denen der Grundwasserkörper zeitweise trockenfällt. Zum anderen betrifft dies den Bereich südöstlich der Gemeinde Leitring. Messungen des Grundwasserstandes deuten im Bereich Leitring im Verhältnis zu benachbarten Messstellen relativ hohe Grundwasserstände an. Gleichzeitig fällt östlich davon das Gelände ab, so dass ein Einstau nur durch einen steilen Abfall des Grundwasserspiegels in diese Richtung vermieden werden kann. Im Modell wurde diese Situation durch geringe k_f -Werte in diesem Bereich gelöst, eine entsprechende Überprüfung ist zu empfehlen.

In Abbildung 22 ist als Ergebnis der instationären Kalibration des Grundwasserströmungsmodells des Unteren Murtales die Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte im Modellgebiet dargestellt. Die resultierende Verteilung zeigt mit Werten zwischen $k_f \leq 2 \cdot 10^{-3}$ und bis zu $k_f = 8 \cdot 10^{-3}$ m/s für derartige Aquifere zu erwartende Größenordnungen. Im überwiegenden Bereich der Niederterrasse des Unteren Murtales liegen die Durchlässigkeiten im Bereich zwischen $2 \cdot 10^{-3}$ m/s bis $6 \cdot 10^{-3}$ m/s. Zonen schlechterer Durchlässigkeiten finden sich entlang des Nordrandes im Modellgebiet und im Besonderen im Bereich der Helfbrunner Terrasse. Im Bereich der Austufe der Mur liegen die Durchlässigkeitsbeiwerte bei $4 \cdot 10^{-3}$ m/s bis $8 \cdot 10^{-3}$ m/s, mit den höchsten Werten in der Gegend um die Brunnen Fluttendorf / Donnersdorf.

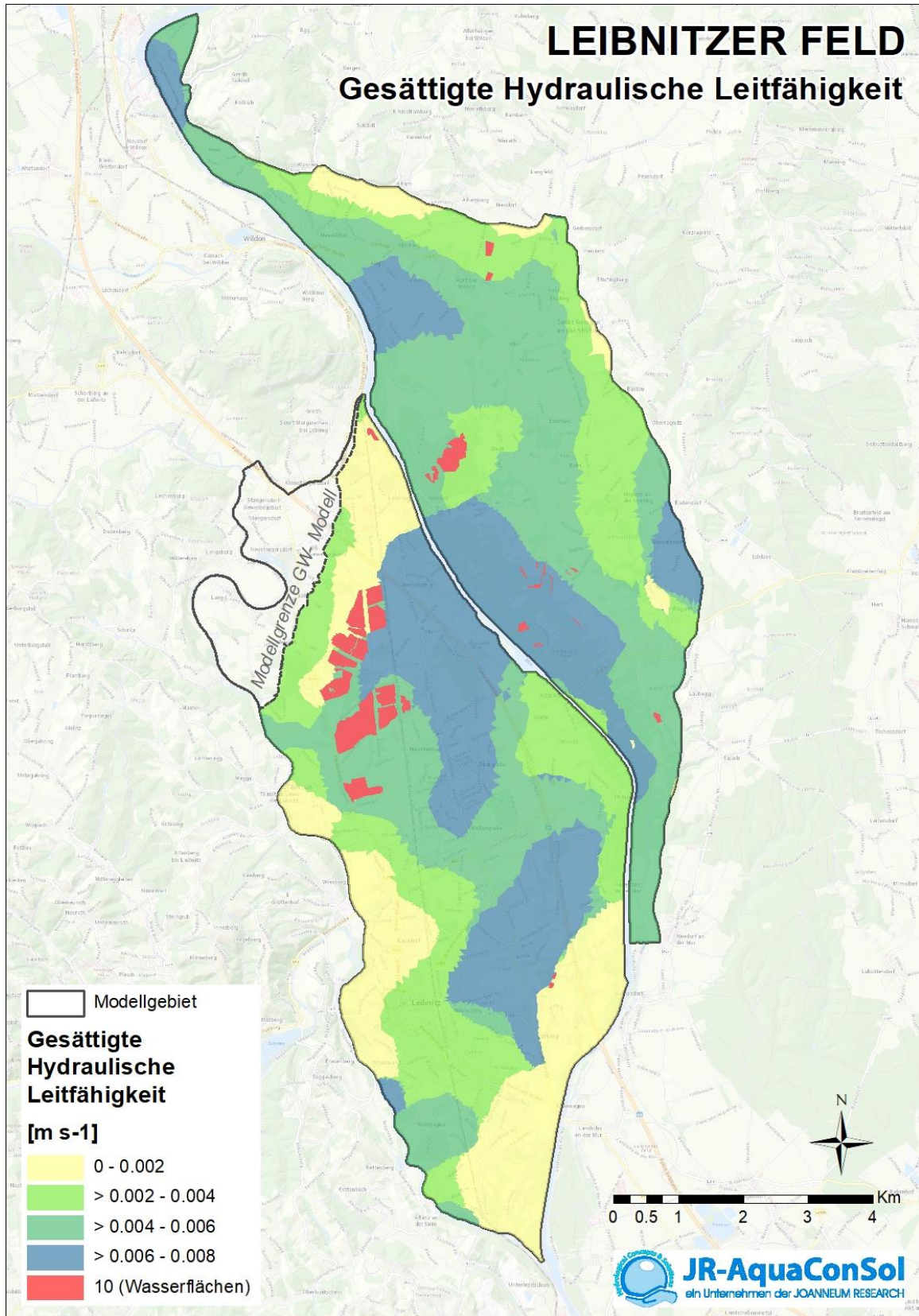


Abbildung 21: Verteilung der kalibrierten Durchlässigkeitsbeiwerte im Leibnitzer Feld

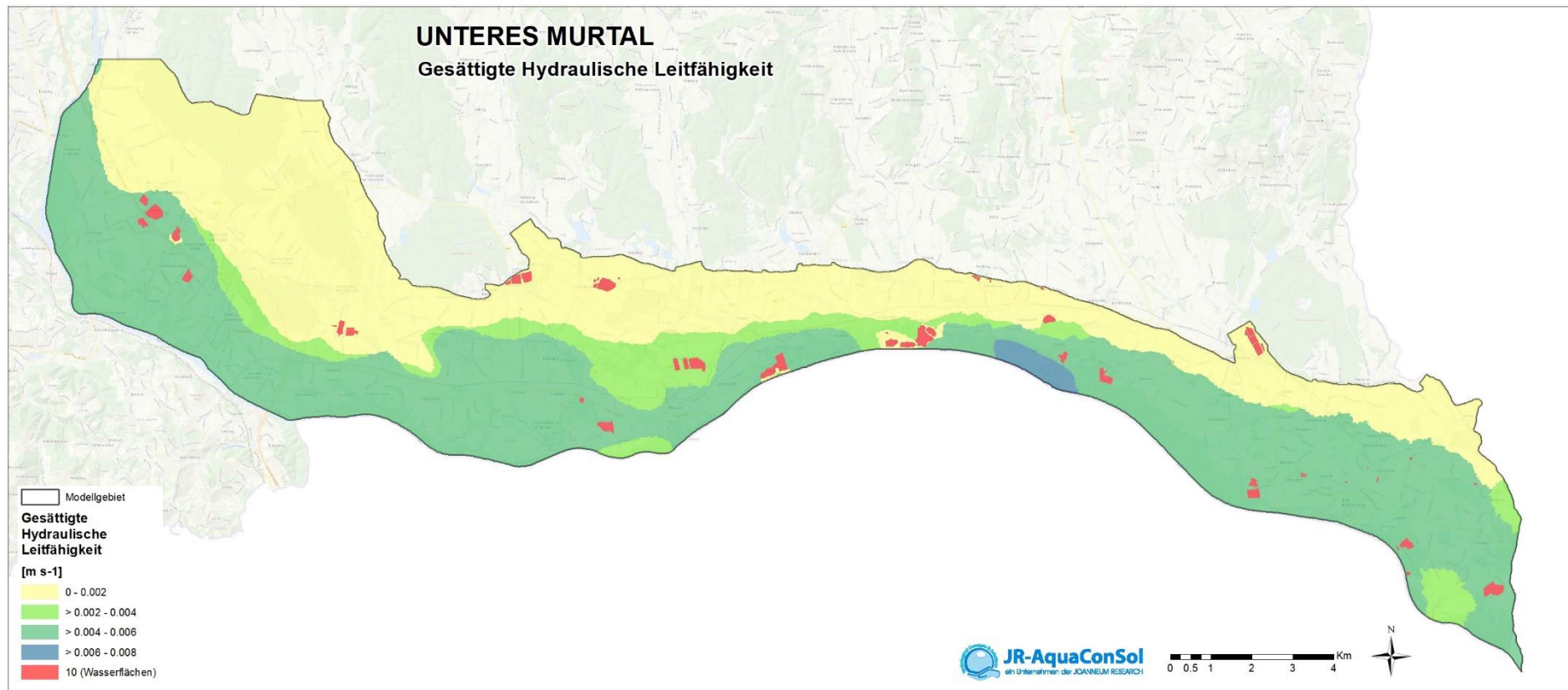


Abbildung 22: Verteilung der kalibrierten Durchlässigkeitsbeiwerte im Unteren Murtal

6.2.5 Porenvolumina

In Abbildung 23 ist die im Zuge der Anpassung der berechneten an die gemessenen Grundwasserspiegellagen ermittelte Verteilung der effektiven Porosität des Grundwasserspiegelschwankungsbereichs im Leibnitzer Feld dargestellt. Der Startwert von 0,1 wurde dabei großflächig auf 0,12 angehoben und weist im Zentralbereich im Westlichen Leibnitzer Feld sogar Werte von 0,18 auf. Im Bereich der Laßnitzschlinge wurde die Porosität lokal auf 0,04 verringert. Die Nassbaggerungen wurden mit dem Maximalwert von 1 im Grundwasserströmungsmodell berücksichtigt.

Abbildung 24 zeigt die Verteilung der effektiven Porosität des Grundwasserspiegelschwankungsbereichs im Unteren Murtal. Der in weiten Teilen ermittelte Wert von 0,12 angehoben wird am nördlichen Modellrand auf Werte von 0,05 bzw. 0,06 reduziert.

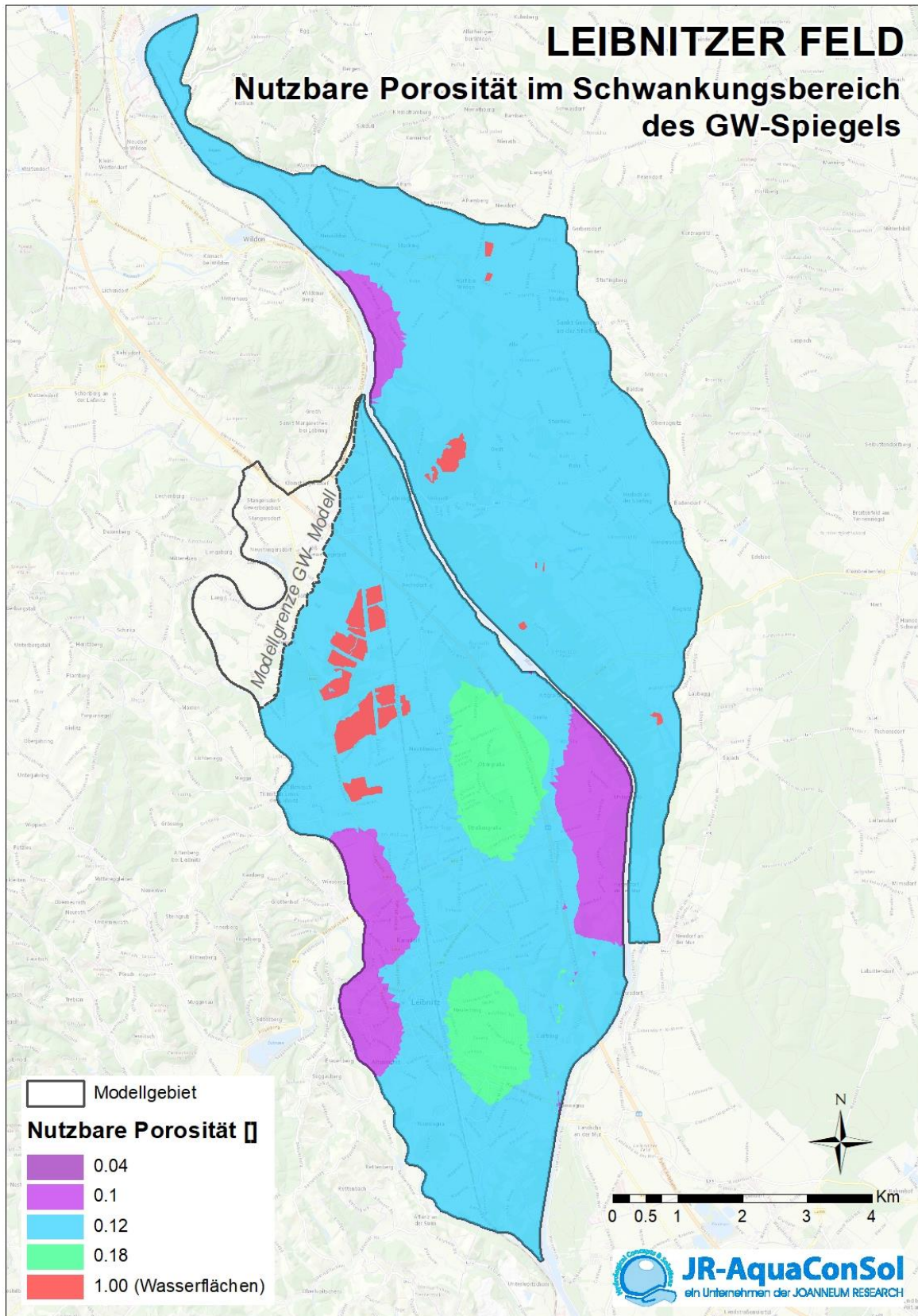


Abbildung 23: Verteilung der kalibrierten Porosität im Leibnitzer Feld

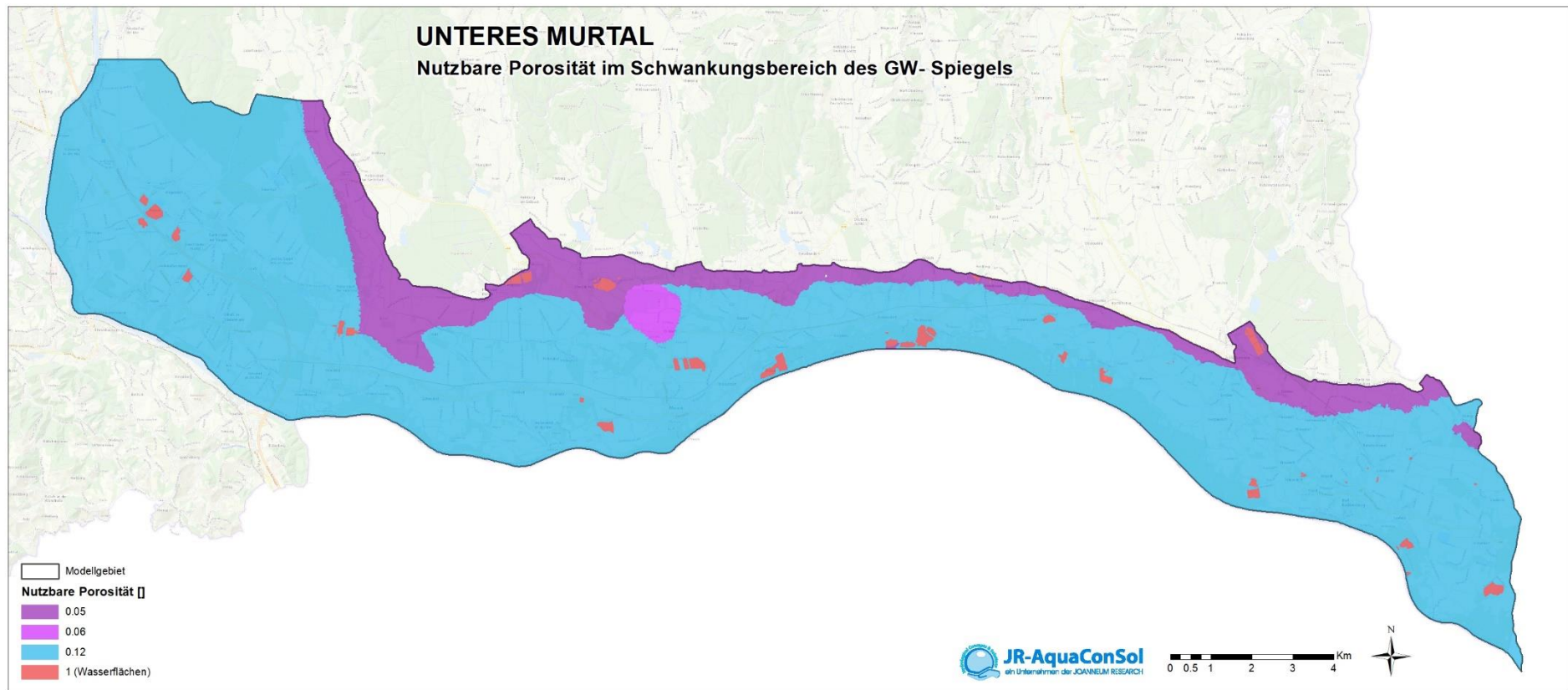


Abbildung 24: Verteilung der kalibrierten Porosität im Unteren Murtal

6.3 Nitrattransport

Allgemein ist festzuhalten, dass mit einem numerischen Nitrattransportmodell auf Aquiferskala aufgrund der bestehenden Unsicherheiten bei den Randbedingungen und der zeitlichen und räumlichen Verteilung der Eintragsfunktion von Nitrat nicht die gleiche Qualität bei der lokalen Nachbildung von gemessenen Ganglinien, wie es im Fall der Grundwasserströmung möglich ist, erzielt werden kann. Der Schwerpunkt bei der regionalen Nitrattransportmodellierung liegt daher vielmehr in der Nachbildung der grundlegenden Eintrags- und Transportprozesse sowie in der Erfassung von maßgeblichen Unterschieden zwischen einzelnen Regionen im Modellgebiet. Die an den Finite-Elemente-Knoten berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser können daher deutlich von gemessenen Werten zu bestimmten Zeitpunkten abweichen.

Ein regionales Nitrattransportmodell ist somit in der Lage, das generelle Niveau und langfristige Trends von Messungen wiederzugeben, ohne dabei kurzfristige Anstiege oder Rückgänge an einzelnen Messstellen abbilden zu können. Gleichzeitig können aber die kontinuierlich berechneten Ganglinien der Nitratkonzentrationen eine hohe zeitliche Variabilität aufweisen, die durch die Abstände zwischen den Messungen nicht zu erfassen sind. Ein Nitrattransportmodell auf Aquiferskala ist daher besonders als Werkzeug zu sehen, um die Auswirkungen von Bewirtschaftungsalternativen zu evaluieren.

Die Unsicherheiten bei der Eintragsfunktion sind wesentlich beeinflusst von den beschränkten Kenntnissen der Aufbringungsmenge von Stickstoff, der konkreten Bewirtschaftung pro Schlag und den naturräumlichen Detailbedingungen, die die lokale Umsetzung von Stickstoff steuern. Der diffuse Austrag aus der landwirtschaftlichen Bodennutzung wurde mit dem Modellverbund SIMWASER/STOTRASIM berechnet. Als Ergebnis erhält man ein Zeit-Tiefen Profil des Inputs von Nitratmasse (kg/ha/a) pro Hydrotop in den Grundwasserkörper.

Außerdem ist generell anzumerken, dass die Lösung der Nitrattransportgleichung im Grundwasser in der Nähe von Randbedingungen je nach der dort beschriebenen Interaktion mit numerischen Effekten behaftet sein kann, so dass die berechneten Nitratkonzentrationen in diesen Bereichen einen numerischen Einfluss aufweisen (siehe dazu auch Diskussion der konvergenten und divergenten Lösung für die Stofftransportgleichung in Kapitel 5.3.1).

6.3.1 Randbedingungen

Als Transportrandbedingungen wurden am nördlichen und östlich Zuflussrand im Östlichen Leibnitzer Feld Nitratkonzentrationen zwischen 10 und 50 mg/l im unterirdischen Zustromwasser, 12 mg/l bei infiltrierendem Wasser aus Oberflächengewässern und 2 mg/l bei infiltrierendem Wasser aus der Mur angesetzt. Bei durchströmten Nassbaggerungen wurde eine verbleibende Nitratkonzentration von 6 mg/l im abströmenden Grundwasser als Resultat des Pflanzen- und Planktonwachstums und des damit einhergehenden Nitratentzugs aus dem Grundwasser angenommen. Für die longitudinale und transversale Dispersion wurden Werte von 10 m bzw. 1 m verwendet. Beim Westlichen Leibnitzer Feld wurden als Transportrandbedingungen am nördlichen Zuflussrand Nitratkonzentrationen von konstant 20 mg/l im unterirdischen Zustromwasser angesetzt. Bei durchströmten Nassbaggerungen wurde eine verbleibende instationäre Nitratkonzentration auf Basis von Messwerten an der Messstelle GA_378420 (Nitratkonzentrationen von ca. 28 mg/l zwischen

1993 und 1995, welche auf ca. 4 mg/l bis 6 mg/l bis 2018 zurückgehen) im abströmenden Grundwasser angenommen.

Beim Unteren Murtal wurden als Transportrandbedingungen am nördlichen und östlich Zuflussrand eine Nitratkonzentration von 20 mg/l im unterirdischen Zustromwasser, 10 mg/l bei infiltrierendem Wasser aus Oberflächengewässern und 5 mg/l bei infiltrierendem Wasser aus der Mur angesetzt. Bei durchströmten Nassbaggerungen wurde eine verbleibende Nitratkonzentration von 2 mg/l im abströmenden Grundwasser angenommen. Die jeweiligen Nitratkonzentrationen bei infiltrierendem Wasser aus Oberflächengewässern, grundwasserstromab von Nassbaggerungen und im unterirdischen Zustromwasser wurden im Verlauf der Kalibration variiert, um die Anpassung der berechneten an die gemessenen Nitratkonzentrationen im Grundwasser zu verbessern.

Der Nitratintrag in das Grundwasser aus der Anreicherung von nitratbelasteten Oberflächenwässern kann die berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser numerisch beeinflussen (siehe auch Kapitel 5.3.1). Im Westlichen Leibnitzer Feld betrifft dies den Bereich an der Mur bei Gabersdorf und an der Sulm bei Aflenz, wo die Oberflächengewässer zwischen einer in den Grundwasserleiter infiltrierenden und einer aus dem Grundwasserleiter exfiltrierenden Funktion wechseln, wodurch in den Berechnungsknoten im unmittelbaren Nahbereich des Gewässers zeitweise numerische Oszillationen auftreten. Außerdem führen die geringen Grundwassermächtigkeiten aufgrund einer abgeleiteten Stauerhochlage und ein niedrigerer Durchlässigkeitsbereich in der Region zwischen Mur und den Altarmen bei Gabersdorf ebenso zu hohen Nitratkonzentrationen.

Im Östlichen Leibnitzer Feld werden die Nitratkonzentrationen unter anderem von der Interaktion mit der Stiefing und dem Weißenegger Mühlkanal beeinflusst. Zur Umsetzung über entsprechende Randbedingungen wäre daher die divergente Lösung der Transportgleichung zu wählen, die aber im konkreten Fall zu numerisch instabilen Ergebnissen geführt hat. Daher wurde die konvergente Lösung gewählt und in folgenden Gewässerabschnitten eine fixe Konzentration als Randbedingung implementiert:

- Im Fall der Stiefing wurde ein Gewässerabschnitt (bei, bzw. nördlich von Oedt) identifiziert, welcher fast permanent mit dem Grundwasserleiter interagiert. Hier wurde eine fixe Konzentration von 12 mg/l (basierend auf Nitratmessungen in der Stiefing) gesetzt.
- Im Fall des Mühlkanals betrifft dies den Bereich bei Neuoedt. Hier befindet sich ebenfalls eine Nassbaggerung (beim Golfclub), welche mit einer fixen Konzentration von 6 mg/l implementiert wurde. Der Einfluss der Nassbaggerung auf den Grundwasserleiter, aber auch der Einfluss von infiltrierendem Wasser aus der Mur dominiert hier über den Einfluss des Mühlkanals.

Ein Abgleich mit vorhandenen Messstellen grundwasserstromab der Stiefing zeigt, dass die Nitratkonzentration durch diesen vereinfachten Modellansatz entweder gut getroffen werden (z.B. Messstelle GA_377380; siehe auch Kapitel 6.3.3) oder die berechneten Nitratkonzentration im Mittel leicht über den gemessenen (z.B. Messstelle uw377380; siehe auch Kapitel 6.3.3) liegen.

Im Unteren Murtal ist die Verwendung des divergenten Ansatzes zur Lösung der Transportgleichung aufgrund der hohen Bedeutung der Nebengewässer unumgänglich. Hierdurch stellen sich numerisch verursachte Unregelmäßigkeiten des Konzentrationsverlaufs im Grundwasser im unmittelbaren

Nahbereich der Nebengewässer ein. Dies betrifft vor allem den Mühlgang nördlich von Obervogau, den Schwarzaubach bei Weitersfeld an der Mur, den Sassbach südlich von Weinburg, und den Drauchenbach nördlich von Halbenrain sowie südlich von Hummersdorf.

6.3.2 Überblick Kalibrationsqualität

In Abbildung 25 ist die Verteilung der mittleren Nitratkonzentration (Median) im Grundwasser des Östlichen Leibnitzer Feldes pro Modellknoten im Untersuchungsgebiet sowie der mittleren Residuen zwischen gemessenen und berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser in der Periode zwischen 1995 und 2017 an den bezeichneten Messstellen dargestellt. Die Ergebnisse der Jahre 1993 und 1994 wurden nicht in die Berechnung der mittleren Nitratkonzentration einbezogen, da die berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser in den beiden ersten Jahren noch deutlich von den beginnenden Wechselwirkungen zwischen Randbedingungen, Anfangsbedingungen und Nitrattransport beeinflusst werden.

Die höchsten mittleren Nitratkonzentrationen im Grundwasser des Östlichen Leibnitzer Feldes treten im Bereich der Niederterrasse auf. Im Abstrombereich von Nassbaggerungen und von infiltrierenden Oberflächengewässern sind die Nitratkonzentrationen geringer. Die mittlere Nitratkonzentration im Grundwasser beträgt 35,1 mg/l. Die mittlere Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Nitratkonzentrationen beträgt an den meisten Messstellen weniger als 10 mg/l.

Die höchsten mittleren Nitratkonzentrationen im Grundwasser des Westlichen Leibnitzer Feldes mit Werten größer als 70 mg/l treten in den Bereichen östlich von Leitring und südlich von Wagna auf. Im Abstrombereich von Nassbaggerungen, Siedlungsgebieten und von infiltrierenden Oberflächengewässern sind die Nitratkonzentrationen geringer. Der Mittelwert der mittleren Nitratkonzentration im Grundwasser beträgt 28,1 mg/l. Die mittlere Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Nitratkonzentrationen beträgt an vielen Messstellen weniger als 10 mg/l, im Süden des Modellgebiets unterschätzt das Modell die gemessenen Nitratkonzentrationen häufiger.

In Abbildung 26 ist die Verteilung der mittleren Nitratkonzentration (Median) im Grundwasser im Unteren Murtal sowie der mittleren Residuen zwischen gemessenen und berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser im Zeitraum zwischen 1995 und 2017 an den bezeichneten Messstellen dargestellt. Der Bereich der Helfbrunner Terrasse wurde im Nitrattransportmodell für das Untere Murtal inaktiv gesetzt, da zu verschiedenen Zeitpunkten im Modell einzelne Elemente in diesem Bereich trockenfallen und numerisch bedingte unplausible Nitratkonzentrationen im Grundwasser resultieren. Die höchsten mittleren Nitratkonzentrationen im Grundwasser treten im Osten des Unteren Murtales auf, was mit der Kombination aus Neubildung und Stickstoffeintrag in den Grundwasserleiter erklärt werden kann. Im Abstrombereich von Nassbaggerungen und von infiltrierenden Oberflächengewässern sind die Nitratkonzentrationen geringer. Der Mittelwert der Nitratkonzentration im Grundwasser beträgt 36 mg/l.

Im Zentralbereich des Unteren Murtales beträgt die mittlere Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Nitratkonzentrationen an den meisten Messstellen weniger als 10 mg/l. Im östlichen Bereich gehen mit den erhöhten Nitratkonzentrationen im Grundwasser aber auch höhere mittlere Abweichungen bei den Nitratkonzentrationen einher. Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, dass bei sauerstoffreduzierten Verhältnissen die mögliche Nitratreduktion im Grundwasser im Zuge des

Stoffwechsels von Bakterien mit dem konservativen Nitrattransportmodell nicht berücksichtigt werden kann. Darüber gelingt es mit dem Nitrattransportmodell nur eingeschränkt, die in der Nähe von Oberflächengewässern gemessenen Nitratkonzentrationen im Grundwasser nachzubilden, diese werden in der Regel deutlich unterschätzt (z.B. bei Messstellen GA38617 oder GA38773). Im Bereich zwischen Seibersdorf bei St. Veit/Oberschwarza und Eichfeld/Mureck liegen die berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser in einigen Messstellen zeitweise deutlich unterhalb der gemessenen. Dies betrifft die Messstellen GA386312, GA386310, GA386510, uw36736, GA38613, uw38595, GA38774, PG61511092 und uw38812.

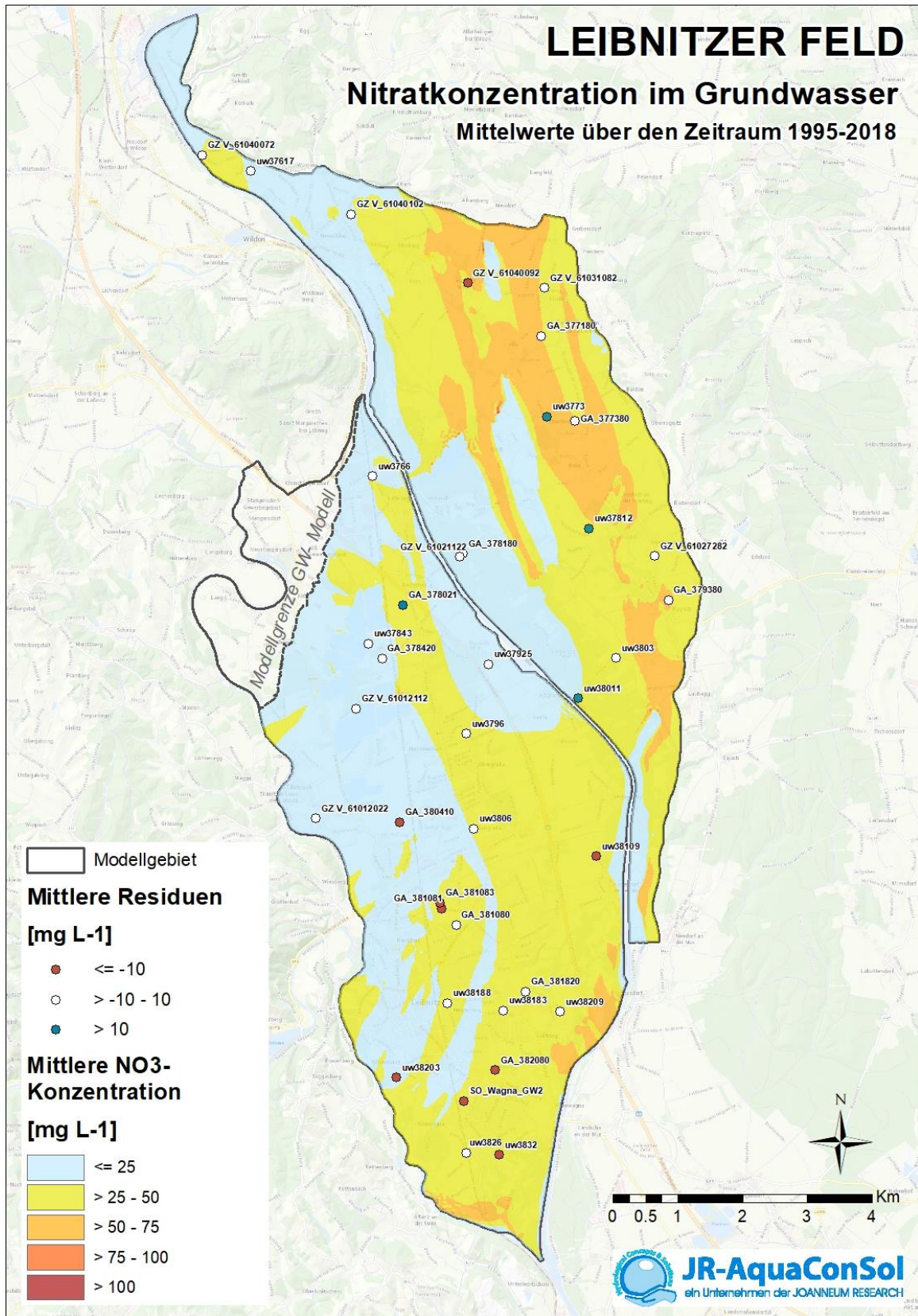


Abbildung 25: Verteilung der mittleren Nitratkonzentration (Median) im Grundwasser sowie der mittleren Residuen zwischen gemessenen und berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser an den bezeichneten Messstellen im Leibnitzer Feld

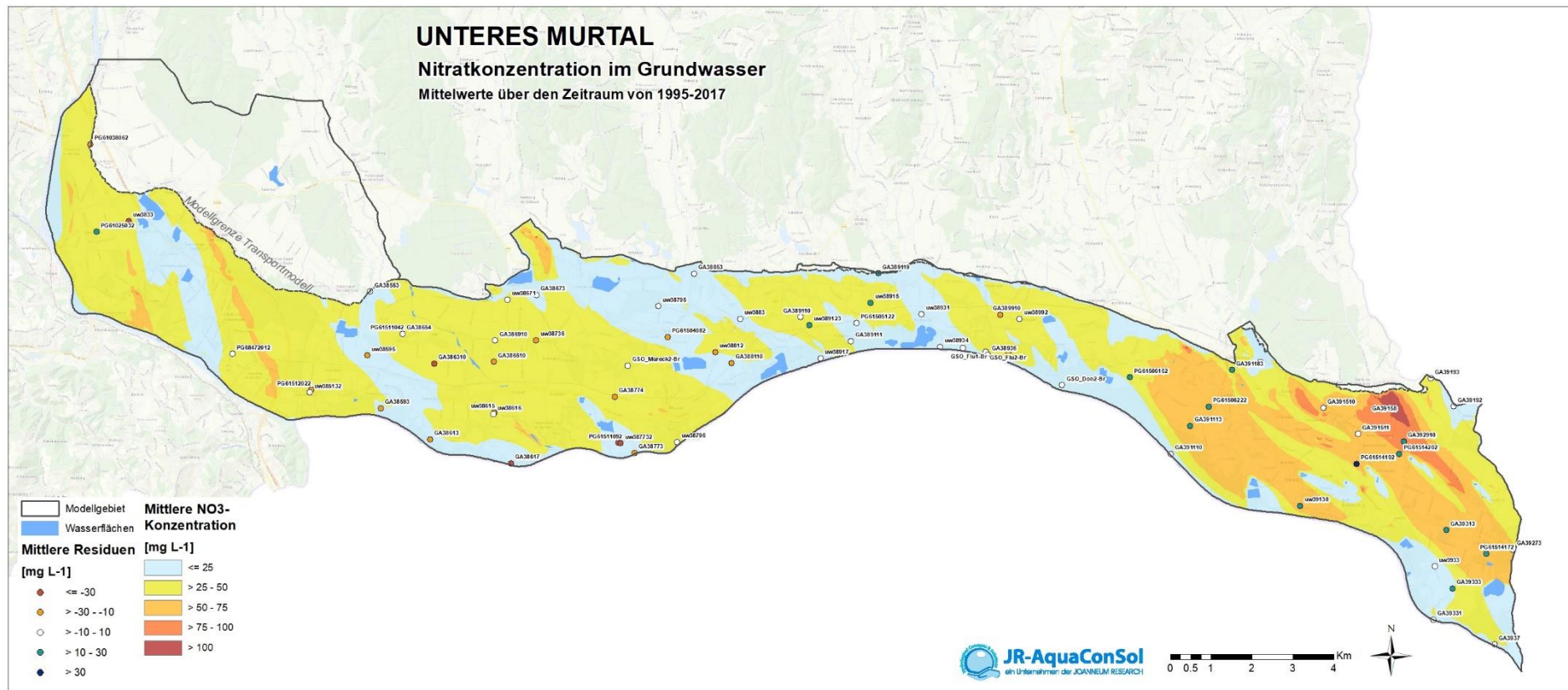


Abbildung 26: Verteilung der mittleren Nitratkonzentration (Median) im Grundwasser sowie der mittleren Residuen zwischen gemessen und berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser an den bezeichneten Messstellen im Unteren Murtal

6.3.3 Veranschaulichung der Kalibrationsqualität an ausgewählten Messstellen

In Abbildung 27 ist exemplarisch der Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Nitratkonzentrationen im Grundwasser des östlichen Leibnitzer Feldes an den Messpegeln GA377380, GA377180 und uw3803 (Lage siehe Abbildung 25) dargestellt.

Die Gewässerzustandsüberwachungsordnungsmessstelle GA377380 liegt im Bereich der Niederterrasse in der Nähe des Brunnens St. Georgen 2 der Leibnitzerfeld Wasserversorgungsgesellschaft. Die beobachtete Grundwasserkonzentration fällt von Werten zwischen 57 mg/l bis 76 mg/l in den frühen 90er Jahren auf Werte zwischen 42 mg/l und 50 mg/l in den 2000er Jahren und geht nach einem kurzen Anstieg über 50 mg/l in 2008 auf Werte zwischen 34 mg/l und 42 mg/l ab 2010 zurück. Grundsätzlich kann diese Dynamik auch von den berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser nachgebildet werden, wobei der Anstieg in 2008 im Modell zu stark berücksichtigt wird, so dass die berechneten Nitratkonzentrationen ab 2007 die gemessenen Werte übersteigen.

Die Gewässerzustandsüberwachungsordnungsmessstelle GA377180 liegt im Bereich der Niederterrasse in der Nähe des Brunnens St. Georgen 1 der Leibnitzerfeld Wasserversorgungsgesellschaft. Die beobachtete Grundwasserkonzentration fällt in mehreren Stufen von Werten über 80 mg/l in den frühen 90er Jahren bis auf Werte zwischen 48 mg/l und 54 mg/l in 2004 zurück. Danach erfolgt ein mehrjähriger Anstieg auf Werte über 72 mg/l in 2008, auf den wiederum ein deutlich ausgeprägter Rückgang auf Werte zwischen 42 mg/l und 48 mg/l in den frühen 2010er Jahren erfolgt. Ab 2013 besteht wieder eine steigende Tendenz bei den Nitratkonzentrationen im Grundwasser. Grundsätzlich kann diese Dynamik auch von den berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser nachgebildet werden, wobei der Rückgang im Modell zwischen 1996 und 2000 zu stark berücksichtigt wird, so dass die berechneten Nitratkonzentrationen in diesem Zeitraum die gemessenen Werte unterschätzen.

Die Messstelle uw3803 liegt im Aubereich des Östlichen Leibnitzer Feldes. Vergleichbar mit der GZÜV-Messstelle GA377180 variieren die Nitratkonzentrationen im Grundwasser bei der Messstelle uw3803 in Form von mehreren Aufwärts- und Abwärtszyklen zwischen 16 mg/l und 64 mg/l. Grundsätzlich kann auch diese Dynamik von den berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser nachgebildet werden, wobei die Aufwärts- und Abwärtszyklen ab 2004 im Modell nicht mehr zur Gänze erfasst werden, so dass die berechneten Nitratkonzentrationen ab diesem Zeitraum eine geringere Variabilität aufweisen.

In Abbildung 28 ist exemplarisch der Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Nitratkonzentrationen im Grundwasser des Westlichen Leibnitzer Feldes an den Messpegeln uw3796, uw37925 und uw3826 (Lage siehe Abbildung 25) dargestellt. Die Messstelle uw3796 liegt in der Nähe von Obergralla. Die Nitratkonzentrationen im Grundwasser bei der Messstelle uw3796 variieren in Form von mehreren Aufwärts- und Abwärtszyklen zwischen 16 mg/l und 44 mg/l. Grundsätzlich kann auch diese Dynamik von den berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser nachgebildet werden, wobei der gemessene Anstieg der Nitratkonzentrationen zwischen 2004 und 2006 vom Modell nur zeitverzögert wiedergegeben wird.

Die Messstelle uw37925 liegt zwischen dem Kraftwerk Gralla und der Autobahn A9. Bis auf die Spitze im Jahr 2004 mit 45 mg/l schwanken die Nitratkonzentrationen im Grundwasser bei der Messstelle

uw37925 zumeist zwischen 5 mg/l und 25 mg/l mit Hochwerten im Zweijahresrhythmus. Grundsätzlich kann diese Dynamik mit dem Nitrattransportmodell gut nachgebildet werden, obwohl die berechneten Nitratkonzentrationen im Grundwasser die gemessenen im Mittel etwas unterschätzen. Die Messstelle uw3826 liegt westlich der Gemeinde Wagna im Abstrombereich des Modellgebiets. Die gemessenen Nitratkonzentrationen im Grundwasser sind seit 1993 von 55 mg/l in einer langsamen Wellenbewegung auf Werte von ca. 35 mg/l in 2018 mit einem zwischenzeitlichen Anstieg in 2006 auf 45 mg/l zurückgegangen. Die berechnete Ganglinie der Nitratkonzentration im Grundwasser kann diese langjährige Veränderung gut nachvollziehen, wobei es in den ersten Jahren eine Über- und in den letzten Jahren eine Unterschätzung der gemessenen Werte zu beobachten ist.

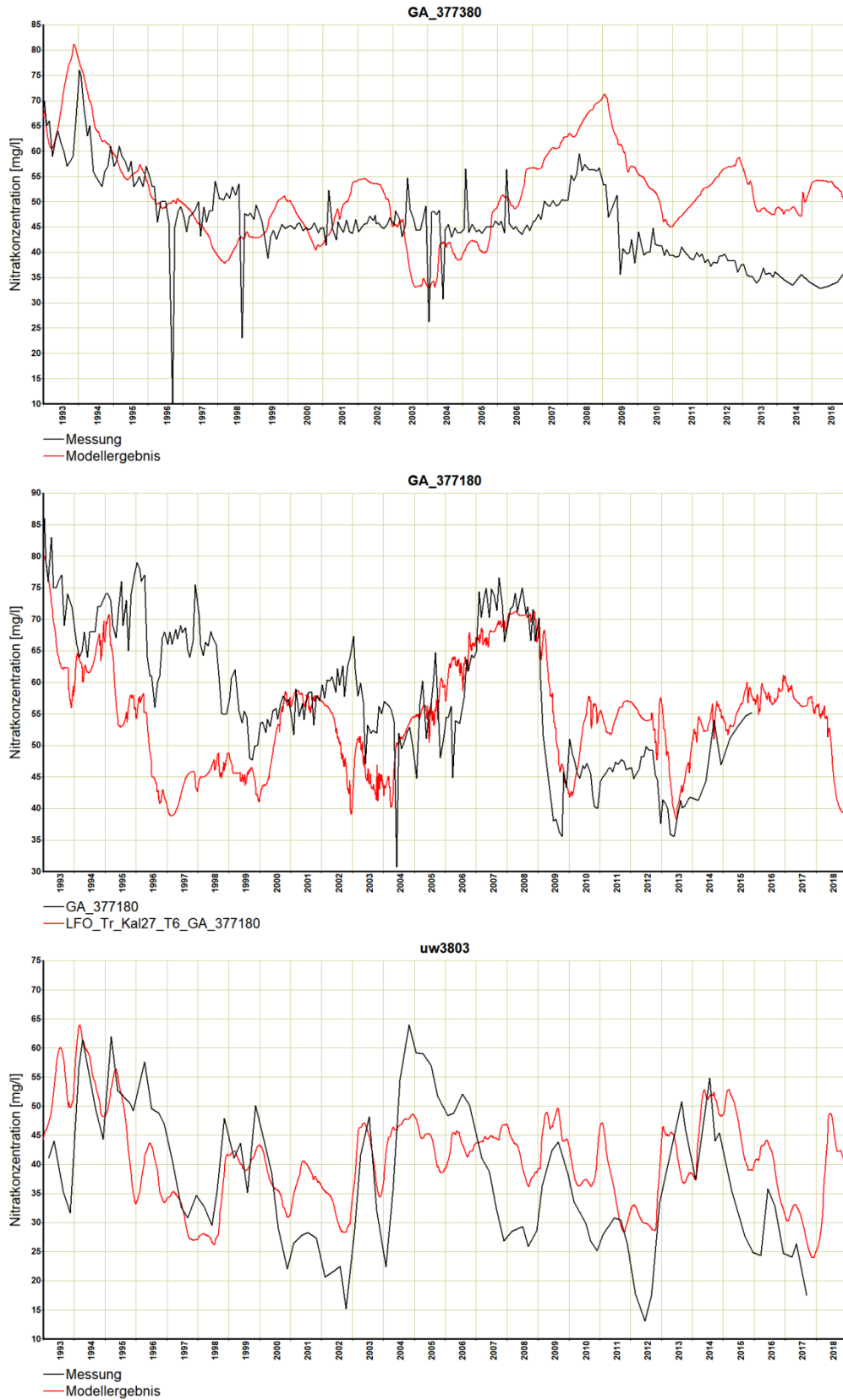


Abbildung 27: Vergleich zwischen berechneten (rote Linie) und gemessenen (schwarze Linie) Nitratkonzentrationen im Grundwasser des Östlichen Leibnitzer Feldes an den Messpegeln GA377380 (obere Darstellung), GA377180 (mittlere Darstellung) und uw3803 (untere Darstellung)

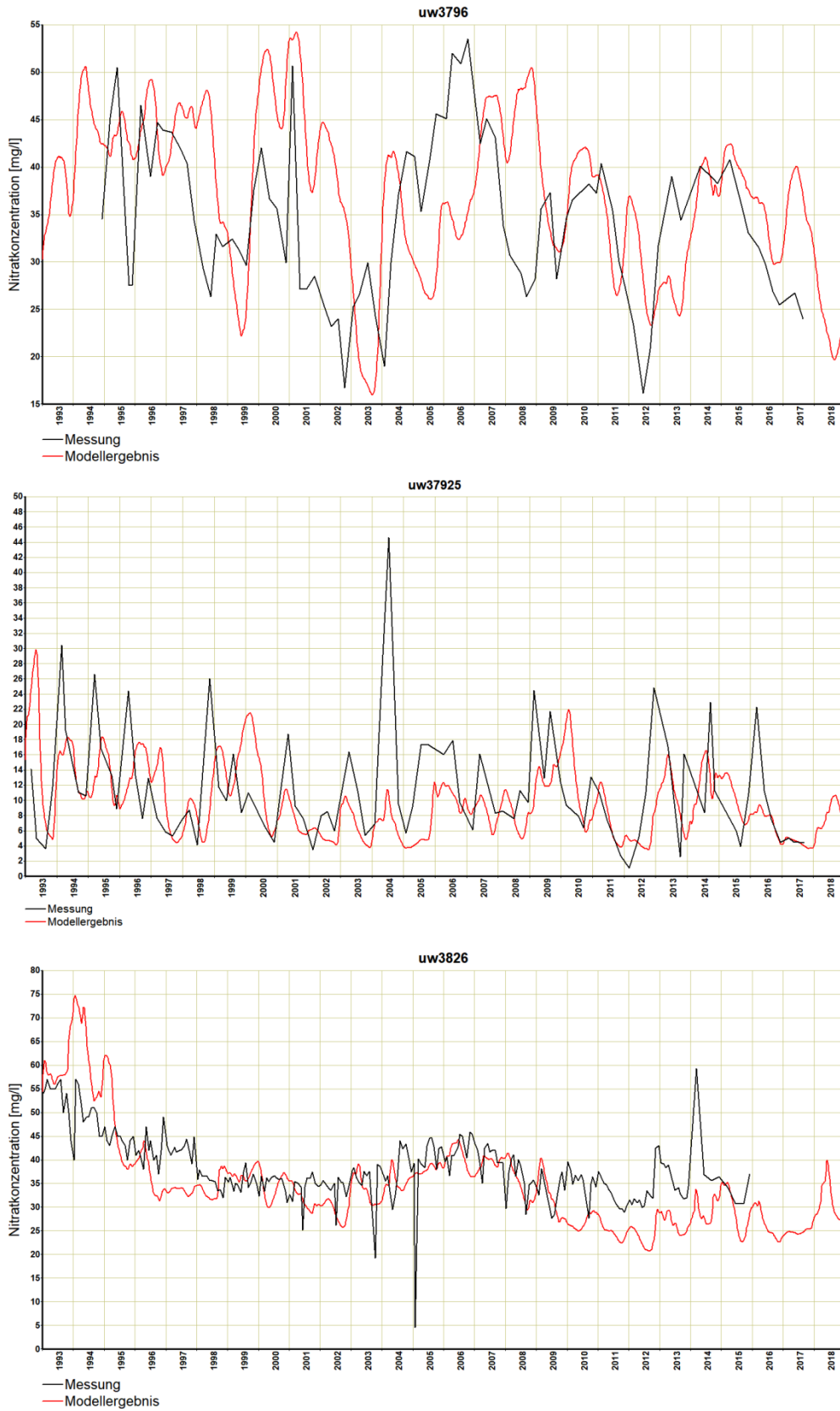


Abbildung 28: Vergleich zwischen berechneten (rote Linie) und gemessenen (schwarze Linie) Nitratkonzentrationen im Grundwasser des Westlichen Leibnitzer Feldes an den Messpegeln uw3796 (obere Darstellung), uw37925 (mittlere Darstellung) und uw3826 (untere Darstellung)

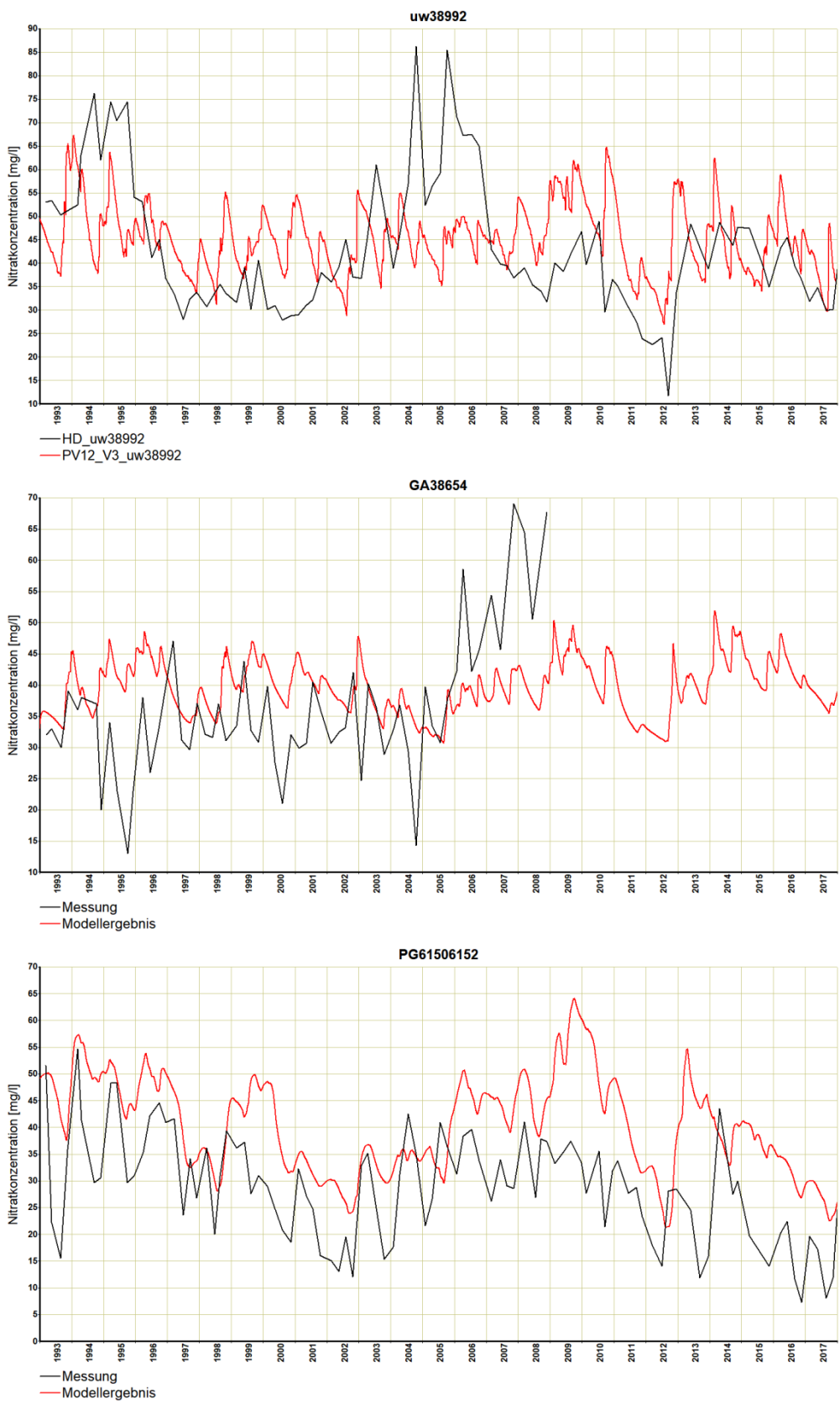


Abbildung 29: Vergleich zwischen berechneten (rote Linie) und gemessenen (schwarze Linie) Nitratkonzentrationen im Grundwasser des Unteren Murtales an den Messpegeln uw38992 (obere Darstellung), GA38654 (mittlere Darstellung) und uwPG61506152 (untere Darstellung)

In Abbildung 29 ist exemplarisch der Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Nitratkonzentrationen im Grundwasser an den Messpegeln uw38992, GA38654 und PG61506152 im Unteren Murtal (Lage siehe Abbildung 26) dargestellt. Die Messstelle uw38992 liegt im Zustrombereich zu dem Brunnenfeld Donnersdorf. Die berechneten Nitratkonzentrationen variieren zwischen ca. 30 mg/l und ca. 65 mg/l und erreichen die gemessenen Hochstände der Nitratkonzentrationen in den Jahren 1994 und 1995 von ca. 75 mg/l und in den Jahren 2004 und 2005 von ca. 85 mg/l nicht (der Tiefstand der Nitratkonzentration in 2012 beruht lediglich auf einer Messung und wird daher nicht weiter in der Diskussion behandelt). Die Messstelle GA38654 befindet sich im westlichen Teil des Unteren Murtals. Die berechneten Nitratkonzentrationen variieren zwischen ca. 30 mg/l und ca. 50 mg/l und überschätzen die gemessenen Nitratkonzentrationen im Grundwasser im Zeitraum zwischen 1993 und 2004, können aber den nachfolgenden gemessenen Anstieg bis auf fast 70 mg/l nicht nachvollziehen. Ab 2008 liegen keine Messwerte mehr vor. Die Messstelle PG61506152 liegt grundwasserstromab vom Brunnenfeld Donnersdorf. Generell kann mit dem Modell die Dynamik der gemessenen Nitratkonzentrationen gut erfasst werden, obwohl im überwiegenden Zeitraum eine Überschätzung der Nitratkonzentration durch das Modell erfolgt.

Die langfristige Entwicklung der tatsächlichen Nitratkonzentrationen im Grundwasser kann mit den Modellergebnissen an den abgebildeten Pegeln wiedergegeben werden. Die numerische Nitrattransportmodellierung stellt somit einen entscheidenden Schritt dar, die Bedeutung der Komponenten des komplexen Zusammenspiels zwischen Grundwasserströmung, diffusem Stickstoffeintrag an der Landoberfläche, Stickstoffumsetzungsprozessen und Randzuflüssen von Nitrat in seiner räumlichen und zeitlichen Dimension generell zu verstehen. Eine Prognosefähigkeit des Nitrattransportmodells z.B. für die Beurteilung von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Auswirkungen der Nitratkonzentration im Grundwasser ist in dem Rahmen der Modellunsicherheiten (siehe Abbildung 25 bzw. Abbildung 26) gegeben.

7 Ergebnisse des Grundwasserströmungs- und des Nitrattransportmodells

7.1 Verteilung von Flurabstand und Grundwassermächtigkeit bei relevanten Grundwasserspiegellagen (P2.5, P50 und P97.5) im Modellzeitraum

Zur Dokumentation der Grundwasserströmungsverhältnisse, der verfügbaren Grundwassermächtigkeiten und der resultierenden Grundwasserflurabstände bei Mittelwasserverhältnissen (Median des Grundwasserspiegels an jedem FE-Knoten) werden in Abbildung 30 die Grundwasserisohypsen und die Grundwassermächtigkeit und in Abbildung 31 die zugehörigen Flurabstände im Leibnitzer Feld dargestellt. Dabei wurden die Grundwassermächtigkeiten aus der Differenz der Raster der berechneten Grundwasserspiegellagen und dem Raster der Höhenlage des Grundwasserstauers (siehe Abbildung 2) berechnet. Die Ermittlung des Grundwasserflurabstandes erfolgte durch Verschnitt des Laserscan-Höhenmodells mit einer Auflösung von 1*1 m mit der berechneten Höhenlage des Grundwasserspiegels.

Die Grundwasserströmungsverhältnisse zeigen im Östlichen Leibnitzer Feld generell ein murparalleles Abströmung des Grundwassers, das durch die Oberflächengewässer (Seen, Flüsse) im Detail beeinflusst wird. Aus Abbildung 30 geht hervor, dass die Mächtigkeit des Grundwassers bei mittleren Grundwasserständen sehr heterogen verteilt ist und zwischen 0 m und 8 m schwankt. Besonders niedrige Grundwassermächtigkeiten liegen zum einen am nordöstlichen Modellrand, sowie nördlich des Mühlgangs im Bereich Haslach an der Stiefing sowie Haslach-Mühle vor. Wie auch aus Abbildung 2 zu entnehmen ist, handelt es sich hierbei um Bereiche, in denen der Grundwasserstauer verhältnismäßig hoch liegt. Analog lassen sich die hohen Grundwassermächtigkeiten von bis zu 6 Metern südlich von St. Georgen an der Stiefing durch eine dort verlaufende Rinnenstruktur im Grundwasserstauer erklären. Entlang der Mur können die stellenweise hohen Grundwassermächtigkeiten durch die Kraftwerksbauten erklärt werden, an welchen das Wasser der Mur aufgestaut wird und somit den Grundwasserspiegel erhöht.

Die Grundwassermächtigkeiten im Westlichen Leibnitzer Feld variieren bei mittlerer Grundwasserspiegellage zwischen kleiner 1 m und über 6 m. Die Grundwasserfließrichtung wird im nördlichen Teil durch ein starkes Grundwasserspiegelgefälle beim Übergang von der Jößer Terrasse auf die Niederterrasse sowie durch die Nassbaggerungen geprägt. Im zentralen Bereich des Westlichen Leibnitzer Feldes fließt das Grundwasser von Nord nach Süd und erfährt eine Beeinflussung nach Südwesten aufgrund des Übertritts von Grundwasser in die Sulm. Im Bereich zwischen Leitring und der Mur reduziert sich durch eine Stauerhochlage die Grundwassermächtigkeit und führt in weiterer Folge zu einem erhöhten Grundwasserspiegelgefälle.

In der Darstellung des Grundwasserflurabstandes wirkt sich naturgemäß die Terrassierung des Untersuchungsgebietes entscheidend aus. Der Abstand zwischen Grundwasserspiegel und Geländeoberkante schwankt zwischen 0 und 24 m. In Abbildung 31 ist sehr deutlich die Unterteilung des Grundwassergebietes in Niederterrasse und Austufe zu erkennen. Im Bereich der Niederterrasse liegen die Flurabstände zwischen 5 m und 10 m, wobei einzelne Bereiche entlang des nordöstlichen Modellrandes einen deutlich höheren Flurabstand aufweisen. Im Nahbereich der

Oberflächengewässer in der Austufe und nahe den offenen Grundwasserflächen in der Haslacher Au geht der Grundwasserflurabstand auf Werte kleiner 1 m zurück.

Der Flurabstand im Westlichen Leibnitzer Feld ist bei mittlerer Grundwasserspiegellage stromab des Kraftwerks Gralla entlang der Mur sowie im Süden des Modellgebiets entlang der Sulm mit Werten kleiner 2 m am geringsten. Stromab der Tillmitscher Nassbaggerungen Richtung Brunnenfeld Kaindorf finden sich die höchsten Flurabstände mit Werten zwischen 5 m und 6 m.

Abbildung 32 zeigt die gesättigten Grundwassermächtigkeiten und die Isolinien des Grundwasserspiegels im Leibnitzer Feld, die dem 2,5% Perzentil entspricht (niedrige Grundwasserspiegellage). Im Allgemeinen bleibt das Verteilungsmuster der Mächtigkeiten und die Fließrichtung des Grundwassers im Vergleich zu den Verhältnissen bei mittlerer Grundwasserspiegellage (siehe Abbildung 30) erhalten. Die absoluten Werte verringern sich, so dass am Ostrand des Östlichen Leibnitzer Feldes Bereiche mit Grundwassermächtigkeiten kleiner als 1 m entstehen. In den Zentralbereichen der Modellgebiete verringern sich die Regionen mit gesättigten Mächtigkeiten größer als 5 m.

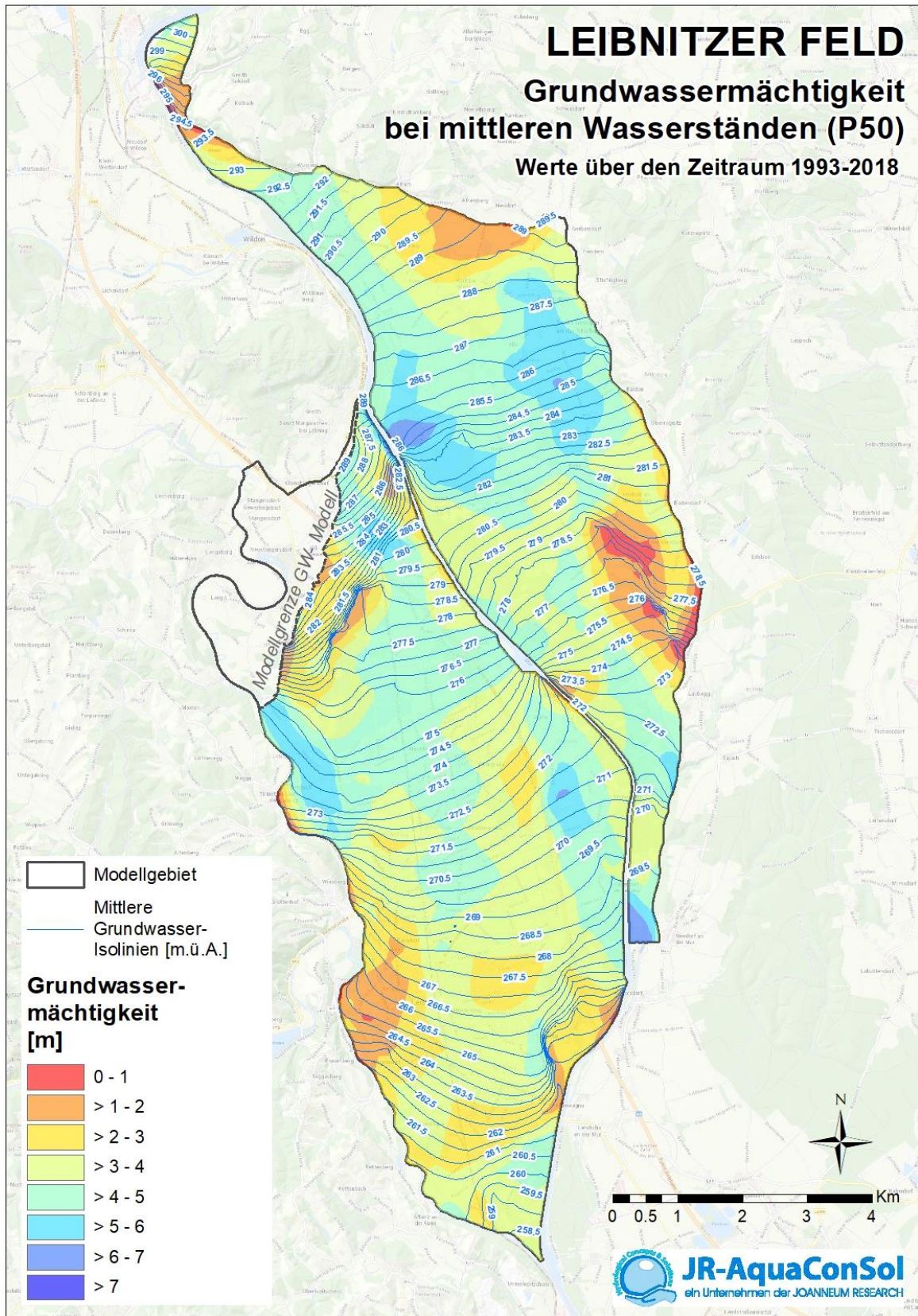


Abbildung 30: Grundwasserspiegellagen bei mittlerem Grundwasserstand und resultierende Grundwassermächtigkeit im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

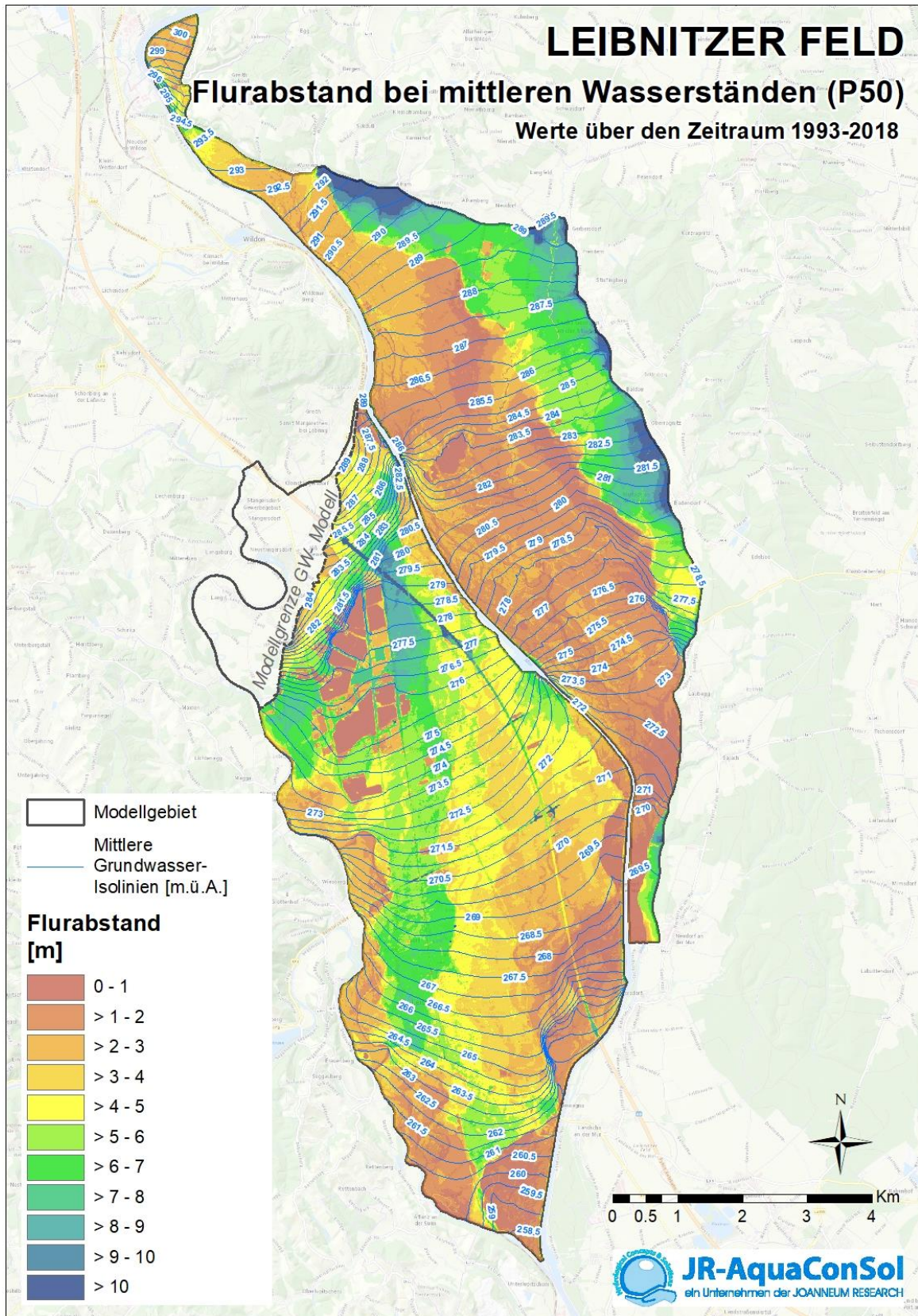


Abbildung 31: Grundwasserspiegellagen bei mittlerem Grundwasserstand und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

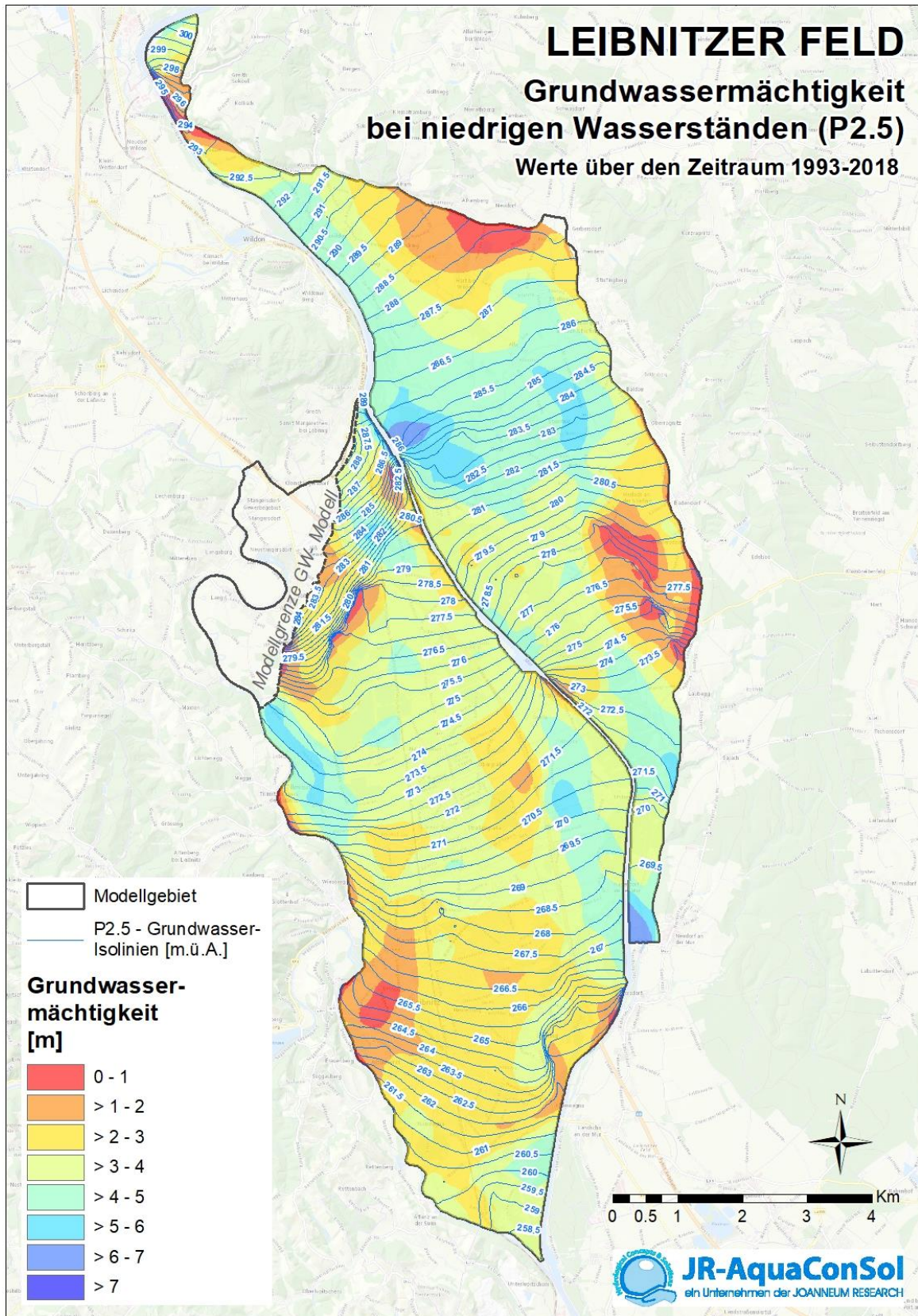


Abbildung 32: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 2,5% Perzentil und resultierende gesättigte Mächtigkeit im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

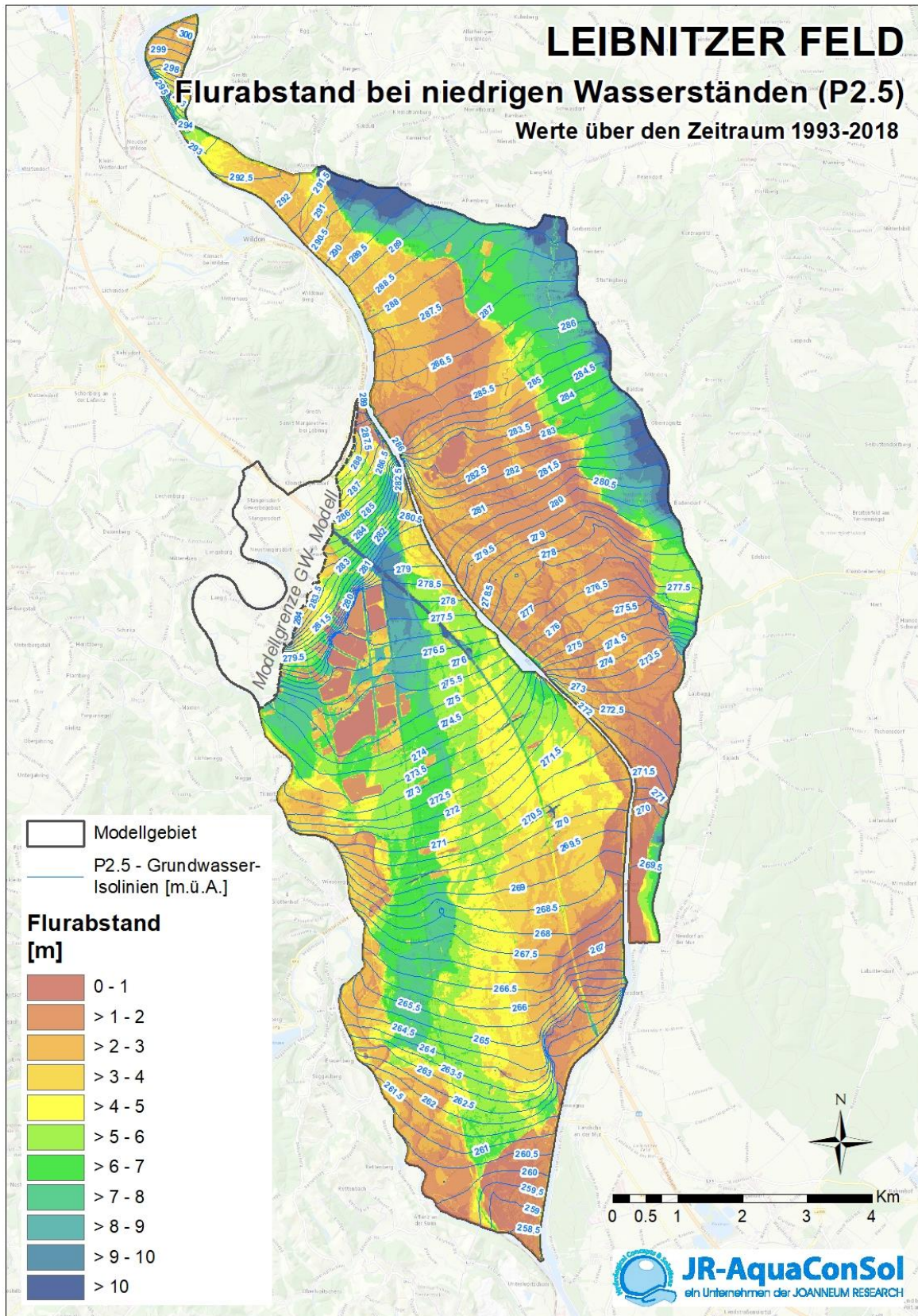


Abbildung 33: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 2,5% Perzentil und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

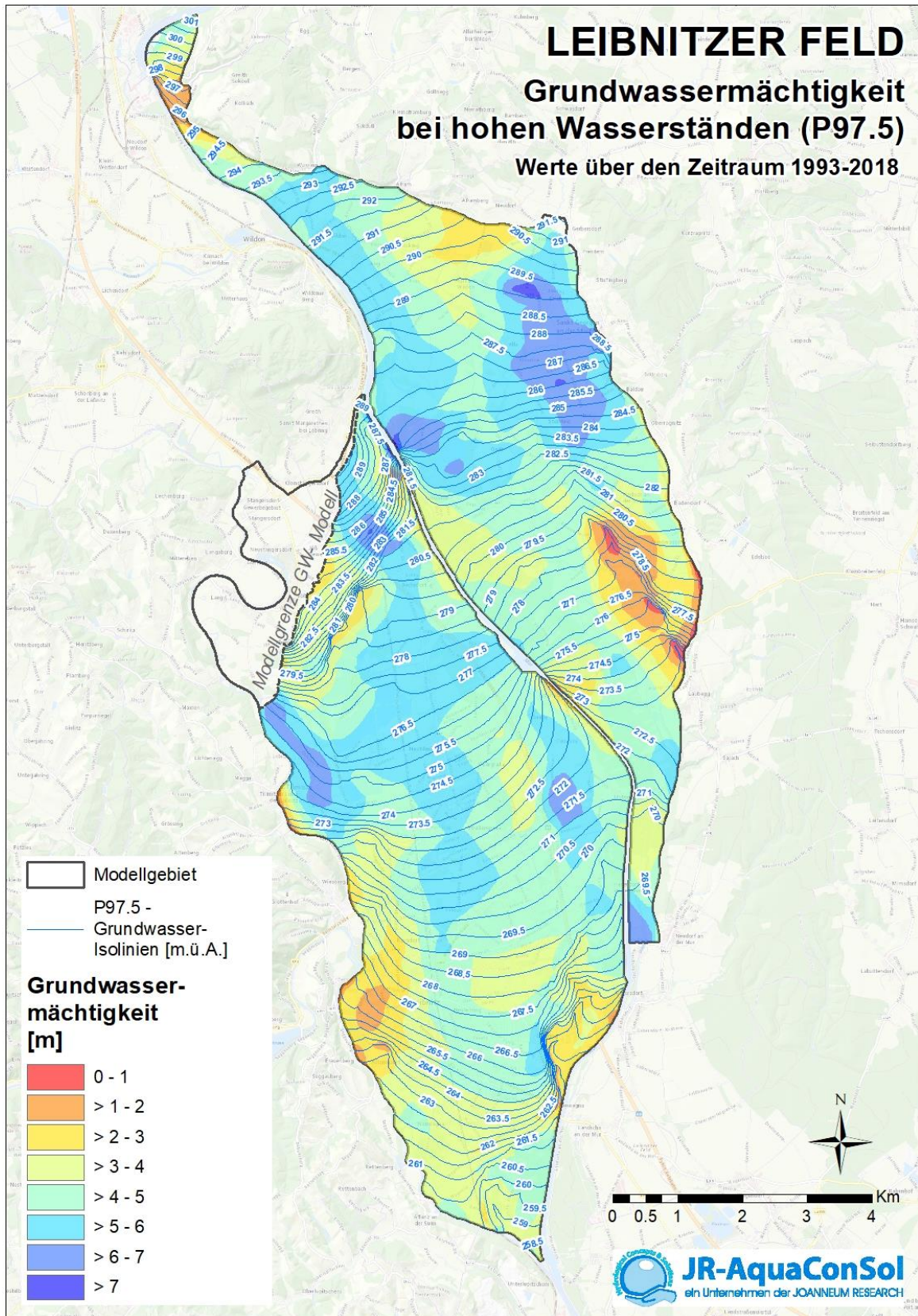


Abbildung 34: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 97,5% Perzentil und resultierende gesättigte Mächtigkeit im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

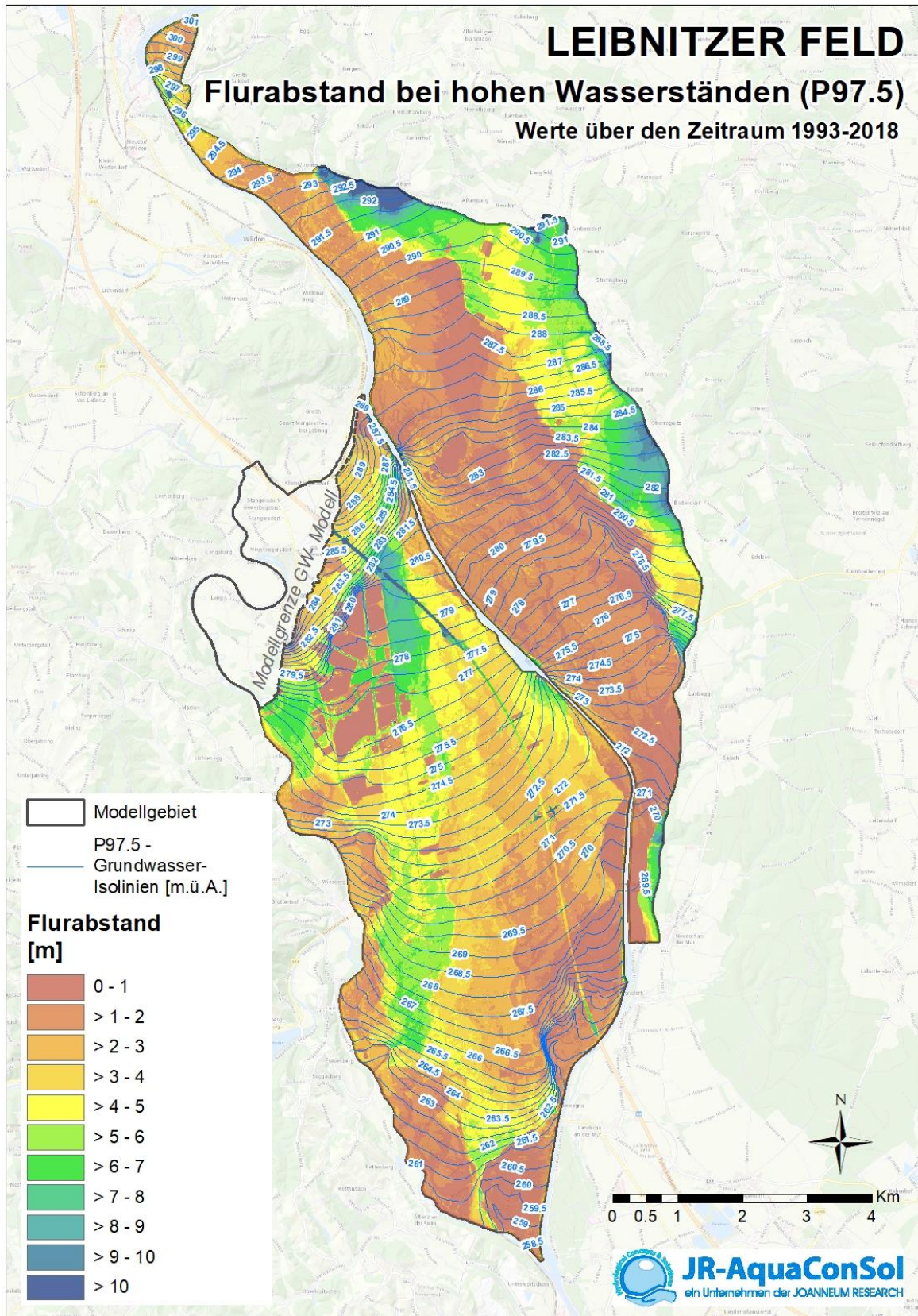


Abbildung 35: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 97,5% Perzentil und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

In Abbildung 33 ist die Verteilung des Flurabstandes und die Isolinien des Grundwasserspiegels für das 2,5% Perzentil des Grundwasserspiegels im Leibnitzer Feld dargestellt. Wie auch bei der Verteilung der gesättigten Mächtigkeiten bleibt das Verteilungsmuster des Flurabstandes im Vergleich zur mittleren Lage des Grundwasserspiegels (siehe Abbildung 31) grundsätzlich erhalten, wobei die Änderungen durch die tiefe Grundwasserlage nur gering ausfallen.

Abbildung 34 zeigt die gesättigten Grundwassermächtigkeiten und die Isolinien des Grundwasserspiegels im Leibnitzer Feld, die dem 97,5% Perzentil entspricht (hohe Grundwasserspiegellage). Bereiche mit gesättigten Mächtigkeiten kleiner 2 m treten nur mehr vereinzelt auf, wohingegen Mächtigkeiten von 5 m und mehr verbreitet in den Zentralbereichen der Modellregionen auftreten.

In Abbildung 35 ist die Verteilung des Flurabstandes und die Isolinien des Grundwasserspiegels für das 97,5% Perzentil des Grundwasserspiegels im Leibnitzer Feld dargestellt. Erwartungsgemäß nehmen die Flurabstände bei hohem Grundwasserspiegel ab. In weiten Teilen des Östlichen Leibnitzer Feldes und in den Bereichen südlich von Gabersdorf entlang der Mur und entlang der Sulm im Westlichen Leibnitzer Feld beträgt dieser jetzt auch aufgrund der Morphologie der Geländeoberfläche nur mehr ca. 1 m. Lediglich am östlichen Modellrand des Östlichen Leibnitzer Feldes und stromab der Tillmitscher Nassbaggerungen liegt der Grundwasserspiegel 5 m oder mehr unter Gelände.

Die Grundwasserströmungsverhältnisse zeigen im Unteren Murtal generell ein murparalleles Abströmung des Grundwassers, das durch die Oberflächengewässer (Seen, Flüsse) im Detail beeinflusst wird. Die Mur agiert in weiten Teilen des unteren Murtals als Vorflut für das Grundwasser.

Aus Abbildung 36 geht hervor, dass die Mächtigkeit des Grundwasserleiters bei mittleren Grundwasserspiegellagen zwischen 0 m und ca. 10 m schwankt. Die Bereiche mit geringen Grundwassermächtigkeiten (< 2 m) befinden sich entlang der Mur, auf der Helfbrunner Terrasse und am nordöstlichen Modellrand. Bereiche mit großen Grundwassermächtigkeiten (> 7 m) sind entlang des nördlichen Randes im Zentralbereich des Unteren Murtals sowie am östlichen Modellrand zu finden.

Dieses grundsätzliche Verteilungsmuster der gesättigten Mächtigkeit lässt sich ebenso sowohl bei niedrigen Grundwasserständen (dargestellt durch das 2,5% Perzentil; d.h. 97,5% aller Grundwasserspiegel sind höher) als auch bei hohen Grundwasserständen (dargestellt durch das 97,5% Perzentil; d.h. nur 2,5% aller Grundwasserspiegel sind höher) beobachten. Bei niedrigen Grundwasserständen (siehe Abbildung 39) sind besonders die niedrigen Grundwassermächtigkeiten auf der Helfbrunner Terrasse zu erwähnen, wohingegen sich bei hohen Grundwasserspiegellagen (siehe Abbildung 41) die Bereiche mit großen Grundwassermächtigkeiten im Zentralraum des Unteren Murtals deutlich ausdehnen.

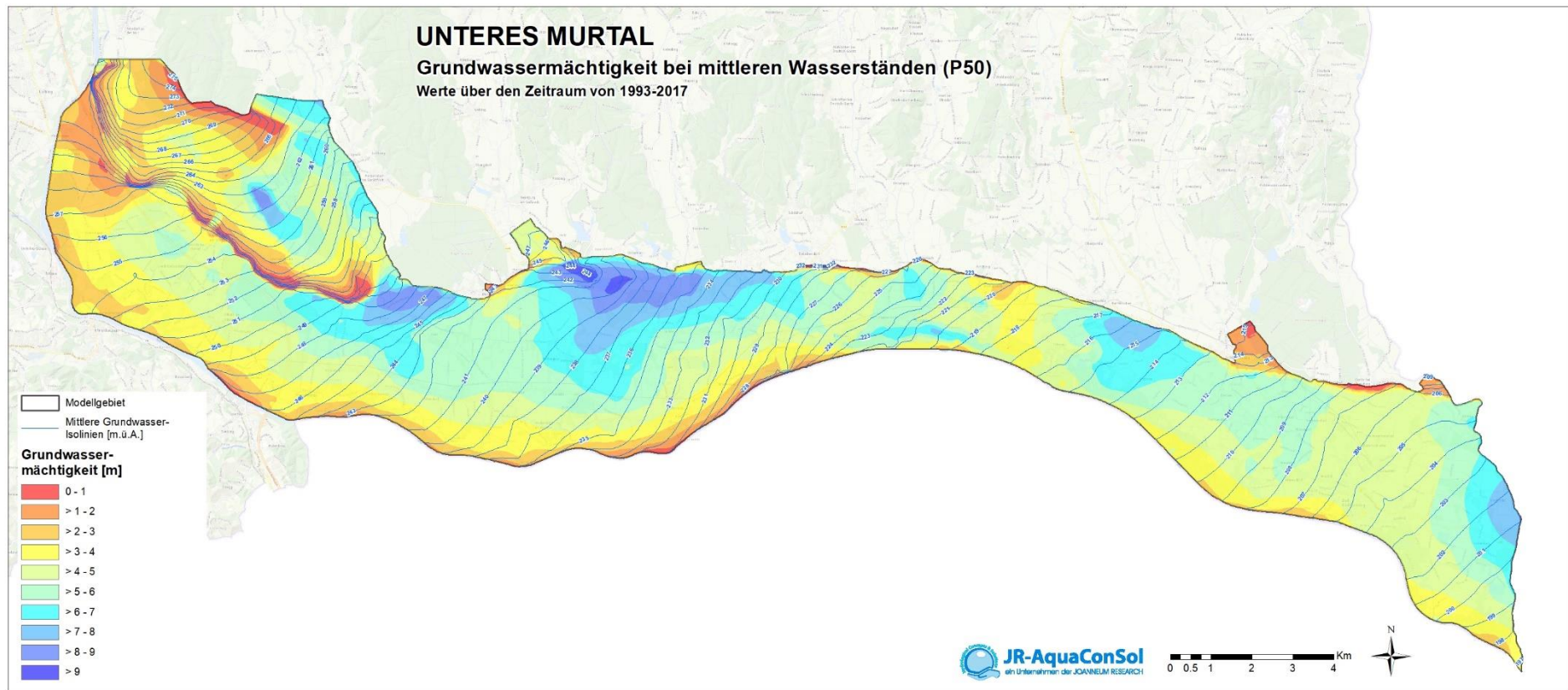


Abbildung 36: Grundwasserspiegellagen bei mittlerem Grundwasserstand und resultierender Grundwassermächtigkeit im Grundwasserkörper Untereres Murtal

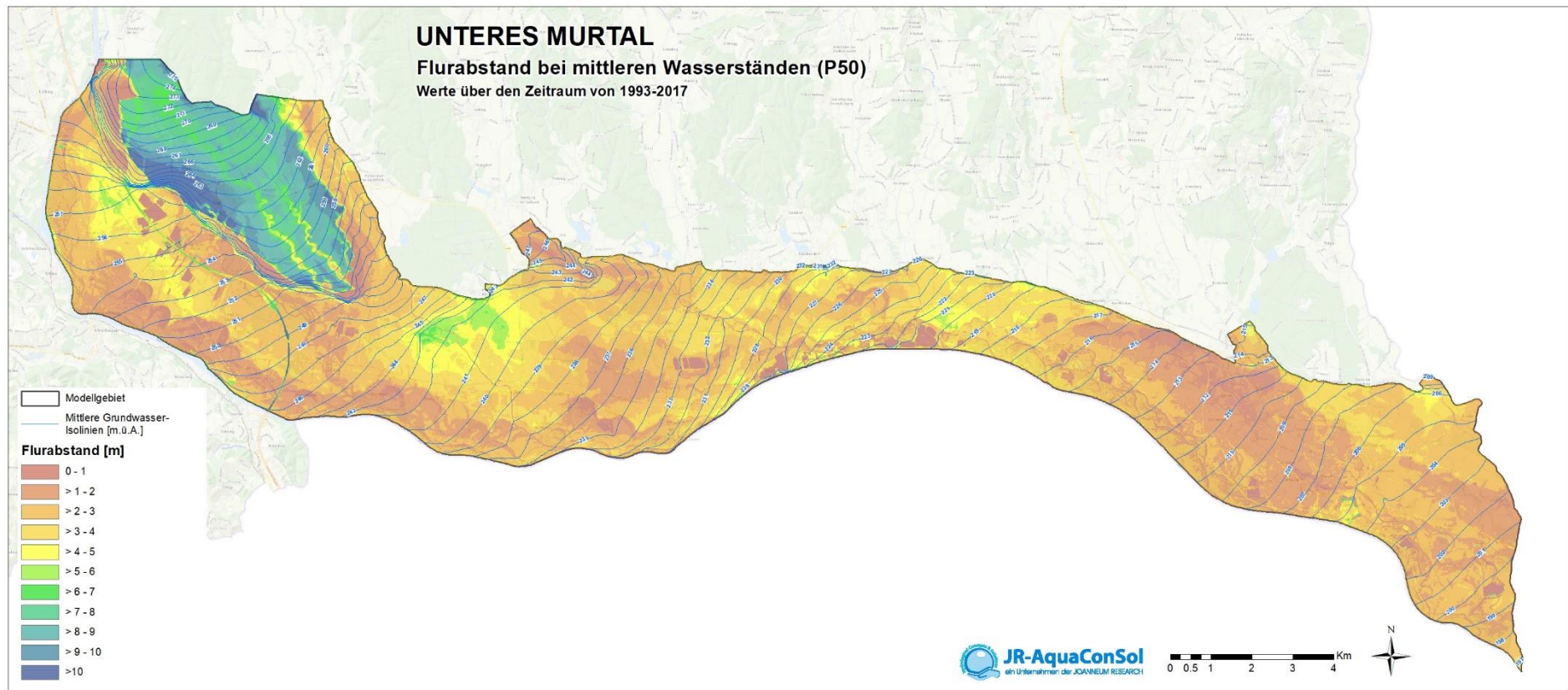


Abbildung 37: Grundwasserspiegellagen bei mittlerem Grundwasserstand und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Untereres Murtal

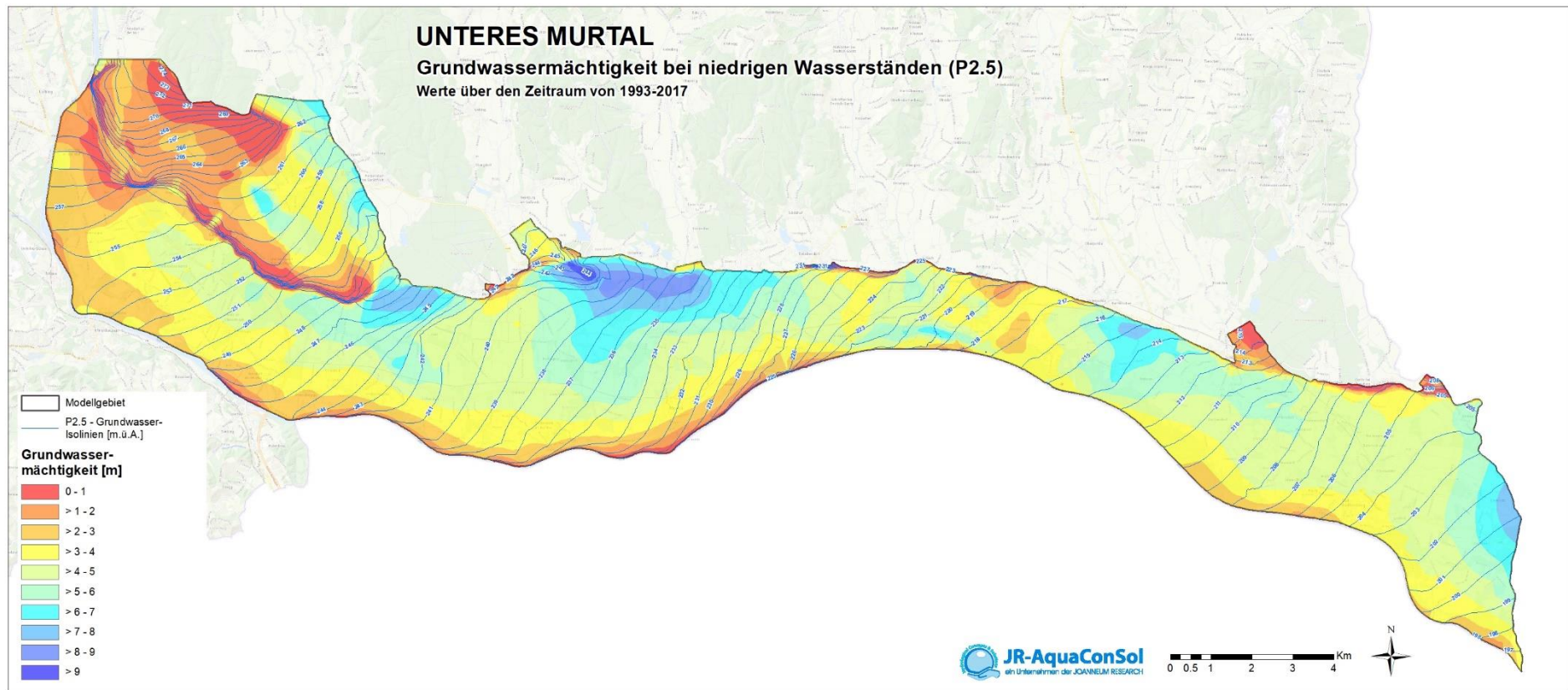


Abbildung 38: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 2,5% Perzentil und resultierende gesättigte Mächtigkeit im Grundwasserkörper Untereres Murtal

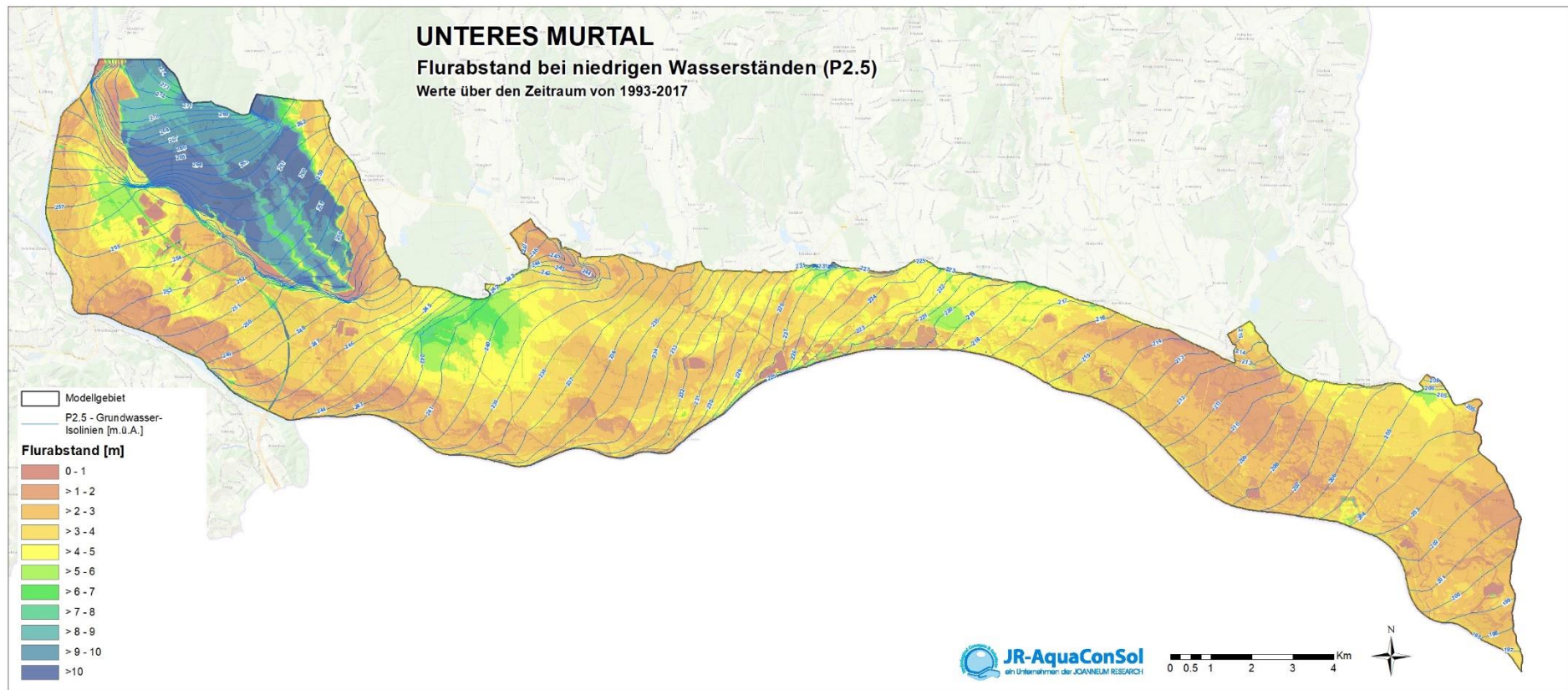


Abbildung 39: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 2,5% Perzentil und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Unterer Murtal

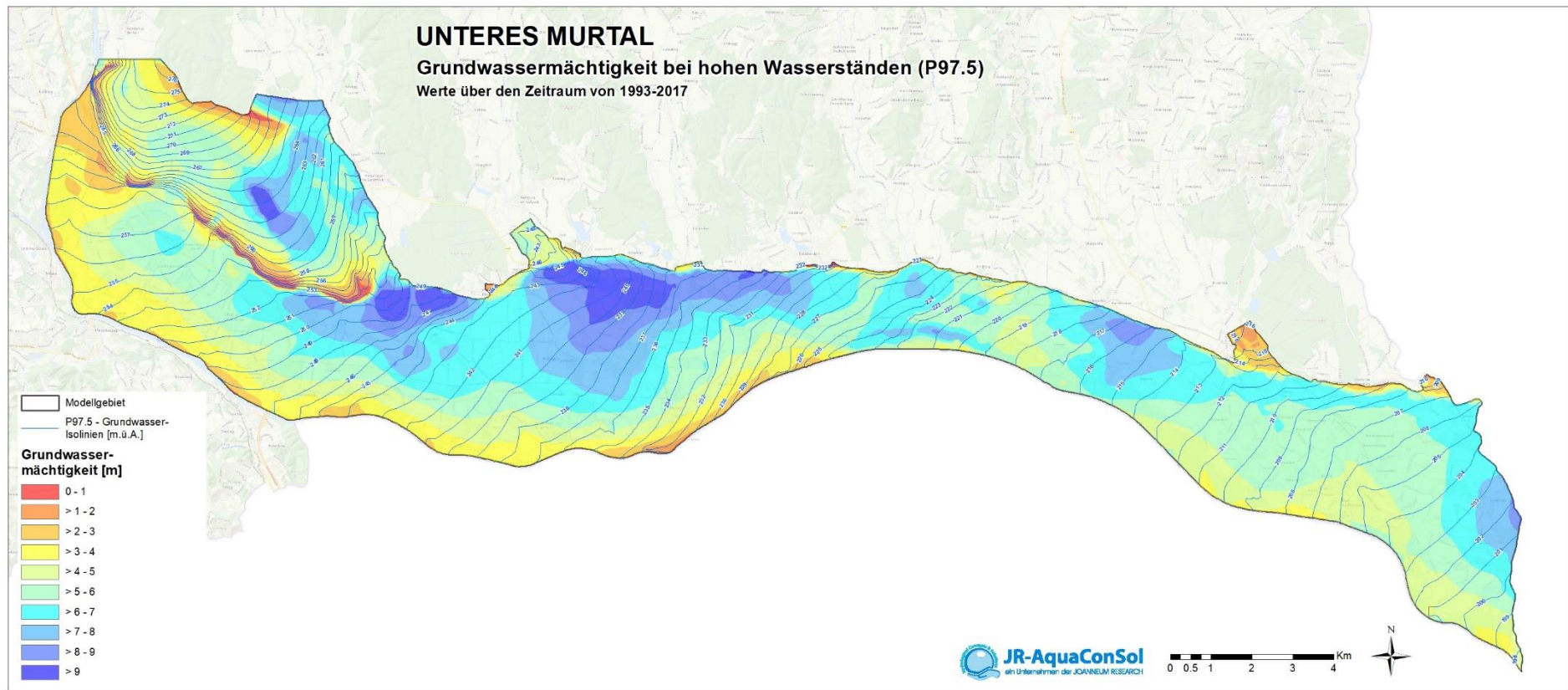


Abbildung 40: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 97,5% Perzentil und resultierende gesättigte Mächtigkeit im Grundwasserkörper Untereres Murtal

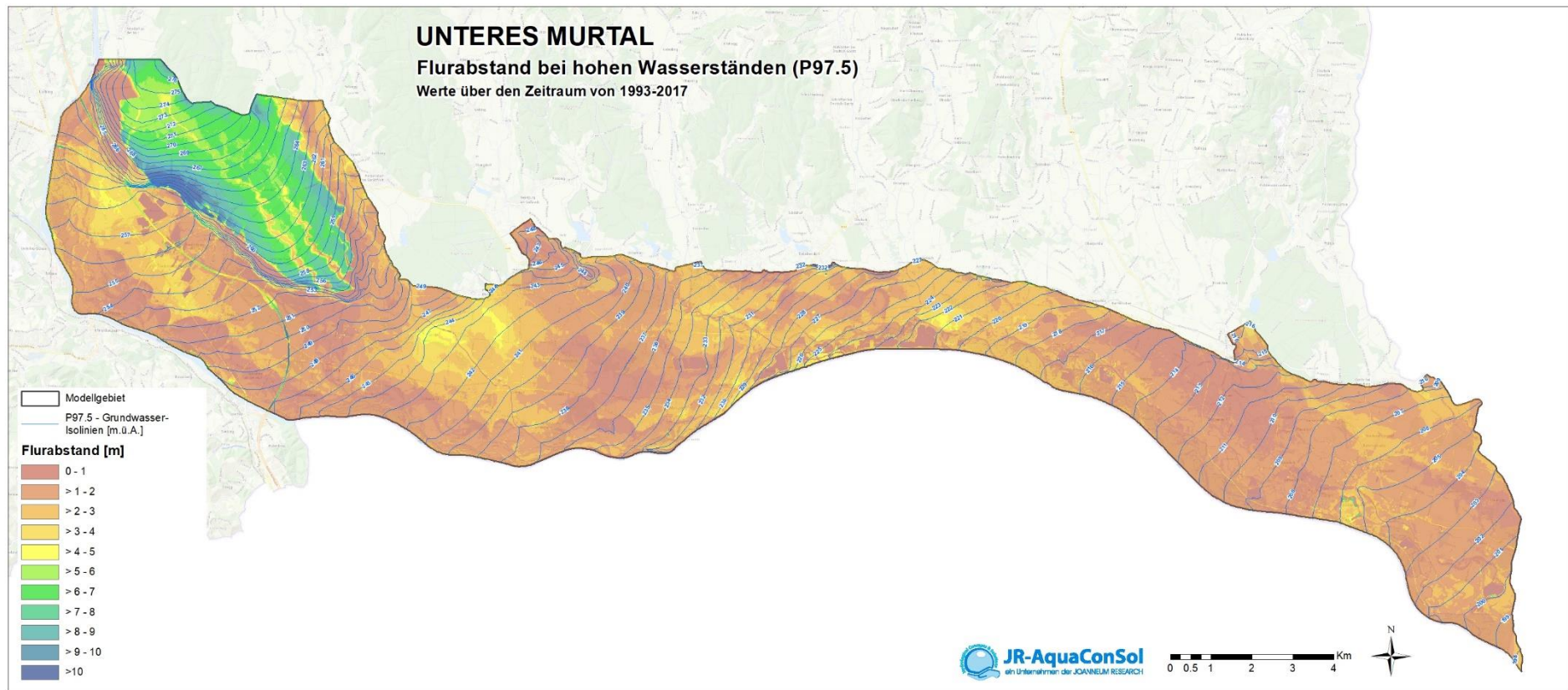


Abbildung 41: Grundwasserspiegellagen bei Grundwasserstand für das 97,5% Perzentil und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Untereres Murtal

Aus der Verteilung des Grundwasserflurabstandes bei mittlerem Grundwasserspiegel (siehe Abbildung 37) lässt sich erkennen, dass in weiten Teilen des Unteren Murtals der Grundwasserspiegel seicht liegt (< 2 m), wobei diese Eigenschaft verstärkt in der östlichen Hälfte des Modellgebiets sowie entlang der Mur auftritt. Lediglich im Bereich der Helfbrunner Terrasse übersteigt der Flurabstand Werte von 7 m.

Im Allgemeinen kann man dieses Verteilungsmuster des Flurabstandes auch bei niedrigen Grundwasserspiegeln (siehe Abbildung 38) beobachten, wobei sich die Werte unwesentlich von denen für einen mittleren Grundwasserspiegel unterscheiden. Bei hohen Grundwasserspiegellagen nimmt der Flurabstand großflächig Werte kleiner als 2 m an (siehe Abbildung 40), wobei entlang der Mur, im Zentralbereich und im östlichen Teil des Unteren Murtals auch häufig Flurabstände unter 1 m auftreten.

7.2 Grundwasserströmungsrichtung bei mittlerer Grundwasserspiegellage

Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen die Grundwasserströmungsrichtungen dargestellt in Form von Bahnlinien bei mittleren Grundwasserspiegellagen in den beiden Grundwasserkörpern.

Im Östlichen Leibnitzer Feld ist die Grundwasserströmungsrichtung grundsätzlich murparallel ausgerichtet, was nicht zuletzt auf die Wirkung des Weissenegger Mühlganges zurückzuführen ist. Bei ihrem Eintritt in das Leibnitzer Feld reichert die Mur das Grundwasser an. Einen wesentlichen Einfluss auf die Grundwasserströmung hat das Kraftwerk Lebring, wo es im Bereich der Haslacher Au zu einer Umströmung des Kraftwerkstandortes kommt. Unterstrom des Kraftwerkes führt die Unterwassereintiefung zu einem Übertritt des Grundwassers in die Mur. Für die Grundwasserströmungsrichtung von Bedeutung ist auch noch die Nassbaggerung im Bereich des Golfplatzes, der sich in erster Linie lokal auf die Grundwasserverhältnisse auswirkt.

Auch für das westliche Leibnitzer Feld ist das Kraftwerk Lebring ein bedeutender Faktor für die Grundwasserströmungsverhältnisse. Auch hier ist die Umströmung des Kraftwerksstandortes und die drainagierende Wirkung der Unterwassereintiefung deutlich erkennbar. Im NW stellen die großflächig wirkenden Tillmitscher Teiche einen erheblichen Faktor für die Grundwasserströmung dar: oberstrom kommt es zu einer deutlich erkennbaren Verteilung des Grundwassers, im Bereich der Teiche kommt es zu lokalen, aber durchaus regional wirkenden Veränderung der Strömungsrichtung. Grundsätzlich ist das westliche Leibnitzer Feld zweigeteilt: im Ostteil strömt das Grundwasser in die Mur, im Westteil in die Sulm ab, sodass sich im zentralen Bereich eine Grundwasserhochlage darstellt, die auch von Wasserversorgungsbrunnen für die Trinkwassergewinnung genutzt wird.

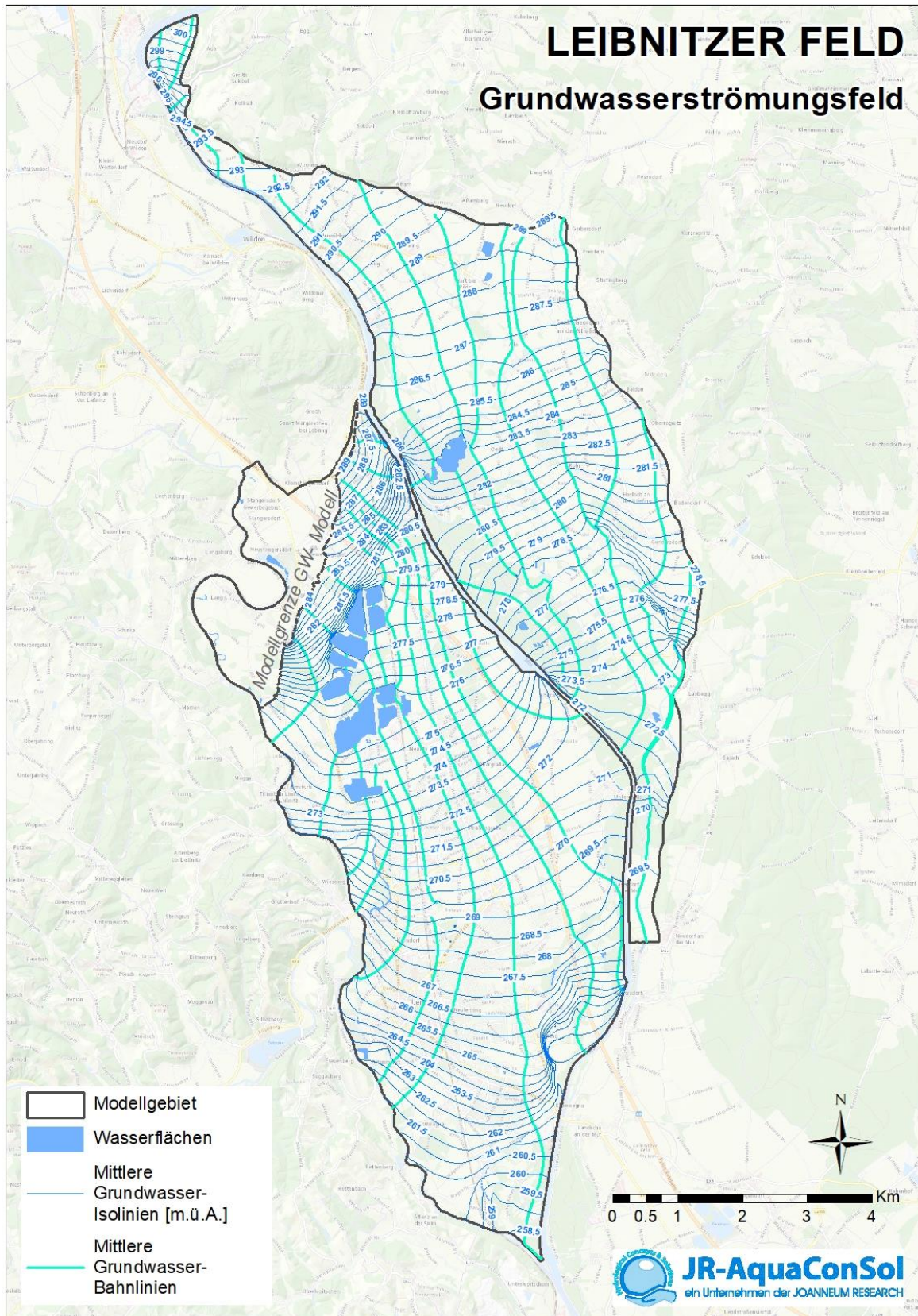


Abbildung 42: Grundwasserströmungsrichtung bei mittlerer Grundwasserspiegellage im Leibnitzer Feld

Im Unteren Murtal ist die Grundwasserströmungsrichtung insgesamt gesehen in einem spitzen Winkel auf die Mur in ausgerichtet. Wesentliche Einflussfaktoren stellen einerseits die Terrassenkante der Wagendorfer Terrasse – mit der relativ plötzlichen Änderung des Grundwassergefälles und die Nassbaggerungen im Unteren Murtal dar. Nicht unbedeutend für die Ausprägung der Grundwassertrömungsrichtung ist auch der Grundwasserzustrom aus dem Saßbachtal und die in diesem Bereich verstärkend wirkende Teichlandschaft.

Weder im Leibnitzer Feld noch im Unteren Murtal ist hinsichtlich der Grundwasserströmung eine signifikante Auswirkung der Grundwasserentnahmen für die Trinkwassergewinnung (für Mittelwasserverhältnisse bei Realentnahme) zu erkennen. Die Wirkung der Brunnen als Senke und die dadurch hervorgerufene Absenkung des Grundwasserspiegels ist nur lokal wirksam und in einer Überblicksdarstellung für die gesamten Grundwasserkörper in den Grundwasserisohypsen kaum erkennbar.

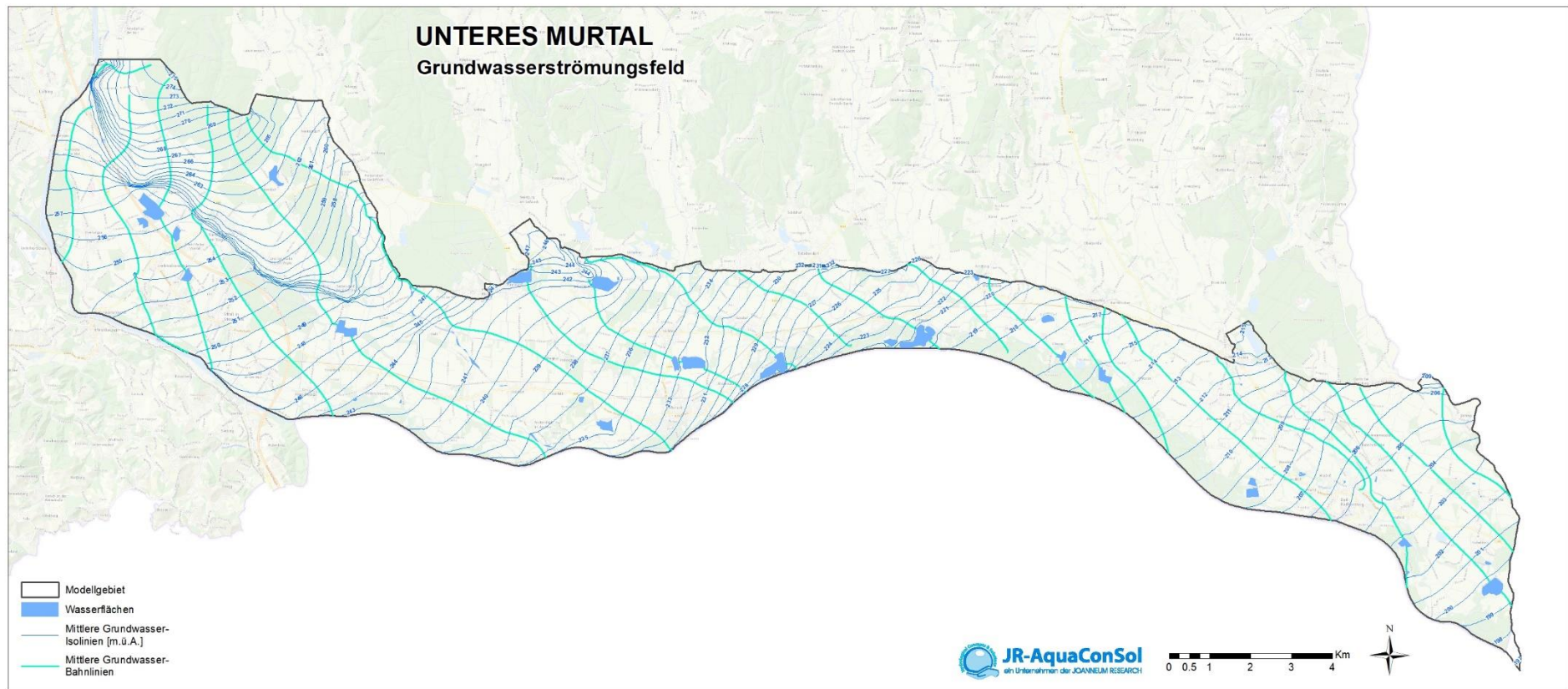


Abbildung 43: Grundwasserströmungsrichtung bei mittlerer Grundwasserspiegellage im Unteren Murtal

7.3 Verteilung der minimalen, und maximalen Nitratkonzentration im Grundwasser im Modellzeitraum

Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen die Verteilung der minimalen und maximalen Nitratkonzentrationen im Grundwasser des Leibnitzer Feldes. Die Verteilung der mittleren (Median) Nitratkonzentration ist in Abbildung 25 enthalten. Wie schon in Kapitel 6.3.2 erläutert, umfasst der Auswertzeitraum die Jahre 1995 bis 2018.

Bei allen drei Abbildungen ist zu erkennen, dass die Nitratkonzentration im Grundwasser im Östlichen Leibnitzer Feld höher ist als im Westlichen Leibnitzer Feld. Im Westlichen Leibnitzer Feld ist deutlich der reduzierende Einfluss der Nassbaggerungen auf die Nitratkonzentration zu identifizieren. Die höchsten Konzentrationen treten im südöstlichen Bereich des Westlichen Leibnitzer Feld auf. Eine bedeutende Rolle für die Nitratverteilung spielen auch die unterschiedlichen Landnutzungen in den beiden Teilgebieten.

Im Östlichen Leibnitzer Feld weisen die Bereiche entlang der Mur aufgrund von Verdünnungseffekten und der Bereich abstrom der Nassbaggerung im Golfplatz die geringsten Nitratkonzentrationen auf. Im Osten des Untersuchungsgebiets, wo diese Effekte nicht auftreten, sind jeweils die höchsten Nitratkonzentrationen im Grundwasser mit Maximalwerten größer als 100 mg/l zu beobachten.

Im Westlichen Leibnitzer Feld führt auch der langjährig wirkende Einfluss der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungseinschränkungen im Schongebiet neben der nitratreduzierenden Wirkung der Tillmitscher Teiche v.a. im Westteil zu erkennbar niedrigeren Nitratkonzentrationen.

Die Verteilung der minimalen Nitratkonzentrationen im Grundwasser des Unteren Murtals (siehe Abbildung 46) zeigt einen mehrmaligen Wechsel zwischen Bereichen mit Konzentrationen unter 25 mg/l und Konzentrationen zwischen 25 mg/l und 50 mg/l. Erstere werden häufig durch das Vorhandensein von Nassbaggerungen und deren Reduktion der Nitratkonzentration im Abstrombereich bestimmt. Im Osten des Unteren Murtals (Bereich Hummersdorf, Goritz bei Radkersburg) gibt es lokale Regionen mit Nitratkonzentrationen im Grundwasser zwischen 50 mg/l und 75 mg/l.

Dieses Muster setzt sich grundsätzlich auf höherem Niveau bei der Verteilung der mittleren (siehe Abbildung 26) und maximalen Nitratkonzentrationen (siehe Abbildung 47) im Grundwasser des Unteren Murtals fort. Bei der Verteilung der mittleren Nitratkonzentration weisen auch schon im Westen des Unteren Murtals erste Bereiche Konzentration zwischen 50 mg/l und 75 mg/l auf, wohingegen im Osten des Unteren Murtals Teilregionen mittlere Nitratkonzentrationen von über 100 mg/l zeigen. Diese Flächen sowie diejenigen mit Nitratkonzentrationen zwischen 75 mg/l und 100 mg/l nehmen bei der Verteilung der maximalen Nitratkonzentration im Grundwasser deutlich zu. Im zentralen und westlichen Teil des Unteren Murtals kommen auch die Bereiche entlang von Nebengewässern zum Vorschein, die aufgrund der numerischen Beeinflussung bei den Nitratkonzentrationen maximale Werte von größer als 100 mg/l ergeben.

Die Karten der minimalen, mittleren und maximalen Nitratkonzentration für die Einzeljahre 1993 bis 2018 in den beiden Grundwasserkörpern sind in Anhang 11.4 enthalten.

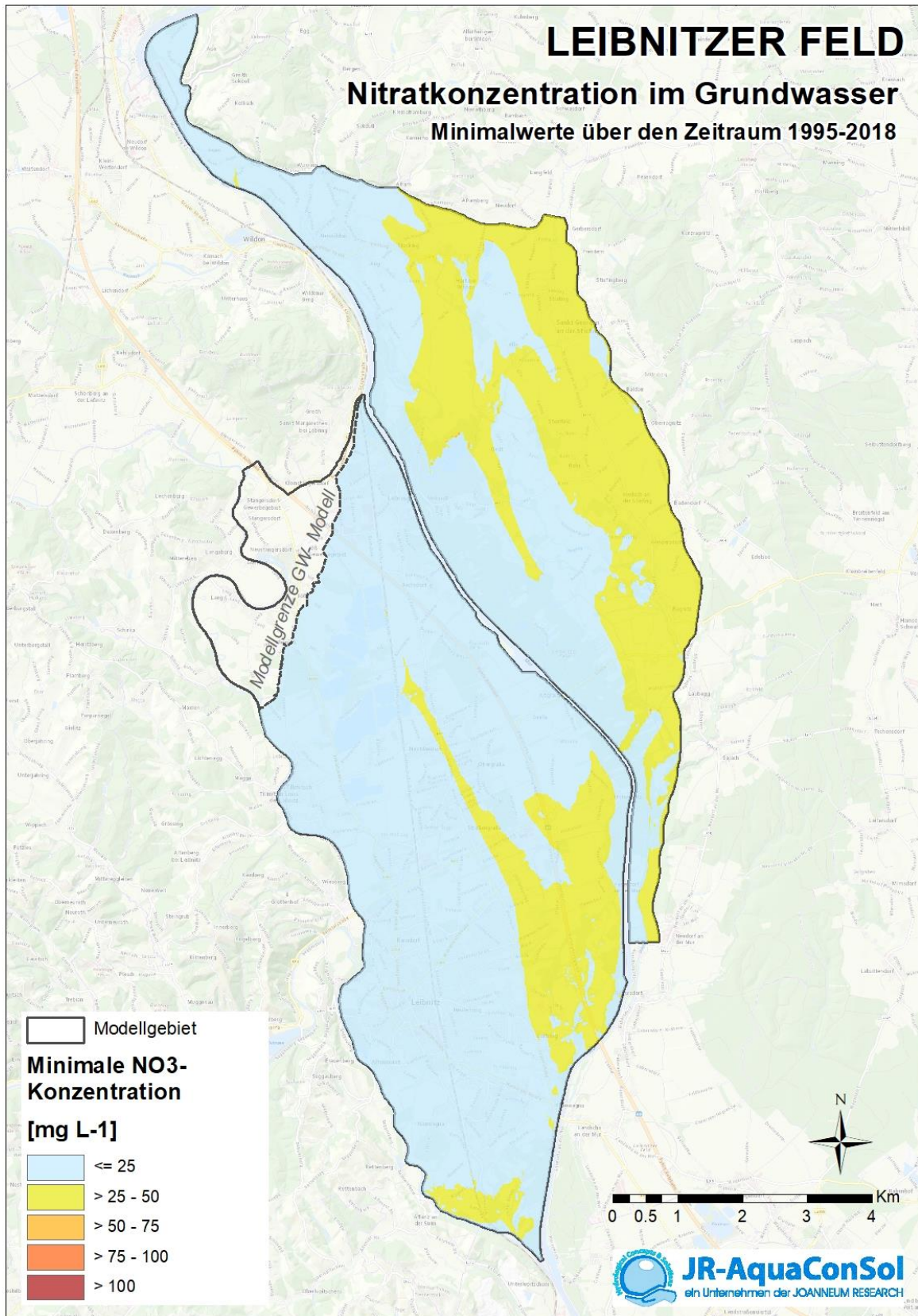


Abbildung 44: Verteilung der minimalen Nitratkonzentration im Grundwasser in der Periode zwischen 1995 und 2018 im Leibnitzer Feld

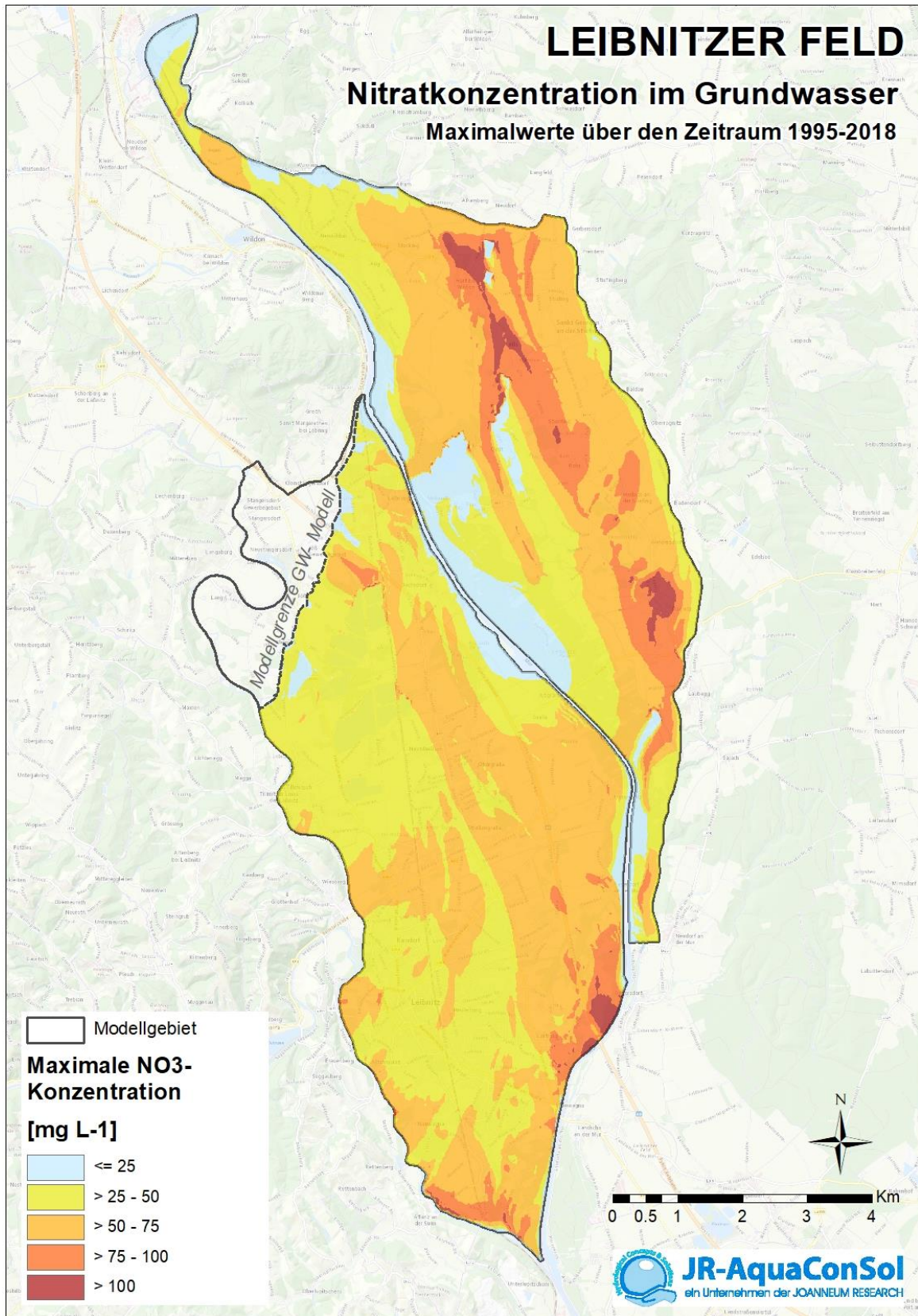


Abbildung 45: Verteilung der maximalen Nitratkonzentration im Grundwasser in der Periode zwischen 1995 und 2018 im Leibnitzer Feld

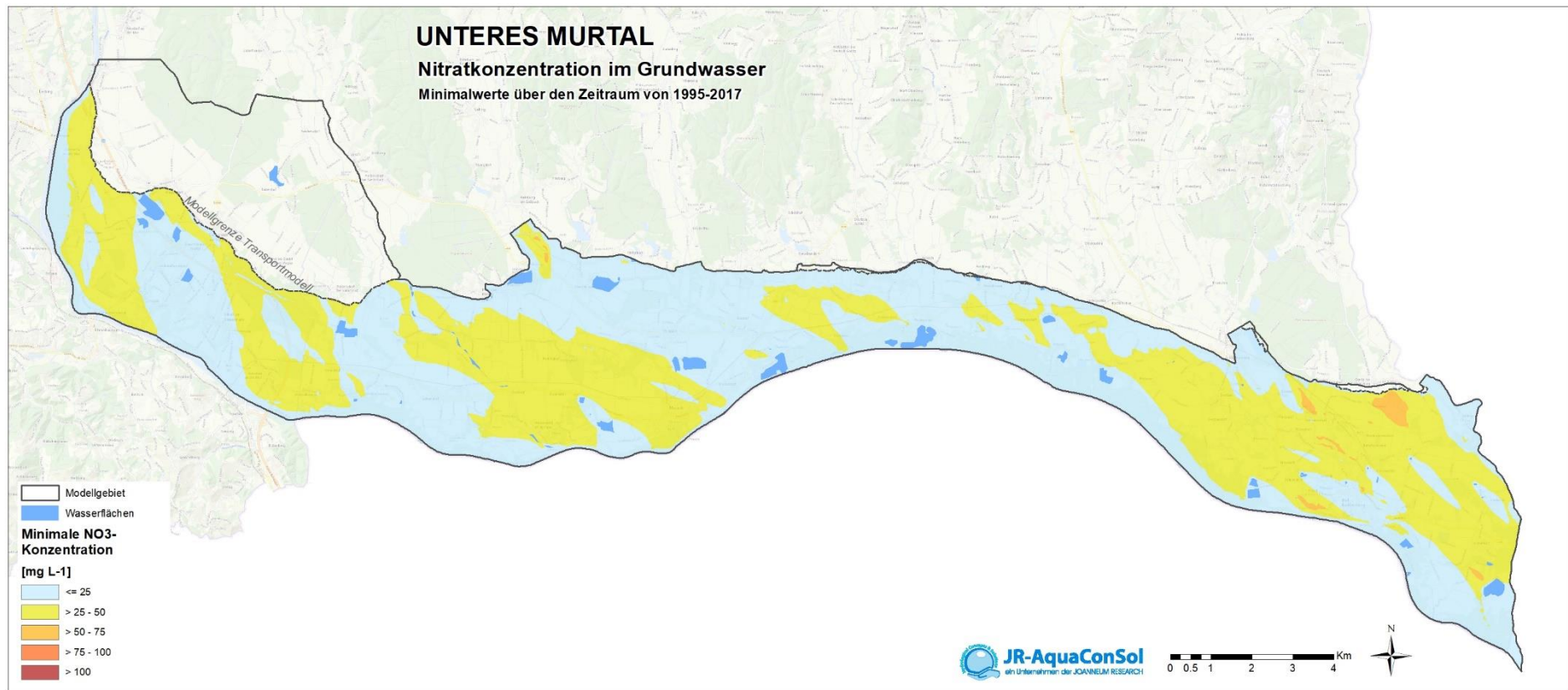


Abbildung 46: Verteilung der minimalen Nitratkonzentration im Grundwasser in der Periode zwischen 1995 und 2017 im Unteren Murtal

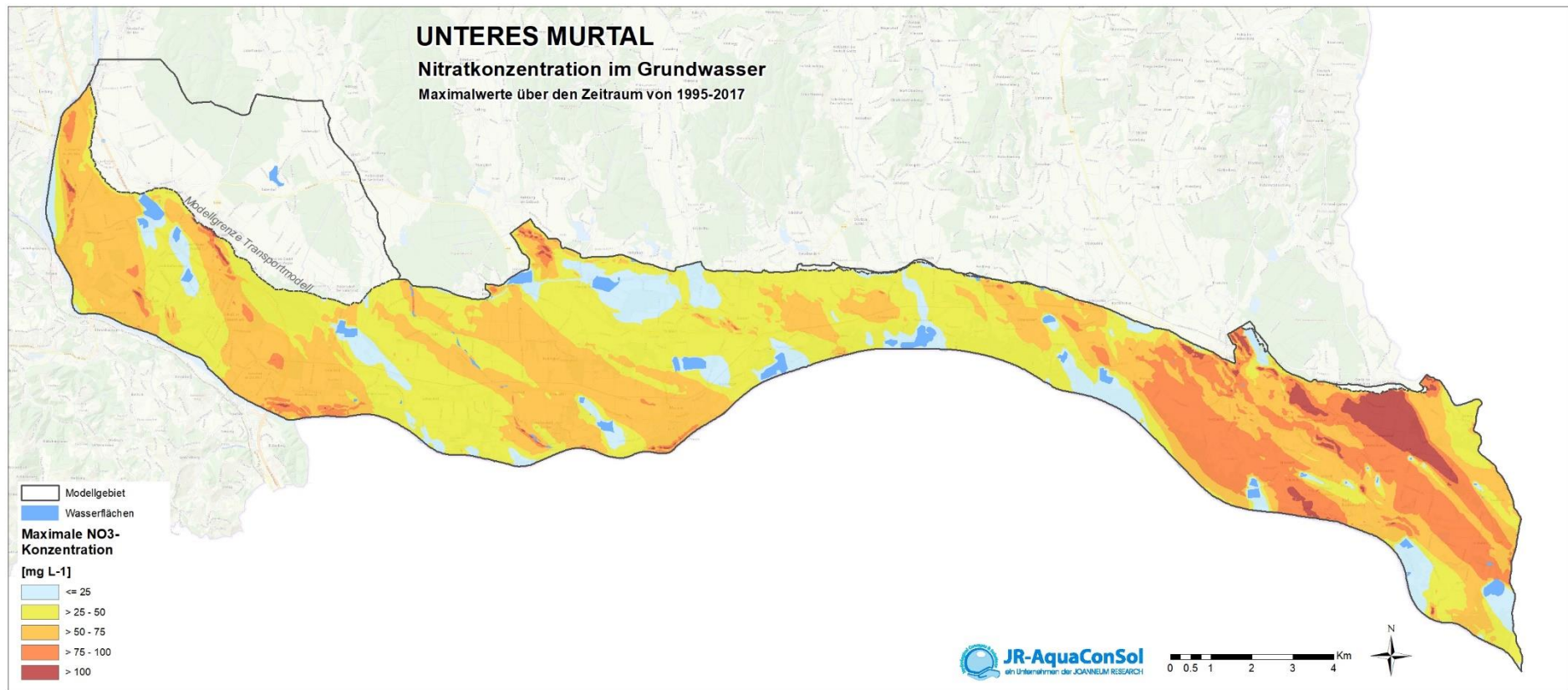


Abbildung 47: Verteilung der maximalen Nitratkonzentration im Grundwasser in der Periode zwischen 1995 und 2017 im Untereren Murtal

8 Vergleich zwischen Istzustand und der bewilligten Konsensentnahme

In Abbildung 48 und Abbildung 49 sind die Differenzen zwischen den mittleren Grundwasserspiegellagen bei Real- und bei Konsensentnahme im Leibnitzer Feld und im Unteren Murtal dargestellt. Differenzen kleiner als 10 cm bleiben dabei aus Gründen einer besseren Übersichtlichkeit unberücksichtigt. Es lässt sich dabei für das Östliche Leibnitzer Feld und das Untere Murtal erkennen, dass die zusätzlichen Absenkungen des Grundwasserspiegels durch die Konsensentnahme im Wesentlichen lokal auf den Bereich der Brunnenstandorte beschränkt bleiben. Bei einem oder mehreren benachbarten Brunnenstandorten bildet der Bereich mit Absenkungen zwischen 10 und 25 cm in der Regel eine zusammenhängende Fläche aus.

Im Westlichen Leibnitzer Feld ist die Differenz der Realentnahmen zu den Konsensentnahmen größer als in den übrigen Brunnenstandorten. Aus diesem Grund bildet sich in diesem Teilgebiet eine größere Differenz der Grundwasserspiegellagen aus, die im Bereich der Brunnenstandorte Werte > 0.75 m erreicht, aber im gesamten westlichen Leibnitzer Feld Werte zwischen 0.1 und 0.5 m erreicht.

Abbildung 50 und Abbildung 51 zeigen die Verteilung der Differenzen zwischen den mittleren Nitratkonzentrationen im Grundwasser bei Real- und bei Konsensentnahme im Leibnitzer Feld und im Unteren Murtal. Es ist ersichtlich, dass Erhöhungen der Nitratkonzentrationen durch die verminderte Aquifermächtigkeit mehrheitlich nur im unmittelbaren Nahbereich der Brunnenstandorte auftreten. Bei den ausgewiesenen Nitratkonzentrationen ist zu beachten, dass diese im Nahbereich von Oberflächengewässern aufgrund des verstärkten Zustroms aus diesen bei erhöhter Absenkung zu geringeren Werten führt. Generell zeigen sich, wie im Westlichen Leibnitzer Feld erkennbar, die größten Abweichungen dort, wo die Differenz zwischen Real- und Konsensentnahme am größten ist. Dadurch entstehen Änderungen in den Zustrombereichen zu den Brunnen, woraus die Einbeziehung von Bereichen entweder höher oder niedrigerer Nitratbelastung des Grundwassers verstärkt wird.

Ein typisches Beispiel dazu ist auch der Bereich der künstlichen Grundwasseranreicherung Fluttendorf/Donnersdorf im Unteren Murtal, wo bei Ausnützung der Konsensmenge in den Entnahmebereichen höhere Nitratkonzentrationen berechnet werden – diese Berechnungsergebnisse sind allerdings in der Natur nicht nachvollziehbar, da in diesem Bereich reaktive sauerstoffzehrende und damit nitratreduzierende Effekte vorliegen, die in dem derzeit vorliegenden Modellansatz nicht berücksichtigt werden können. Im Bereich der Versickerung des Anreicherungswassers zeigt sich allerdings klar, dass eine Ausschöpfung der Konsensmenge eine deutliche Verbesserung der Nitratverdünnung, sowohl im Kernbereich als auch in einem deutlich vergrößerten Gebiet bewirken würde.

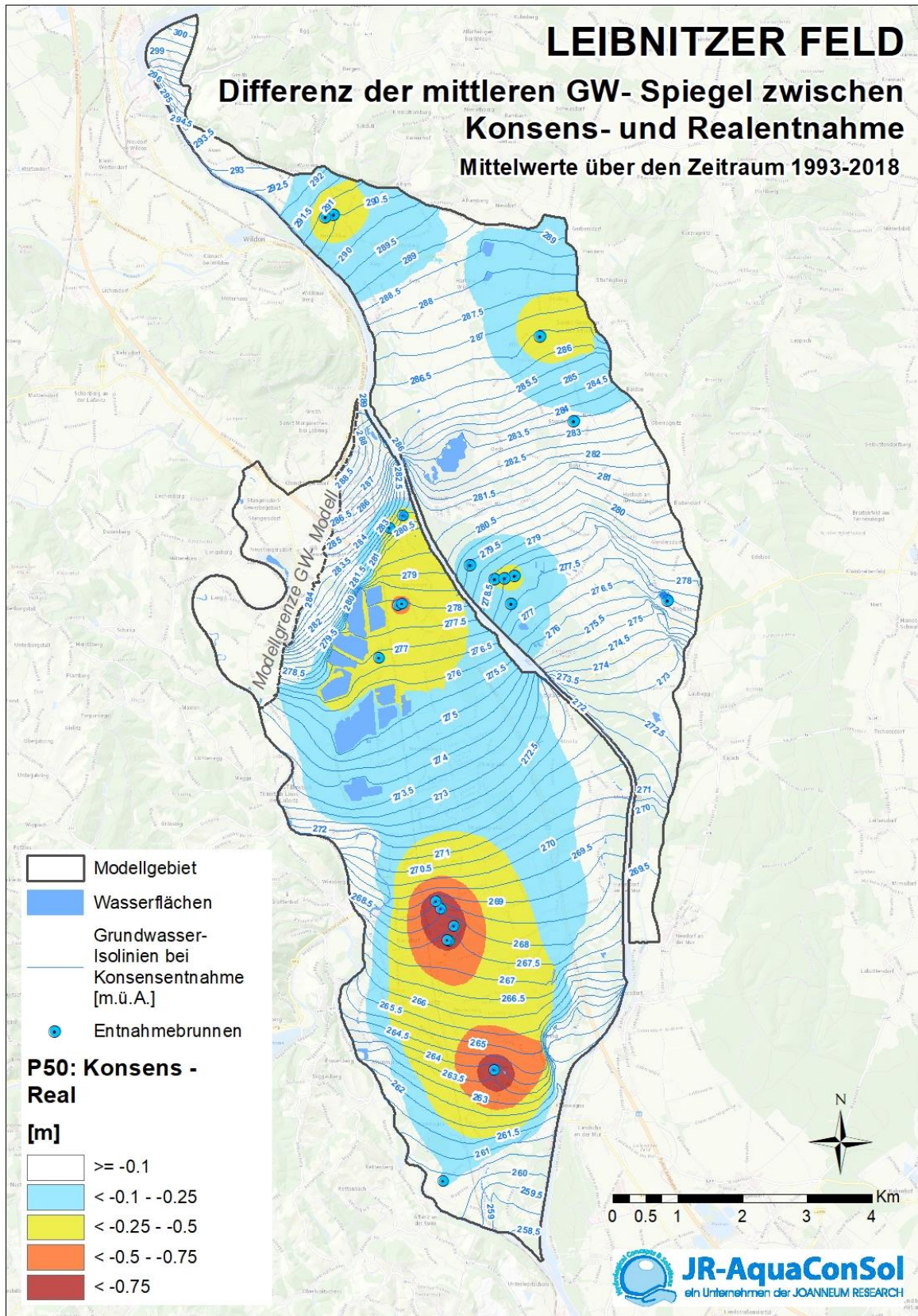


Abbildung 48: Differenz zwischen der mittleren Grundwasserspiegellage bei Real- und Konsensentnahme im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

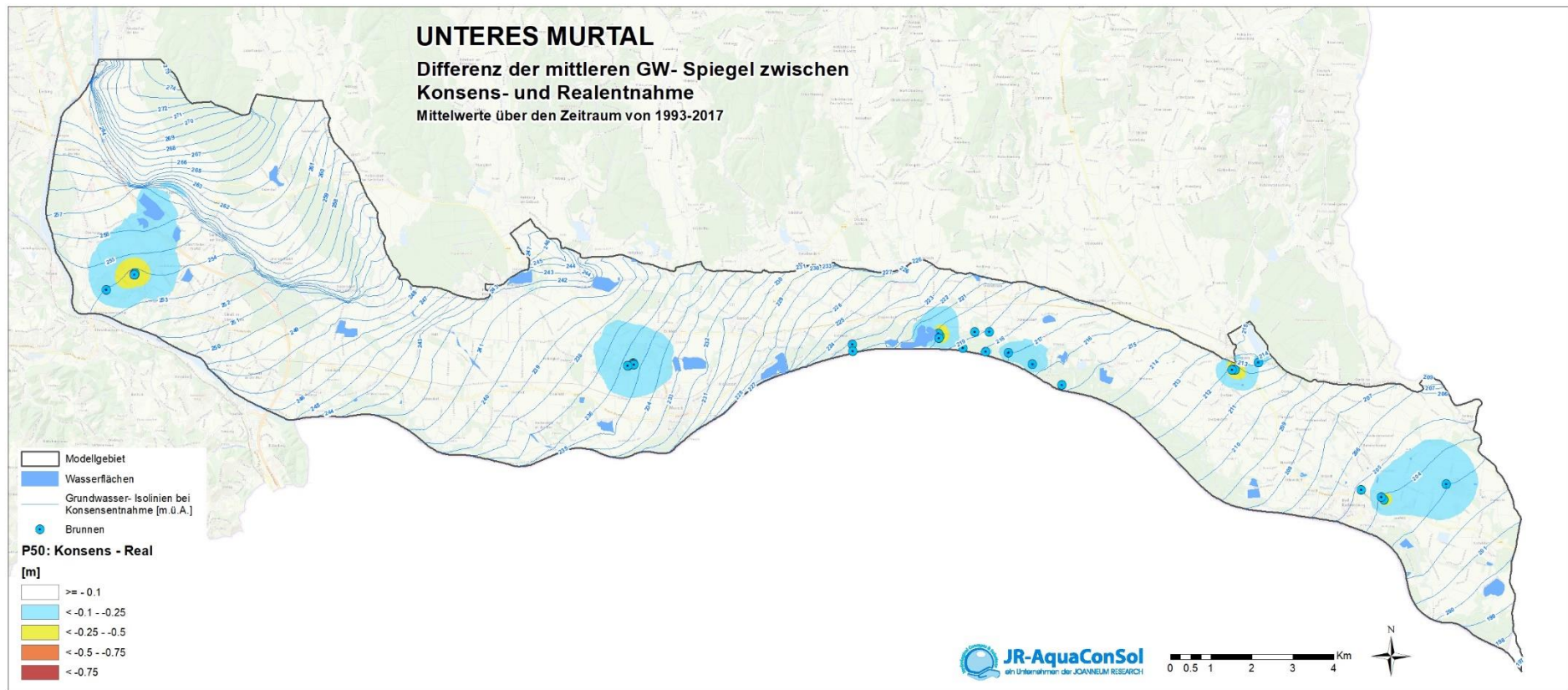


Abbildung 49: Differenz zwischen der mittleren Grundwasserspiegellage bei Real- und Konsensentnahme im Grundwasserkörper Unteren Murtal

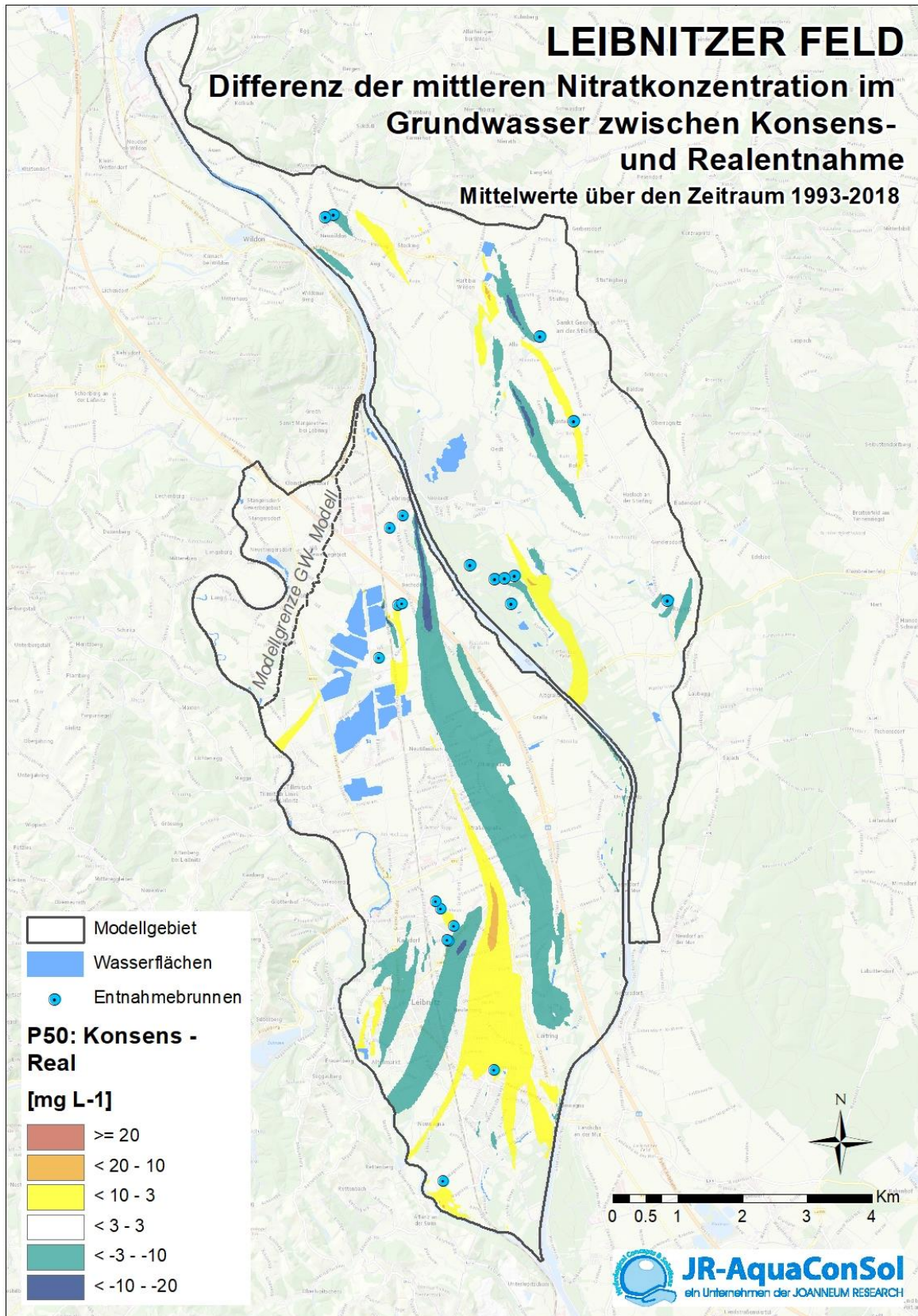


Abbildung 50: Differenz zwischen der mittleren Nitratkonzentration im Grundwasser bei Real- und Konsensentnahme im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

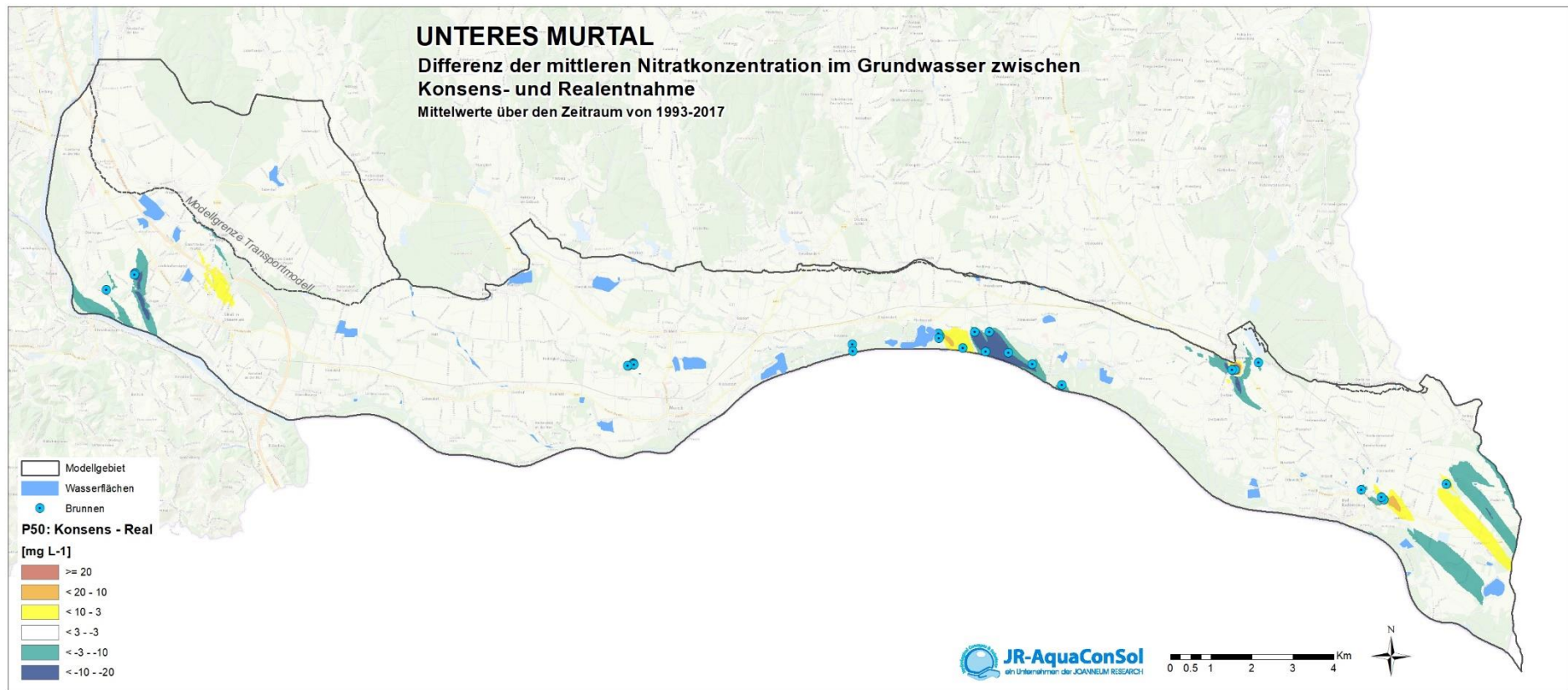


Abbildung 51: Differenz zwischen der mittleren Nitratkonzentration im Grundwasser bei Real- und Konsensentnahme im Grundwasserkörper Unteren Murtal



9 Ermittlung von Extremlagen des Grundwasserspiegels mit einer 100-jährigen Auftretenswahrscheinlichkeit

In sehr vielen praktischen Fragestellungen im Bereich der Hydrologie von Porengrundwasserleitern stellt sich die Frage nach dem langfristig zu erwartenden höchsten Grundwasserspiegel (Altlasten-Gefährdungspotential, Bauvorhaben, etc.). Desgleichen ist die Frage nach dem langfristig zu erwartenden niedrigsten Grundwasserstand für den Bereich der Wasserwirtschaft von essentieller Bedeutung.

Die ÖNORM B 2400 definiert RHHW als „durch theoretische Überlegungen und Berechnungen als größtmögliches Hochwasser ermittelter Wert“, wobei die analoge Verwendung der Bezeichnung RHHGW für Grundwasserstand ausdrücklich definiert wird (ÖNORM B 2400). Analog dazu wird auch der Begriff des niedrigst möglichen Wertes (RNNW) definiert.

Eine Möglichkeit zur Ermittlung von RHHGW und RNNGW stellt der Einsatz mathematischer Grundwasserströmungsmodelle unter Heranziehung extremer hydrologischer Randbedingungen dar. Die Anwendung derartiger Modelle scheitert fast immer an der dafür notwendigen Datenlage. Einen weiteren Ansatzpunkt zur Ermittlung der oben angeführten Größen stellt die Kombination extremwertanalytischer und geostatistischer Verfahren dar.

Für die Grundwasserkörper Leibnitzer Feld (westlicher und östlicher Teil) und Unteres Murtal sollen durch theoretische Überlegungen und Berechnungen die Verteilungen von höchsten möglichen (RHHGW) und niedrigsten möglichen (RNNGW) Grundwasserständen an diskreten Punkten bestimmt werden. Zu diesem Zweck wird die Ermittlung des 100-jährigen Hoch- (HGW100) bzw. 100-jährigen Niedrig-Grundwasserstandes (NGW100) unter Anwendung des statistischen Verfahrens nach Gumbel mit den Berechnungen der Grundwasserspiegelganglinien durch ein numerisches Grundwasserströmungsmodell kombiniert. Das Verfahren nach Gumbel ist ausführlich in Fank und Fuchs (1999) beschrieben.

9.1 Fachlich – wissenschaftlicher Hintergrund

9.1.1 Einleitung

In vielen seichtliegenden porösen Grundwasserleitern zeigen die Grundwasserstände eine saisonale und jährliche Variabilität in Abhängigkeit von natürlichen Rahmenbedingungen und menschlichen Eingriffen. Nach Najib et al. (2008) können hohe Grundwasserstände mit dem Neubildungspotential (z.B. intensive oder lang andauernde Niederschläge, Schneeschmelze, hoher Oberflächengewässerwasserstände, Infiltrationskapazität der Böden und Bodenwassersättigung) und Druckübertragungsprozessen im unterlagernden Grundwasserreservoir in Zusammenhang gebracht werden. Anthropogene Maßnahmen, die zu hohen Grundwasserständen beitragen sind beispielsweise die Versiegelung von Landoberflächenteilen, künstliche Grundwasseranreicherung oder die Errichtung von Wasserkraftwerken (Limberg et al., 2010). Im gegenständlichen Zusammenhang haben extrem hohe Grundwasserstände eine besondere Bedeutung, da sie zu Zerstörungen und wirtschaftlichen Verlusten aufgrund von Überflutungen der Landoberfläche, das Eindringen von Wasser in Parkhäuser, eine Einflussnahme auf Deponien oder sonstige unterirdische Infrastruktur nehmen können (Kreibich & Thieken, 2008). Aus diesen Gründen brauchen Planer und Verwaltung Informationen über extreme Grundwasserstände für die Landes- und Projektplanung.

Die Schätzung von extremen Grundwasserständen sollte auf Messdaten des Grundwasserstandes von Pegeln beruhen, die ausreichend lange (mehr als 10 Jahre) und in einer ausreichenden Frequenz (z.B. mindestens einmal wöchentlich; Vogt et al., 2006) beobachtet wurden, damit keine signifikanten Grundwasserextreme verpasst wurden. Außerdem sollten die Grundwassermessdaten nicht durch anthropogene Aktivitäten wie Pumpbetrieb, Drainage oder Anreicherung beeinflusst sein. Existiert ein derartiger Einfluss, sollte dieser konstant in der Vergangenheit und auch repräsentativ für die Folgejahre sein. Zusätzlich sind die Grundwasserstandsdaten hinsichtlich eines vorhandenen Trends untersucht werden. Bei dessen Existenz ist zu entscheiden, ob der Trend für die Berechnung der Extremwerte herausgerechnet werden kann (Vogt et al., 2006).

In der Hydrologie von Oberflächengewässersystemen ist die statistische Frequenzanalyse ein Standardverfahren um den Abfluss mit einem bestimmten Wiederkehrintervall oder einer Überschreitungswahrscheinlichkeit zu schätzen (Coles, 2001; Katz et al., 2002). Ziel dieser Arbeit ist es, jährliche Maxima des Grundwasserstandes aus einer langen Beobachtungsperiode zur Frequenz der Wiederkehr durch eine entsprechende Wahrscheinlichkeitsverteilung in Relation zu setzen (Najib et al., 2008).

Zwei der am meisten verwendeten Ansätze in der hydrologischen Frequenzmodellierung sind der „annual maximum series“ (AMS) Ansatz und der „peaks over threshold“ (POT) Ansatz (Coles, 2001). Die AMS – Methode berücksichtigt ausschließlich jährliche Extremwerte, unabhängig davon, ob andere Ereignisse im selben Jahr die Jahrestextremwerte anderer Jahre überschreiten. Die POT – Methode versucht diese Nachteile zu überwinden und verwendete alle jene Ereignisse über einem zu spezifizierenden Niveau. Dazu müssen alle jene Ereignisse definiert werden, die über dem Niveau liegen und zusätzlich von benachbarten Ereignissen unabhängig sind (Najib et al., 2008).

Zu Beginn wird im AMS-Ansatz eine geeignete Wahrscheinlichkeitsverteilung an eine Serie von jährlichen Extremwerten angepasst. Diese Verteilung wird in der Folge genutzt, um den Grundwasserstand zu schätzen, der ein definiertes Wiederkehrintervall aufweist bzw. der eine bestimmte Wahrscheinlichkeit überschreitet. Weil die wahre Wahrscheinlichkeitsverteilung der Daten nicht bekannt ist, können unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen verwendet werden. Die üblicherweise am meisten genutzte Wahrscheinlichkeitsverteilung im AMS-Ansatz ist jene der „generalized extreme-value“ (GEV) Verteilung (Najib et al., 2008). Diese inkludiert die Gumbel, Frechet und die Weibull Formulierung.

Fürst et al. (2014) verwenden in ihrer Studie zur regionalen Frequenz Analyse vier Verteilungsfunktionen: Logistische Verteilung, Pearson type III Verteilung, 3-parameter Lognormale Verteilung und die Extremwert Typ I Gumbel Verteilung. Es kann keine generelle Empfehlung für eine bevorzugte Verteilungsfunktion gegeben werden. Najib et al. (2008) verglichen sechs unterschiedliche Schätzverfahren für Grundwasserstände mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren, wobei der AMS- und der POT-Ansatz jeweils mit unterschiedlichen Parameter-Schätzverfahren verwendet wurden. Alle Kombinationen ergaben sehr gut vergleichbare Schätzungswerte und Standardabweichungen für die extremen Grundwasserspiegellagen – es konnte kein Ansatz als besonders gut geeignet gegenüber den anderen verglichenen hervorgehoben werden.

Vogt et al. (2006) betrachten die mit der Gumbel-Verteilung berechneten Extremwertschätzungen als vertrauensvoller als die Ergebnisse aus anderen Verteilungen und Schätzmethoden. Nach der Gumbel-Methode abgeleitete Schätzungen erwiesen sich als robuster gegenüber Änderungen in den Input-Daten. Najib et al. (2008) diskutierten, dass zweiparametrische Gumbel Quantil Schätzer in manchen Fällen gegenüber dreiparametrischen GEV-Quantil Schätzern der Vorzug zu geben sei, insbesondere dann, wenn der Formparameter schlecht durch die Daten repräsentiert wird.

Alternativ zur Verwendung von extremwertstatistischen Verfahren können extrem hohe Grundwasserstandwerte auch durch die Berechnung mittels eines Grundwasserströmungsmodells mit korrespondierenden extremen Annahmen für die Randbedingungen (z.B. Kombination für mehrere aufeinanderfolgende extrem feuchte Jahre und gleichzeitige Außerbetriebnahme von Brunnenfeldern) gewonnen werden. Kidmose et al. (2013) kombinierten Ensemble-Modelle des Klimawandel Impacts mit der Modellierung von extremen Grundwasserständen und wandten die Extremwertanalyse (EVA) auf die Projektion zukünftiger extremer Grundwasserstände (2081 – 2100) an. Die Autoren berechneten Grundwasserstände für unterschiedliche Wiederkehrintervalle und verglichen verschiedene Quellen der Unsicherheiten. Limberg et al. (2010) betrieben ein Grundwasserströmungsmodell mit hohen Grundwasserneubildungsraten und überhöhten Wasserspiegellagen von Oberflächengewässern um eine Verteilung von höchsten zu erwartenden Grundwasserspiegellagen für den Berlin-Grundwasserleiter zu erarbeiten und vergleichen die Ergebnisse mit den höchsten gemessenen Grundwasserständen an Beobachtungsbrunnen. Allerdings weisen physikalisch basierte Ansätze für die Betrachtung extremer möglicher Zustände starke Begrenzungen auf und geben keinen Einblick in Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Wiederkehrintervalle (Fürst et al., 2014).

Um auch noch andere Ansätze zu berücksichtigen, sei erwähnt, dass Upton & Jackson (2011) statistische Methoden der Klassifikation von hydrografischen Ganglinien mit „lumped parameter“ Modellen kombinierten, um die raumzeitliche Auswirkung grundwasserbedingter Überflutung in einem Kreide-Einzugsgebiet im südlichen England zu untersuchen. Ascott et al. (2017) kombinierten die statistische Analyse von Grundwasserständen und Impuls – Response Funktionen und zeigten die vorherrschende Steuerung der Grundwasserüberflutung durch Response Funktionen in englischen Kreide-Gebieten.

Die Ableitung von extremen Grundwasserständen an Monitoring-Messstellen allein stellt keine kontinuierliche Verteilung jener Werte sicher, die für Planungsprozesse erforderlich sind. Dafür ist ein Interpolationsschritt notwendig, der die extremen Grundwasserstände an benachbarten Stationen einbezieht. Sowohl Fank & Fuchs (1999), als auch Fürst et al. (2014) verwendeten zur Interpolation das Ordinary Kriging Verfahren. Jedenfalls verhindert aber die Interpolation von Schätzwerten von Extremen zwischen definierten Punkten die Berücksichtigung naturnaher Rahmenbedingungen (z.B. Grundwasserabfuhr durch interagierende Oberflächengewässerkörper) oder anthropogene Nutzungen (z.B. Grundwasserentnahmen) zwischen den Beobachtungsbrunnen auf die Entwicklung von Grundwasserextremen. Diese Informationen werden jedoch durch regionale instationär kalibrierte Grundwasserströmungsmodelle verfügbar gemacht, da sie - wenn sie gut kalibriert sind - die Auswirkung des Einflusses natürlicher Rahmenbedingungen und die des anthropogenen Eingriffs in den Grundwasserleiter und auf die Grundwasserstandsverhältnisse gut abbilden.

Im hier präsentierten Ansatz wurde ein Wiederkehrintervall von 100 Jahren gewählt, d.h. die Schätzung von extremen Grundwasserständen die statistisch in jeweils 100 Jahren erreicht bzw. überschritten werden. Sie werden aus beobachteten Zeitreihen an Grundwasserstandsmessstellen durch die Verwendung von statistisch basierten Extremwertanalysen vorhergesagt. Als neuer Ansatz für die Generierung einer Karte von extremen Grundwasserstandswerten wird die Berechnung von 100jährigen Ereignissen, basierend auf der Gumbel Methode aus den berechneten Zeitreihen von Grundwasserständen an allen FE-Knoten eines numerischen Modellnetzes in einem instationär kalibrierten regionalen Grundwasserströmungsmodell verwendet. Dadurch kann die Reaktion des Grundwasserleiters auf definierte Einflussgrößen zwischen den Grundwasserstandsmessstellen auf einer physikalischen Basis verfügbar gemacht werden. Eine Interpolation der geschätzten Extremwerte ist dadurch nicht mehr notwendig.

9.1.2 Statistische Extremwertanalyse nach der GUMBEL - Methode

Für das jährliche Maximum bzw. Minimum des Grundwasserstandes y_i für eine Reihe von m Jahren wird die Gumbel Funktion $G(y) = e^{-e^{-\exp(y)}}$ genutzt, um die Verteilung der jährlichen Grundwasserextremwerte zu beschreiben. Dabei kann y als $y = (y - \lambda) / \delta$ ausgedrückt werden, wobei λ und δ die Parameter der Gumbel Funktion darstellen. Die Implementierung des hier genutzten Gumbel-Ansatzes ist in Fank & Fuchs (1999) beschrieben; einige wesentliche Komponenten werden hier wiederholt, wobei auf relevante Kreuz-Referenzierungen zu anderen extremwertanalytischen Arbeiten verwiesen wird.

Um zu überprüfen, ob die Daten einer Zeitreihe Realisierungen einer spezifischen Verteilung sind, können sogenannte Quantil – Quantil Plots verwendet werden, wobei die empirischen Quantile aus den Messdaten den theoretischen Quantilen einer Verteilungsfunktion gegenübergestellt werden. Liegen die Quantil-Datenpunkte in etwa auf einer geraden Linie, können die jährlichen Grundwasserextremwerte durch eine Gumbel-Funktion beschrieben werden. Sind starke Abweichungen von einer linearen Verteilung erkennbar, sind meist alternative Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen (z.B. Frechet oder Weibull) besser geeignet, um extreme Grundwasserstände mit einem definierten Wiederkehrintervall zu berechnen (Fank & Fuchs, 1999). Für Reihen mit weniger als etwa 40 Datenpunkten kann der Komogornov-Smirnow Test (Hartung, 1987) verwendet werden, um zu prüfen ob die Verteilung der unbekannt Datenbasis durch eine Gumbel-Funktion repräsentiert werden kann. Diese Hypothese wird verworfen, wenn ein definiertes Signifikanzlevel nach dem Vergleich mit kritischen Lilliefors Werten (Lilliefors, 1967) nicht erreicht wird. Alternativ dazu kann die Qualität der Anpassung durch den chi-quadrat Test (Najib et al., 2008) beurteilt werden. Die Homogenität, Stationarität und Unabhängigkeit der Daten müssen geprüft werden – z.B. durch den Mann-Whitney Test (Mann & Whitney, 1947). In dieser Arbeit wird die partielle Autokorrelationsanalyse verwendet, um zu prüfen, ob die jährlichen Grundwasserextremwerte voneinander unabhängig sind (Fank & Fuchs, 1999).

Die Parameter λ und δ können durch verschiedene Verfahren wie der Momentenmethode, der Maximum Likelihood Methode oder der Least Square Methode, die alle eine minimale Varianz der Parameterschätzung liefern, geschätzt werden. Madsen et al. (1997) diskutierten dazu adäquate Möglichkeiten der Schätzung der Verteilungsfunktion und der Schätzparameter. Najib et al. (2008) wandten die Momentenmethode, die Maximum Likelihood Methode und über die Wahrscheinlichkeit gewichtete Methode an um die Parameter eines AMS- und eine POT-Ansatzes zu

schätzen und kombinierte Effekte auf die Grundwasserstandswerte mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren zu untersuchen. In der hier verwendeten statistischen Extremwertanalyse wird die Momentenmethode verwendet um die Parameter λ and δ der Gumbel Funktion zu berechnen. Sie kann als Realisierung ihrer ersten zwei Momente betrachtet werden. Das n-jährliche Wiederkehrintervall kann berechnet werden als $y_n = y_{\text{mean}} + s_y * z$ mit $z = (y - \lambda_{\text{est}}) / \delta_{\text{est}}$ und s_y , das die Standardabweichung der jährlichen Grundwasser Extremwerte abbildet.

Der vorhergesagte extreme Grundwasserstandswert ist nur eine Schätzung der wahren aber unbekanntem Werte, die auf einer statistischen Probe beruhen. Die Unsicherheit kann durch Konfidenzintervalle für geschätzte Parameter quantifiziert werden, in welcher der wahre Wert mit einer spezifischen Wahrscheinlichkeit dargestellt werden kann (Vogt et al., 2006). Die Weite des Konfidenzinterfalls kann als Indikator für Zuverlässigkeit der Schätzung verwendet werden (Fürst et al., 2014).

In dieser Arbeit wird das 95 % Wahrscheinlichkeitslevel für die beiden Schätzer λ and δ berechnet. Kidmose et al. (2013) verwendeten eine ähnliche Methode, indem sie auf das Konfidenzinterfall als Fehlergrenzen für die Gumbel-Verteilung referenzierten. Sie nutzten dabei die Maximum Likelihood Methode für die Parameterschätzung.

9.2 Berechnung und Darstellung der HGW100 und der NGW100 – Werte für die Modellgebiete Östliches Leibnitzer Feld, Westliches Leibnitzer Feld und Unteres Murtal

Die Berechnung und Darstellung der HGW100 und der NGW100 – Werte für die Modellgebiete Östliches Leibnitzer Feld, Westliches Leibnitzer Feld und Unteres Murtal folgt einem mehrstufigen Verfahren:

1. Ermittlung der HGW100 und der NGW100 Grundwasserspiegellagen nach dem Gumbel-Verfahren in Fank & Fuchs (1999) an den langfristig beobachteten Grundwasserpegeln des Hydrographischen Dienstes des Landes Steiermark
2. Ermittlung der HGW100 und der NGW100 Grundwasserspiegellagen nach dem Gumbel-Verfahren in Fank & Fuchs (1999) an den FE-Knoten der Grundwassermodelle Östliches Leibnitzer Feld, Westliches Leibnitzer Feld und Unteres Murtal und Berechnung eines Rasters der Grundwasserextremwerte
3. Ermittlung der Differenzen der HGW100 und der NGW100 Werte aus den Messdaten der Messstellen des Hydrographischen Dienstes des Landes Steiermark und der berechneten Extremwerte aus den numerischen Grundwasserströmungsmodellen an denselben Beobachtungspunkten. Diese Differenzen resultieren in erster Linie daher, dass die langjährig instationär kalibrierten Grundwasserströmungsmodelle nicht auf eine möglichst korrekte Wiedergabe der Jahresextremwerte, sondern auf mittlere Grundwasserspiegellagen kalibriert wurden.
4. Kriging – Interpolation der Differenzen der Grundwasserspiegelextremwerte aus (3) als Raster für die Grundwassermodellgebiete
5. Addition der Modellraster aus (2) und aus (4) und Berechnung der modellbasierten Raster der HGW100 und der NGW100 Werte für die Modellgebiete Östliches Leibnitzer Feld, Westliches Leibnitzer Feld und Unteres Murtal

In Abbildung 52 ist die Berechnung von extremen Grundwasserspiegelhochständen, in Abbildung 53 von extremen Grundwasserspiegeltiefständen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Darstellung der Autokorrelationsfunktion der Jahresextremwerte nach dem Verfahren in Fank & Fuchs (1999), beispielhaft für die Messstelle uw37672 im Östlichen Leibnitzer Feld dargestellt. Abbildung 54 und Abbildung 55 liefert die adäquaten Berechnungsergebnisse für die Messstelle uw38085 im Westlichen Leibnitzer Feld, Abbildung 56 und Abbildung 57 zeigt die Ergebnisse für die Messstelle uw38415 im Unteren Murtal.

Als Eingangsdaten in diese Berechnung dienen die gemessenen Grundwasserspiegelmaxima einer Reihe mit einer Länge von mindestens 10 Jahren Beobachtungsdauer.

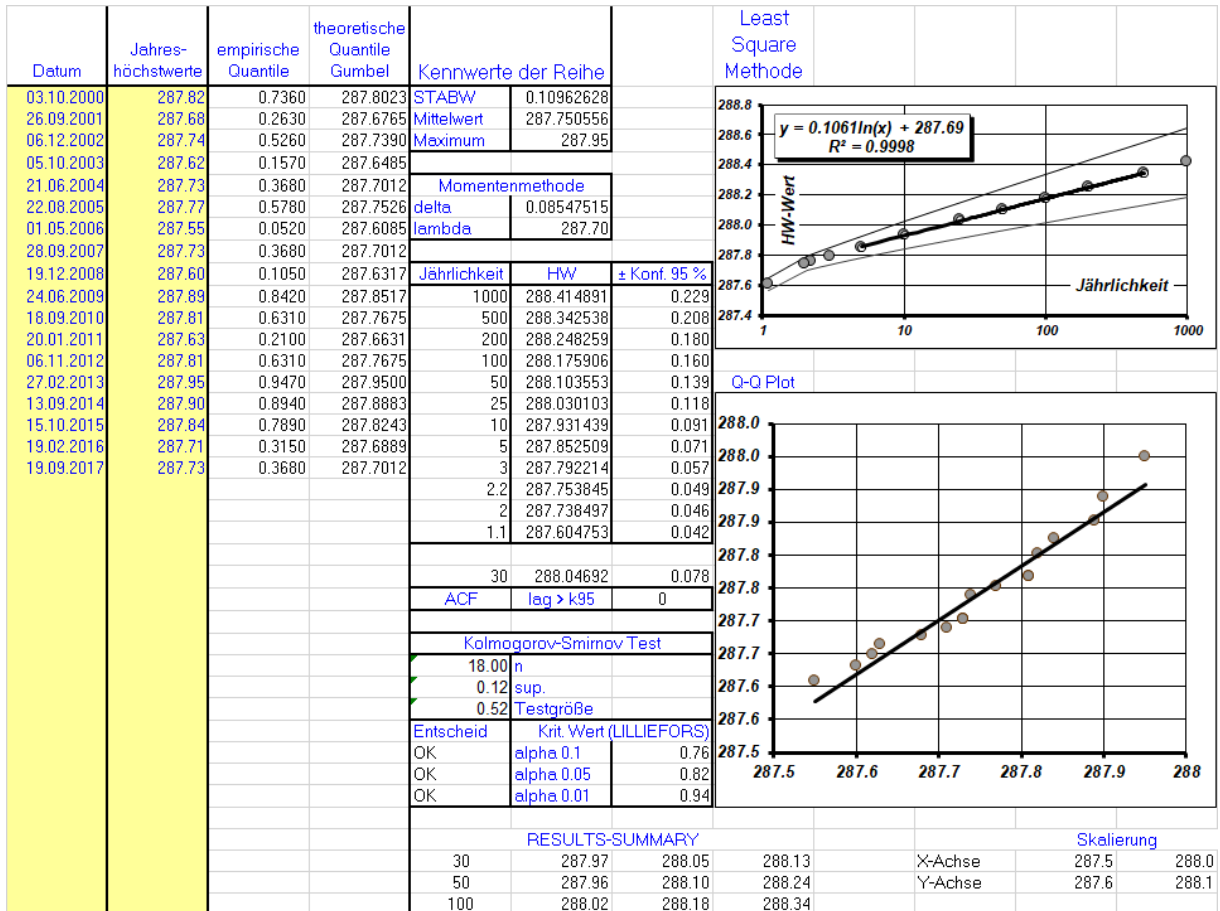
Im Bereich der Extremwertstatistik wird üblicherweise an die empirischen Daten im ersten Schritt eine GUMBEL - Verteilung angenähert. Stellt sich aufgrund von Teststatistiken und graphischen Interpretationshilfen (siehe unten) heraus, dass die empirische Verteilung nicht signifikant von einer GUMBEL Verteilung verschieden ist, so wird für die weitere Untersuchung die Annahme einer GUMBEL Verteilung beibehalten.

Aus der geordneten Reihe dieser Jahreshöchstwerte des Grundwasserspiegels einer Messreihe werden die empirischen $y_{(i)}$ und die zugehörigen theoretischen Quantile $\xi_{i/(m+1)}$ ermittelt. Aus der Gegenüberstellung im Q-Q-Plot können erste Schlüsse auf die Zulässigkeit der Verwendung einer Gumbel Verteilung getroffen werden. Nach der Momentenmethode werden die Parameter δ und λ der Gumbel Verteilung geschätzt und die zu erwartenden Grundwasserhöchststände für definierte Jährlichkeiten berechnet. Nach dem in Fank & Fuchs (1999) vorgestellten Verfahrens wurde ein 95 % Konfidenzintervall berechnet.

Als Entscheidungshilfe werden die Testgrößen des Kolmogorov-Smirnov Tests berechnet und diese Testgröße mit den entsprechenden kritischen Werten nach Lilliefors (1967) auf drei unterschiedlichen Signifikanzniveaus verglichen. Wird die Nullhypothese, dass es keinen Grund gibt, unter Berücksichtigung eines bestimmten Signifikanzniveaus die Anpassung der aus den Daten gewonnenen Verteilung an eine Gumbel Verteilung anzuzweifeln, nicht verworfen, so wird im Tabellenbereich Entscheidung der Text „OK“ ausgegeben, ansonsten „verwerfen“.

Unter Verwendung der „Least Square Methode“ werden die Parameter einer logarithmischen Ausgleichsfunktion berechnet, die es erlauben, aus vorgegebenen Extremwerten deren Jährlichkeit bzw. aus vorgegebenen Jährlichkeiten die zugehörigen Extremwerte zu berechnen.

Die Anwendbarkeit der hier beschriebenen Methode zur Berechnung der Jährlichkeit setzt sogenannte IID (independent identical distributed) Prozesse voraus, das bedeutet in diesem Fall, dass die jeweiligen Jahresextremwerte über die Zeit betrachtet unabhängig voneinander sein müssen. Es darf also weder zu einer trendmäßigen Zu- bzw. Abnahme der Jahresextrema kommen noch dürfen die Extremwerte aufeinanderfolgender Jahre voneinander abhängig sein. Eine Methode um die Frage der zeitlichen Unabhängigkeit zu untersuchen, ist die Verwendung von Autokorrelations- (ACF) und partiellen Autokorrelationsdiagrammen (PACF), wie dies in Abbildung 52 bis Abbildung 57 für die ausgewählten Referenz-Grundwasserstandsmessstellen in den drei Modellgebieten dargestellt ist (Box & Jenkins, 1976).



Autokorrelation

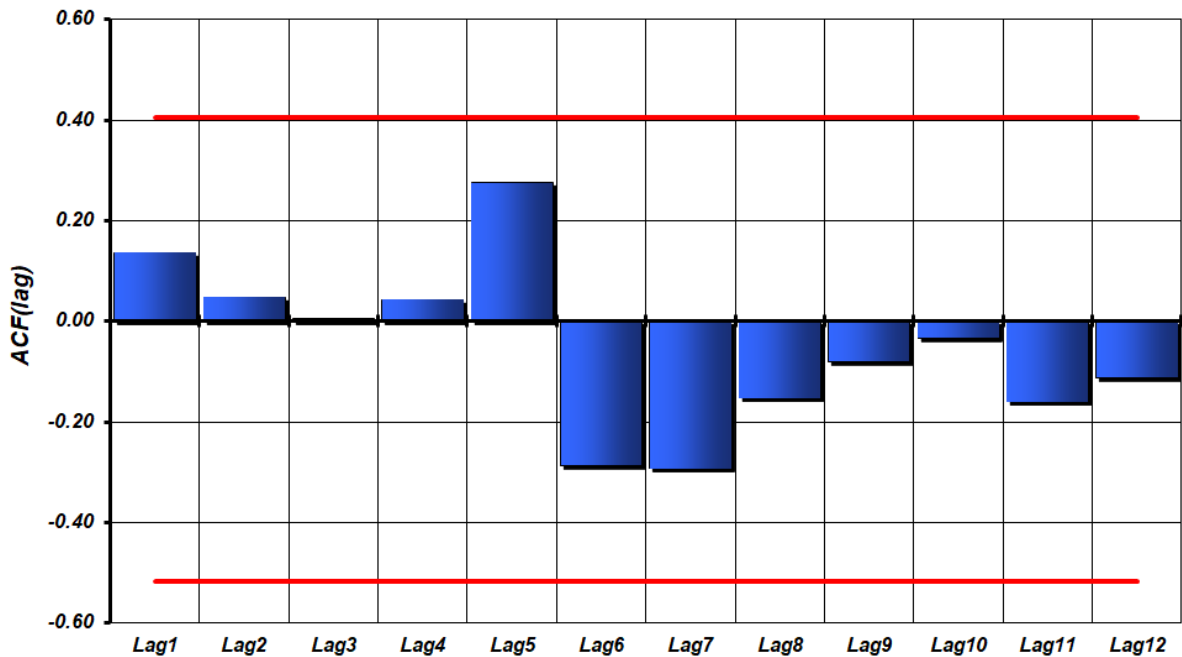
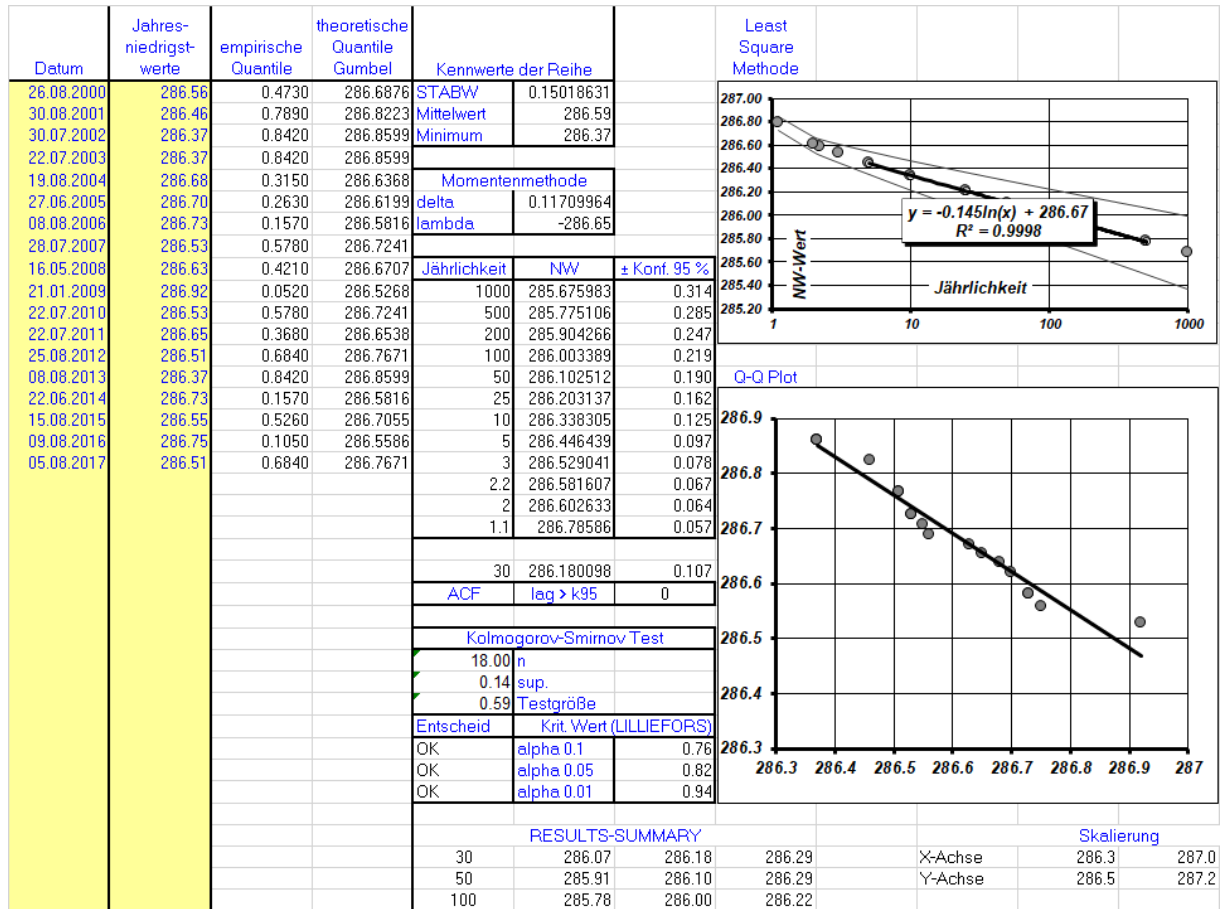


Abbildung 52: Berechnung von extremen Grundwasserspiegelhochständen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Darstellung der Autokorrelationsfunktion der Jahresextremwerte nach dem Verfahren in Fank & Fuchs (1999), beispielhaft für die Messstelle uw37672 im Östlichen Leibnitzer Feld



Autokorrelation

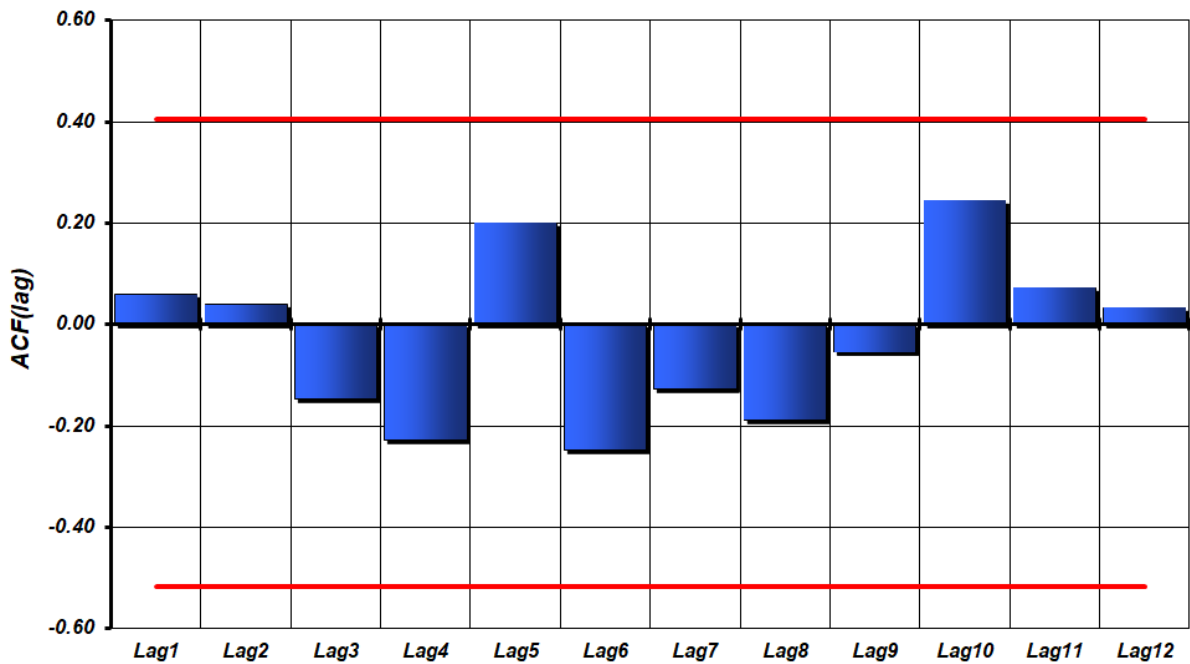
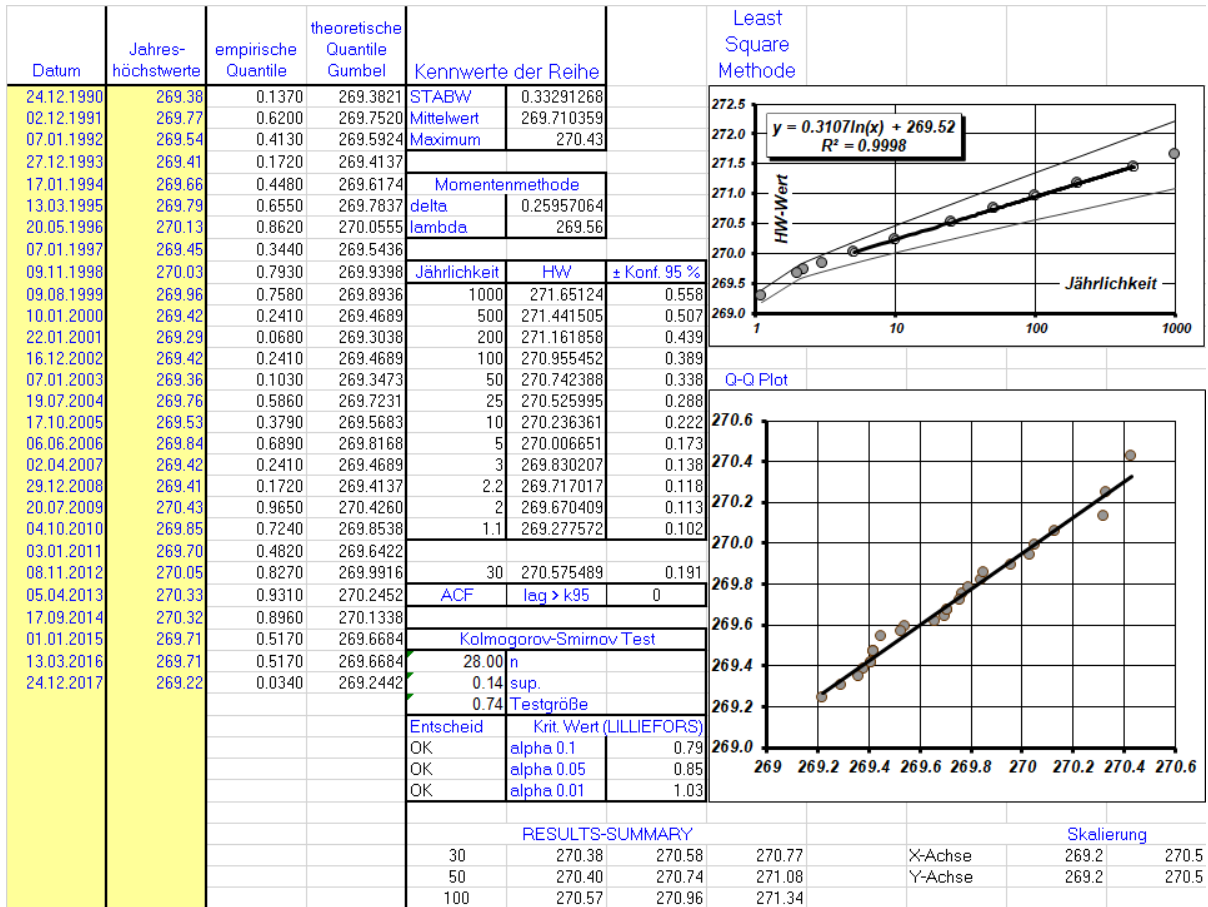


Abbildung 53: Berechnung von extremen Grundwasserspiegeltiefständen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Darstellung der Autokorrelationsfunktion der Jahresextremwerte nach dem Verfahren in Fank & Fuchs (1999), beispielhaft für die Messstelle uw37672 im Östlichen Leibnitzer Feld



Autokorrelation

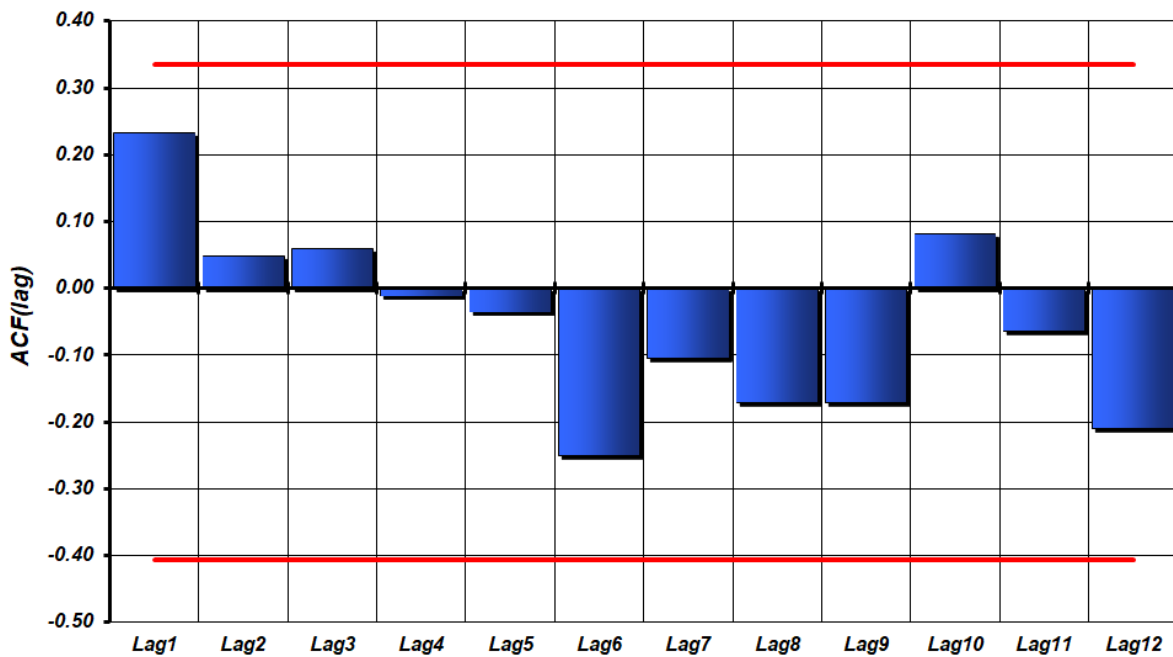
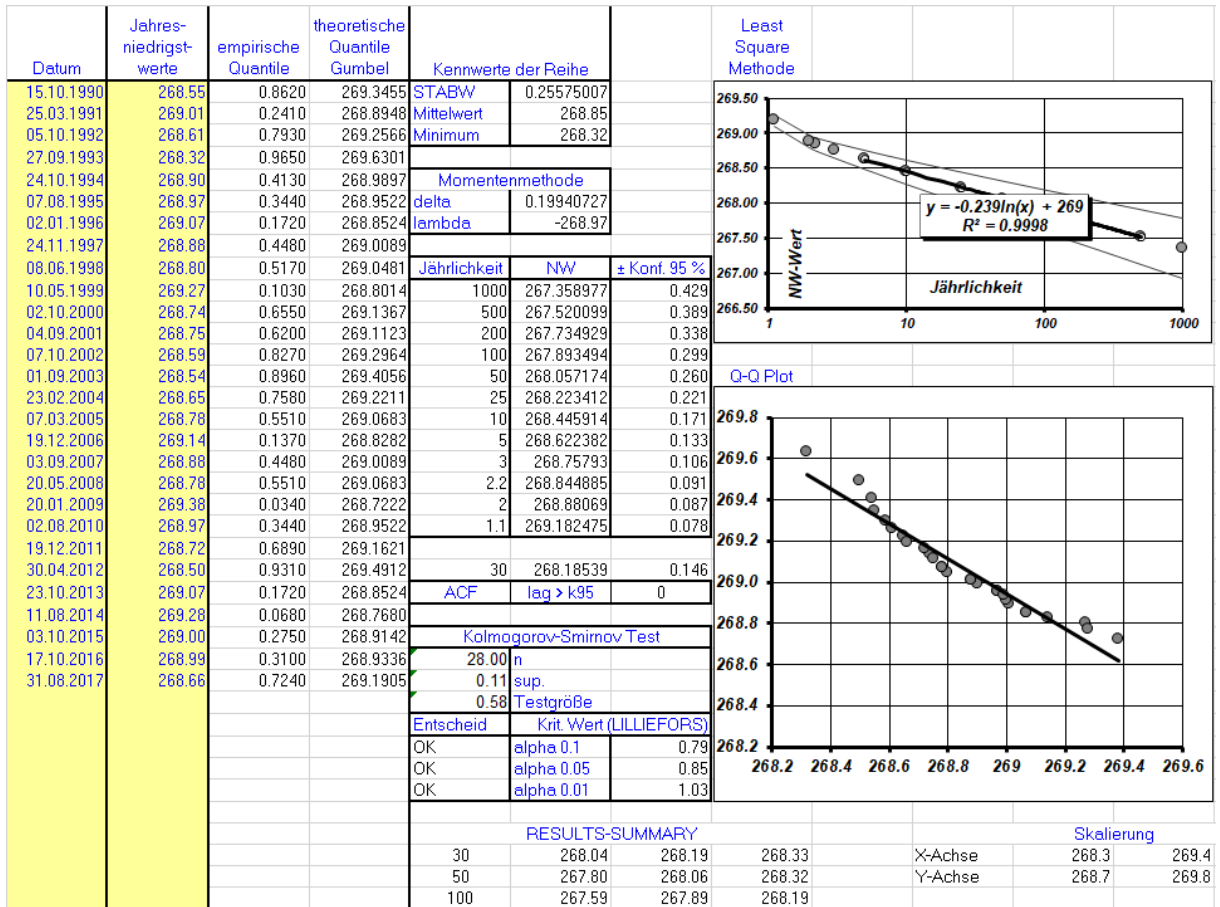


Abbildung 54: Berechnung von extremen Grundwasserspiegelhochständen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Darstellung der Autokorrelationsfunktion der Jahresextremwerte nach dem Verfahren in Fank & Fuchs (1999), beispielhaft für die Messstelle uw38085 im Westlichen Leibnitzer Feld



Autokorrelation

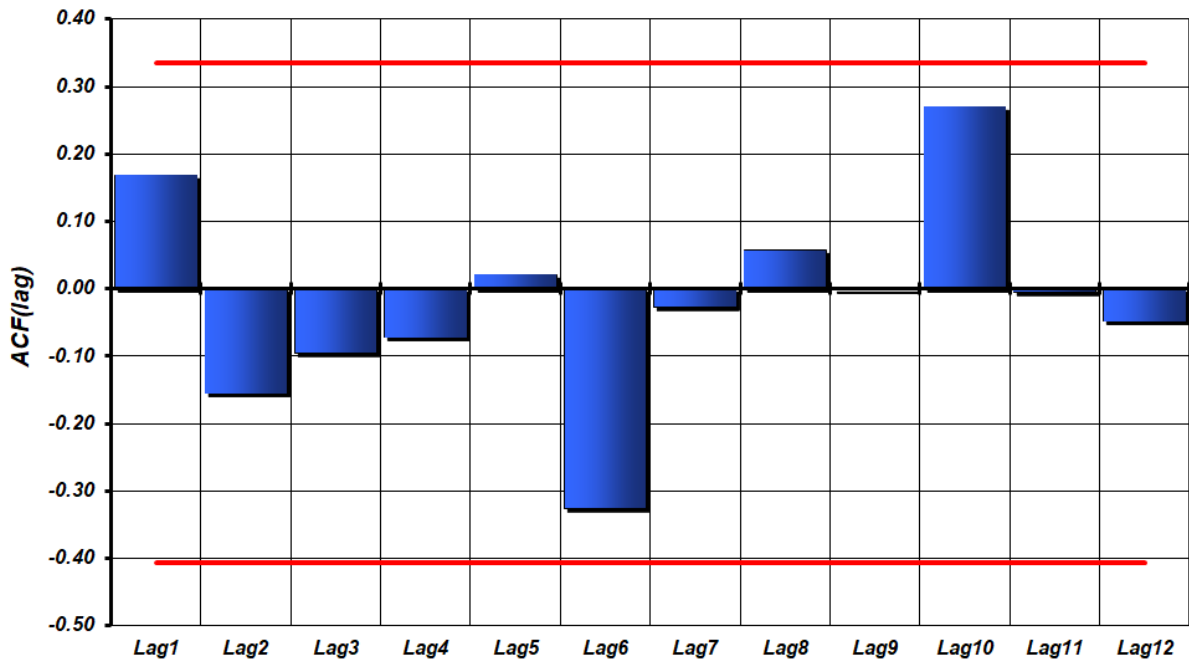
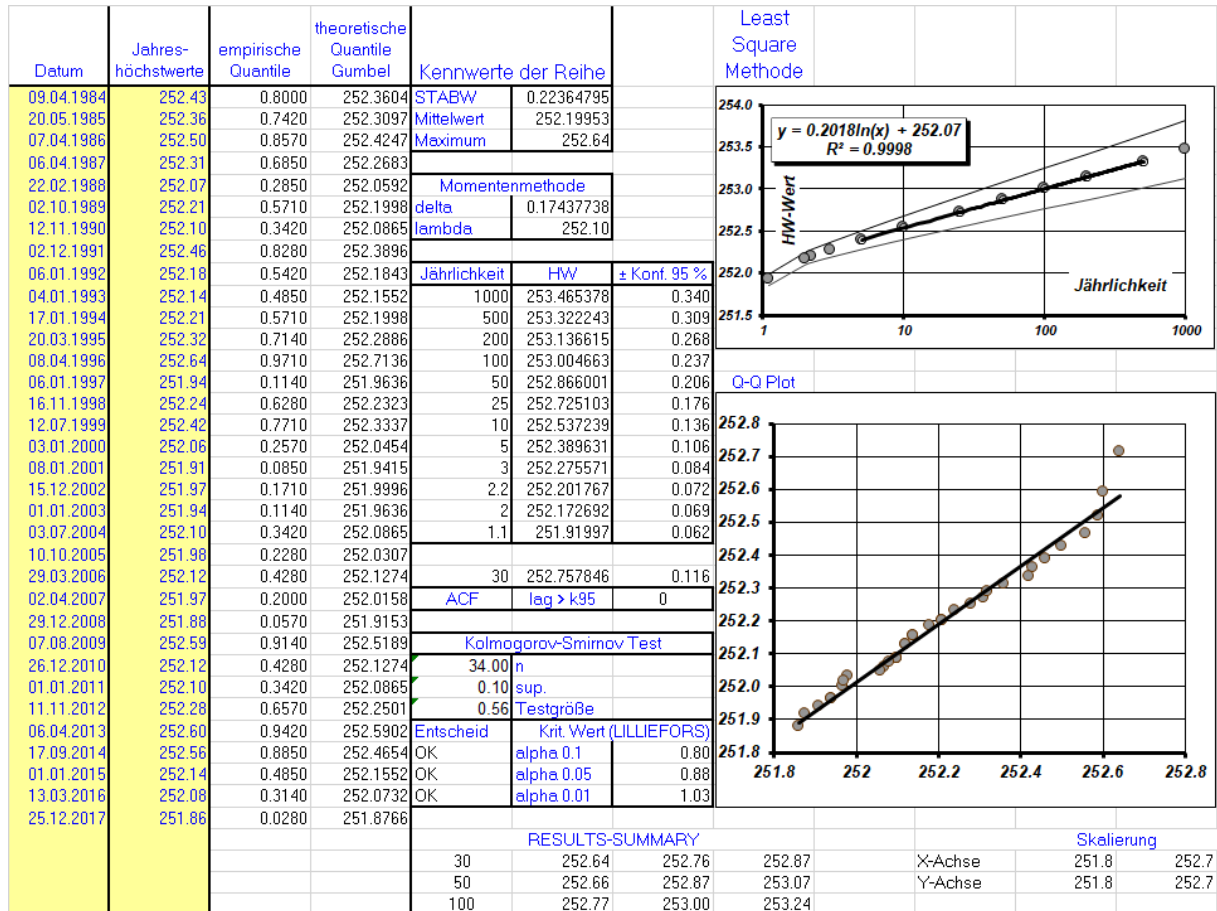


Abbildung 55: Berechnung von extremen Grundwasserspiegeltiefständen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Darstellung der Autokorrelationsfunktion der Jahresextremwerte nach dem Verfahren in Fank & Fuchs (1999), beispielhaft für die Messstelle uw38085 im Westlichen Leibnitzer Feld



Autokorrelation

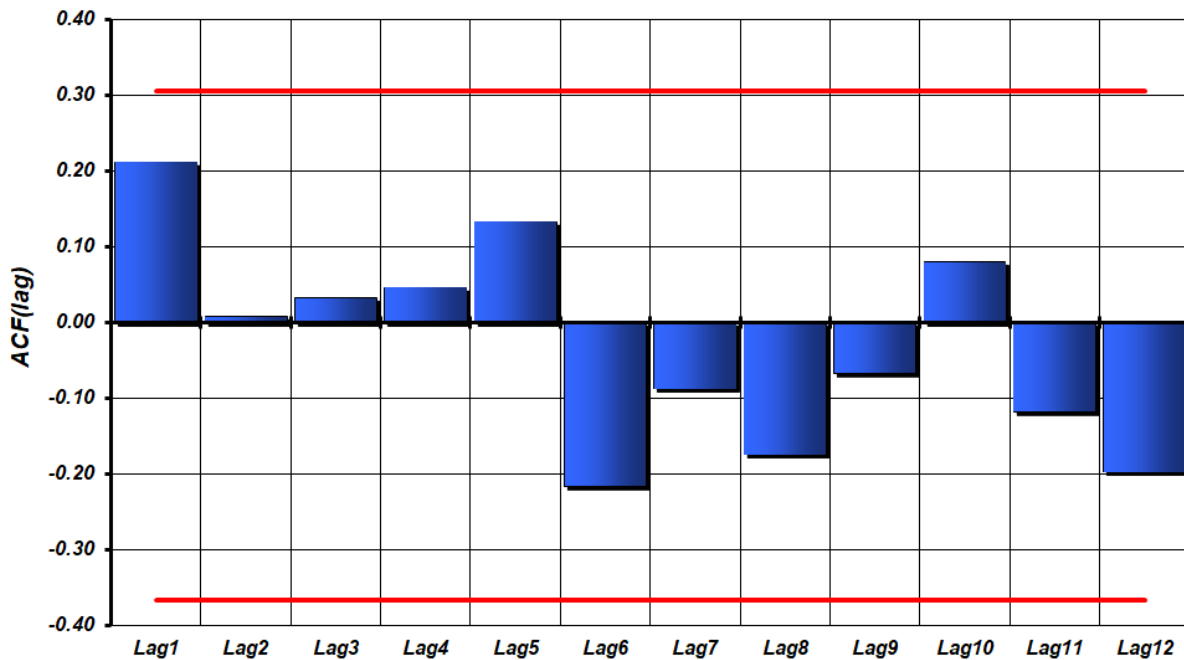
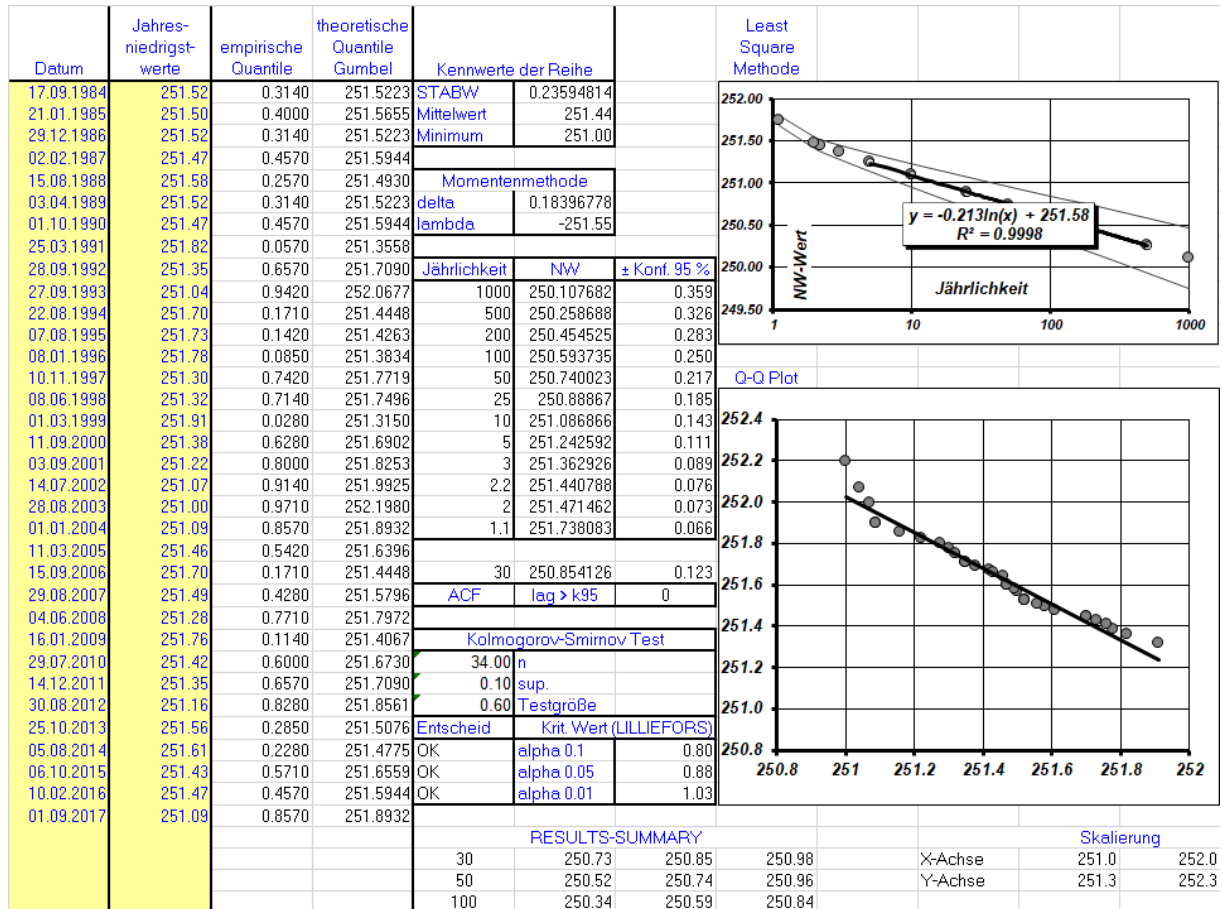


Abbildung 56: Berechnung von extremen Grundwasserspiegelhochständen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Darstellung der Autokorrelationsfunktion der Jahresextremwerte nach dem Verfahren in Fank & Fuchs (1999), beispielhaft für die Messstelle uw38415 im Unteren Murtal



Autokorrelation

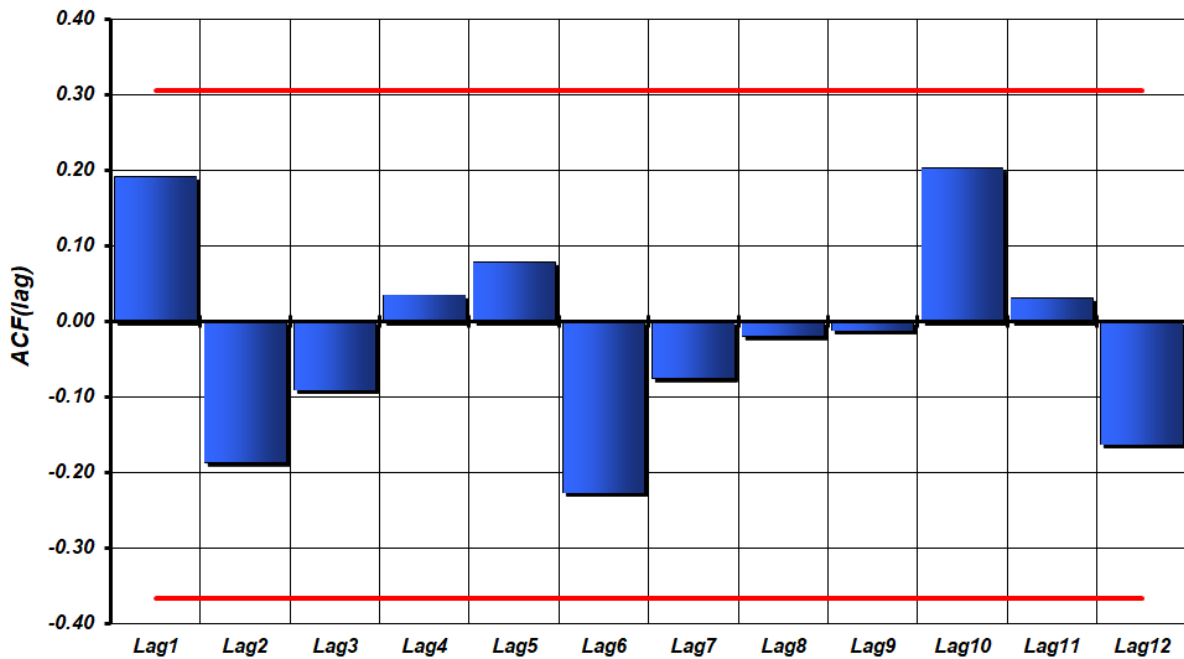


Abbildung 57: Berechnung von extremen Grundwasserspiegeltiefständen mit unterschiedlichen Jährlichkeiten und Darstellung der Autokorrelationsfunktion der Jahresextremwerte nach dem Verfahren in Fank & Fuchs (1999), beispielhaft für die Messstelle uw38415 im Unteren Murtal

Man erkennt in beiden Diagrammen, dass die jeweiligen Koeffizienten in Bezug auf nahezu alle timelags sich nicht signifikant von Null unterscheiden, was auf das Vorliegen zeitlicher unabhängiger Prozesse (white noise) hindeutet. Vor der Anwendung der vorgestellten Methode zur Ermittlung von Jährlichkeiten des Eintreffens von extremen Grundwasserständen ist die Unabhängigkeit der Jahreshöchstwerte jedenfalls zu testen. Ein Auftreten von signifikanten Koeffizienten muss aber auch hydrologisch begründbar sein, bevor die Anwendbarkeit der Extremwertstatistik auf Grundwasserstandsdaten ausgeschlossen wird.

Die für die Berechnung der HGW100- und NGW100-Grundwasserspiegellagen verwendeten Grundwassermesspegel sind in Tabelle 5 bis Tabelle 10 für die drei Untersuchungsgebiete getrennt nach Hochwasser- und Niederwasserextremwertberechnung dargestellt. Die Lage der verwendeten Messstellen ist Abbildung 58 für die Hochwasser- und Abbildung 59 für die Niederwasserextremwertberechnung zu entnehmen. Die gemessenen Grundwasserspiegel wurden an jedem Messpegel auf Lücken, Trends, Diskontinuitäten und eine ausreichend lange Beobachtungsdauer (im gegenständlichen Fall zumindest 15 Jahre innerhalb des Modellzeitraumes) hin untersucht. Messpegel, die eines dieser Kriterien nicht erfüllen, wurden bei der extremwertstatistischen Berechnung der HGW100- und NGW100-Grundwasserspiegellagen nicht berücksichtigt. Des Weiteren wurden solche Messstellen ausgeschlossen, die die in Fank und Fuchs (1999) beschriebenen Testkriterien für die Autokorrelation der Jahresextremwerte und die Anwendbarkeit der Gumbel-Verteilung nicht erfüllen.

In Tabelle 5 bis Tabelle 10 sind in den Tabellenüberschriften folgende Parameter definiert:

HLA_NR	Messstellennummer des Hydrographischen Dienstes (uw als Kennung für unterirdisches Wasser)
BMN_RW	Bundsmeldenetz Koordinate - Rechtswert
BMN_HW	Bundsmeldenetz Koordinate - Hochwert
ZR_von	Zeitreihe verwendet von Jahr ?? an
ZR_bis	Zeitreihe verwendet bis Jahr ??
Anz_Jahre	Anzahl der verwendeten Jahresextremwerte (kann unterschiedliche sein zur Differenz (ZR_bis – ZR_von), wenn Lücken in der Zeitreihe auftreten oder unplausible Werte nicht verwendet wurden)
HW(NW)100Mess	Ergebnis der Extremwertberechnung mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren für Hochwasser (Niederwasser) aus den Messstellendaten
HW(NW)100Mod	Ergebnis der Extremwertberechnung mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren für Hochwasser (Niederwasser) aus den Modellberechnungsergebnissen
HW(NW)100Diff	Differenz aus HW(NW)100Mess – HW(NW)100Mod als Grundlage für die Korrektur der zu erwartenden Extremwerte zwischen den Messstellen.

Tabelle 5: Modellgebiet Östliches Leibnitzer Feld: berechnete HGW100 - Werte an den geeigneten Messstellen aus den Messdaten des Hydrographischen Dienstes und Differenzen zu Grundwasserextremwerten aus den Modellberechnungsergebnissen

HLA_NR	BMN_RW	BMN_HW	ZR_von	ZR_bis	Anz_Jahre	HW100Mess	HW100Mod	HW100Diff
uw3761	689763	195051	1966	2017	52	292.52	292.67	-0.15
uw37617	687131	195678	1990	2017	28	295.39	295.41	-0.02
uw37618	688044	195546	1990	2017	28	294.79	294.88	-0.09
uw3763	688334	194652	1995	2016	22	292.19	292.18	0.02

HLA_NR	BMN_RW	BMN_HW	ZR_von	ZR_bis	Anz_Jahre	HW100Mess	HW100Mod	HW100Diff
uw37633	685927	197611	1993	2017	25	300.53	299.94	0.60
uw37635	689075	194248	1989	2017	29	291.16	291.21	-0.05
uw3765	690552	194093	1964	2017	54	291.01	290.36	0.65
uw37652	691174	194565	1990	2017	28	292.36	291.97	0.39
uw3767	689566	193152	1980	2017	38	288.86	288.58	0.27
uw37672	690255	192860	2000	2017	18	288.18	288.04	0.13
uw3769	691713	193707	1963	2017	55	292.12	290.68	1.44
uw37711	691213	192944	1963	2016	54	291.00	288.67	2.33
uw37713	690744	192011	1990	2017	28	287.09	286.21	0.88
uw3773	691706	191886	1980	2017	38	286.11	285.22	0.89
uw37771	690370	190547	1989	2017	29	282.23	282.26	-0.03
uw3779	691396	190545	1997	2017	21	282.27	281.46	0.81
uw3781	690813	189140	1998	2017	20	279.63	279.76	-0.13
uw37812	692359	190157	1983	2017	35	280.19	279.03	1.17
uw3787	692199	189481	1990	2017	28	278.94	278.45	0.49
uw37931	693451	189254	1986	2017	32	279.29	279.37	-0.08
uw38011	692197	187538	1969	2017	49	274.13	273.90	0.24
uw3803	692780	188160	1990	2017	28	275.10	275.11	-0.01
uw3809	693011	186610	1975	2017	43	272.92	272.78	0.13

Tabelle 6: Modellgebiet Östliches Leibnitzer Feld: berechnete NGW100 - Werte an den geeigneten Messstellen aus den Messdaten des Hydrografischen Dienstes und Differenzen zu Grundwasserextremwerten aus den Modellberechnungsergebnissen

HLA_NR	BMN_RW	BMN_HW	ZR_von	ZR_bis	Anz_Jahre	NW100Mess	NW100Mod	NW100Diff
uw3761	689763	195051	1966	2017	52	288.53	288.35	0.17
uw37617	687131	195678	1990	2017	28	292.15	292.30	-0.15
uw37618	688044	195546	1990	2017	28	291.68	291.35	0.34
uw37633	685927	197611	1993	2017	25	298.79	299.16	-0.37
uw37635	689075	194248	1989	2017	29	288.61	288.31	0.30
uw3765	690552	194093	1964	2017	54	286.83	286.80	0.03
uw37652	691174	194565	1990	2017	28	287.06	286.50	0.55
uw3767	689566	193152	1980	2017	38	286.81	287.00	-0.19
uw37672	690255	192860	2000	2017	18	286.00	286.26	-0.25
uw3769	691713	193707	1963	2017	55	285.72	285.70	0.02
uw37711	691213	192944	1963	2016	54	285.27	285.33	-0.06
uw37713	690744	192011	1990	2017	28	284.60	284.80	-0.20
uw3773	691706	191886	1980	2017	38	282.65	283.16	-0.51
uw3775	691389	191249	1972	2017	46	281.53	282.12	-0.60
uw37751	690974	191343	1963	2017	55	281.96	282.61	-0.66
uw37771	690370	190547	1989	2017	29	281.06	281.21	-0.15
uw3779	691396	190545	1997	2017	21	280.39	280.50	-0.10
uw3781	690813	189140	1998	2017	20	277.99	278.09	-0.10
uw37812	692359	190157	1983	2017	35	277.85	278.06	-0.21
uw3787	692199	189481	1990	2017	28	276.77	276.96	-0.20

HLA_NR	BMN_RW	BMN_HW	ZR_von	ZR_bis	Anz_Jahre	NW100Mess	NW100Mod	NW100Diff
uw37931	693451	189254	1986	2017	32	277.51	277.02	0.49
uw38011	692197	187538	1969	2017	49	272.35	272.41	-0.06
uw3803	692780	188160	1990	2017	28	273.68	273.89	-0.21
uw3809	693011	186610	1975	2017	43	271.20	271.71	-0.51

Tabelle 7: Modellgebiet Westliches Leibnitzer Feld: berechnete HGW100 – Werte an den geeigneten Messstellen aus den Messdaten des Hydrografischen Dienstes und Differenzen zu Grundwasserextremwerten aus den Modellberechnungsergebnissen

HLA_NR	BMN_RW	BMN_HW	ZR_von	ZR_bis	Anz_Jahre	HW100Mess	HW100Mod	HW100Diff
uw37685	688637	189877	1991	2017	27	285.59	286.60	-1.01
uw3778	689470	190041	1988	2017	30	282.08	282.12	-0.03
uw37843	688955	188379	1981	2017	37	279.48	279.67	-0.20
uw3786	687959	187927	1965	2017	53	280.17	281.10	-0.94
uw37861	688315	188267	1980	2017	38	279.44	280.57	-1.13
uw37864	688509	187255	1977	2016	40	277.93	278.09	-0.17
uw3788	689925	188522	1985	2017	33	279.49	279.61	-0.12
uw3790	688058	186184	1978	2017	40	275.61	275.46	0.15
uw37905	688379	186346	1984	2017	34	276.04	276.37	-0.32
uw3792	690421	188897	1966	2017	52	280.01	279.82	0.20
uw37962	691193	187222	1990	2017	28	275.07	276.00	-0.92
uw3798	691975	187468	1966	2016	51	274.01	272.41	1.59
uw38002	691570	186317	1990	2017	28	273.05	273.91	-0.86
uw3802	687895	186823	1977	2017	41	276.81	276.26	0.55
uw3806	690581	185521	1961	2017	57	273.15	274.30	-1.15
uw38066	689377	184700	1978	2017	40	271.75	272.01	-0.26
uw38067	690182	184885	2000	2017	18	272.75	273.23	-0.48
uw38085	691460	184415	1990	2017	28	270.91	271.22	-0.31
uw3810	691848	185478	1963	2017	55	272.02	272.06	-0.05
uw38101	690644	184252	1965	2016	52	271.07	271.54	-0.46
uw38105	689978	184188	1965	2015	51	271.62	271.79	-0.17
uw38109	692467	185099	1975	2017	43	269.97	270.04	-0.07
uw3812	690002	186198	1985	2017	33	275.23	275.95	-0.72
uw38122	691650	183739	1976	2017	42	269.06	270.10	-1.04
uw38144	692523	183687	1975	2017	43	268.09	268.02	0.07
uw38183	691037	182712	1963	2017	54	268.55	268.94	-0.39
uw38184	689011	182930	1990	2017	28	266.94	266.71	0.23
uw38186	689379	182289	1990	2017	28	265.76	265.98	-0.23
uw38188	690170	182833	1990	2016	27	268.29	269.04	-0.75
uw38203	689388	181683	1975	2017	43	264.82	263.85	0.97
uw38209	691906	182698	1976	2017	42	266.61	266.57	0.04
uw3826	690469	180515	1964	2017	54	263.27	262.67	0.61
uw38282	690116	179782	1990	2016	27	262.11	261.09	1.02
uw38301	691701	181269	1990	2017	28	263.20	263.35	-0.15
uw3832	690972	180484	1975	2017	43	261.79	261.35	0.44

HLA_NR	BMN_RW	BMN_HW	ZR_von	ZR_bis	Anz_Jahre	HW100Mess	HW100Mod	HW100Diff
uw3834	690755	181220	1985	2017	33	264.63	265.12	-0.49
uw38341	690512	181399	1996	2017	22	265.12	265.29	-0.17

Tabelle 8: Modellgebiet Westliches Leibnitzer Feld: berechnete NGW100 – Werte an den geeigneten Messstellen aus den Messdaten des Hydrografischen Dienstes und Differenzen zu Grundwasserextremwerten aus den Modellberechnungsergebnissen

HLA_NR	BMN_RW	BMN_HW	ZR_von	ZR_bis	Anz_Jahre	NW100Mess	NW100Mod	NW100Diff
uw37685	688637	189877	1991	2017	27	284.25	283.11	1.15
uw37843	688955	188379	1981	2017	37	275.90	276.00	-0.09
uw3786	687959	187927	1965	2017	53	278.15	277.30	0.85
uw37861	688315	188267	1980	2017	38	278.25	277.48	0.77
uw37864	688509	187255	1977	2016	40	274.85	274.39	0.46
uw3788	689925	188522	1985	2017	33	276.41	276.20	0.21
uw3790	688058	186184	1978	2017	40	273.22	272.86	0.37
uw37905	688379	186346	1984	2017	34	273.40	273.12	0.28
uw3792	690421	188897	1966	2017	52	276.79	277.03	-0.24
uw37962	691193	187222	1990	2017	28	273.20	272.55	0.65
uw3798	691975	187468	1966	2016	51	271.50	271.58	-0.08
uw38002	691570	186317	1990	2017	28	270.87	270.42	0.45
uw3802	687895	186823	1977	2017	41	273.84	273.65	0.20
uw3806	690581	185521	1961	2017	57	271.05	270.24	0.81
uw38066	689377	184700	1978	2017	40	269.49	269.29	0.20
uw38067	690182	184885	2000	2017	18	269.45	269.05	0.39
uw38085	691460	184415	1990	2017	28	267.93	267.99	-0.06
uw3810	691848	185478	1963	2017	55	269.03	269.23	-0.20
uw38101	690644	184252	1965	2016	52	267.87	267.56	0.31
uw38105	689978	184188	1965	2015	51	267.33	267.03	0.30
uw38109	692467	185099	1975	2017	43	268.85	268.74	0.11
uw3812	690002	186198	1985	2017	33	272.29	271.93	0.36
uw38122	691650	183739	1976	2017	42	267.41	267.11	0.30
uw38144	692523	183687	1975	2017	43	266.34	266.89	-0.55
uw38183	691037	182712	1963	2017	54	265.76	265.07	0.69
uw38184	689011	182930	1990	2017	28	264.92	264.79	0.13
uw38186	689379	182289	1990	2017	28	263.71	263.30	0.41
uw38188	690170	182833	1990	2016	27	265.47	265.11	0.35
uw38203	689388	181683	1975	2017	43	261.65	261.51	0.14
uw38209	691906	182698	1976	2017	42	264.70	264.52	0.18
uw3822	691639	181902	1985	2017	33	264.95	263.85	1.09
uw3826	690469	180515	1964	2017	54	260.40	260.52	-0.13
uw38282	690116	179782	1990	2016	27	259.37	259.80	-0.43
uw38301	691701	181269	1990	2017	28	261.32	261.70	-0.38
uw3832	690972	180484	1975	2017	43	260.25	260.40	-0.16
uw3834	690755	181220	1985	2017	33	262.00	261.91	0.10
uw38341	690512	181399	1996	2017	22	262.53	262.10	0.43

Tabelle 9: Modellgebiet Unteres Murtal: berechnete HW100 – Werte an den geeigneten Messstellen aus den Messdaten des Hydrografischen Dienstes und Differenzen zu Grundwasserextremwerten aus den Modellberechnungsergebnissen

HLA_NR	BMN_RW	BMN_HW	ZR_von	ZR_bis	Anz_Jahre	HW100Mess	HW100Mod	HW100Diff
uw38251	692287	180426	1984	2017	34	260.03	259.86	0.16
uw3829	692441	178833	1980	2017	38	257.49	257.60	-0.10
uw38315	692747	178977	1980	2017	38	257.50	258.14	-0.64
uw3833	693743	179159	1965	2017	53	257.60	258.86	-1.26
uw3835	694878	178378	1972	2017	46	255.73	256.91	-1.18
uw38352	695129	179326	1982	2017	36	256.69	258.42	-1.73
uw38371	692912	177007	1998	2017	19	255.98	254.94	1.04
uw3839	694180	176757	1984	2017	34	253.40	252.95	0.45
uw38391	694993	177049	1984	2017	34	253.35	253.88	-0.53
uw38412	695704	178612	1972	2010	39	255.70	255.70	0.00
uw38415	695592	176783	1984	2017	34	253.01	253.28	-0.27
uw38416	695906	177517	1966	2017	52	254.02	254.53	-0.52
uw38456	696323	176204	1978	2017	40	250.71	251.49	-0.78
uw3847	696526	174936	1984	2017	34	249.17	249.83	-0.67
uw38511	698203	174983	1976	2017	42	247.47	247.78	-0.31
uw38513	698598	174428	2003	2017	15	246.52	246.77	-0.25
uw38553	698082	176250	1988	2017	30	249.35	250.98	-1.64
uw38575	700109	176943	1982	2017	36	250.64	251.99	-1.35
uw3859	699387	175003	1975	2017	43	246.12	245.65	0.47
uw38592	699924	174603	2000	2017	18	244.62	243.99	0.63
uw38595	699588	175874	1982	2017	36	247.08	247.82	-0.74
uw3861	701559	173774	1983	2013	31	241.14	241.31	-0.17
uw38612	701095	173846	2000	2016	17	242.06	242.32	-0.27
uw38615	702701	174483	1982	2017	36	240.96	241.08	-0.12
uw38632	701183	174966	1979	2017	39	244.02	243.81	0.22
uw3865	701560	176212	1976	2017	42	245.75	245.14	0.61
uw38653	702110	175571	1982	2017	36	243.29	243.61	-0.32
uw38671	703021	177239	1976	2017	42	243.60	245.03	-1.43
uw38672	703717	177358	2000	2017	18	246.09	244.62	1.48
uw3869	702218	176216	1976	2017	42	244.81	244.33	0.48
uw3871	703904	173851	2003	2017	15	239.36	238.26	1.10
uw38712	703058	173234	2003	2017	15	241.63	240.50	1.12
uw38715	703938	175060	1982	2017	36	240.91	240.86	0.04
uw3873	704308	175767	1966	2017	52	241.63	241.43	0.20
uw38735	703745	176252	1982	2017	36	242.74	242.73	0.00
uw38736	703723	176248	1986	2017	32	242.80	242.75	0.05
uw38752	704855	177101	1997	2017	21	243.77	242.63	1.14
uw3877	705747	173764	1966	2017	52	236.40	236.35	0.05
uw38771	706111	173485	2003	2017	15	237.42	236.24	1.18
uw38775	705100	175441	1982	2017	36	239.89	239.94	-0.06
uw3879	706750	176401	1966	2009	44	239.06	237.70	1.37
uw38794	707267	174878	2003	2017	15	235.68	234.81	0.88

HLA_NR	BMN_RW	BMN_HW	ZR_von	ZR_bis	Anz_Jahre	HW100Mess	HW100Mod	HW100Diff
uw38795	706713	177077	1982	2017	36	240.11	239.11	0.99
uw38796	707174	173760	2003	2017	15	234.71	232.88	1.83
uw38811	709186	175454	1980	2017	38	228.38	228.96	-0.58
uw38812	708107	175955	1982	2017	36	234.18	233.40	0.78
uw3883	708719	176769	1966	2017	52	233.65	232.15	1.50
uw3885	708156	177874	1966	2017	52	238.58	237.64	0.94
uw38911	710479	176513	1971	2017	47	228.27	227.77	0.49
uw38913	712419	176328	1988	2017	30	223.77	224.04	-0.27
uw389131	711678	176255	1994	2017	24	225.86	225.64	0.22
uw38916	711912	177160	1987	2016	30	227.29	227.50	-0.21
uw389161	712148	177844	1994	2017	15	228.78	230.64	-1.87
uw38931	713159	176884	1968	2017	50	224.33	223.89	0.44
uw38933	714565	176439	1988	2017	30	221.29	221.50	-0.21
uw38952	713456	177950	1974	2017	44	227.78	227.64	0.14
uw38971	714527	177586	1974	2017	44	224.90	224.18	0.72
uw38993	715589	176830	2000	2017	18	221.92	221.21	0.71
uw3901	716359	175134	2001	2017	17	221.11	219.08	2.03
uw3903	716963	175552	1981	2017	37	218.25	217.64	0.61
uw3905	717259	176022	1961	2017	57	218.00	217.66	0.34
uw39073	718494	176555	1988	2016	29	217.60	217.31	0.28
uw39114	718464	175292	1966	2017	52	216.02	215.49	0.53
uw39116	719350	173819	1988	2017	30	214.20	213.53	0.67
uw391161	719729	174147	1994	2017	24	214.40	213.11	1.30
uw391163	719261	173507	2000	2017	18	215.48	214.44	1.04
uw39118	720336	175605	1982	2017	36	213.89	213.83	0.07
uw3913	720172	174608	1966	2017	52	213.45	213.02	0.43
uw39133	722165	173519	1966	2017	52	210.25	209.47	0.78
uw39139	721839	174764	1980	2017	38	211.87	211.49	0.39
uw3915	724042	173350	1966	2017	52	207.55	207.00	0.55
uw39153	723024	174471	1976	2017	42	210.08	209.61	0.47
uw39157	723261	171848	1988	2015	28	209.64	208.40	1.24
uw3917	724886	172186	1966	2017	52	205.41	205.20	0.20
uw39191	726155	174098	1981	2017	37	208.20	206.89	1.31
uw39217	725620	175334	2000	2017	15	211.60	210.37	1.23
uw39251	727631	171135	2004	2017	14	202.40	201.50	0.90
uw3927	726815	171251	1976	2017	42	203.25	202.69	0.56
uw3929	724716	173450	1982	2017	36	207.26	206.99	0.27
uw3931	724883	171231	1988	2017	30	204.87	204.14	0.74
uw39311	725987	171625	1994	2017	21	205.18	204.06	1.12
uw3933	725729	170712	1988	2017	30	204.18	203.10	1.08
uw39331	726139	170171	1994	2017	23	203.34	202.02	1.32
uw3935	726579	169541	1988	2017	30	202.23	200.65	1.58
uw3937	725696	169422	2000	2017	18	205.26	203.85	1.42
uw3939	727074	168852	2000	2014	15	203.61	201.41	2.20

Tabelle 10: Modellgebiet Unteres Murtal: berechnete NGW100 – Werte an den geeigneten Messstellen aus den Messdaten des Hydrografischen Dienstes und Differenzen zu Grundwasserextremwerten aus den Modellberechnungsergebnissen

HLA_NR	BMN_RW	BMN_HW	ZR_von	ZR_bis	Anz_Jahre	NW100Mess	NW100Mod	NW100Diff
uw38251	692287	180426	1984	2017	34	258.01	258.75	-0.75
uw3829	692441	178833	1980	2017	38	255.37	255.28	0.08
uw38315	692747	178977	1980	2017	38	255.20	255.31	-0.11
uw3833	693743	179159	1965	2017	53	254.69	254.59	0.09
uw3835	694878	178378	1972	2017	46	252.96	253.46	-0.50
uw38352	695129	179326	1982	2017	36	254.36	254.47	-0.11
uw38371	692912	177007	1998	2017	19	253.31	253.62	-0.31
uw3839	694180	176757	1984	2017	34	251.43	252.01	-0.58
uw38391	694993	177049	1984	2017	34	251.54	251.77	-0.23
uw38412	695704	178612	1972	2010	39	253.04	253.64	-0.60
uw38415	695592	176783	1984	2017	34	250.59	250.78	-0.18
uw38416	695906	177517	1966	2017	52	251.48	251.66	-0.18
uw38456	696323	176204	1978	2017	40	248.56	248.98	-0.42
uw3847	696526	174936	1984	2017	34	245.92	246.02	-0.10
uw38511	698203	174983	1976	2017	42	244.94	244.91	0.03
uw38553	698082	176250	1988	2017	30	245.59	246.36	-0.77
uw38575	700109	176943	1982	2017	36	247.03	246.24	0.79
uw3859	699387	175003	1975	2017	43	243.93	243.38	0.54
uw38592	699924	174603	2000	2017	18	241.62	241.85	-0.23
uw38595	699588	175874	1982	2017	36	243.69	243.81	-0.12
uw38612	701095	173846	2000	2016	17	239.53	239.73	-0.20
uw38615	702701	174483	1982	2017	36	237.74	238.29	-0.55
uw38632	701183	174966	1979	2017	39	240.33	240.49	-0.16
uw3865	701560	176212	1976	2017	42	239.63	239.97	-0.34
uw38653	702110	175571	1982	2017	36	238.91	239.32	-0.41
uw38671	703021	177239	1976	2017	42	239.57	238.94	0.63
uw38672	703717	177358	2000	2017	18	237.56	238.55	-0.99
uw3869	702218	176216	1976	2017	42	238.93	239.31	-0.38
uw3871	703904	173851	2003	2017	15	236.11	236.03	0.08
uw38712	703058	173234	2003	2017	15	235.58	235.07	0.52
uw38715	703938	175060	1982	2017	36	236.26	236.78	-0.52
uw3873	704308	175767	1966	2017	52	236.33	236.65	-0.32
uw38735	703745	176252	1982	2017	36	237.17	237.55	-0.38
uw38736	703723	176248	1986	2017	32	237.07	237.57	-0.50
uw38752	704855	177101	1997	2017	21	237.19	237.17	0.02
uw3877	705747	173764	1966	2017	52	233.19	233.29	-0.11
uw38771	706111	173485	2003	2017	15	231.83	231.50	0.33
uw38775	705100	175441	1982	2017	36	235.39	235.49	-0.10
uw3879	706750	176401	1966	2009	44	233.24	233.27	-0.03
uw38794	707267	174878	2003	2017	15	230.98	231.28	-0.31
uw38795	706713	177077	1982	2017	36	234.87	235.05	-0.18
uw38796	707174	173760	2003	2017	15	230.31	230.34	-0.03

HLA_NR	BMN_RW	BMN_HW	ZR_von	ZR_bis	Anz_Jahre	NW100Mess	NW100Mod	NW100Diff
uw38812	708107	175955	1982	2017	36	230.03	230.35	-0.33
uw3885	708156	177874	1966	2017	52	233.18	233.02	0.16
uw38911	710479	176513	1971	2017	47	224.80	224.82	-0.02
uw38913	712419	176328	1988	2017	30	221.02	220.89	0.13
uw389131	711678	176255	1994	2017	24	222.31	221.60	0.70
uw38916	711912	177160	1987	2016	30	223.35	222.82	0.53
uw389161	712148	177844	1995	2017	15	225.55	224.61	0.94
uw38931	713159	176884	1968	2017	50	221.26	220.78	0.47
uw38933	714565	176439	1988	2017	30	217.68	217.53	0.15
uw38952	713456	177950	1974	2017	44	223.85	222.22	1.63
uw38971	714527	177586	1974	2017	44	219.45	219.21	0.24
uw38993	715589	176830	2000	2017	18	216.74	216.77	-0.04
uw3901	716359	175134	2001	2017	17	214.34	214.22	0.12
uw3903	716963	175552	1981	2017	37	214.41	214.33	0.08
uw3905	717259	176022	1961	2017	57	214.77	214.50	0.28
uw39073	718494	176555	1988	2016	29	213.76	214.20	-0.44
uw39114	718464	175292	1966	2017	52	212.70	212.96	-0.26
uw39116	719350	173819	1988	2017	30	210.64	210.61	0.03
uw391161	719729	174147	1994	2017	24	210.42	210.69	-0.27
uw391163	719261	173507	2000	2017	18	210.22	210.19	0.03
uw39118	720336	175605	1982	2017	36	211.18	211.64	-0.46
uw3913	720172	174608	1966	2017	52	210.62	210.70	-0.09
uw39133	722165	173519	1966	2017	52	207.57	207.54	0.03
uw39139	721839	174764	1980	2017	38	208.60	209.02	-0.41
uw3915	724042	173350	1966	2017	52	204.39	204.95	-0.56
uw39153	723024	174471	1976	2017	42	206.56	206.87	-0.32
uw39157	723261	171848	1988	2015	28	203.99	203.99	0.00
uw3917	724886	172186	1966	2017	52	202.27	203.02	-0.75
uw39191	726155	174098	1981	2017	37	203.78	203.61	0.17
uw39217	725620	175334	2000	2017	15	208.71	208.29	0.42
uw3923	726928	172458	1968	2017	50	201.38	201.72	-0.33
uw39251	727631	171135	2004	2017	14	199.60	199.94	-0.35
uw3927	726815	171251	1976	2017	42	200.49	200.66	-0.17
uw3929	724716	173450	1982	2017	36	203.70	204.12	-0.42
uw3931	724883	171231	1988	2017	30	202.06	202.02	0.05
uw39311	725987	171625	1994	2017	21	200.91	201.64	-0.73
uw3933	725729	170712	1988	2017	30	201.17	201.14	0.02
uw39331	726139	170171	1994	2017	23	199.81	200.03	-0.22
uw3935	726579	169541	1988	2017	30	198.37	198.54	-0.17
uw3937	725696	169422	2000	2017	18	198.84	198.85	-0.01
uw3939	727074	168852	2000	2014	15	197.18	197.08	0.09

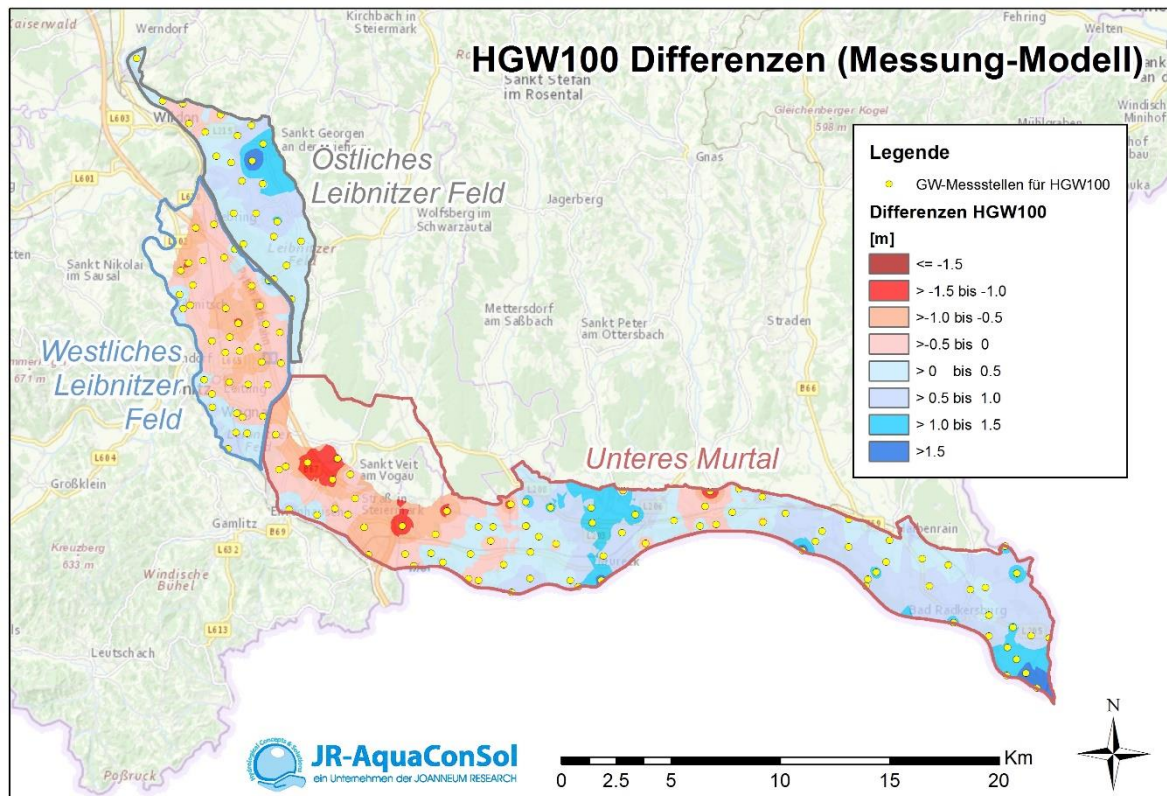


Abbildung 58: Interpolierter Korrekturraster für den Abgleich der HGW100 Werte aus dem Grundwassermodell mit den HGW100 Werten an den Grundwasserstandsmessstellen in den Modellgebieten

Für die Erstellung der Karten der zu erwartenden Grundwasserspiegelextremwerte in den untersuchten Modellgebieten wurden die Differenzen der HGW100 und der NGW100 Werte aus den Messdaten der Messstellen des Hydrographischen Dienstes des Landes Steiermark und der berechneten Extremwerte aus den numerischen Grundwasserströmungsmodellen an denselben Beobachtungspunkten berechnet (siehe Tabelle 5 bis Tabelle 10). Diese Differenzen resultieren in erster Linie daher, dass die langjährig instationär kalibrierten Grundwasserströmungsmodelle nicht auf eine möglichst korrekte Wiedergabe der Jahresextremwerte, sondern auf mittlere Grundwasserspiegellagen kalibriert wurden.

Diese berechneten Unterschiede an den Messstellen wurden mittels Kriging – Interpolation als Raster für die Grundwassermodellgebiete generiert. Die interpolierten Differenzen zwischen den aus den Messdaten und den Modelldaten berechneten Grundwasserspiegelextremwerten (Messung – Modell) sind für die extremen Grundwasserhochstände in Abbildung 58, für die extremen Grundwassertiefstände in Abbildung 59 dargestellt. Für die notwendige Korrektur der aus den Modellergebnissen berechneten Grundwasserspiegelextremwerte um zu einer Angleichung an die aus den Messdaten berechneten Grundwasserspiegelextremwerte zu gelangen bedeutet dies, dass in den blau ausgewiesenen Flächen eine Anhebung, in den rot ausgewiesenen Flächen eine Absenkung der Modellberechnungsergebnisse erfolgen muss.

Durch dieses Verfahren wird gewährleistet, dass an den langfristig beobachteten Grundwasserstandsmessstellen die aus den Messdaten abgeleiteten zu erwartenden Grundwasserspiegelextremwerte für die flächenhafte Auswertung verwendet werden, in den Bereichen zwischen den Grundwasserstandsmessstellen die Ergebnisse der aus dem

Grundwassermodell berechneten Grundwasserextremwerte die Form der zu erwartenden extremen Grundwasserspiegeloberfläche vorgeben, diese aber auf Basis der Messdaten korrigiert ist.

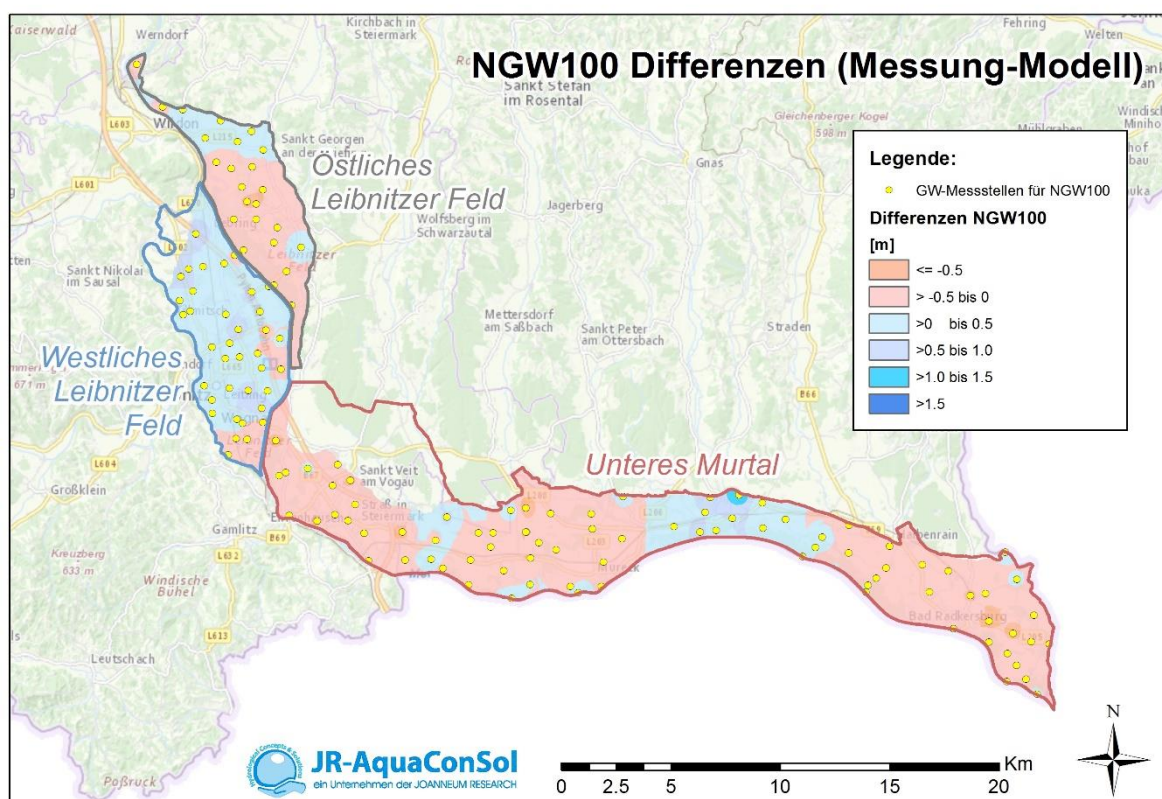


Abbildung 59: Interpolierter Korrekturraster für den Abgleich der NGW100 Werte aus dem Grundwassermodell mit den NGW100 Werten an den Grundwasserstandsmessstellen in den Modellgebieten

9.3 Verteilung der HGW100- und NGW100-Grundwasserspiegellagen sowie des resultierenden Flurabstandes und der gesättigten Mächtigkeit

Durch die Addition der Raster der aus dem Grundwassermodell berechneten Extremwerte der Grundwasserspiegel und der interpolierten Differenzen zwischen den aus Messdaten und den aus den Modellergebnissen berechneten Grundwasserspiegel extremwerten wird für die Modellgebiete Nordöstliches Leibnitzer Feld, Westliches Leibnitzer Feld und Unteres Murtal eine korrigierte Oberfläche zu erwartender extremer Grundwasserspiegelniedrigststände und zu erwartender extremer Grundwasserspiegelniedrigststände mit einem jeweiligen Wiederkehrintervall von 100 Jahren berechnet.

Wenn bei der Ermittlung der HGW100- bzw. der NGW100-Grundwasserspiegellagen die Geländeoberkante überschritten (im Fall von HGW100) bzw. die Staueroberkante unterschritten (im Fall von NGW100) werden, werden diese Flächen in den jeweiligen Kartendarstellungen der Grundwassermächtigkeiten bzw. Flurabstände durch eine eigene Kategorie berücksichtigt und die Isolinien der Grundwasserextremlagen in diesen Bereichen unterbrochen.

Abbildung 60 und Abbildung 61 zeigen die resultierenden Isolinien des maximalen Grundwasserspiegels mit einer 100-jährigen Auftretenswahrscheinlichkeit (HGW100) sowie die

dazugehörigen Grundwassermächtigkeiten bzw. Flurabstände im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld. Es ist zu erkennen, dass der HGW100-Grundwasserspiegel im Zentralbereich und im Süden des Östlichen Leibnitzer Feldes höher liegt als die Geländeoberkante. Im Westlichen Leibnitzer Feld trifft dies auf den Sulmspitz zu, wo die Sulm in die Mur einmündet. In den diesen Bereichen wurden ebenfalls bei der Darstellung der Grundwassermächtigkeit die Isolinien des HGW100-Grundwasserspiegels unterbrochen. Die Berechnung der Grundwassermächtigkeit in diesen Flächen wurde mit der Geländeoberkante begrenzt. In den Aubereichen liegen die Flurabstände lediglich zwischen 0 m und 1 m. Die höchsten Flurabstände bzw. Grundwassermächtigkeiten werden in der Regel vom Geländere relief bestimmt (z.B. Niederterrasse des Östlichen Leibnitzer Feldes). Geringe Grundwassermächtigkeiten sind dagegen eine Folge von Stauerhochlagen (siehe dazu auch Abbildung 2).

In Abbildung 62 und Abbildung 63 sind die die resultierenden Isolinien des minimalen Grundwasserspiegels mit einer 100-jährigen Auftretenswahrscheinlichkeit (NGW100) sowie die dazugehörigen Grundwassermächtigkeiten und Flurabstände im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld dargestellt. Ein Trockenfallen des Grundwasserleiters (Unterschreitung der Stauerlage durch den NGW100-Grundwasserspiegel) ist nur in 2 kleinen Teilflächen am Ostrand des Östlichen Leibnitzer Feldes festzustellen. Bis auf einige wenige isolierte Bereiche ist die verbleibende Restmächtigkeit des Grundwasserleiters bei NGW100-Grundwasserspiegellage größer als 1 m. Die Flurabstände zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen Auegebieten und Niederterrasse. Diese liegen selbst unter diesen Bedingungen in den Auegebieten unter 3 m, wohingegen diese auf der Niederterrasse häufig zumindest 5 m betragen und am Ostrand des Östlichen Leibnitzer Feldes auch Werte über 10 m erreichen können.

Abbildung 64 und Abbildung 65 zeigen die resultierenden Isolinien des maximalen Grundwasserspiegels mit einer 100-jährigen Auftretenswahrscheinlichkeit (HGW100) sowie die dazugehörigen Grundwassermächtigkeiten bzw. Flurabstände im Grundwasserkörper Unteres Murtal. Es ist deutlich zu erkennen, dass der HGW100-Grundwasserspiegel in weiten Teilen des zentralen und östlichen Unteren Murtals höher als die Geländeoberkante liegt. Nur im westlichen Teil des Unteren Murtals gibt es zusammenhängende Bereiche mit einem Flurabstand bis ca. 5 m. Die höchsten Grundwassermächtigkeiten mit Werten größer als 9 m entstehen am nördlichen Rand im zentralen Modellgebiet während entlang der Mur die geringsten Grundwassermächtigkeiten (werte um ca. 3 m) zu finden sind.

In Abbildung 66 und Abbildung 67 sind die die resultierenden Isolinien des minimalen Grundwasserspiegels mit einer 100-jährigen Auftretenswahrscheinlichkeit (NGW100) sowie die dazugehörigen Grundwassermächtigkeiten und Flurabstände im Grundwasserkörper Unteres Murtal dargestellt. Entlang der Mur und im östlichen Teil des Unteren Murtals bleibt der Flurabstand selbst bei einer NGW100-Grundwasserpiegellage kleiner als 3 m. Im Bereich zwischen Prillinghof und Halt finden sich die größten Flurabstände von bis zu 8 m. Die Grundwassermächtigkeit bei der NGW100-Grundwasserpiegellage ist am geringsten entlang der Mur und am nordöstlichen Rand des Modellgebiets mit Werten zwischen 1 m und 2 m und erreicht ihre Höchstwerte in der Nähe von Oberraktisch mit ca. 9 m.

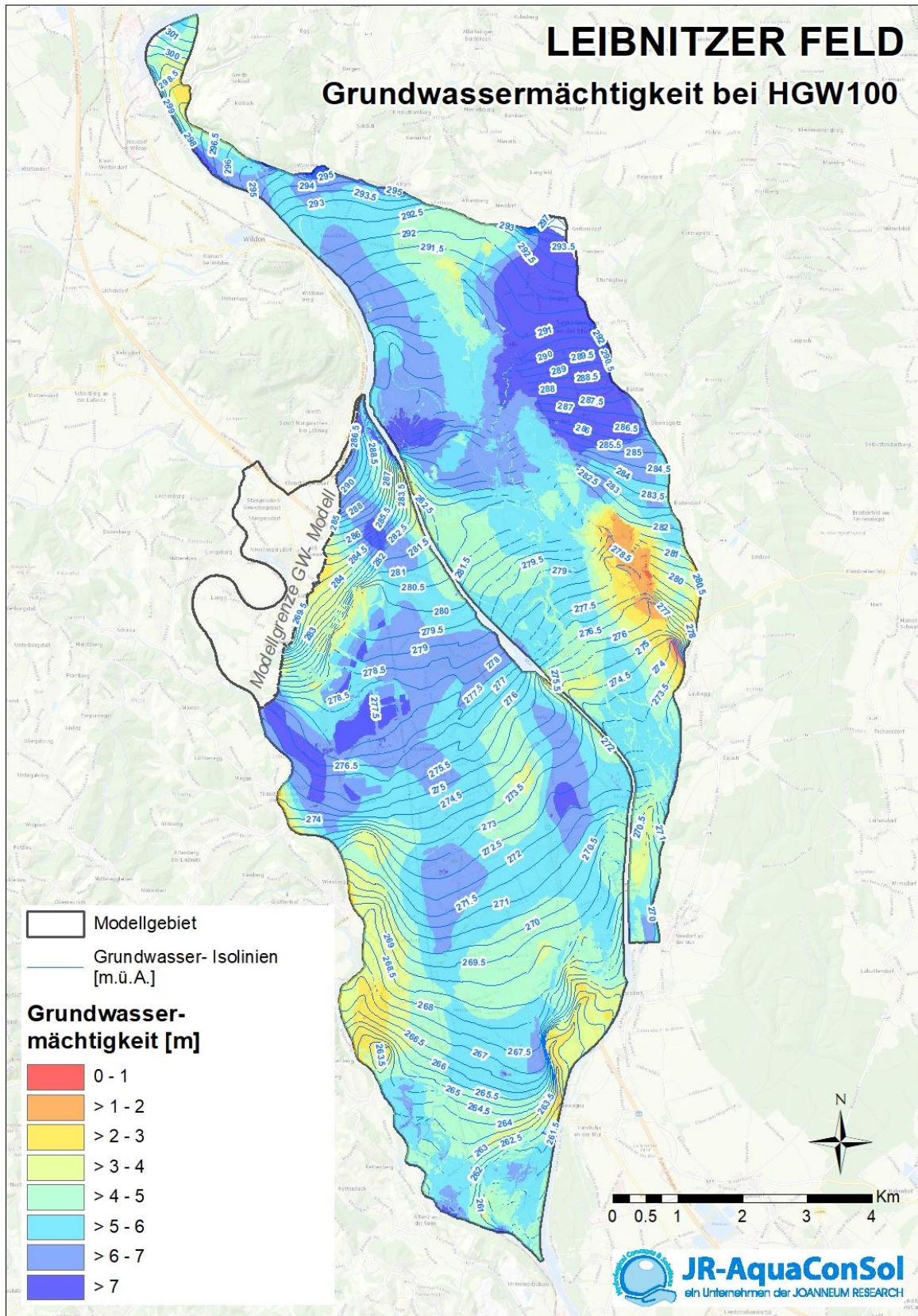


Abbildung 60: Grundwasserspiegellagen bei HGW100 und resultierende Grundwassermächtigkeit im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

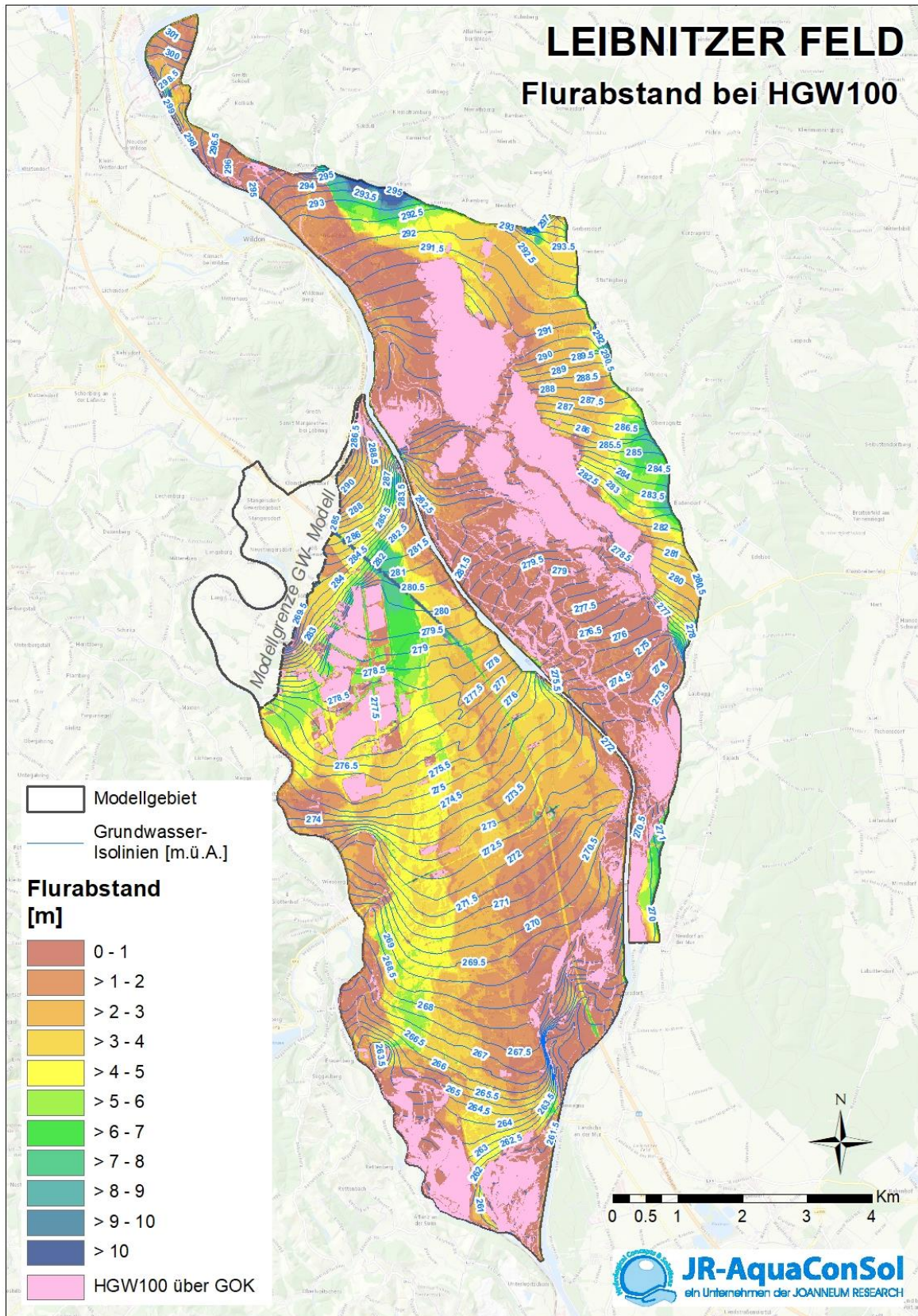


Abbildung 61: Grundwasserspiegellagen bei HGW100 und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

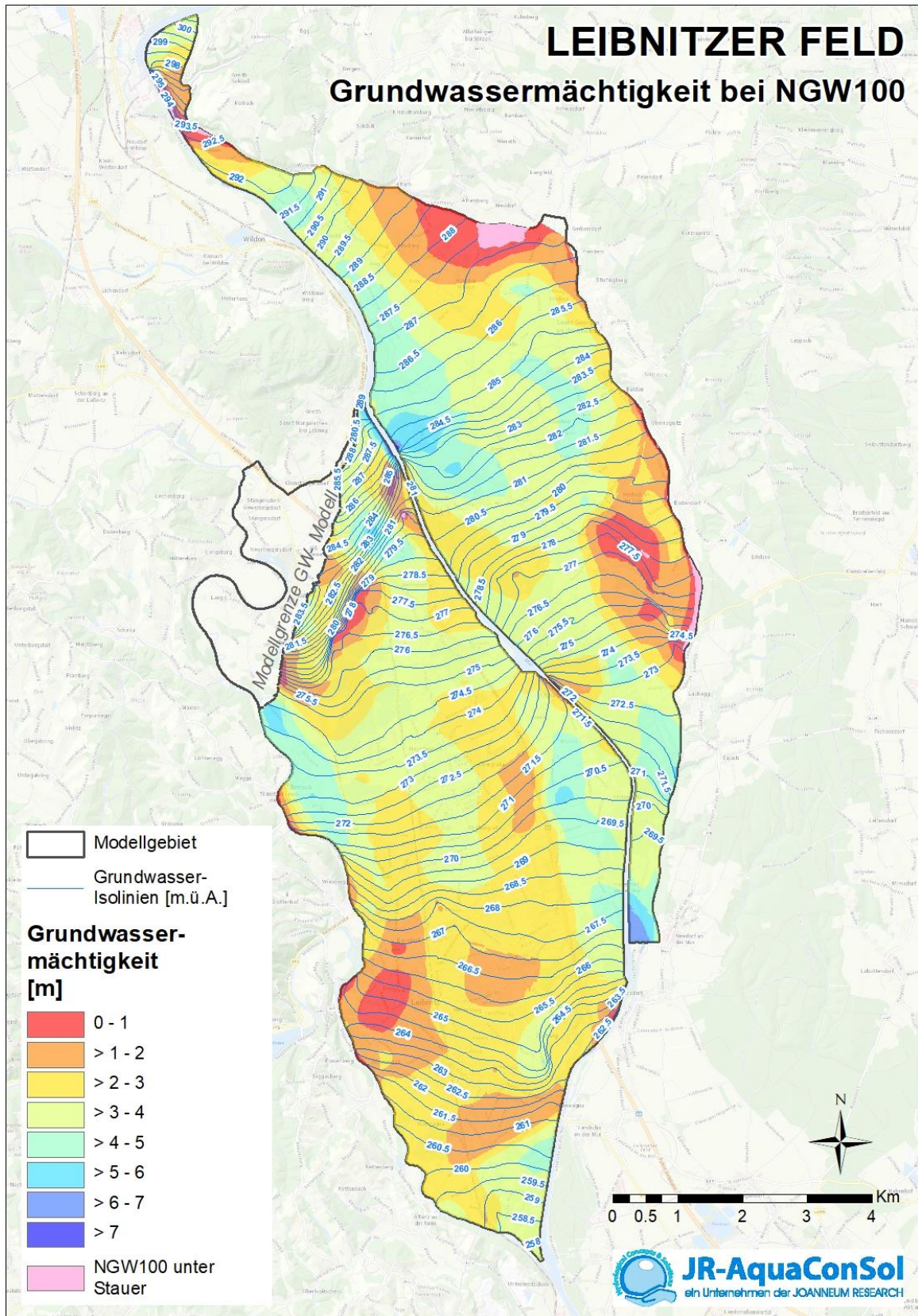


Abbildung 62: Grundwasserspiegellagen bei NGW100 und resultierende Grundwassermächtigkeit im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

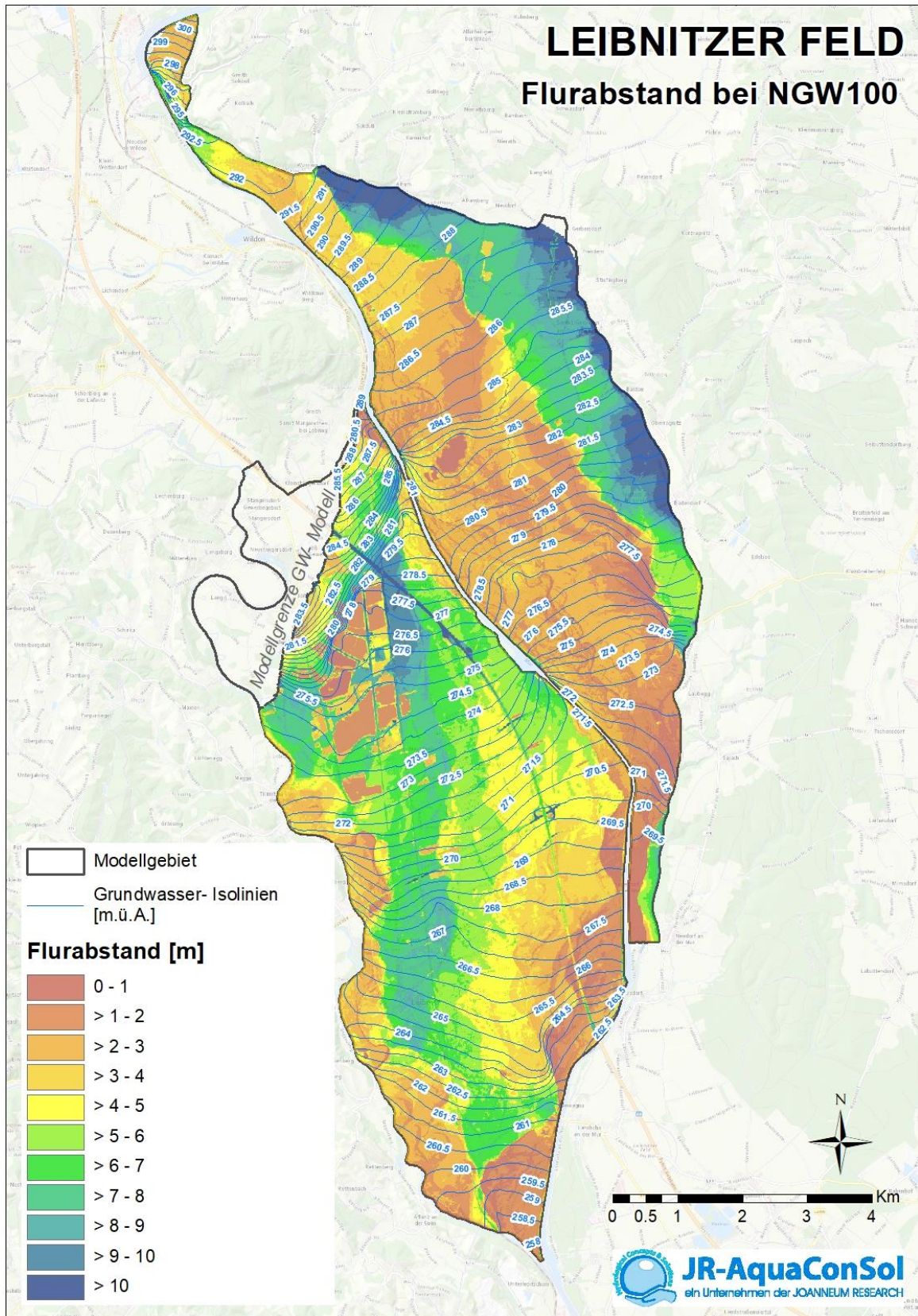


Abbildung 63: Grundwasserspiegellagen bei NGW100 und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Leibnitzer Feld

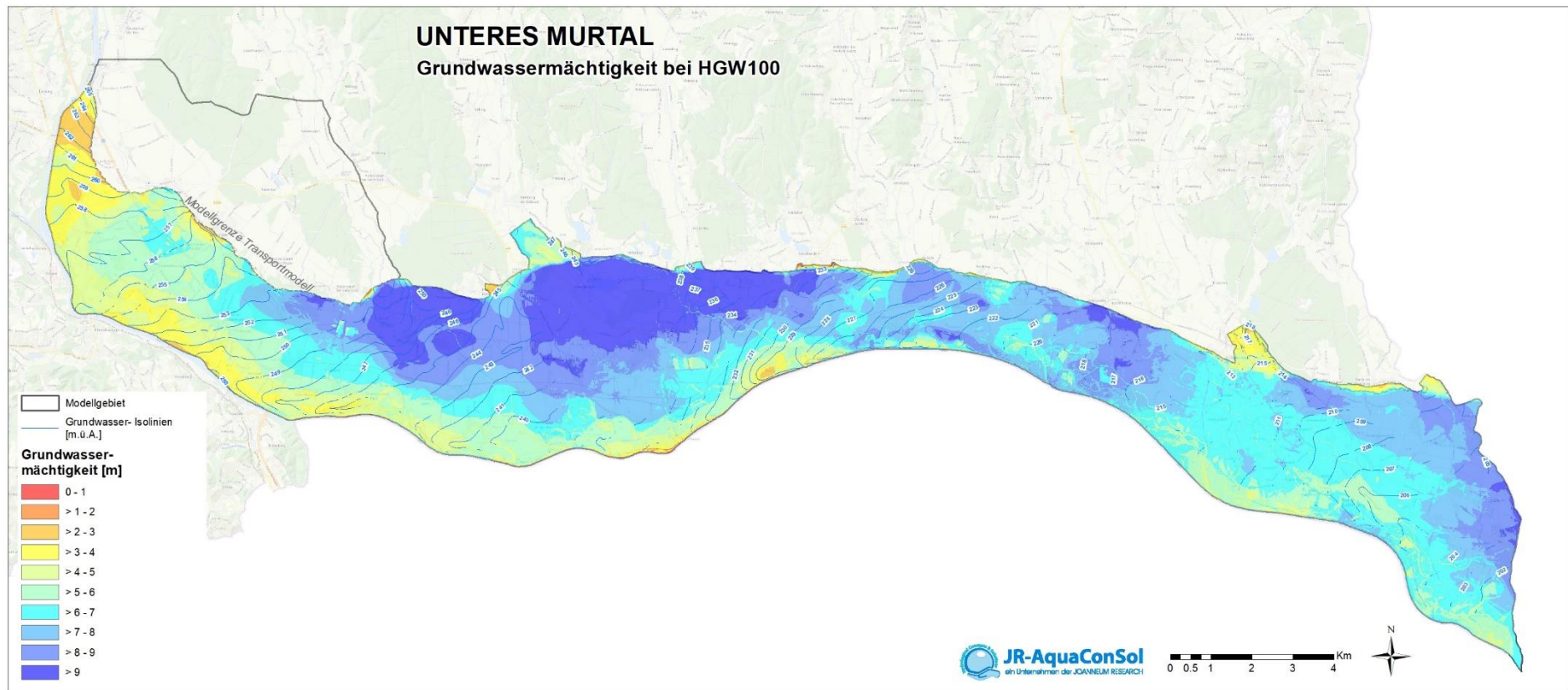


Abbildung 64: Grundwasserspiegellagen bei HGW100 und resultierende Grundwassermächtigkeit im Grundwasserkörper Untereres Murtal

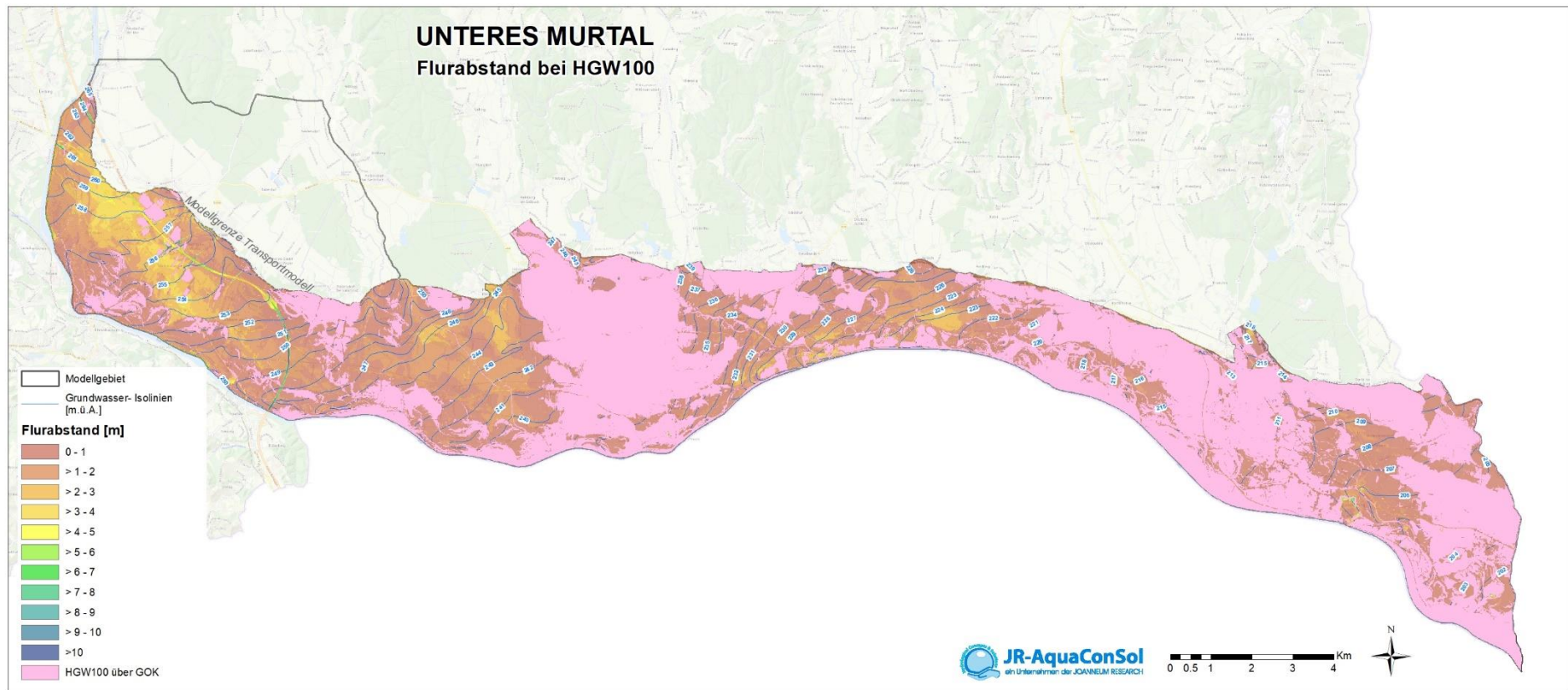


Abbildung 65: Grundwasserspiegellagen bei HGW100 und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Unteres Murtal

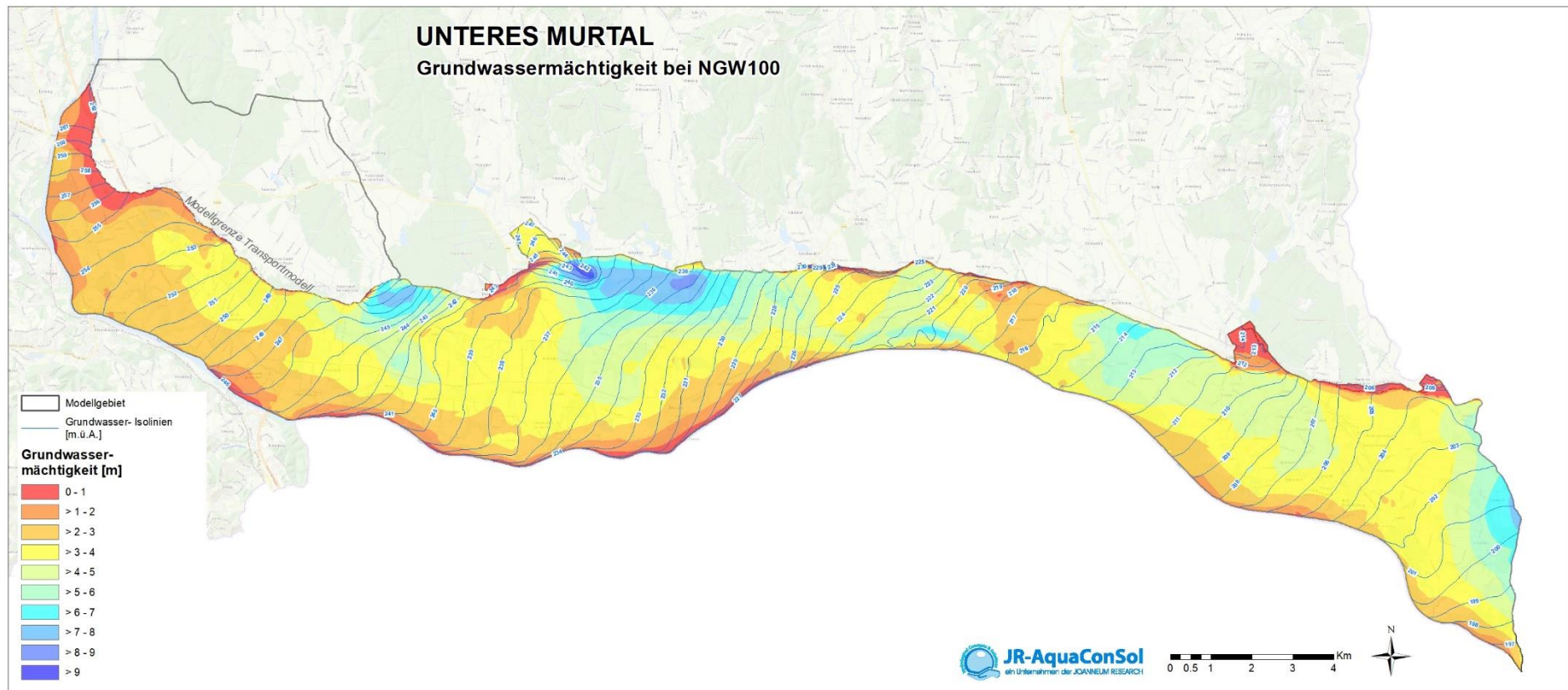


Abbildung 66: Grundwasserspiegellagen bei NGW100 und resultierende Grundwassermächtigkeit im Grundwasserkörper Unteres Murtal

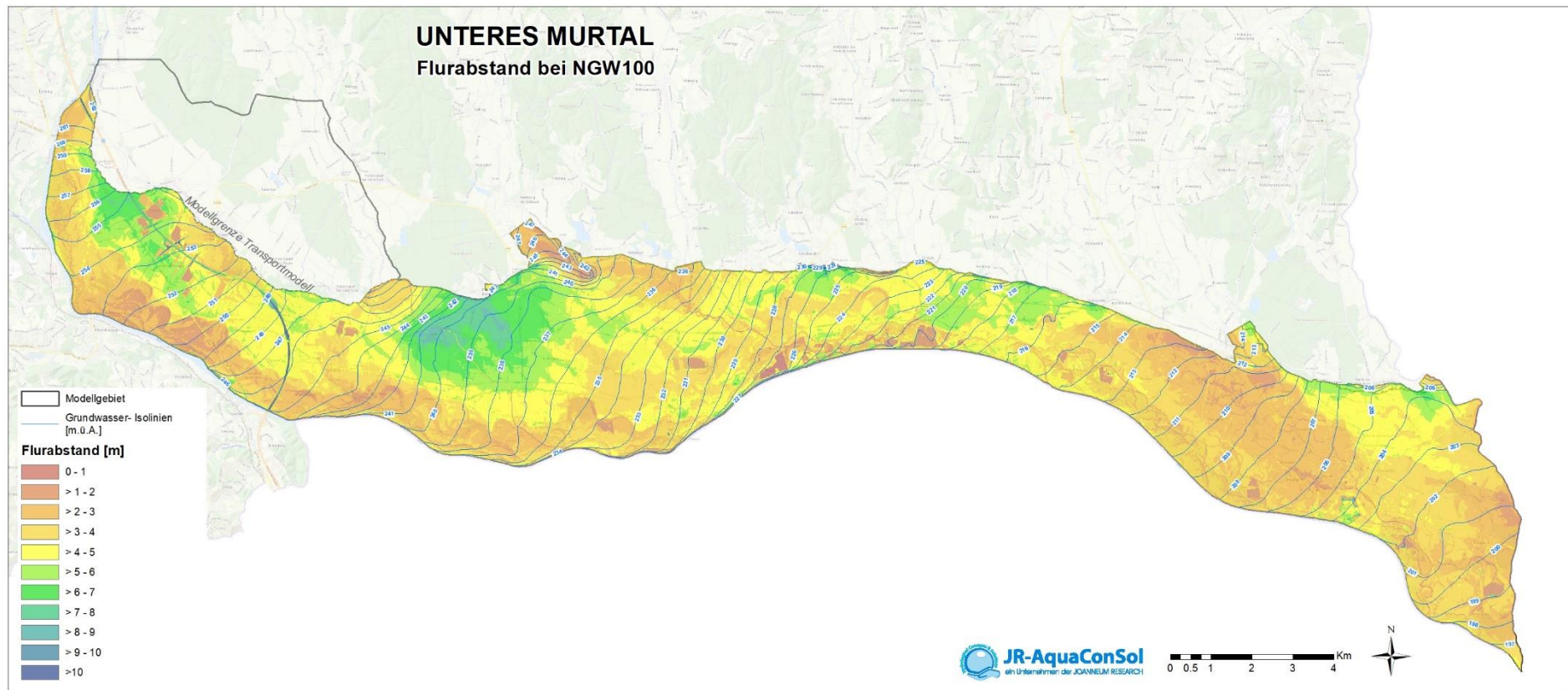


Abbildung 67: Grundwasserspiegellagen bei NGW100 und resultierender Grundwasserflurabstand im Grundwasserkörper Unteres Murtal



10 Literatur

- Allen, R., L.S Pereira, D. Raes & M. Smith (1998): Crop evapotranspiration – Guidelines for computing water requirements.- FAO Irrigation and Drainage Paper 56, 300 S, Rom
- Amt der Steiermärkischen Landesregierung (2018): Grundwasserschutzprogramm Graz bis Bad Radkersburg 2018, ausgegeben am 14. März 2018, LGBl. Nr. 24/2018, Graz.
- Ascott M.J., Marchant B.P., Macdonald D., McKenzie A.A., Bloomfield J.P. (2017): Improved understanding of spatio-temporal controls on regional scale groundwater flooding using hydro-graph analysis and impulse response functions, *Hydrological Processes*, 31, 4586-4599. doi:10.1002/hyp.11380
- Box G.E.P., & G.M. Jenkins (1976): *Time Series Analysis, Forecasting and Control*. 238 S., Holden-Day, San Francisco.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (1974): Österreichische Bodenkartierung – Erläuterungen zur Bodenkarte 1:25.000 (Kartierungsbereich Mureck und Radkersburg, Steiermark). Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Vienna, Austria
- Coles, S. (2001): *An introduction to statistical modeling of extreme values*. Springer Series in Statistics. Springer-Verlag.
- DHI-WASY, 2009, FEFLOW White Papers Vol. I, 368 Seiten
- Diersch HJG (2009) FEFLOW Reference Manual, DHI-WASY GmbH, Berlin
- eBOD (2004): Österreichische Bodenkartierung. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien.
- Fank J., Gombocz G., Leditzky H.P., Poltnig W., Reiss F. & G. Rock (1994): Grundwassermodell „Unteres Murtal“. Grundlagenerhebung. - Unveröff. Ber. d. Inst. f. Hydrogeologie und Geothermie der JOANNEUM RESEARCH, 57 S, Anhang A, Anhang B, 15 Beilagen, Graz.
- Fank J., Fuchs K., 1999, Anwendung der Extremwertstatistik in der Hydrologie von Porengrundwasservorkommen. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, 78, 31-45, Wien.
- Fank, J., G. Rock, K. Fuchs & A. Dalla-Via (2002): Grundwasserströmungs- und -transport-modell „Unteres Murtal“ zur Erfassung der regionalen Strömungsverhältnisse und der Interaktion von Oberflächenwässern mit dem Grundwasser in einem rezenten Augebiet (Schlussteil – Endbericht). Proj. Nr. STA 28C/99. Unveröff. Bericht Institut für Hydrogeologie und Geothermie, JOANNEUM RESEARCH, 186 S., Anhang, 12 Beilagen, Graz.
- Fank, J, & G. Rock (2011): Erstellung eines instationären Grundwasserströmungsmodells für das östliche Leibnitzer Feld Unveröff. Ber. JOANNEUM RESEARCH, RESOURCES Inst. f. Wasser, Energie und Nachhaltigkeit – Wasser Ressourcen Management, 78 S., Graz.
- Fank, J, Fank, G., Dalla-Via, A., Poltnig, W., Draxler J.C. & M. Plieschenegger (2008): Grundwasserströmungsmodell Marchfeld. Unveröff. Ber. JOANNEUM RESEARCH, RESOURCES Inst. f. Wasser, Energie und Nachhaltigkeit – Wasser Ressourcen Management, 117 S., Graz.
- Feichtinger, F. (1998): STOTRASIM -Ein Modell zur Simulation der Stickstoffdynamik in der ungesättigten Zone eines Ackerstandortes. Schriftenreihe des Bundesamtes für Wasserwirtschaft, 7, S. 14-41.

-
- Fürst J., Bichler A., Konecny F. (2014): Regional Frequency Analysis of Extreme Groundwater Levels, *Groundwater* 53(3), 414-423. doi: 10.1111/gwat.12223
- Grünwald, C. (2013): Die Bedeutung von detailliert bekannten Wetterdaten für die Modellierung des Bodenwasserhaushalts und des Stickstoffaustrags auf der regionalen Skala. Masterarbeit am Institut für Geographie und Raumforschung, 93 S.
- Hartung J. (1987): Statistik - Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. Oldenbourg, München.
- Katz R.W., Parlange M.B., Naveau P. (2002): Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources* 25, no. 8 – 12: 1287 – 1304.
- Kidmose J., Refsgaard, J.C., Troldborg, L., Seavy L.P., Escriva M.M. (2013): Climate change impact on groundwater levels: ensemble modelling of extreme values, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 1619–1634. doi:10.5194/hess-17-1619-2013
- Kinzelbach W., Numerische Methoden zur Modellierung des Transports von Schadstoffen im Grundwasser, Oldenbourg, München, 1987.
- Klammler, G. (2008): Climatic water balance of northern Dravsko polje (Slovenia) – Spatial distribution of the groundwater recharge from 2003 to 2007. Diplomarbeit an der Karl-Franzens-Universität Graz., 159 S.
- Klammler G, G. Rock, J. Fank & H. Kupfersberger (2012): Generating land use information to derive diffuse water and nitrate transfer as input for groundwater modelling at the aquifer scale. In: Oswald SE, Kolditz O, Attinger S (eds) *Models—repositories of knowledge*, ModelCARE2011, Leipzig/Germany, IAHS Publ 355, 237–242.
- Klammler, G., Kupfersberger, H. Rock G. Fank J. (2013): Modeling coupled unsaturated and saturated nitrate distribution of the aquifer Westliches Leibnitzer Feld, Austria. *Environ Earth Sci*, DOI 10.1007/s12665-013-2302-6.
- Kreibich H., Thieken A.H. (2008): Assessment of damage caused by high groundwater inundation. *Water Resources Research* 44(9), W09409.
- Kupfersberger, H., G. Rock, G. Klammler & Draxler, J. (2015): Grundwassermodell Gosdorf / Mureck. Unveröff. Ber. JOANNEUM RESEARCH, RESOURCES Inst. f. Wasser, Energie und Nachhaltigkeit, 35 S., Graz.
- Lilliefors, H.W. (1967); On the Kolmogorov-Smirnov test for normality with mean and variance unknown. *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 67, 399-402.
- Limberg A., Hörmann U., Verleger H. (2010): Modellentwicklung zur Berechnung des höchsten Grundwasserstandes im Land Berlin, *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge*, 17 1/2, S. 23-37.
- Mach, J. (2017): Modeling the use of small diameter wells for ground water recharge in a quaternary aquifer, M.Sc.- thesis, Universität Darmstadt, 77 Seiten.
- Madsen, H., Rasmussen, P.F., Rosbjerg, D. (1997): Comparison of annual maximum series and partial duration series methods for modelling extreme hydrologic events – 1. At-site modelling. *Water Resources Research* 33 (4), 747–757.
- Mann H.B., Whitne, D.R. (1947): On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *Annals of Mathematical Statistics* 18 (1), 50–60.

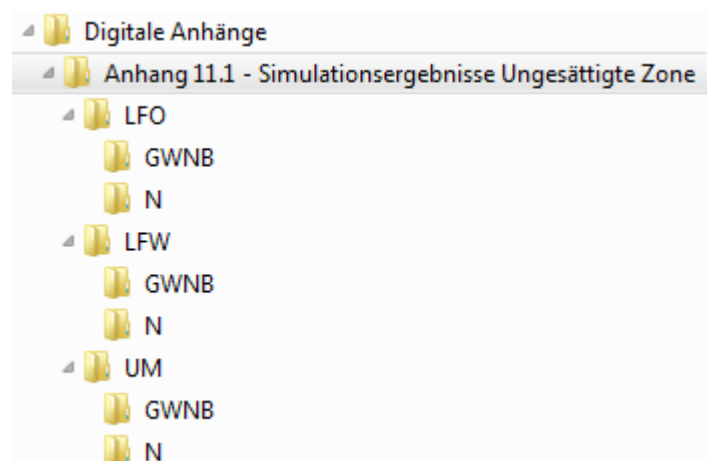
-
- Murer, E. (1998): Die Ableitung der Parameter eines Bodenwasserhaushalts- und Stofftransportmodells aus den Ergebnissen der Bodenkartierung. Schriftenreihe BAW, Band 1, 89-103.
- Stenitzer (1988)
- Najib K., Jourde H., Pistre S. (2008): A methodology for extreme groundwater surge predetermination in carbonate aquifers: Groundwater flood frequency analysis, *Journal of Hydrology* 352, 1 - 15. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.11.035
- ÖNORM B2400 (01.03.2016): Hydrologie — Hydrographische Begriffe und Zeichen. Ergänzende Bestimmungen zur ÖNORM EN ISO 772. Austrian Standards Institute, Wien.
- Stenitzer, E. (1988): SIMWASER -Ein numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. *Mitteilungen aus der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt*, 31, A-3252 Petzenkirchen
- Stenitzer, E. & E. Murer (2003): Impact of soil compaction upon soil water balance and maize yield estimated by the SIMWASER model. *Soil Till. Res.* 73. 43-56.
- Stenitzer, E., H. Diestel, Th. Zenker & R. Schwartengraber (2007a): Assessment of Capillary Rise from Shallow Groundwater by the Simulation Model SIMWASER Using Either Estimated Pe-dottransfer Functions of Measured Hydraulic Parameters. *Water Resour Manage*, 21, 1567-1584.
- Stenitzer, E., H. Diestel, U. Franko, R. Schwartengraber & T. Zenker (2007b): Performance of the model SIMWASER in two contrasting case studies on soil water movement. In: Kersebaum, K.Ch., J.-M. Hecker, W. Mirschel, M. Wegehenkel (eds.): *Modelling Water and Nutrient Dynamics in Soil-Crop Systems*. Springer.
- Upton K.A., Jackson C.R. (2011): Simulation of the spatio-temporal extent of groundwater flooding using statistical methods of hydrograph classification and lumped parameter models. *Hydrological Processes* 25, no. 12: 1949 – 1963.
- Vogt N., Lesemann H., Stiegeler R. (2006): Festlegung von Bemessungsgrundwasserständen auf Grundlage statistischer Analysen. Zentrum Geotechnik der TU München. *Wasserwirtschaft* 10, S. 28-33.



11 Beschreibung der digitalen Anhänge

11.1 Ergebnisdatei-Struktur Simulationen Ungesättigte Zone

Die Ergebnisse aus den Simulationsrechnungen der ungesättigten Zone liegen für die Untersuchungsgebiete Östliches Leibnitzer Feld (LFO), Westliches Leibnitzer Feld (LFW) und Unteres Murtal (UMUR) separat im Ordner „Digitale Anhänge\Anhang 11.1 - Simulationsergebnisse Ungesättigte Zone“ vor. In den jeweiligen Unterordnern sind die Ergebnisse für Grundwasserneubildung (GWNB) und Stickstoff-Austrag (N) aus der ungesättigten Zone enthalten. Die Ordnerstruktur sieht demnach folgenderweise aus:



Die Dateibezeichnungen folgen der Systematik *Präfix_HytopID_Parameter.Dateiformat*. Die folgenden vier Beispiele erklären alle vorkommenden Dateibezeichnungen:

- **HyTop_XXXXX_H2OFLUX.ERG**
 - XXXXX → 5-stellige Hydrotop-ID
 - H2OFLUX → Parameter Grundwasserneubildung
 - .ERG → Dateiendung für Zeit-Tiefen-Profile (Landwirtschaft, Siedlung)
- **HyTop_XXXXX_NFLUX.ERG**
 - XXXXX → 5-stellige Hydrotop-ID
 - NFLUX → Parameter Stickstoffaustrag
 - .ERG → Dateiendung für Zeit-Tiefen-Profile (Landwirtschaft, Siedlung)
- **HyTop_XXXXX_H2OFLUX.tsa**
 - XXXXX → 5-stellige Hydrotop-ID
 - H2OFLUX → Parameter Grundwasserneubildung
 - .tsa → Dateiendung für Zeitreihen (Wald, Oberflächengewässer)
- **HyTop_XXXXX_NFLUX.tsa**
 - XXXXX → 5-stellige Hydrotop-ID
 - NFLUX → Parameter Stickstoffaustrag
 - .tsa → Dateiendung für Zeitreihen (Wald, Oberflächengewässer)

Die Simulationen der Grundwasserneubildung und Stickstoffausträge für **landwirtschaftliche Flächen** und **Siedlungsgebiete** wurden mit dem **Modell SIMWASER/STOTRASIM** durchgeführt. Die Ergebnisse daraus liegen für jedes einzelne Hydrotop als Zeit-Tiefen-Profil vor. Der simulierte

Zeitschritt ist ein Tag; der ausgewertete Zeitraum für die Ergebnisse der ungesättigten Zone ist von 1.1.1993-31.12.2017 für das Untere Murtal bzw. von 1.1.1993-31.12.2018 für das Westliche und Östliche Leibnitzer Feld. Die simulierte Tiefe ist so gewählt, dass die Wasser- und Stickstoffflüsse bis unter den minimalen Grundwasserstand simuliert werden. Die ausgegebenen Ergebnisse werden – wenn nicht anders definiert – in 10 cm Tiefenschritten unterteilt. Nachstehend ist ein Beispiel für das Zeit-Tiefen-Profil der Grundwasserneubildung für das Hydrotop 1 (*HyTop_00001_H2OFLUX.ERG*) des Östlichen Leibnitzer Feldes angeführt.

Time	5	15	20	25	35	45	55	65
1993.01.01	-6.2614E-01	-1.7665E-01	5.4335E-02	1.5561E-01	3.0118E-01	4.1051E-01	5.0158E-01	5.861E-01
1993.01.02	-4.5664E-01	-1.3394E-01	9.6219E-03	8.7645E-02	2.1815E-01	3.4613E-01	4.546E-01	5.476E-01
1993.01.03	4.1469E+00	2.4308E+00	1.5234E+00	1.1213E+00	5.97E-01	4.1855E-01	4.3377E-01	5.0865E-01
1993.01.04	6.2839E-01	7.3831E-01	8.1915E-01	8.3333E-01	7.9637E-01	6.7086E-01	5.7136E-01	5.4809E-01
1993.01.05	-2.5309E-01	1.7264E-01	3.9366E-01	4.9887E-01	6.2666E-01	6.5845E-01	6.3805E-01	6.144E-01
1993.01.06	-4.0691E-01	7.3798E-03	2.0251E-01	3.1369E-01	4.7057E-01	5.6344E-01	6.0785E-01	6.2448E-01
1993.01.07	-1.565E-02	1.3136E-01	2.3427E-01	2.596E-01	3.7301E-01	4.7535E-01	5.4859E-01	5.955E-01
1993.01.08	-2.5867E-02	1.3678E-01	2.2869E-01	2.662E-01	3.4179E-01	4.2322E-01	4.9782E-01	5.5895E-01
1993.01.09	5.8159E-02	1.6529E-01	2.4009E-01	2.6204E-01	3.2668E-01	3.9424E-01	4.6304E-01	5.2512E-01
1993.01.10	-1.1539E-01	1.0908E-01	1.7641E-01	2.397E-01	3.1486E-01	3.8005E-01	4.4121E-01	4.9683E-01
1993.01.11	-3.0938E-01	-3.4784E-02	1.2076E-01	1.8216E-01	2.7949E-01	3.5549E-01	4.19E-01	4.7351E-01
1993.01.12	-9.7829E-01	-3.68E-01	-1.0579E-01	4.1987E-02	2.0946E-01	3.1375E-01	3.8913E-01	4.4774E-01
1993.01.13	-1.7624E-01	-1.0738E-01	-1.4785E-02	1.9966E-03	1.3087E-01	2.506E-01	3.4424E-01	4.1429E-01
1993.01.14	-4.1033E-01	-1.5011E-01	-3.4971E-02	2.5036E-02	1.2681E-01	2.1996E-01	3.0534E-01	3.7744E-01
1993.01.15	-2.5071E-01	-1.0548E-01	-3.8729E-02	1.0578E-02	1.0608E-01	1.9696E-01	2.7785E-01	3.4703E-01
1993.01.16	-5.2019E-01	-2.2763E-01	-6.1182E-02	-1.2482E-02	9.2085E-02	1.7775E-01	2.5396E-01	3.2034E-01
1993.01.17	-5.8015E-01	-2.7388E-01	-1.3568E-01	-6.1607E-02	5.3002E-02	1.514E-01	2.3035E-01	2.9576E-01
1993.01.18	-5.7558E-01	-2.9305E-01	-1.5521E-01	-8.8851E-02	1.7847E-02	1.2043E-01	2.0332E-01	2.7037E-01
1993.01.19	-2.851E-01	-1.8702E-01	-1.1821E-01	-8.9774E-02	-1.9967E-03	9.2009E-02	1.7651E-01	2.4459E-01
1993.01.20	-4.0041E-01	-2.0777E-01	-1.2156E-01	-7.473E-02	-2.0325E-04	7.2926E-02	1.5254E-01	2.1971E-01
1993.01.21	-6.9606E-01	-3.3561E-01	-1.8414E-01	-1.0969E-01	-1.378E-02	5.8951E-02	1.3383E-01	1.9787E-01
1993.01.22	-4.5691E-01	-2.865E-01	-1.9258E-01	-1.4077E-01	-4.0118E-02	4.1632E-02	1.1175E-01	1.7697E-01
1993.01.23	-1.4635E+00	-6.1503E-01	-3.0584E-01	-1.9411E-01	-6.0708E-02	2.3248E-02	9.0182E-02	1.5649E-01
1993.01.24	-9.3602E-01	-5.7537E-01	-3.6839E-01	-3.0092E-01	-1.2105E-01	-8.634E-03	6.8608E-02	1.3641E-01
1993.01.25	-5.0388E-02	-1.4993E-01	-2.0724E-01	-2.1417E-01	-1.3447E-01	-3.6274E-02	6.719E-02	1.141E-01
1993.01.26	-1.3207E+00	-5.7994E-01	-3.1551E-01	-2.3942E-01	-1.406E-01	-4.8146E-02	2.8048E-02	9.3117E-02
1993.01.27	-1.2478E+00	-6.1588E-01	-3.7331E-01	-2.9717E-01	-1.8773E-01	-7.1562E-02	1.1679E-02	7.9671E-02
1993.01.28	-5.0856E-01	-4.7192E-01	-3.4892E-01	-3.0216E-01	-2.1168E-01	-9.3651E-02	-4.2998E-03	6.788E-02

Die Grundwasserneubildung unter **Waldstandorten** wird mit Hilfe eines Einschicht-Bodenwasserhaushaltsmodelles nach dem Speicherüberlaufprinzip berechnet. Die Ergebnisse liegen hierzu nur in einer Bodentiefe vor. Dasselbe gilt für die Grundwasserneubildung unter **Oberflächengewässern**. Das nachstehende Beispiel zeigt die Struktur des *HyTop_*FLUX.tsa*-Files:

```

TSA; 1.00
Name; 10002
Parameter; GWN
Unit; mm
DateTimeFormat; dd.MM.yyyy HH:mm:ss
Data
01.01.1993 00:00:00; 0.000
02.01.1993 00:00:00; 0.000
03.01.1993 00:00:00; 0.000
04.01.1993 00:00:00; 0.000
05.01.1993 00:00:00; 0.000
06.01.1993 00:00:00; 0.000
07.01.1993 00:00:00; 0.000
08.01.1993 00:00:00; 0.000
09.01.1993 00:00:00; 0.000
10.01.1993 00:00:00; 0.000
11.01.1993 00:00:00; 0.000
12.01.1993 00:00:00; 0.000
13.01.1993 00:00:00; 0.000
14.01.1993 00:00:00; 0.000
15.01.1993 00:00:00; 0.000
16.01.1993 00:00:00; 0.000
17.01.1993 00:00:00; 0.000
18.01.1993 00:00:00; 0.000
19.01.1993 00:00:00; 0.000
20.01.1993 00:00:00; 0.000
  
```

Die nachstehenden Tabellen zeigen einen Überblick der Hydrotop-IDs in den einzelnen Modellgebieten nach Landnutzung:

Östliches Leibnitzer Feld		
<i>Landnutzungsart</i>	<i>Hydrotop-IDs</i>	<i>Anzahl Hydrotope</i>
Landwirtschaft	00001-00110	110
Oberflächengewässer	10001	1
Wald	10002-100029	28
Siedlungsgebiet	20001-20049	49
Summe Hydrotopanzahl:		188

Westliches Leibnitzer Feld		
<i>Landnutzungsart</i>	<i>Hydrotop-IDs</i>	<i>Anzahl Hydrotope</i>
Landwirtschaft	00001-00219	219
Oberflächengewässer	10001	1
Wald	10002-10030	29
Siedlungsgebiet	20001-20136	136
Rekultivierungsflächen	30001	1
Summe Hydrotopanzahl:		386

Unteres Murtal		
<i>Landnutzungsart</i>	<i>Hydrotop-IDs</i>	<i>Anzahl Hydrotope</i>
Landwirtschaft	00001-00567	567
Oberflächengewässer	10001	3
	10201	
	10501	
Wald	10002-10110	427
	10202-10383	
	10502-10663	
Siedlungsgebiet	20001-20858*	708
Summe Hydrotopanzahl:		1705

*) nicht alle Hydrotop-IDs in diesem Bereich vergeben

11.2 Kalibrationsauswertung an den Messpegeln für Grundwasserspiegel

11.2.1 Erläuterung der Auswertung

Für jede Messstelle wurde ein Vergleich zwischen Messung und Rechnung in der zeitlichen Entwicklung (Abbildung 68), ein Vergleich der gemessenen Spiegellagen mit den zeitgleichen berechneten Grundwasserspiegellagen (Abbildung 69), der zeitliche Verlauf der Differenzen zwischen Messung und zeitgleichen Rechenergebnissen (Abbildung 70) sowie die Doppelsummenkurve der Absolutwertänderungen der Grundwasserspiegellage der gemessenen und der zeitgleichen berechneten Grundwasserstände (Abbildung 71) grafisch ausgewertet.

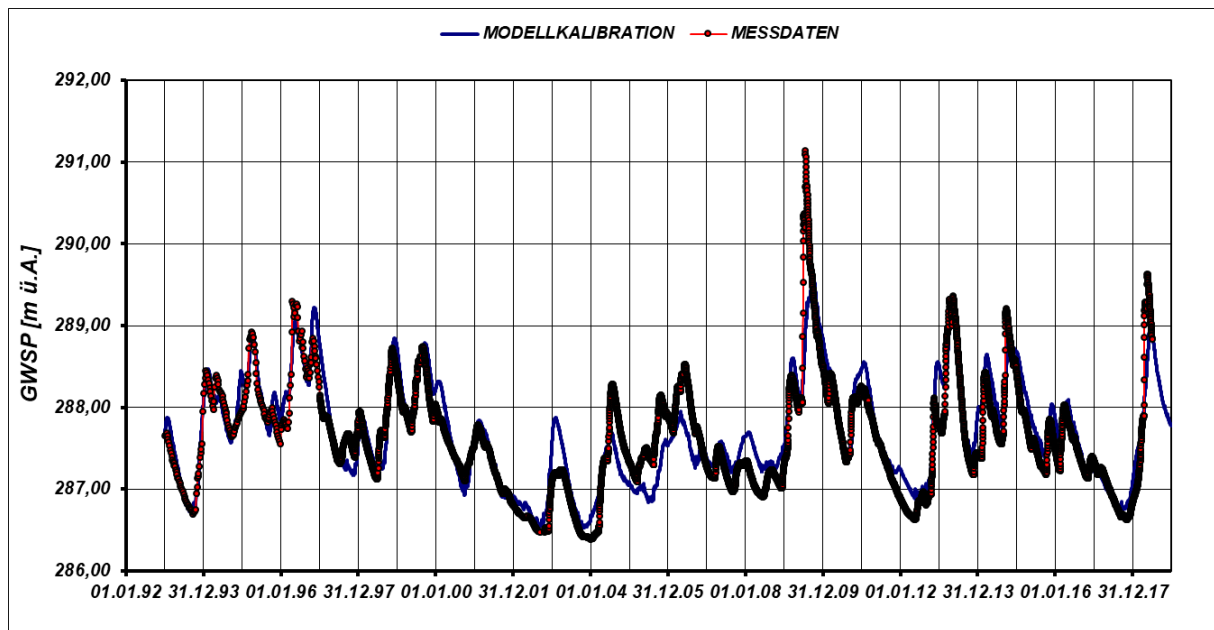


Abbildung 68: Vergleich der berechneten Grundwasserstandsganglinie mit dem Messdaten beispielhaft an der Grundwassermessstelle uw3769 im Östlichen Leibnitzer Feld (siehe auch Abbildung 18)

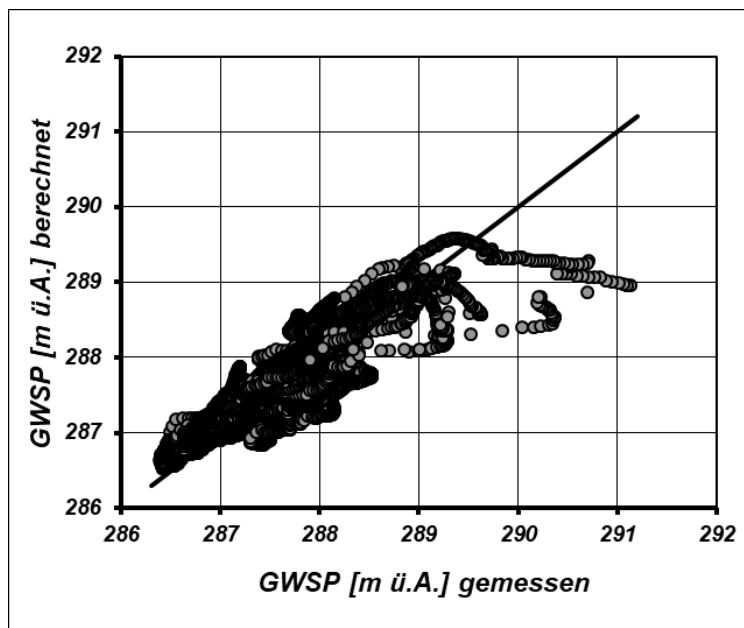


Abbildung 69: Scatterplot der gemessenen Grundwasserspiegellagen im Vergleich zu den zeitgleichen berechneten Grundwasserständen beispielhaft an der Grundwassermessstelle uw3769 im Östlichen Leibnitzer Feld

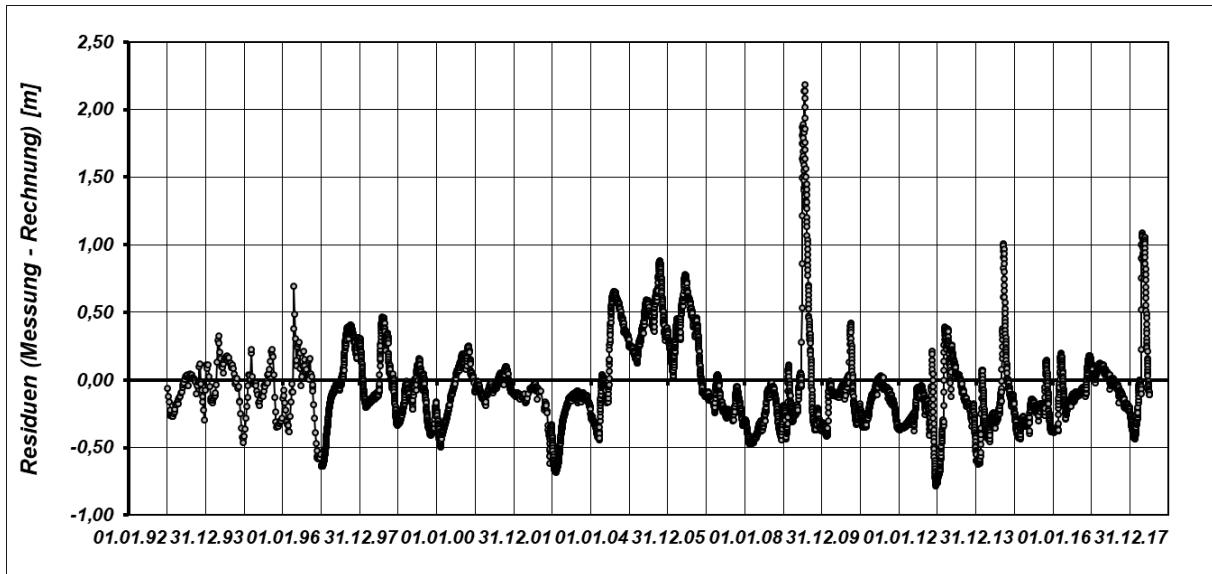


Abbildung 70: Zeitlicher Verlauf der Differenzen zwischen den gemessenen und den zeitgleichen berechneten Grundwasserständen beispielhaft an der Grundwassermessstelle uw3769 im Östlichen Leibnitzer Feld

Die in Tabelle 11 angegebenen Kennwerte der instationären Modellkalibration wurden für jede Messstelle ermittelt. Neben Minimum, Mittelwert und Maximum der Messdaten im Vergleich zu den äquivalenten Berechnungsergebnissen wurde auch eine Fehlerstatistik basierend auf den in Kapitel 5.4 diskutierten Maßzahlen für die zeitgleichen Beobachtungstermine als Bewertung der Kalibrationsgüte berechnet.

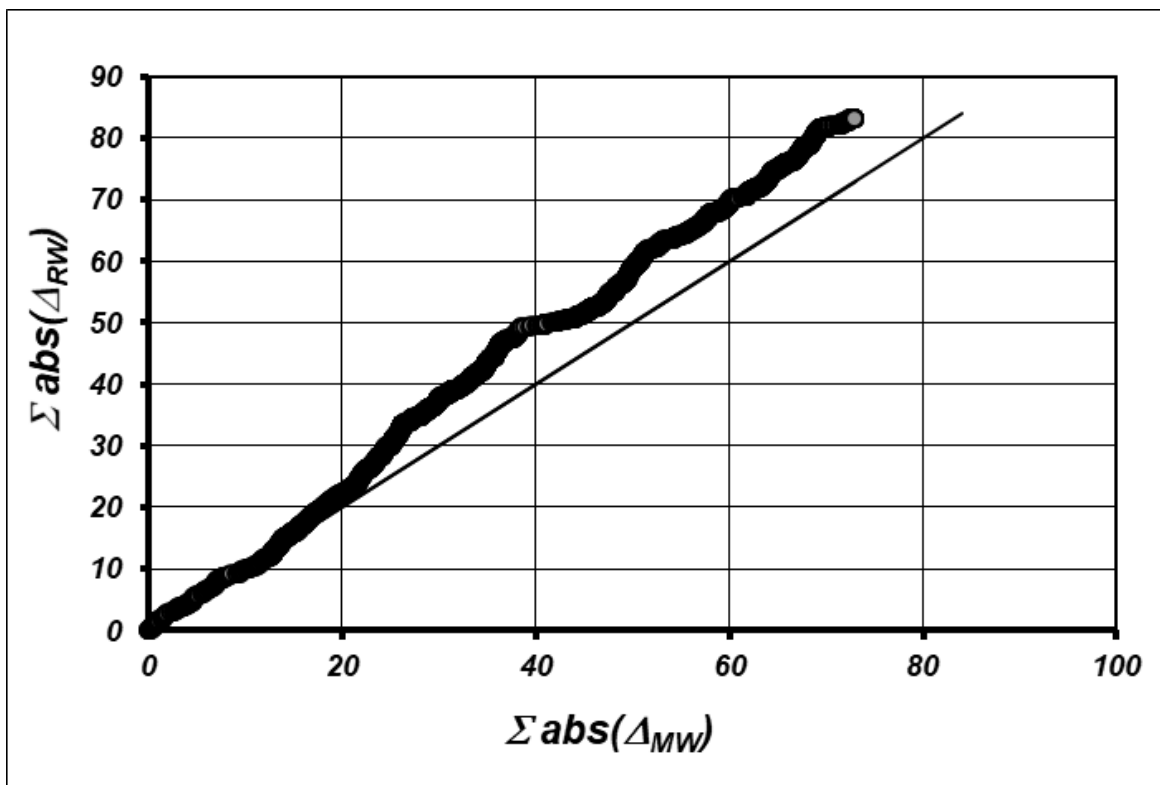


Abbildung 71: Doppelsummenkurve der Absolutwertänderungen der Grundwasserspiegellage der gemessenen und der zeitgleichen berechneten Grundwasserstände beispielhaft an der Grundwassermessstelle uw3769 im Östlichen Leibnitzer Feld

Tabelle 11: Instationäre Modellkalibration: Kennwerte der Modellkalibration beispielhaft dargestellt an der Grundwasserstandsmessstelle uw3769 im Östlichen Leibnitzer Feld

uw3769	MESSUNG	BERECHNUNG
MINIMUM	286,39	286,53
MITTELWERT	287,61	287,67
MAXIMUM	291,14	289,58
FEHLERSTATISTIK		
RES_MIN	größte negative Abweichung [m]	-0,781277
RES_MEAN	mittlere Abweichung [m]	-0,053665
RES_MAX	größte positive Abweichung [m]	2,183572
RMSQ	mittlere Residuenquadratsumme [m ²]	0,105411
SQR(RMSQ)	Wurzel(RMSQ) [m]	0,324670
RMSE	Mittlerer Fehler [%]	0,112884
CRM	Koeffizient der mittleren Residuenmasse [-]	-0,000187
CD	Koeffizient der Modelldetermination [-]	1,177291
EF	Modelleffizienz (Nash-Sutcliffe)	0,765406

Generell ist aber festzuhalten, dass die Qualität der Modellkalibration gerade bei einem über einen längeren Zeitraum instationär kalibrierten 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.

11.3 GIS - Daten

<ul style="list-style-type: none"> <ul style="list-style-type: none"> LFO_BMNM34 <ul style="list-style-type: none"> lfo_gw_bahnlilien lfo_gw_isolinien_p025 lfo_gw_isolinien_p50 lfo_gw_isolinien_p50_kon lfo_gw_isolinien_p975 lfo_hgw100_isolinien lfo_hydrotope lfo_kf lfo_landnutzug lfo_modellgebiet LFO_Mst_HGW100 LFO_Mst_NGW100 lfo_n_nutz lfo_ngw100_isolinien lfo_res_mit_gw lfo_res_mit_no3 lfo_St_Iso lfo_Stpkt LFO_UZ_GWNB_JSum LFO_UZ_N_JSum LFO_UZ_NO3_JMit LFW_BMNM34 <ul style="list-style-type: none"> lfw_gw_bahnlilien lfw_gw_isolinien_p025 lfw_gw_isolinien_p50 lfw_gw_isolinien_p50_kon lfw_gw_isolinien_p975 lfw_hgw100_isolinien lfw_hydrotope lfw_kf lfw_landnutzug lfw_modellgebiet_GZ lfw_modellgebiet_UZ LFW_Mst_HGW100 LFW_Mst_NGW100 lfw_n_nutz lfw_ngw100isolinien lfw_res_mit_gw lfw_res_mit_no3 lfw_St_Iso lfw_Stpkt LFW_UZ_GWNB_JSum LFW_UZ_N_JSum LFW_UZ_NO3_JMit 	<p>Vektor-Daten für das Östliche Leibnitzer Feld</p> <p>GW-Bahnlilien bei mittleren GW-Ständen (P50)</p> <p>GW-Isolinien bei niedrigen GW-Ständen (P2,5)</p> <p>GW-Isolinien bei mittleren GW-Ständen (P50)</p> <p>GW-Isolinien bei mittleren GW-Ständen (P50) Konsensentnahmen</p> <p>GW-Isolinien bei hohen GW-Ständen (P97,5)</p> <p>GW-Isolinien bei HGW100</p> <p>Hydrotope</p> <p>Hydraulische Leitfähigkeit</p> <p>Landnutzung</p> <p>Modellgebiet</p> <p>Messstellen für HGW100-Auswertung</p> <p>Messstellen für NGW100-Auswertung</p> <p>Nutzbare Porosität</p> <p>GW-Isolinien bei NGW100</p> <p>Mittlere Residuen der GW-Spiegel (Simulation-Messung)</p> <p>Mittlere Residuen der NO3-Konz. im GW (Simulation-Messung)</p> <p>Isolinien des Grundwasserstauers</p> <p>Punktinformation der GW-Stauerlage</p> <p>Mittlere Jahressummen der Grundwasserneubildung</p> <p>Mittlere Jahressummen der Stickstoffauswaschung</p> <p>Jahresmittelwerte der Nitratkonzentration im Sickerwasser</p> <p>Vektor-Daten für das Westliche Leibnitzer Feld</p> <p>GW-Bahnlilien bei mittleren GW-Ständen (P50)</p> <p>GW-Isolinien bei niedrigen GW-Ständen (P2,5)</p> <p>GW-Isolinien bei mittleren GW-Ständen (P50)</p> <p>GW-Isolinien bei mittleren GW-Ständen (P50) Konsensentnahmen</p> <p>GW-Isolinien bei hohen GW-Ständen (P97,5)</p> <p>GW-Isolinien bei HGW100</p> <p>Hydrotope</p> <p>Hydraulische Leitfähigkeit</p> <p>Landnutzung</p> <p>Modellgebiet (gesättigte Zone)</p> <p>Modellgebiet (ungesättigte Zone)</p> <p>Messstellen für HGW100-Auswertung</p> <p>Messstellen für NGW100-Auswertung</p> <p>Nutzbare Porosität</p> <p>GW-Isolinien bei NGW100</p> <p>Mittlere Residuen der GW-Spiegel (Simulation-Messung)</p> <p>Mittlere Residuen der NO3-Konz. im GW (Simulation-Messung)</p> <p>Isolinien des Grundwasserstauers</p> <p>Punktinformation der GW-Stauerlage</p> <p>Mittlere Jahressummen der Grundwasserneubildung</p> <p>Mittlere Jahressummen der Stickstoffauswaschung</p> <p>Jahresmittelwerte der Nitratkonzentration im Sickerwasser</p>
---	--

<ul style="list-style-type: none"> UM_BMNM34 <ul style="list-style-type: none"> um_gw_bahnlilien um_gw_isolinien_p025 um_gw_isolinien_p50 um_gw_isolinien_p50_kon um_gw_isolinien_p975 um_hgw100_isolinien um_hydrotope um_kf um_landnutzung um_modellgebiet_HGW um_modellgebiet_UZ um_modellgrenze_GZ_Tr UM_Mst_HGW100 UM_Mst_NGW100 um_n_nutz um_ngw100_isolinien um_res_mit_gw um_res_mit_no3 um_St_Iso um_Stpkt UM_UZ_GWNB_JSum UM_UZ_N_JSum UM_UZ_NO3_JMit + lfo_fa_hgw100 + lfo_fa_ngw100 + lfo_fa_p025 + lfo_fa_p50 + lfo_fa_p975 + lfo_gw_p50kr + lfo_gwm_hw100 + lfo_gwm_nw100 + lfo_gwm_p025 + lfo_gwm_p50 + lfo_gwm_p975 + lfo_hgw100dif + lfo_ngw100dif + lfo_no3_max + lfo_no3_min + lfo_no3_p50 + lfo_no3_p50kr LFO_UZ_GWNB_JSum_Tab LFO_UZ_N_JSum_Tab LFO_UZ_NO3_JMit_Tab 	Vektor-Daten für das Untere Murtal <ul style="list-style-type: none"> GW-Bahnlilien bei mittleren GW-Ständen (P50) GW-Isolinien bei niedrigen GW-Ständen (P2,5) GW-Isolinien bei mittleren GW-Ständen (P50) GW-Isolinien bei mittleren GW-Ständen (P50) Konsensentnahmen GW-Isolinien bei hohen GW-Ständen (P97,5) GW-Isolinien bei HGW100 Hydrotope Hydraulische Leitfähigkeit Landnutzung Modellgebiet (HGW100/NGW100-Auswertung) Modellgebiet (ungesättigte Zone) Modellgebiet (Stofftransport gesättigte Zone) Messstellen für HGW100-Auswertung Messstellen für NGW100-Auswertung Nutzbare Porosität GW-Isolinien bei NGW100 Mittlere Residuen der GW-Spiegel (Simulation-Messung) Mittlere Residuen der NO3-Konz. im GW (Simulation-Messung) Isolinien des Grundwasserstauers Punktinformation der GW-Stauerlage Mittlere Jahressummen der Grundwasserneubildung Mittlere Jahressummen der Stickstoffauswaschung Jahresmittelwerte der Nitratkonzentration im Sickerwasser Östliches Leibnitzer Feld - Flurabstand bei HGW100 Flurabstand bei NGW100 Flurabstand bei niedrigen GW-Ständen (P2,5) Flurabstand bei mittleren GW-Ständen (P50) Flurabstand bei hohen GW-Ständen (P97,5) Diff. der mittleren GW-Spiegel zw. Konsens- und Realentnahme Grundwassermächtigkeit bei HGW100 Grundwassermächtigkeit bei NGW100 Grundwassermächtigkeit bei niedrigen GW-Ständen (P2,5) Grundwassermächtigkeit bei mittleren GW-Ständen (P50) Grundwassermächtigkeit bei hohen GW-Ständen (P97,5) Korrekturwerte HGW100-Auswertung (Diff. Messung-Modell) Korrekturwerte NGW100-Auswertung (Diff. Messung-Modell) Maximale Nitratkonzentrationen im Grundwasser Minimale Nitratkonzentrationen im Grundwasser Mittlere Nitratkonzentrationen im Grundwasser (Median) Diff. d. mittleren NO3-Konz. im GW (Konsens – Realentnahme) Jahressummen der Grundwasserneubildung (Tabellen) Jahressummen der Stickstoffauswaschung (Tabellen) Jahresmittelwerte der NO3-Konz. im Sickerwasser (Tabellen)
---	---

+ [grid icon] lfw_fa_hgw100	Westliches Leibnitzer Feld - Flurabstand bei HGW100
+ [grid icon] lfw_fa_ngw100	Flurabstand bei NGW100
+ [grid icon] lfw_fa_p025	Flurabstand bei niedrigen GW-Ständen (P2,5)
+ [grid icon] lfw_fa_p50	Flurabstand bei mittleren GW-Ständen (P50)
+ [grid icon] lfw_fa_p975	Flurabstand bei hohen GW-Ständen (P97,5)
+ [grid icon] lfw_gw_p50kr	Diff. der mittleren GW-Spiegel zw. Konsens- und Realentnahme
+ [grid icon] lfw_gwm_hw100	Grundwassermächtigkeit bei HGW100
+ [grid icon] lfw_gwm_nw100	Grundwassermächtigkeit bei NGW100
+ [grid icon] lfw_gwm_p025	Grundwassermächtigkeit bei niedrigen GW-Ständen (P2,5)
+ [grid icon] lfw_gwm_p50	Grundwassermächtigkeit bei mittleren GW-Ständen (P50)
+ [grid icon] lfw_gwm_p975	Grundwassermächtigkeit bei hohen GW-Ständen (P97,5)
+ [grid icon] lfw_hgw100dif	Korrekturwerte HGW100-Auswertung (Diff. Messung-Modell)
+ [grid icon] lfw_ngw100dif	Korrekturwerte NGW100-Auswertung (Diff. Messung-Modell)
+ [grid icon] lfw_no3_max	Maximale Nitratkonzentrationen im Grundwasser
+ [grid icon] lfw_no3_min	Minimale Nitratkonzentrationen im Grundwasser
+ [grid icon] lfw_no3_p50	Mittlere Nitratkonzentrationen im Grundwasser (Median)
+ [grid icon] lfw_no3_p50kr	Diff. d. mittleren NO3-Konz. im GW (Konsens – Realentnahme)
[table icon] LFW_UZ_GWNB_JSum_Tab	Jahressummen der Grundwasserneubildung (Tabellen)
[table icon] LFW_UZ_N_JSum_Tab	Jahressummen der Stickstoffauswaschung (Tabellen)
[table icon] LFW_UZ_NO3_JMit_Tab	Jahresmittelwerte der NO3-Konz. im Sickerwasser (Tabellen)
+ [grid icon] um_fa_hgw100	Unteres Murtal - Flurabstand bei HGW100
+ [grid icon] um_fa_ngw100	Flurabstand bei NGW100
+ [grid icon] um_fa_p025	Flurabstand bei niedrigen GW-Ständen (P2,5)
+ [grid icon] um_fa_p50	Flurabstand bei mittleren GW-Ständen (P50)
+ [grid icon] um_fa_p975	Flurabstand bei hohen GW-Ständen (P97,5)
+ [grid icon] um_gw_p50kr	Diff. der mittleren GW-Spiegel zw. Konsens- und Realentnahme
+ [grid icon] um_gwm_hw100	Grundwassermächtigkeit bei HGW100
+ [grid icon] um_gwm_nw100	Grundwassermächtigkeit bei NGW100
+ [grid icon] um_gwm_p025	Grundwassermächtigkeit bei niedrigen GW-Ständen (P2,5)
+ [grid icon] um_gwm_p50	Grundwassermächtigkeit bei mittleren GW-Ständen (P50)
+ [grid icon] um_gwm_p975	Grundwassermächtigkeit bei hohen GW-Ständen (P97,5)
+ [grid icon] um_hgw100dif	Korrekturwerte HGW100-Auswertung (Diff. Messung-Modell)
+ [grid icon] um_ngw100dif	Korrekturwerte NGW100-Auswertung (Diff. Messung-Modell)
+ [grid icon] um_no3_max	Maximale Nitratkonzentrationen im Grundwasser
+ [grid icon] um_no3_min	Minimale Nitratkonzentrationen im Grundwasser
+ [grid icon] um_no3_p50	Mittlere Nitratkonzentrationen im Grundwasser (Median)
+ [grid icon] um_no3_p50kr	Diff. d. mittleren NO3-Konz. im GW (Konsens – Realentnahme)
[table icon] UM_UZ_GWNB_JSum_Tab	Jahressummen der Grundwasserneubildung (Tabellen)
[table icon] UM_UZ_N_JSum_Tab	Jahressummen der Stickstoffauswaschung (Tabellen)
[table icon] UM_UZ_NO3_JMit_Tab	Jahresmittelwerte der NO3-Konz. im Sickerwasser (Tabellen)

<ul style="list-style-type: none"> 📁 Raster Einzeljahre <ul style="list-style-type: none"> 📁 LFO <ul style="list-style-type: none"> 📁 LFO GZ NO3 JMax 📁 LFO GZ NO3 JMin 📁 LFO GZ NO3 JMit P50 📁 LFW <ul style="list-style-type: none"> 📁 LFW GZ NO3 JMax 📁 LFW GZ NO3 JMin 📁 LFW GZ NO3 JMit P50 📁 UM <ul style="list-style-type: none"> 📁 UM GZ NO3 JMax 📁 UM GZ NO3 JMin 📁 UM GZ NO3 JMit P50 	<hr/> <p>Östliches Leibnitzer Feld</p> <p>Maximale NO3-Konz. im Grundwasser für einzelne Jahre</p> <p>Minimale NO3-Konz. im Grundwasser für einzelne Jahre</p> <p>Mittlere NO3-Konz. im Grundwasser für einzelne Jahre (Median)</p> <hr/> <p>Westliches Leibnitzer Feld</p> <p>Maximale NO3-Konz. im Grundwasser für einzelne Jahre</p> <p>Minimale NO3-Konz. im Grundwasser für einzelne Jahre</p> <p>Mittlere NO3-Konz. im Grundwasser für einzelne Jahre (Median)</p> <hr/> <p>Unteres Murtal</p> <p>Maximale NO3-Konz. im Grundwasser für einzelne Jahre</p> <p>Minimale NO3-Konz. im Grundwasser für einzelne Jahre</p> <p>Mittlere NO3-Konz. im Grundwasser für einzelne Jahre (Median)</p>
--	--

11.4 Liste der Karten im PDF-Format und im JPG-Format

Die nachfolgende Liste enthält die Karten, die sowohl für den Grundwasserkörper Leibnitzer Feld (Simulationsperiode 1993 bis 2018) als auch für das Untere Murtal (Simulationsperiode 1993 bis 2017) erstellt und im Bericht erläutert wurden.

Dateiname	Karteninhalt
1_GZ_Stauer	Grundwasserstauer
2_UZ_Landnutzung	Landnutzung
3_UZ_Bodentypen	Bodentypen ÖBK (generalisiert)
4_UZ_Hydrotope	Hydrotope und Hydrotop-IDs
5_UZ_GWNB_Mit	Grundwasserneubildung Mittelwerte über den Zeitraum von 1993-2017 bzw. 2018 (Mittlere Jahressummen)
6_UZ_N_Mit	Stickstoffaustrag aus ungesättigter Zone Mittelwerte über den Zeitraum von 1993-2017 bzw. 2018 (Mittlere Jahressummen)
7_UZ_NO3_Mit	Nitratkonzentration im Sickerwasser Mittelwerte über den Zeitraum von 1993-2017 bzw. 2018 (Mittelwerte als arithmetisches Mittel)
8_GZ_GW_Mit_P50_Res	Mittlere Residuen zwischen modellierten und gemessenen Grundwasserspiegeln Mittelwerte über den Zeitraum von 1993-2017 bzw. 2018 (Mittelwerte als Median = 50%-Perzentil)
9_GZ_kf	Gesättigte Hydraulische Leitfähigkeit
10_GZ_nnutz	Nutzbare Porosität im Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels
11_GZ_NO3_Mit_P50_Res	Nitratkonzentration im Grundwasser Mittelwerte über den Zeitraum von 1995-2017 bzw. 2018 (Mittelwerte als Median = 50%-Perzentil)
12_GZ_GWM_Mit_P50	Grundwassermächtigkeit bei mittleren Wasserständen (P50) Werte über den Zeitraum von 1993-2017 bzw. 2018 (Mittelwerte als Median = 50%-Perzentil)

Dateiname	Karteninhalt
13_GZ_FA_Mit_P50	Flurabstand bei mittleren Wasserständen (P50) Werte über den Zeitraum von 1993-2017 bzw. 2018 (Mittelwerte als Median = 50%-Perzentil)
14_GZ_GWM_Min_P025	Grundwassermächtigkeit bei niedrigen Wasserständen (P2.5) Werte über den Zeitraum von 1993-2017 bzw. 2018 (Grundwassermächtigkeit beim 2,5%-Perzentil des Grundwasserspiegels)
15_GZ_FA_Max_P025	Flurabstand bei niedrigen Wasserständen (P2.5) Werte über den Zeitraum von 1993-2017 bzw. 2018 (Flurabstand beim 2,5%-Perzentil des Grundwasserspiegels)
16_GZ_GWM_Max_P975	Grundwassermächtigkeit bei hohen Wasserständen (P97.5) Werte über den Zeitraum von 1993-2017 bzw. 2018 (Grundwassermächtigkeit beim 97,5%-Perzentil des Grundwasserspiegels)
17_GZ_FA_Min_P975	Flurabstand bei hohen Wasserständen (P97.5) Werte über den Zeitraum von 1993-2017 bzw. 2018 (Flurabstand beim 97,5%-Perzentil des Grundwasserspiegels)
18_GZ_GW_Mit_P50_Bahnlinien	Grundwasserströmungsfeld (Mittelwerte als Median = 50%-Perzentil)
19_GZ_NO3_Min	Nitratkonzentration im Grundwasser Minimalwerte über den Zeitraum von 1995-2017 bzw. 2018
20_GZ_NO3_Max	Nitratkonzentration im Grundwasser Maximalwerte über den Zeitraum von 1995-2017 bzw. 2018
21_GZ_GW_Diff_Kon-Real	Differenz der mittleren GW-Spiegel zwischen Konsens- und Realentnahme Mittelwerte über den Zeitraum von 1993-2017 bzw. 2018 (Mittelwerte als Median = 50%-Perzentil)
22_GZ_NO3_Diff_Kon-Real	Differenz der mittleren Nitratkonzentration im Grundwasser zwischen Konsens- und Realentnahme Mittelwerte über den Zeitraum von 1993-2017 bzw. 2018 (Mittelwerte als Median = 50%-Perzentil)
23_GZ_GWM_HGW100	Grundwassermächtigkeit bei HGW100
24_GZ_FA_HGW100	Flurabstand bei HGW100
25_GZ_GWM_NGW100	Grundwassermächtigkeit bei NGW100
26_GZ_FA_NGW100	Flurabstand bei NGW100

Die nachfolgende Liste enthält die Karten mit den unterschiedlichen Auswertungen in den Einzeljahren während der jeweiligen Simulationsperiode im Leibnitzer Feld und im Unteren Murtal. Für das Leibnitzer Feld ergeben sich somit pro Karteninhalt 26 Einzelkarten und im Unteren Murtal 25 Einzelkarten. In Summe wurden für das Leibnitzer Feld 182 Karten und für das Untere Murtal 176 Karten erstellt.

Dateiverzeichnis	Karteninhalt - Einzeljahreskarten
UM GZ NO3 JMax	Nitratkonzentration im Grundwasser Jahresmaximalwerte für einzelne Jahre zwischen 1993 und 2017 bzw. 2018
UM GZ NO3 JMin	Nitratkonzentration im Grundwasser Jahresminimalwerte für einzelne Jahre zwischen 1993 und 2017 bzw. 2018

Dateiverzeichnis	Karteninhalt - Einzeljahreskarten
UM GZ NO3 JMit P50	Nitratkonzentration im Grundwasser Jahresmittelwerte für einzelne Jahre zwischen 1993 und 2017 bzw. 2018 (Mittelwerte als Median = 50%-Perzentil)
UM UZ GWNB JSum	Grundwasserneubildung Jahressummen für einzelne Jahre zwischen 1993 und 2017 bzw. 2018
UM UZ N JSum	Stickstoffaustrag aus ungesättigter Zone Jahressummen für einzelne Jahre zwischen 1993 und 2017 bzw. 2018
UM UZ NO3 JMit	Nitratkonzentration im Sickerwasser Jahresmittelwerte für einzelne Jahre zwischen 1993 und 2017 bzw. 2018 (Mittelwerte als arithmetisches Mittel)



Priv. Doz. DI Dr. H. Kupfersberger

(Projektleiter)

Graz, am 25.10.2019



JR-AquaConSol
ein Unternehmen der JOANNEUM RESEARCH

JR-AquaConSol GmbH
Steyrergasse 21
8010 Graz

Tel.: +43 316 384545
Fax: +43 316 384545 99

office@JR-AquaConSol.at
www.JR-AquaConSol.at