Licca Liber - Weiterführende Untersuchungen

Anlage 6.2 Aufbau und Anpassung des Grundwassermodells

Stand: 07. Mai 2018
Version: 03

Abbildungsverzeichnis 5

Tabellenverzeichnis 15

Anlagenverzeichnis 17

Wichtige Begriffe 18

Abkürzungsverzeichnis 21

Einheitenverzeichnis 22

1 Einleitung 24
1.1 Projekt Licca Liber 24
1.2 Fragestellung, Ziele und Vorgehen 24

2 Modellaufbau 27
2.1 Eingesetzte Modellsoftware 27
2.2 Modell- und Aussagegebiet 27
2.3 Räumliche Diskretisierung 29
2.3.1 Horizontal 29
2.3.2 Vertikal 31
2.4 Modellkonzept 34
2.5 Stationäre Modellrandbedingungen 34
2.5.1 Äußere Randbedingungen 34

2.5.2 Innere Randbedingungen 36
2.6 Instationäre Modellrandbedingungen 60
2.6.1 Äußere Randbedingungen 60
2.6.2 Innere Randbedingungen 62
2.7 Initiale Parametrisierung 71
2.7.1 Durchlässigkeiten 71
2.7.2 Speichernutzbarer Hohlraumanteil 76
2.7.3 Leakage-Koeffizient 77
2.8 Visualisierung des Grundwassermodells (Blockbild) 77

3 Stationäre Kalibrierung 79
3.1 Übersicht 79
3.1.1 Betrachtungszeitraum 79
3.1.2 Vergleichs- und Kalibriergrößen 80
3.2 Ergebnisse 91
3.2.1 Berechnete Piezometerhöhen 91
3.2.2 Wasserbilanz 91
3.2.3 Modellparameter 97
3.3 Anpassungsgüte 99

4 Instationäre Kalibrierung 105
4.1 Übersicht 105
4.2 Betrachtungszeitraum, Startbedingung und zeitliche Diskretisierung 105
4.3 Vergleichs- und Kalibriergrößen 106
4.3.1 Grundwasser-Sammler und Kanalisation 106
4.3.2 Überflutungsflächen Paar und Wertach 107
4.3.3 Veränderung der Sohleigenschaften des Lechs 108
4.3.4 Leakage-Koeffizient des Lechs für Exfiltration ohne Bezug zum Mittelwasser 109
4.4 Variation ausgewählter Kalibriergrößen und der modelltechnischen Umsetzung von instationären Prozessen 109
4.4.1 Grundwassersammler und Kanalisation 109
4.4.2 Berücksichtigung von Ausuferungsflächen 113
4.4.3 Veränderung der Sohleigenschaften des Lechs bei Hochwasser 117
4.4.4 Berücksichtigung von Wasserspiegelanstiegen der Bäche im Stadtwald in Folge der Lechhochwässer 119
4.4.5 Speichernutzbarer Hohlraumanteil 124
4.5 Ergebnisse 126
4.5.1 Berechnete Grundwasserganglinien 126
4.5.2 Berechnete Grundwassergleichen 146
4.5.3 Wasserbilanz 146

4.5.4 Modellparameter 157
4.5.5 Speichernutzbarer Hohlraumanteil 158
4.6 Anpassungsgüte 158
4.6.1 Auswertung der zeitlichen Dynamik 158
4.6.2 Auswertung der absoluten Abweichung 160

5 Modelltest 165
5.1 Übersicht 165
5.2 Betrachtungszeitraum und Startbedingung 165
5.3 Randbedingungen 167
5.3.1 Übersicht 167
5.3.2 Paar 167
5.3.3 Überflutungsflächen Paar und Wertach 167
5.3.4 Lochbach-Ablass 168
5.3.5 Reduzierung des Wasserspiegels am Hochablass und Ablass der Stadtbäche 169
5.3.6 GW-Sammler 170
5.4 Vergleichsgrößen 170
5.4.1 GW-Sammler 170
5.4.2 Kanalisation 170
5.5 Ergebnisse 171
5.5.1 Berechnete Grundwasserganglinien 171
5.5.2 Berechnete Grundwassergleichen 192
5.5.3 Wasserbilanz 192
5.6 Anpassungsgüte 202
5.6.1 Auswertung der zeitlichen Dynamik 202
5.6.2 Auswertung der absoluten Abweichung 203

6 Ermittlung eines Referenzzustands für Prognosen mit niedrigen Grundwasserständen 208
6.1 Übersicht 208
6.2 Vergleichsgrößen 209
6.3 Randbedingungen 212
6.3.1 Grundwasserneubildung 212
6.3.2 Lech 213
6.3.3 Paar 214
6.3.4 Wertach 214
6.3.5 Entnahmen 214
6.3.6 GW-Sammler 214
6.4 Ergebnisse 214
6.4.1 Berechnete Piezometerhöhen 214

6.4.2 Wasserbilanzen 217

7 Sensitivitätsanalyse 223
7.1 Übersicht 223
7.2 Sensitivität der Modellparameter 223
7.2.1 Durchlässigkeiten 224
7.2.2 Leakage-Koeffizienten der Fließgewässer 228
7.2.3 Grundwasserneubildung 231
7.2.4 Speichernutzbarer Hohlraumanteil 234
7.3 Kovarianzanalyse 241
7.3.1 Methodik 241
7.3.2 Ergebnisse der Kovarianzanalyse 242
7.4 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse 245

8 Zusammenfassung 247

9 Referenzen 249

Anhang 1: Quer- und Längsschnitte 251

Anhang 2: Dokumentation einer Auswahl von Kalibrierschritten (stationär) 267

Anhang 3: Generierung von instationären Wasserspiegeln aus stationären Wasserspiegelberechnungen 270

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Modell- und Aussagebiet 28
Abbildung 2.2: Modellnetz bei Fkm 56 30
Abbildung 2.3: Vertikale Diskretisierung 32
Abbildung 2.4: Quartärkiesbasis 33
Abbildung 2.5: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung im Zeitraum 1992 bis 2015 37
Abbildung 2.6: 2D- und 1D-Kontaktflächen einer Leakage-Randbedingung in Feflow (DHI Wasy GmbH, 2017) 38
Abbildung 2.7:Ermittlung des MW-Wasserspiegels am Beispiel des Querschnitts bei Fkm 106,8. 40
Abbildung 2.8: Wasserspiegel entlang der Paar 40
Abbildung 2.9: Wasserspiegel im Einzugsgebiet der Paar (Nebengewässer und Paar südlich von Fkm 116 wurden mit Wasserspiegeln aus dem Geländemodell belegt). 41
Abbildung 2.10: Interpolierte Wasserspiegellagen der Stadtbäche (Punkte entsprechen Randbedingungen im Modell, Dreiecke entsprechen Messwerten) 43
Abbildung 2.11: Interpolierte Wasserspiegellagen des Lochbachs, der Bäche im Stadtwald sowie am Verlorenen Bach/Hagenbach (Punkte entsprechen Randbedingungen im Modell, Dreiecke entsprechen Messwerten) 45
Abbildung 2.12: Wasserspiegellagen des Lechs 47
Abbildung 2.13: Wasserspiegellagen der Wertach und Singold 49
Abbildung 2.14: Interpolierte Wasserspiegellagen der Schmutter (Punkte entsprechen Randbedingungen im Modell, Dreiecke entsprechen Messwerten) 51
Abbildung 2.15: Austretendes Grundwasser unterstrom des Absturz 50,4 (hier: westlich des Lechs). Bild links: Teich, Bild rechts: Abfluss vom Teich zum Lech. 52
Abbildung 2.16: Grundwasserbrunnen im Modellgebiet 55
Abbildung 2.17: Grundwasserhaltungen in der Innenstadt Augsburg 57
Abbildung 2.18: Höhen der Abwasserkanäle 59
Abbildung 2.19: Messstellen am Südrand 61
Abbildung 2.20: Ganglinien der Messstellen Koe11 (Lechtal) und gkd_8242 (Wertachtal) 62
Abbildung 2.21: Grundwasserneubildung des gesamten Modellgebiets 63
Abbildung 2.22: Ganglinie des Wasserspiegels an der Messstelle Mering (Vergleich zwischen Messung und den modulierten, flächigen Wasserspiegeln) 64
Abbildung 2.23: Ausuferungsflächen der Paar (Simulationsergebnis aus der instationären Wasserspiegelsimulation für das HW1999) 65

Abbildung 2.24: Ausuferungsflächen an Fkm 52 vor dem Pfingsthochwasser (links) und während des Pfingsthochwassers (rechts) (Ausuferungsflächen werden rot dargestellt) 67
Abbildung 2.25: Ganglinie des Wasserspiegels an der Messstelle Pegel Haunstetten (Vergleich zwischen Messung und den modulierten, flächigen Wasserspiegeln)..... 68
Abbildung 2.26: Vergleich zwischen modulierter und gemessener Wasserspiegelganglinie am Pegel Oberhausen 69
Abbildung 2.27: Ausuferungsflächen der Wertach (Stationäre Berechnung HQ100) 70
Abbildung 2.28: Durchlässigkeiten des Grundwassermodells Königsbrunn (HydroConsult, 2003) 74
Abbildung 2.29: Initiale Durchlässigkeitsverteilung 75
Abbildung 2.30: Blockbild des Grundwassermodells Licca Liber mit Angaben zu Randbedingungen und den Modellschichten. 78
Abbildung 3.1: Kalibrierabschnitte an den Gewässern im Stadtwald, rechts des Lechs sowie Referenzmessstellen für die Anpassung des Lechs. 83
Abbildung 3.2: Kalibrierabschnitte an den Gewässern im Stadtgebiet 87
Abbildung 3.3: Kalibrierabschnitte an den Gewässern im Wertachtal 89
Abbildung 3.4: Bereiche für Bewertung der Modellgüte 102
Abbildung 3.5: Räumliche Verteilung der Anpassungsgüte der Simulation im Aussagegebiet 103
Abbildung 3.6: Gegenüberstellung von gemessenen und simulierten Grundwasserständen 104
Abbildung 3.7: Abweichung zwischen Messung und Simulation in Abhängigkeit des Grundwasserstands 104
Abbildung 4.1: Fremdwasser der Kanalisation Augsburg für das Jahr 1999 (TBA, 2017) 107
Abbildung 4.2: Mittlere Sohle ober- und unterstrom des Hochablasses vor und nach dem HW1999 108
Abbildung 4.3: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen für den Leakage-Koeffizienten der MW2010-Kalibrierung sowie für den rekalibrierten Leakage-Koeffizienten des HW1999 Zeitraums an der Messstelle tba_0410a (Übergangsbereich vom Stadtwald zum bebauten Innenstadtbereich, Lech-fern) 110
Abbildung 4.4: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen für den Leakage-Koeffizienten der MW2010-Kalibrierung sowie für den rekalibrierten Leakage-Koeffizienten des HW1999 Zeitraums an der Messstelle tba_0606 (Übergangsbereich vom Stadtwald zum bebauten Innenstadtbereich, Lech-fern) 111
Abbildung 4.5: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen für den Leakage-Koeffizienten der MW2010-Kalibrierung sowie

für den rekalibrierten Leakage-Koeffizienten des HW1999 Zeitraums an der Messstelle tba_0897 (Innenstadtbereich, Lech-nah) 111
Abbildung 4.6: Bilanz der Abwasserkanäle für den Leakage-Koeffizienten der MW2010-Kalibrierung....112
Abbildung 4.7: Bilanz der Abwasserkanäle für den rekalibrierten Leakage-Koeffizienten der HW1999-Kalibrierung....113
Abbildung 4.8: Wirkung der Ausuferung der Paar auf eine von der Ausuferung betroffene Messstelle in Kissing (Paar-nah) 114
Abbildung 4.9: Wirkung der Ausuferung der Paar auf eine von der Ausuferung betroffene Messstelle in Kissing (Paar-fern) 115
Abbildung 4.10: : Wirkung der Ausuferung der Paar auf eine von der Ausuferung betroffene Messstelle in Mering (Paar-fern)....115
Abbildung 4.11: Wirkung der Ausuferung der Paar auf eine von der Ausuferung nicht betroffene Messstelle am Lech (Paar-fern)....116
Abbildung 4.12: Messstelle im nördlichen Bereich der Ausuferung der Wertach....116
Abbildung 4.13: Messstelle im südlichen Bereich der Ausuferung 117
Abbildung 4.14: Lech-nahe Messstelle oberstrom des Hochablasses....118
Abbildung 4.15: Lech-ferne Messstelle oberstrom des Hochablasses 119
Abbildung 4.16: Lech-nahe Messstelle unterstrom des Hochablasses....119
Abbildung 4.17: Auswertung der Abflussmessung (WWA Donauwörth, 2016) je Bilanzabschnitt (rote Linie) in Bezug auf die mittlere Breite (B), mittlere Geschwindigkeit (v) und mittleren Anstieg der Wasserspiegel durch eine Zunahme des Abfluss im Bilanzabschnitt um 500 l/s....121
Abbildung 4.18: Lech-ferne Messstelle im Stadtwald mit geringer Änderung während des Hochwasserereignis durch eine instationäre Wasserspiegel-Anpassung an den Bächen im Stadtwald....122
Abbildung 4.19: Lech-nahe Messstelle im Stadtwald mit geringer Änderung während des Hochwasserereignis durch eine instationäre Wasserspiegel-Anpassung an den Bächen im Stadtwald....122
Abbildung 4.20: Hochwasserbedingte Abnahme der Infiltration in einigen Bilanzabschnitten des Stadtwalds ohne Berücksichtigung einer Erhöhung von Wasserspiegeln (vgl. Abbildung 3.1 zur Lage der Bilanzabschnitte) 123
Abbildung 4.21: Hochwasserbedingte Abnahme der Infiltration in einigen Bilanzabschnitten des Stadtwalds bei Berücksichtigung einer Erhöhung von Wasserspiegeln (vgl. Abbildung 3.1 zur Lage der Bilanzabschnitte) 124
Abbildung 4.22: Messstelle im Postglazial zwischen Lech und Paar....125
Abbildung 4.23: Messstelle im Postglazial im Bereich Königsbrunn/Haunstetten....125
Abbildung 4.24: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_9069....126
Abbildung 4.25: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8836....127

Abbildung 4.26: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle Koe1 127
Abbildung 4.27: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8835 (südlicher Stadtwald, Lech-nah) 129
Abbildung 4.28: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8834 (südlicher Stadtwald, Lech-fern) 129
Abbildung 4.29: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_2002 (mittlerer Stadtwald, Lech-nah) .130
Abbildung 4.30: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_2028 (mittlerer Stadtwald, Lech-fern) .130
Abbildung 4.31: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_2043 (mittlerer Stadtwald, Lech-fern) .131
Abbildung 4.32: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_1047 (nördlicher Stadtwald, Lech-nah) 131
Abbildung 4.33: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_1002 (nördlicher Stadtwald, Lech-nah) 132
Abbildung 4.34: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_1005 (nördlicher Stadtwald, Lech-fern) 132
Abbildung 4.35: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24402 (südöstlicher Bereich zwischen Lech und Paar, Lech-nah) 134
Abbildung 4.36: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle gkd_8270 (südöstlicher Bereich zwischen Lech und Paar, Lech-fern) 135
Abbildung 4.37: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24418 (nördlicher Bereich zwischen Lech und Paar Höhe Kissing, Lech-nah) 135
Abbildung 4.38: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24420 (nördlicher Bereich zwischen Lech und Paar Kissing, Lech-fern) 136
Abbildung 4.39: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24422 (nördlicher Bereich zwischen Lech und Paar, außerhalb Aussagegebiet Kissing, Lech-fern) 136
Abbildung 4.40: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0410a (Übergangsbereich vom Stadtwald zum bebauten Innenstadtbereich, Lech-fern) 138

Abbildung 4.41: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0606 (Übergangsbereich vom Stadtwald zum bebauten Innenstadtbereich, Lech-fern) 138
Abbildung 4.42: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0897 (Innenstadtbereich, Lech-nah) 139
Abbildung 4.43: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0610 (Nördlicher Innenstadtbereich, Lech-nah) 139
Abbildung 4.44: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0613 (Bereich Wertachmündung, Wertach-nah) 140
Abbildung 4.45: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0127 (Augsburg Ost, nahe Kuhsee) 141
Abbildung 4.46: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0100a (Augsburg Ost, nahe östlicher Grenze des Aussagegebiets, eher Lech-fern) 141
Abbildung 4.47: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle gkd_8193 (Augsburg Ost, außerhalb östlicher Grenze des Aussagegebiets, nahe Autobahn, Lech-fern).....142
Abbildung 4.48: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0127 (Augsburg Ost, nahe Wertachmündung, Lech-nah) 142
Abbildung 4.49: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0049 (Augsburg Ost, nahe nördlicher Grenze des Aussagegebiets) 143
Abbildung 4.50: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle bew_1003 (Augsburg Nord, nahe nördlicher Grenze des Aussagegebiets) 144
Abbildung 4.51: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0625 (Augsburg Nord, nördlich Wertachmündung).....144
Abbildung 4.52: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0697 (Augsburg Nord, südlich Wertachmündung, Wertach-fern) 145
Abbildung 4.53: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0135c (Augsburg Nord, südlich Grenze Aussagegebiet, Wertach-nah) 145
Abbildung 4.54: Wasserbilanz des Lech im südlichen Planungsraum (Lage der Bilanzbereiche siehe Kapitel 3.1.2.2).....147
Abbildung 4.55: Wasserbilanz des Lech im nördlichen Planungsraum (Lage der Bilanzbereiche siehe Kapitel 3.1.2.4).....148

Abbildung 4.56: Bilanz des Lochbachs je Abschnitt 150
Abbildung 4.57: Bilanz der Gewässer im Stadtwald 151
Abbildung 4.58: Bilanz der Stadtbäche 152
Abbildung 4.59: Bilanz des Kuh- und Weitmannsees (beide Seen sind mit einem Abfluss/Überfall versehen) 153
Abbildung 4.60: Bilanz der Paar (im Flussschlauch, Ausuferung wird gesondert betrachtet) 154
Abbildung 4.61: Bilanz der Wertach je Abschnitt (vgl. Kapitel 3.1.2.6). 155
Abbildung 4.62: Bilanz der Ausuferungsflächen während des Pfingsthochwassers 156
Abbildung 4.63: Bilanz der Kanalisation (Fremdwasserandrang) 157
Abbildung 4.64: Absolute Abweichung an Messstellen in Königsbrunn/Haunstetten 161
Abbildung 4.65: Absolute Abweichung an Messstellen in Stadtwald und im Bereich zwischen Lech und Paar 162
Abbildung 4.66: Absolute Abweichung an Messstellen im Innenstadtbereich, im Augsburger Osten sowie im nördlichen Lechtal 163
Abbildung 4.67: Absolute Abweichung an Messstellen im Wertachtal 164
Abbildung 5.1: Wasserstand des Lechs am Pegel Haunstetten und am Pegel unterhalb der Wertachmündung 166
Abbildung 5.2: Ganglinie des Grundwasserstands an der Messstelle SWA_1807 166
Abbildung 5.3: Abfluss der Paar am Pegel Mering 168
Abbildung 5.4: Abfluss an der Ausleitung des Lochbachs aus dem Lech (Pegel Unterbergen) (LfU, 2017) 169
Abbildung 5.5: Fremdwasser der Kanalisation Augsburg für das Jahr 2005 (TBA, 2017) 171
Abbildung 5.6: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_9069 172
Abbildung 5.7: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8836 172
Abbildung 5.8: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8833 173
Abbildung 5.9: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8067 173
Abbildung 5.10: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8835 (südlicher Stadtwald, Lech-nah) 175
Abbildung 5.11: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8834 (südlicher Stadtwald, Lech-fern) 176
Abbildung 5.12: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_2002 (mittlerer Stadtwald, Lech-nah) .176
Abbildung 5.13: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_2028 (mittlerer Stadtwald, Lech-fern) .177

Abbildung 5.14: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_2043 (mittlerer Stadtwald, Lech-fern) .177
Abbildung 5.15: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_1047 (nördlicher Stadtwald, Lech-nah) 178
Abbildung 5.16: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_1002 (nördlicher Stadtwald, Lech-nah) 178
Abbildung 5.17: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_1005 (nördlicher Stadtwald, Lech-fern) 179
Abbildung 5.18: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_1839 (nördlicher Stadtwald, Lech-nah) 179
Abbildung 5.19: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24402 (südöstlicher Bereich zwischen Lech und Paar, Lech-nah) 180
Abbildung 5.20: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle gkd_8270 (südöstlicher Bereich zwischen Lech und Paar, Lech-fern).....181
Abbildung 5.21: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24418 (nördlicher Bereich zwischen Lech und Paar Höhe Kissing, Lech-nah) 181
Abbildung 5.22: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24420 (nördlicher Bereich zwischen Lech und Paar Kissing, Lech-fern) 182
Abbildung 5.23: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24422 (nördlicher Bereich zwischen Lech und Paar, außerhalb Aussagegebiet Kissing, Lech-fern) 182
Abbildung 5.24: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0410a (Übergangsbereich vom Stadtwald zum bebauten Innenstadtbereich, Lech-fern) 184
Abbildung 5.25: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0418 (Übergangsbereich vom Stadtwald zum bebauten Innenstadtbereich, Lech-fern) 184
Abbildung 5.26: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0898 (Innenstadtbereich, Lech-nah)....185
Abbildung 5.27: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0747 (Nördlicher Innenstadtbereich, Lech-nah) 185

Abbildung 5.28: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0613 (Bereich Wertachmündung, Wertach-nah) 186
Abbildung 5.29: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0127 (Augsburg Ost, nahe Kuhsee) 187
Abbildung 5.30: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0100a (Augsburg Ost, nahe östlicher Grenze des Aussagegebiets, eher Lech-fern) 188
Abbildung 5.31: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle gkd_8193 (Augsburg Ost, außerhalb östlicher Grenze des Aussagegebiets, nahe Autobahn, Lech-fern).....188
Abbildung 5.32: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0127 (Augsburg Ost, nahe Wertachmündung, Lech-nah) 189
Abbildung 5.33: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0049 (Augsburg Ost, nahe nördlicher Grenze des Aussagegebiets) 189
Abbildung 5.34: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle bew_1003 (Augsburg Nord, nahe nördlicher Grenze des Aussagegebiets) 190
Abbildung 5.35: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0625 (Augsburg Nord, nördlich Wertachmündung).....191
Abbildung 5.36: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0697 (Augsburg Nord, südlich Wertachmündung, Wertach-fern) 191
Abbildung 5.37: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0132a (Augsburg Nord, südlich Grenze Aussagegebiet, Wertach-nah) 192
Abbildung 5.38: Wasserbilanz des Lech im südlichen Planungsraum (Lage der Bilanzbereiche siehe Kapitel 3.1.2.2).....193
Abbildung 5.39: Wasserbilanz des Lech im nördlichen Planungsraum (Lage der Bilanzbereiche siehe Kapitel 3.1.2.4).....194
Abbildung 5.40: Bilanz des Lochbachs je Abschnitt 196
Abbildung 5.41: Bilanz der Gewässer im Stadtwald 197
Abbildung 5.42: Bilanz der Stadtbäche 198
Abbildung 5.43: Bilanz des Kuh- und Weitmannsees (beide Seen sind mit einem Abfluss/Überfall versehen) 199
Abbildung 5.44: Bilanz der Paar (im Flussschlauch, Ausuferung wird gesondert betrachtet).....200
Abbildung 5.45: Bilanz der Wertach je Abschnitt (vgl. Kapitel 3.1.2.6). 201

Abbildung 5.46: Bilanz der Kanalisation (Fremdwasserandrang) 202
Abbildung 5.47: Absolute Abweichung an Messstellen in Königsbrunn/Haunstetten 205
Abbildung 5.48: Absolute Abweichung an Messstellen in Stadtwald und im Bereich zwischen Lech und Paar 205
Abbildung 5.49: Absolute Abweichung an Messstellen im Innenstadtbereich, im Augsburger Osten sowie im nördlichen Lechtal.....206
Abbildung 5.50: Absolute Abweichung an Messstellen im Wertachtal.....207
Abbildung 6.1: Abfluss des Lech am Pegel Haunstetten und am Pegel u.d. Wertachmündung sowie zugehörige MNQ Abflüsse.....209
Abbildung 6.2: Ganglinie des Grundwasserstands an der Messstelle SWA_9069 (Bereich Königsbrunn).....210
Abbildung 6.3: Ganglinie des Grundwasserstands an der Messstelle SWA_2028 (Bereich Stadtwald).....211
Abbildung 6.4: Ganglinie des Grundwasserstands an der Messstelle UNIPER_24420 (Bereich zwischen Lech und Paar).....211
Abbildung 6.5: Ganglinie des Grundwasserstands an der Messstelle tba_0809 (Bereich Innenstadt).....212
Abbildung 6.6: Ganglinie des Grundwasserstands an der Messstelle tba_0050 (Bereich Augsburg Ost).....212
Abbildung 6.7: Monatliche Grundwasserneubildung im Modellgebiet für den Gesamtzeitraum sowie gegen Ende des Jahrs 2005.....213
Abbildung 6.8: Differenz zwischen MNW und MW-Berechnung.....216
Abbildung 7.1: Abweichung der Grundwasserstände zwischen Messung und Simulation im Gesamtgebiet für verschiedene kf-Wert Faktoren für Mittelwasser April/Mai 2010. 225
Abbildung 7.2: Abweichung der Grundwasserstände zwischen Messung und Simulation im Gesamtgebiet für verschiedene Leakagekoeffizienten für Mittelwasser April/Mai 2010. 229
Abbildung 7.3: Abweichung der Grundwasserstände zwischen Messung und Simulation im Gesamtgebiet für verschiedene Grundwasserneubildungsraten für Mittelwasser April/Mai 2010.....232
Abbildung 7.4: Vergleich der Ganglinien an der Messstelle swa_9069 (Königsbrunn) für verschiedene Sensitivitätsläufe zum speichernutzbaren Hohlraumanteil 235
Abbildung 7.5: Vergleich der Ganglinien an der Messstelle swa_2043 (Stadtwald) für verschiedene Sensitivitätsläufe zum speichernutzbaren Hohlraumanteil 235
Abbildung 7.6: Vergleich der Ganglinien an der Messstelle uniper_24420 (Bereich zw. Lech und Paar) für verschiedene Sensitivitätsläufe zum speichernutzbaren Hohlraumanteil 236

Abbildung 7.7: Bereiche in denen während des HW1999-Kalibrierungszeitraum eine Reduzierung des speichernutzbaren Hohlraumanteils zu einer verbesserten Anpassung führt. 237
Abbildung 7.8: Vergleich der Ganglinien an der Messstelle swa_9069 (Königsbrunn) für den Referenzzustand und eine global reduzierte Porosität von 0,1 238
Abbildung 7.9: Vergleich der Ganglinien an der Messstelle swa_2043 (Stadtwald) für den Referenzzustand und eine global reduzierte Porosität von 0,1 239
Abbildung 7.10: Vergleich der Ganglinien an der Messstelle uniper_24420 (Bereich zw. Lech und Paar) für den Referenzzustand und eine global reduzierte Porosität von 0,1 239
Abbildung 7.11: Übersicht über den jeweils am besten angepassten Modelllauf.....240

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Angaben zu den Grundwassersammlern in Augsburg 56
Tabelle 2.2: Literaturangaben zu Durchlässigkeiten im Modellgebiet 72
Tabelle 2.3: Literaturangaben zum speichernutzbaren Hohlraumanteil im Modellgebiet 76
Tabelle 3.1: Zusammenstellung der für die stationäre Kalibrierung des Grundwassermodells verwendeten Daten 80
Tabelle 3.2: Vergleichsgrößen für die Kalibrierung von Leakage-Koeffizienten im Stadtwald, hier: Bilanzgrößen 84
Tabelle 3.3: Vergleichsgrößen für die Kalibrierung von Leakage-Koeffizienten im Stadtwald, hier: Grundwassermessstellen 85
Tabelle 3.4: Gemessene und simulierte Wasserbilanz im Bereich südlich des Hochablasses 93
Tabelle 3.5: Simulierte Wasserbilanz im Bereich südlich des Hochablasses *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)* 94
Tabelle 3.6: Gemessene und simulierte Wasserbilanz im Bereich Innenstadt 94
Tabelle 3.7: Simulierte Wasserbilanz im Bereich Innenstadt *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)* 95
Tabelle 3.8: Wasserbilanz im Wertachtal *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)* 96
Tabelle 3.9: Gemessene und simulierte Wasserbilanz weiterer Randbedingungen 96
Tabelle 3.10: Simulierte Wasserbilanz weiterer Randbedingungen *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)* 97
Tabelle 3.11: Wasserumsatz des Modells 97
Tabelle 3.12: Leakage-Koeffizienten der Kanalisation und der GW-Sammler 98
Tabelle 3.13: Güteparameter für das stationär kalibrierte Grundwassermodell 101
Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse im Bereich Stadtwald 133
Tabelle 6.1: Gemessene und simulierte Wasserbilanz im Bereich südlich des Hochablasses für den MNQ-Referenzlauf 218
Tabelle 6.2: Simulierte Wasserbilanz im Bereich südlich des Hochablasses für den MNQ-Referenzlauf *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)* 219
Tabelle 6.3: Gemessene und simulierte Wasserbilanz im Bereich Innenstadt für den MNQ-Referenzlauf 219
Tabelle 6.4: Simulierte Wasserbilanz im Bereich Innenstadt für den MNQ-Referenzlauf *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)* 220

Tabelle 6.5: Wasserbilanz im Wertachtal für den MNQ-Referenzlauf *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)* 221
Tabelle 6.6: Simulierte Wasserbilanz weiterer Randbedingungen für den MNQ-Referenzlauf *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)* 221
Tabelle 6.7: Wasserumsatz des Modells für den MNQ-Referenzlauf (Lage der Randbedingungen, s. Anlage 6.2.2) 222
Tabelle 7.1: Übersicht über durchgeführte Sensitivitätsläufe. 224
Tabelle 7.2: Mittlere absolute Abweichung verschiedener Messstellengruppen für verschiedene kf-Wert Faktoren für Mittelwasser April/Mai 2010. 225
Tabelle 7.3: Vergleich In- und Exfiltrationsraten für Gewässerabschnitte mit Messung für verschiedene kf-Wert Faktoren. 227
Tabelle 7.4: Mittlere absolute Abweichung verschiedener Messstellengruppen für verschiedene Leakage-Koeffizienten Faktoren für Mittelwasser April/Mai 2010.....228
Tabelle 7.5: Vergleich In- und Exfiltrationsraten für Gewässerabschnitte mit Messung für verschiedene Leakage-Koeffizienten Faktoren.....230
Tabelle 7.6: Mittlere absolute Abweichung verschiedener Messstellengruppen für verschiedene Faktoren für die Grundwasserneubildungsrate für Mittelwasser April/Mai 2010. 231
Tabelle 7.7: Vergleich In- und Exfiltrationsraten für Gewässerabschnitte mit Messung für verschiedene Grundwasserneubildungsraten. 233
Tabelle 7.8: Beispielhafte Korrelationsmatrix für die Gegenüberstellung von kf-Wert und Leakage-Koeffizient. 242
Tabelle 7.9: Korrelation zwischen kf-Wert und Leakage-Koeffizient für Grundwassermessstellen im Gesamtgebiet. 243
Tabelle 7.10: Korrelation zwischen kf-Wert und Leakage-Koeffizient für Grundwassermessstellen im Aussagegebiet. 243
Tabelle 7.11: Korrelation zwischen kf-Wert und Leakage-Koeffizient für Grundwassermessstellen im Stadtwald. 244
Tabelle 7.12: Korrelation zwischen kf-Wert und Leakage-Koeffizient für In- und Exfiltrationsraten für die Gewässerabschnitte südlich des Hochablasses. 245

Anlagenverzeichnis

Anlage 6.2.1: Übersichtslageplan Modellgebiet (Messstellen, Grundwasserentnahmen, Wasserschutzgebiete, Geologische Einheiten)
Anlage 6.2.2: Übersichtslageplan Diskretisierung und Randbedingungen des Grundwassermodells
Anlage 6.2.3: Übersichtslageplan Gewässer im Stadtwald
Anlage 6.2.4: Grundwassergleichen MW2010 (Messung) und grundwassererfüllte Mächtigkeit
Anlage 6.2.5: Wasserspiegel der Oberflächengewässer
Anlage 6.2.6: Stationär kalibrierte Durchlässigkeiten
Anlage 6.2.7: Stationär Kalibrierte Leakage-Koeffizienten InfiltrationAnlage 6.2.8: Stationär Kalibrierte Leakage-Koeffizienten Exfiltration
Anlage 6.2.9: GWGL im südlichen Aussagegebiet bei Mittelwasser und Abweichung je Messstelle
Anlage 6.2.10: GWGL im nördlichen Aussagegebiet bei Mittelwasser und Abweichung je Messstelle
Anlage 6.2.11: Übersichtskarte Wasserflüsse
Anlage 6.2.12: Übersichtskarte Speichernutzbarer Hohlraumanteil
Anlage 6.2.13: GWGL im südlichen Aussagegebiet während dem Pfingsthochwasser 1999 und NSME'-Koeffizient je Messstelle
Anlage 6.2.14: GWGL im nördlichen Aussagegebiet während dem Pfingsthochwasser 1999 und NSME'-Koeffizient je Messstelle
Anlage 6.2.15: GWGL im südlichen Aussagegebiet während dem Hochwasserereignis 2005 und NSME'-Koeffizient je Messstelle
Anlage 6.2.16: GWGL im nördlichen Aussagegebiet während dem Hochwasserereignis 2005 und NSME'-Koeffizient je Messstelle
Anlage 6.2.17: Grundwassergleichen für den quartären Grundwasserleiter im südlichen Aussagegebiet bei MW (2010) und MNW
Anlage 6.2.18: Grundwassergleichen für den quartären Grundwasserleiter im nördlichen Aussagegebiet bei MW (2010) und MNW

Wichtige Begriffe

Hydrogeologisches Modell	„Eine aus einer Modellvorstellung heraus entwickelte in sich schlüssige und parametrisierte Beschreibung und Darstellung hydrogeologischer Strukturen und Prozesse.“ DVGW (2016)
Grundwassermodell	„Grundwassermodelle schließen die Lücke zwischen der Erkundung bzw. Überwachung und der Beschreibung des Systemverhaltens von Strömungs- und Transportprozessen in Grundwasservorkommen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie die naturräumlichen Gegebenheiten unter Einbeziehung aller wesentlichen Einflussgrößen aus Geologie und Hydrogeologie modellhaft widerspiegeln und flächendeckende und zeitlich differenzierte Analysen und Prognosen liefern.“ (DVGW, 2016) Das Grundwassermodell für das Projekt Licca Liber wird dazu verwendet, die Auswirkungen der geplanten Maßnahmen am Lech auf die Grundwasserverhältnisse zu prognostizieren.
Modellgebiet	Das Modellgebiet umfasst den Teil des Untersuchungsraums, der vom Grundwassermodell abgebildet wird. „Das Modellgebiet muss nach hydrogeologisch-geohydraulischen Kriterien ausreichend groß bemessen sein und sich in seiner Abgrenzung an natürlichen geohydraulischen Grenzen ([…]) orientieren.“ (DVGW, 2016)
Aussagegebiet	„Aus modelltechnischen Gründen müssen an den äußeren Grenzen eines Modellgebietes Randbedingungen festgelegt werden. Sie können die Ergebnisse der Modellierungen beeinflussen und zwar umso stärker, je näher der Ort der Aussage am Modellrand liegt. Deshalb soll nach Möglichkeit innerhalb des Modellgebietes ein kleineres Aussagegebiet mit genügend großem Abstand zu den Rändern ausgewiesen werden, für welches das Modell hinreichend genaue Aussagen ermöglicht.“ (DVGW, 2016) Im vorliegenden Fall reicht das Aussagegebiet im Westen bis zur Hochterrasse, im Süden ungefähr bis zum Lech Fkm 59, im Osten wird noch etwa die Hälfte des Gebiets zwischen Paar und Lech abgedeckt und im Norden endet das Aussagegebiet

	etwa auf Höhe der A8.
Kalibrierung	Bei der Kalibrierung werden die Modellparameter so bestimmt, dass eine möglichst hohe Übereinstimmung zwischen Grundwassermodell und historischen Beobachtungen (z.B. Ganglinien an Grundwassermessstellen, Abflüsse, …) erreicht wird. Dazu werden unsichere Parameter (wie Durchlässigkeiten, Leakage-Koeffizienten, Speicherkoeffizienten, Transportparameter, …) sowie Randbedingungen variiert, bis sich der verbleibende Fehler auf ein akzeptables Minimum reduziert.
Modelltest	„Überprüfung eines kalibrierten Modells, indem Messwerte eines Systemzustands nachgebildet werden, der noch nicht für eine Modellkalibrierung herangezogen worden ist. Gebräuchlich ist auch der Begriff Validierung.“ (DVGW, 2016)
Infiltration und Exfiltration	Bei der Infiltration handelt es sich um einen Prozess, in dem durch Aussickerungen von Wasser aus Flüssen, Bächen, Gräben oder Seen eine Speisung des Grundwassers stattfindet. Infiltration kann nicht nur aus dem Gewässer selbst stattfinden. Im Hochwasserfall findet die Infiltration meist auch über Ausuferungsflächen der Gewässer statt. Der Infiltrations-Prozess setzt voraus, dass die Wasserspiegel im Gewässer über denen des Grundwassers stehen. Exfiltration ist der umgekehrte Prozess zur Infiltration. Er beschreibt Situationen, in denen Grundwasser an oberirdische Gewässer abgegeben wird.
Randbedingung	An den Rändern des Grundwassermodells müssen sogenannte Randbedingungen definiert werden. Es handelt sich um Vorgaben für das Modell. Typische Randbedingungen sind: **Festpotenzialrand**: Es wird i.d.R. ein aus Grundwasserstandsmessungen abgeleiteter Grundwasserstand dem Modell vorgegeben. Im Modell für Licca Liber wurde die Randbedingung beispielsweise am südlichen und nördlichen Modellrand gewählt. Durch diese Randbedingung stellt sich am entsprechenden Modellrand der vorgegebene Grundwasserstand ein. Der Zufluss an Grundwasser stellt sich entsprechend dem Gefälle der Grundwasseroberfläche und dem lokalen Durchlässigkeitsbeiwert ein. **Zuflussrand**: Diese Randbedingung wird im Grundwassermodell für Licca Liber für Zuflüsse über Teile des westlichen und östlichen Modellrands gewählt. Ein Sonderfall

	ist der „No-Flow“-Rand, an dem der Zufluss 0 m³/ (s m) beträgt. Dabei handelt sich um eine Randbedingung, die oft am Übergang von einem gutdurchlässigen zu einem undurchlässigen Untergrund verwendet wird. Im Grundwassermodell für Licca Liber stammt das zuströmende Wasser u.a. aus den außerhalb des Modellgebiets anschließenden tertiären Grundwasserleitern. **Leakage-Rand**: Es handelt sich um eine Randbedingungen an der ein Massenfluss in Abhängigkeit einer Differenz von Wasser- bzw. Grundwasserständen und eines Widerstands stattfindet. Typischerweise wird der Leakage-Rand zur Simulation des Austauschens zwischen Gewässern (Flüsse, Bäche, etc.) und dem Grundwasserleiter verwendet. Angetrieben wird der Austausch von der Differenz aus Wasserstand im Gewässer und dem umliegenden Grundwasserstand. Begrenzt wird der Austausch durch die Sohldichtung (oder Kolmation) des Gewässers. Auch die Austauschfläche spielt für die Größe der Austauschrate eine Rolle.

Abkürzungsverzeichnis

MW	Mittelwasser
HGM	Hydrogeologische Modell
FKM	Flusskilometer
GKD	Gewässerkundlicher Dienst (meist im Zusammenhang mit Grundwasser- oder Wasserspiegelmessungen)
HGK500	Hydrogeologische Karte 1:500000 (LfU, 2016)
HGW	Tertiäres Hauptgrundwasserstockwerk, wird unterteilt in HGW1 (1. Tertiäres Hauptgrundwasserstockwerk) und HGW2
MNW	Mittelwert der jährlichen Niedrigwasserstände einer Zeitreihe
HQ	Hochwasser
A	Fläche meist als durchströmte Fläche verwendet [m²]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]
BC	Boundary Condition oder Randbedingung
Uniper	Betreiber der Staustufe 23 (betreibt Grundwassermessstellen östlich des Lechs)
WWA	Wasserwirtschaftsamt (wenn nicht anders vermerkt: Wasserwirtschaftsamt Donauwörth)
TBA	Tiefbauamt (wenn nicht anders vermerkt: Tiefbauamt Augsburg)

Einheitenverzeichnis

m	Längeneinheit Meter
Mm	Längeneinheit Millimeter
km	Längeneinheit Kilometer
km²	Flächeneinheit Quadratkilometer
s	Zeiteinheit Sekunde
d	Zeiteinheit Tag
mon	Zeiteinheit Monat
a	Zeiteinheit Jahr
m/s	Geschwindigkeit, auch gebräuchlich für die Durchlässigkeit des Untergrunds
l/s	Einheit für den Abfluss oder Durchfluss in Litern pro Sekunde
m³/s	Einheit für den Abfluss oder Durchfluss in Kubikmeter pro Sekunde (1 m³/s entspricht 1000 l/s)
m ü. NN	Einheit für die Höhe im Metern über dem Meeresspiegel. Diese Einheit ist nicht nur für die Geländehöhe oder Höhe von Bauwerken gebräuchlich, sondern auch für Wasserspiegel und Grundwasserstände

Hinweis: In Tabellen und Abbildungen werden zur Wahrung eines einheitlichen Erscheinungsbilds im Bericht Punkte als Dezimaltrennzeichen verwendet, da einige Software-Pakete die zur Erstellung von Visualisierungen verwendet wurden nur Punkte als Dezimaltrennzeichen unterstützen (z.B. Feflow). Im Fließtext wird ein Komma als Dezimaltrennzeichen verwendet.

1 Einleitung

1.1 Projekt Licca Liber

Das Lechtal im Raum Augsburg unterliegt vielfältigen Nutzungsansprüchen. Energiegewinnung, Naherholung, Naturschutz, Hochwasserschutz, Landwirtschaft und Trinkwasserwassergewinnung prägen den Lech und dessen Umfeld. Verbau und Eintiefung des Lechs haben in der Vergangenheit zu einem Lebensraumverlust für Tiere und Pflanzen geführt. Es besteht Handlungsbedarf, den eingetreten negativen Entwicklungen entgegen zu wirken.

Ziel des Projektes „Licca liber“ ist die Stabilisierung der Flusssohle bei gleichzeitiger Renaturierung des Flusses sowie dem Erhalt des Hochwasserschutzes. Hierzu werden verschiedenste Maßnahmen untersucht.

Gegenstand der vorliegenden Arbeiten ist der Planungsabschnitt Licca liber I. Dieser verläuft von Flusskilometer 56,7 (Unterwasser der Staustufe 23) bis 37,3 (Oberwasser Wehr Gersthofen). In diesem Abschnitt befinden sich mehrere Querbauwerke, die den Wasserspiegelverlauf des Lechs prägen.

Die Grundwasserstände im Planungsabschnitt sind eng mit dem Lech verbunden. Durch die vorhandenen Querbauwerke und den damit verbundenen Sprüngen des Lechwasserspiegels ist davon auszugehen, dass der Lech sowohl Wasser an das Grundwasser abgibt (sogenannte Infiltration) als auch Grundwasser aufnimmt (Exfiltration) und sich die zu entwickelnden Maßnahmen am Lech auf die Grundwasserverhältnisse auswirken können. Dabei ist besonders zu beachten, dass in angrenzenden Kommunen bereits hohe Grundwasserstände im Bereich von bebauten Gebieten vorherrschen.

Daher werden im Rahmen der Planungen am Lech auch die Grundwasserverhältnisse mit betrachtet.

1.2 Fragestellung, Ziele und Vorgehen

Mit dem numerischen Grundwassermodell werden die potenziellen Auswirkungen von Maßnahmen am Lech untersucht. Grundlage des numerischen Grundwassermodells ist das sogenannte Hydrogeologische Modell, in dem die wesentlichen Grunddaten zusammengestellt sind.

Ziel des Grundwassermodells ist es ein Verständnis für die Prozesse im Untersuchungsraum zu entwickeln und diese in einem Grundwassermodell abzubilden. Darauf aufbauend werden die Wirkungen von Maßnahmen mit entsprechenden modellbasierten Simulationen prognostiziert.

Die vorliegende Studie kommt nicht ohne die Verwendung von technisch geprägten Begrifflichkeiten aus. Die wichtigsten Begriffe werden in einer einleitenden Übersicht (s. Kapitel „Wichtige Begriffe“) erklärt.

Die Bearbeitung orientiert sich an den Ausführungen in DVGW (2016). Entsprechend gliedert sich die Bearbeitung und Dokumentation in folgende Arbeitsschritte:

- Modellaufbau:
    - Auswahl eines geeigneten Simulationsprogramms
    - Sachgerechte Unterteilung des Modellgebiets
    - Modelltechnische Umsetzung der natürlichen Strukturen (z.B. Flüsse) und Prozesse (z.B. Grundwasserneubildung aus Niederschlägen) sowie die Zuweisung von Parametern für die Beschreibung der Eigenschaften des Untergrunds (z.B. Durchlässigkeit der Kiese und Schotter im Lechtal)
- Kalibrierung: Variation der Modellparameter, um gemessene Zustandsgrößen (z.B. Grundwasserstände) möglichst genau nachbilden zu können
    - Stationär (d.h. unter Vernachlässigung zeitlicher Änderungen) anhand der Nachbildung der Grundwasserstände im Jahr 2010, in dem aus hydrologischer Sicht mittlere Verhältnisse vorlagen
    - Instationär (d.h. zeitlich veränderlich) anhand der Nachbildung des Jahres 1999. Dieser Zeitraum beinhaltet ein Hochwasser des Lechs mit spürbaren Reaktionen im Grundwasser
- Modelltest (früher war auch der Begriff Validierung üblich) im Sinne einer Überprüfung der Kalibrierung. Dazu wird das Jahr 2005 nachgerechnet und geprüft, ob mit den in der Kalibrierung ermittelten Parametern ein unabhängiges Ereignis im Grundwassermodell nachvollzogen werden kann. Das Jahr 2005 bietet sich für diesen Test an, da ein weiteres Lechhochwasser auftrat und sich gegen Jahresende eine Niedrigwassersituation einstellte.
- Sensitivitätsanalyse einschließlich Kovarianzanalyse: Untersuchung, ob die bei der Kalibrierung gefundene Parameterbelegung eindeutig ist oder ob Doppeldeutigkeiten vorhanden sind. Doppeldeutigkeit bedeutet in diesem Kontext,

ob das Grundwassermodell auch mit anderen Kombinationen von Parametern eine vergleichbare Anpassung an die Messungen erzielt werden kann. Wenn Doppeldeutigkeiten verbleiben, hat dies zur Konsequenz, dass bei der Prognostik mit Parameterbandbreiten gearbeitet werden muss

- Prognostik: Vorhersage der Auswirkungen der am Lech vorgesehenen Maßnahmen bzw. Varianten des Projekts Licca liber auf die Grundwasserverhältnisse

Diese Arbeitsschritte und die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden dokumentiert.

2 Modellaufbau

2.1 Eingesetzte Modellsoftware

Bei der eingesetzten Modellsoftware handelt es sich um Feflow in der Version 7.0 der DHI-Wasy GmbH. Feflow zählt zu den am weitest verbreiteten Simulationsprogrammen für Grundwasserströmungen. Feflow basiert auf Finiten Elemente Methode und ist daher besonders geeignet, die zum Teil sehr großen Skalenunterschiede im Untersuchungsraum abzubilden (großräumiges Untersuchungsgebiet bei zugleich sehr kleinräumigen Anpassungen des Lechs im Planungsraum).

2.2 Modell- und Aussagegebiet

Die Abgrenzung des Modellgebiets und die Festlegung des Aussagegebiets sind im Bericht zum Hydrogeologischen Modell (ARGE SKI KUP UIBK, 2018) beschrieben. Modell- und Aussagegebiet sind in Abbildung 2.1 dargestellt. Das Modellgebiet umfasst eine Gesamtfläche von 342 km² während das Aussagebiet, das Teil des Modellgebiets ist, etwa 112 km² abdeckt.

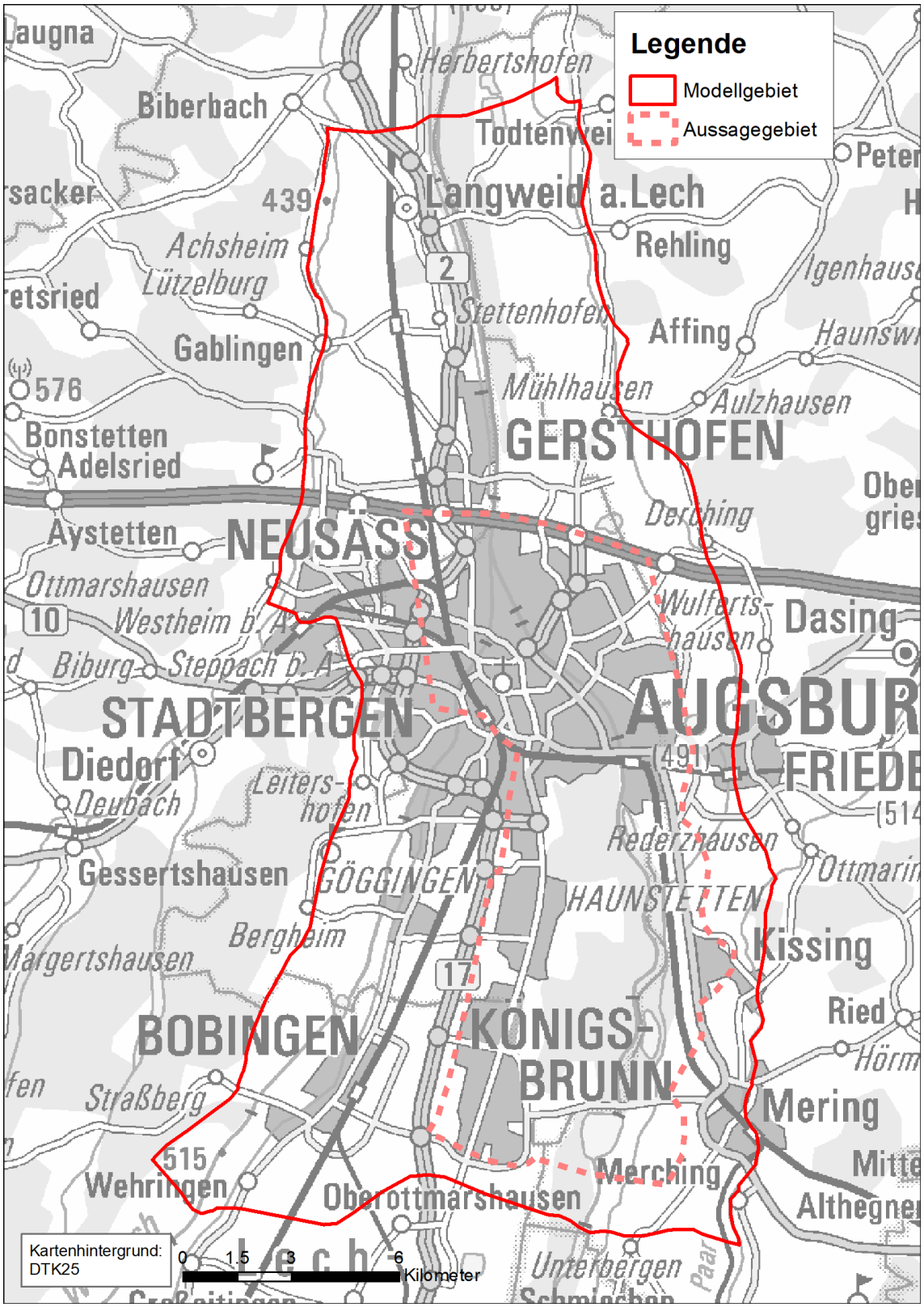

Abbildung 2.1: Modell- und Aussagebiet

2.3 Räumliche Diskretisierung

2.3.1 Horizontal

Unter räumlicher Diskretisierung wird die Unterteilung des Modellgebiets in Berechnungsknoten und -elemente verstanden. Das Ergebnis der Diskretisierung ist das sogenannte Modellnetz. Für die Generierung des Modellnetzes wurde der Netzgenerator Triangle innerhalb der Programmoberfläche von Feflow verwendet.

Das Modellnetz ist an die Lage von Gewässern, Grundwassermessstellen und Grundwasserentnahmen sowie an die Verläufe der hydrogeologischen Einheiten (Auenstufe, Postglazial, Niederterrasse, Hochterrasse) angepasst. Weiterhin wurde das Modellnetz im Aussagegebiet und im Planungsbereich (zwischen dem Wehr Gersthofen und der Staustufe 23) jeweils verfeinert. Elementgrößen variieren daher zwischen 100 m (außerhalb des Aussagegebiets) und 15 m im Planungsbereich. Abbildung 2.2 zeigt die unterschiedlichen Verfeinerungsstufen im Aussagebiet und im Planungsbereich für einen Kartenausschnitt.

Das gesamte Modellnetz ist in Anlage 6.2.2 dargestellt.

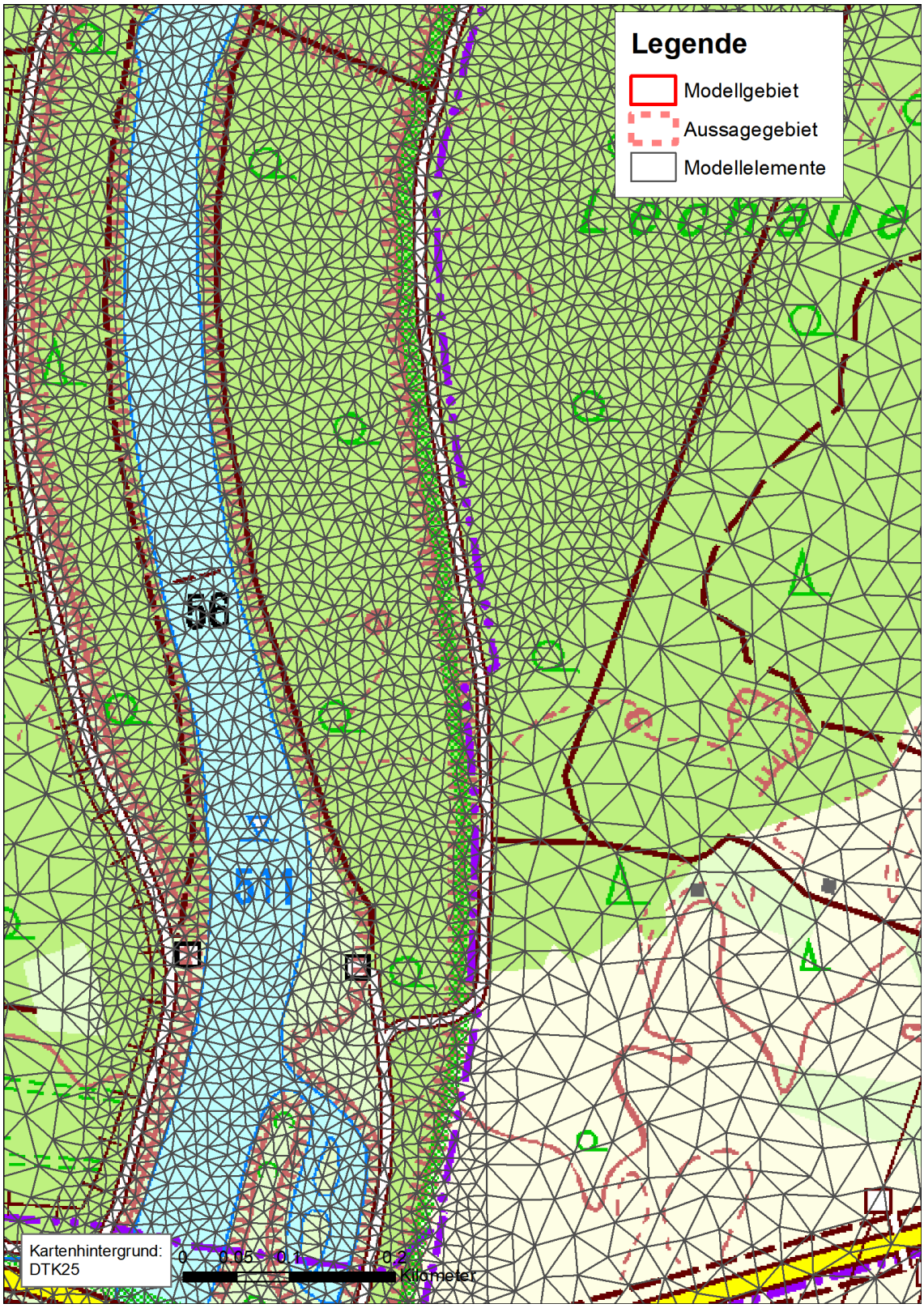

Abbildung 2.2: Modellnetz bei Fkm 56

2.3.2 Vertikal

Wie im Bericht zum Hydrogeologischen Modell (ARGE SKI KUP UIBK, 2018) ausgeführt, liegen im Modellgebiet mehrere relevante geologische Schichten vor. Neben der horizontalen Diskretisierung ist daher auch eine feinere vertikale Diskretisierung erforderlich. Das Modellnetz besteht vertikal aus 12 Schichten („Layer“). 2 Modellschichten bilden die Deckschicht ab, 7 Modellschichten repräsentieren die Quartärkiese und 3 zusätzliche Schichten bilden das tieferliegende Tertiär ab.

Die Modelloberkante entspricht der Geländeoberkante aus dem Höhenmodell (1m-Raster des WWAs Donauwörth im DHHN12-Höhensystem). Entsprechend der jeweils vorliegenden interpolierten Deckschichtmächtigkeit (vgl. Bericht zum HGM) ergibt sich für die dritte Modellschicht die Höhe der Quartärkiesoberkante (siehe Abbildung 2.4). Im Bereich des Lechs entspricht die Geländeoberkante einer Sohlvermessung (Befliegung durch die Firma AHM Consult), hier wurden keine Deckschichten angesetzt. Die Tertiäroberkante wurde auf die Oberkante von Modellschicht 10 angesetzt, wenn dadurch die Quartärkiesmächtigkeit nicht unter 0,5 m fällt (ansonsten wurde die Tertiäroberkante im Grundwassermodell angepasst). Unterhalb des Lechs wurden auch geringere Quartärkiesmächtigkeiten zugelassen.

Im Bereich von Seen entspricht die Modelloberkante dem Seewasserspiegel (ca. MW), die Oberkante von Modellschicht 3 entspricht der Sohle des Sees. Wenn Tiefenvermessungen an den Seen vorliegen (vgl. Bericht zum HGM: Ilsesee, Kuhsee, Auensee) wurden diese Höhen übernommen, an den übrigen Seen entspricht die Sohle der Tertiäroberkante.

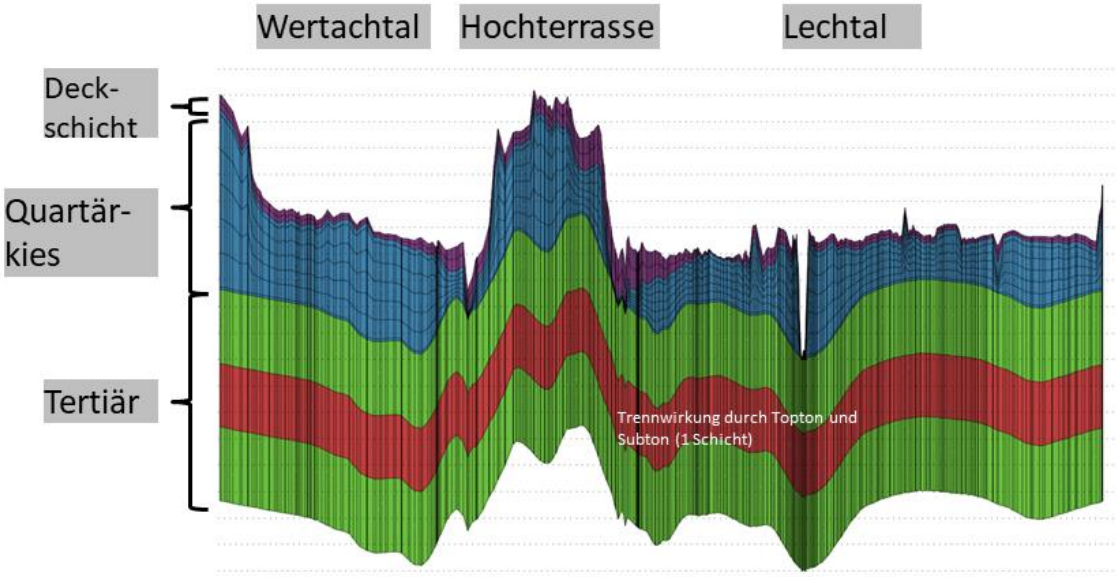

Abbildung 2.3:Vertikale Diskretisierung

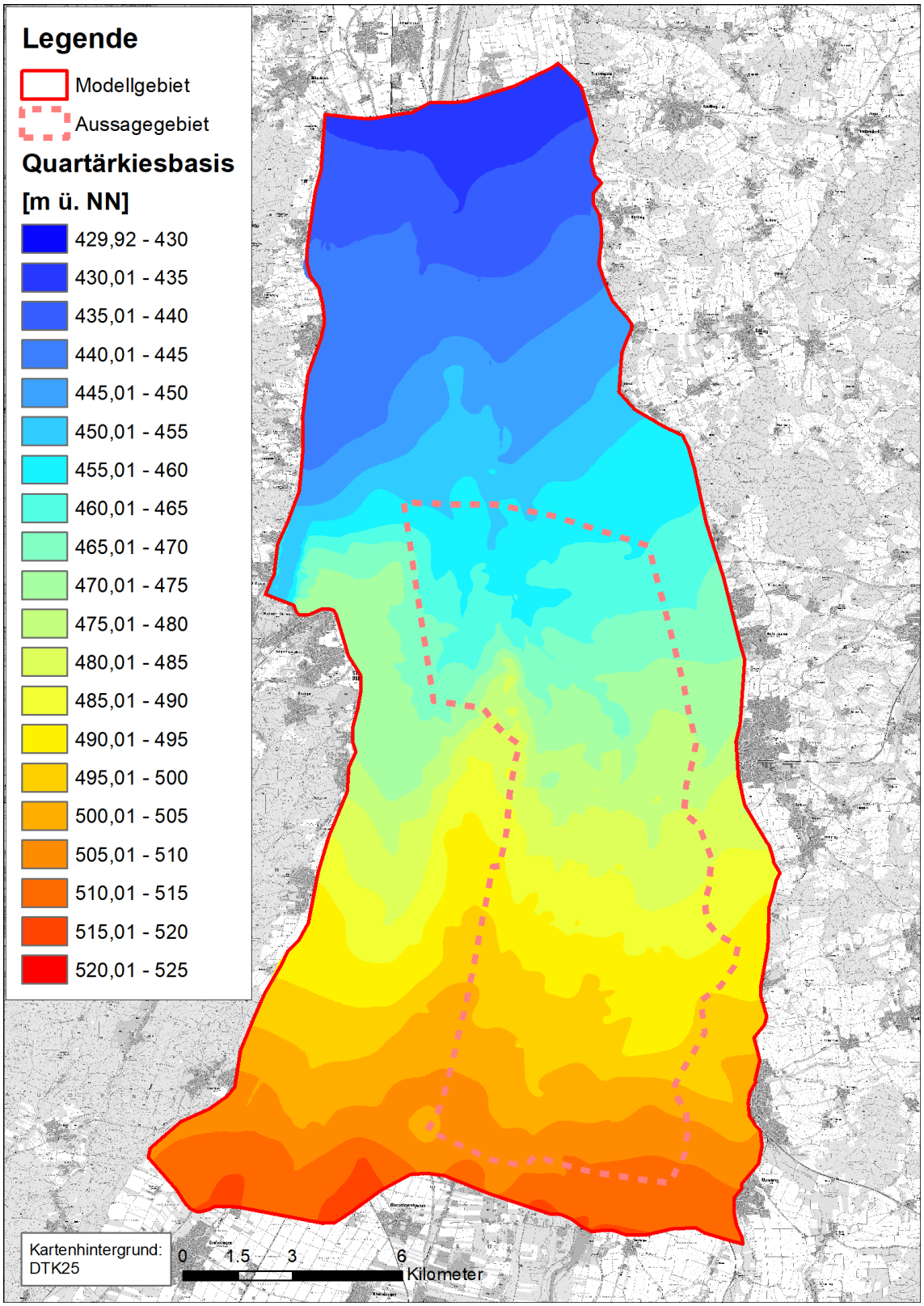

Abbildung 2.4:Quartärkiesbasis

2.4 Modellkonzept

Das vorliegende Grundwassermodell bildet die Deckschicht, die Quartärkiese und das Tertiär (letzteres vereinfacht) ab. Für diese Schichten wird der speichernutzbare Hohlraumanteil entsprechend ungespannter Verhältnissen parametrisiert, teilgespannte Verhältnisse können sich aufgrund von Durchlässigkeitskontrasten lokal ergeben, wenn die Grundwasseroberfläche eine darüberliegende Schicht erreicht.

Numerisch wird die ungesättigte Zone vereinfacht durch einen „phreatischen" Ansatz abgebildet (phreatic top slice). Der phreatische Ansatz erfordert eine feinere vertikale Diskretisierung, ist aber verglichen mit der vollständigen Vernachlässigung der ungesättigten Zone (bewegliche Modelloberkante, Ansatz der free and movable surface) im Bereich hoher k_f-Wert-Gradienten (besonders im Übergang zum Tertiär) numerisch deutlich stabiler (Zitat Feflow Hilfe (DHI Wasy GmbH, 2017): *"This method does not suffer from parameter interpolation problems in case of steep hydraulic gradients and a water table cutting through slices.")*

2.5 Stationäre Modellrandbedingungen

2.5.1 Äußere Randbedingungen

2.5.1.1 Übersicht

Gemäß dem Bericht zum Hydrogeologischen Modell (ARGE SKI KUP UIBK, 2018) wurden für den quartären Grundwasserleiter Festpotential-, Zustrom sowie No-Flow-Ränder angesetzt. Zusätzlich wurden für den Modellrand nördlich der Paar und südlich der Schmutter Festpotentialränder angesetzt um den Ab- bzw. Zustrom durch deren Einzugsgebiete abzubilden.

Im Tertiär wurden an der Modellunterkante flächig Grundwassergleichen des HGW1 als Festpotentialrand angesetzt (digitalisiert aus HydroConsult, 2016). Eine Zwischenschicht mit geringen Durchlässigkeiten stellt sicher, dass die Austauschmengen den im Bericht zum HGM dokumentierten Austauschraten entsprechen.

Die Lage der Randbedingungen ist Anlage 6.2.2 zu entnehmen.

2.5.1.2 Festpotentialränder

Im Modellgebiet wurde an vier Modellrändern des Quartärkies-Grundwasserleiters Festpotentiale angesetzt:

- Der Festpotentialrand im Süden beträgt 518,5 m ü. NN für MW. Dieser Wert liegt 1,5 m unterhalb der Grundwassergleiche aus der HGK500 die für die Abgrenzung des südlichen Modellrands herangezogen wurde, da eine Auswertung der Grundwassergleichen aus Messdaten auf einen geringeren Grundwasserstand hindeutet. Für Prognoseläufe wird dieser Rand gegebenenfalls in einen Zuflussrand konvertiert.
- Der Festpotentialrand im Norden beträgt in Übereinstimmung mit den Grundwassergleichen der HGK500 435 m ü. NN.
- An den Modellrändern nördlich der Paar und südlich der Schmutter entspricht der Wert des Festpotentialrands jeweils dem lokal vorliegenden Wasserspiegel von Paar bzw. Schmutter (MW: 489,5 m ü. NN bzw. 455,96 m ü. NN).
- Der Festpotentialrand an der Modellunterkante entspricht den in Anlage 6.2.2 dargestellten Grundwassergleichen des HGW1 (digitalisiert aus HydroConsult, 2016). Der Austausch mit dem Quartärkies wird durch eine Zwischenschicht gemäß den Vorgaben des HGM eingestellt.

2.5.1.3 Zuflussränder

Entsprechend den Vorgaben des Berichts zum HGM wurde am östlichen Zuflussrand ein Zufluss von 280 l/s angesetzt. Am westlichen Zuflussrand entlang der Schmutter beträgt der Zufluss etwa 180 l/s. Diese Werte entsprechen der Grundwasserneubildung der Einzugsgebiete außerhalb dieser Ränder. Die Grundwassergleichen dieser Einzugsgebiete zeigen einen Zustrom ins Modellgebiet, daher werden o.g. Mengen als Randzustrom angenommen.
Am Modellrand westlich des nördlichen Wertachtals wird ein Zufluss von 60 l/s angenommen. Für den südlich anschließenden Modellrand liegt keine Schätzung vor, daher wird die Zuflussrandbedingung bis zum südlichen Modellrand kopiert.

2.5.1.4 NoFlow-Ränder

Über Ränder die mit keiner Randbedingung belegt wurden, findet kein Zu-/Abfluss ins Modellgebiet statt, hierbei handelt es sich um NoFlow-Ränder. Die Lage der NoFlow-Ränder für den Quartärkies kann Anlage 6.2.2 entnommen werden. Im Tertiär entsprechen alle vertikalen Ränder ebenfalls NoFlow-Rändern.

2.5.2 Innere Randbedingungen

2.5.2.1 Übersicht

2.5.2.2 Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Im Rahmen des Berichts zum Hydrogeologischen Modell wurde die Grundwasserneubildung auf Tagesbasis ermittelt und ausgewertet. Im Zeitraum 1992 bis 2015 beträgt die mittlere jährliche Grundwasserneubildung 157 mm/a (13,1 mm/mon), die räumliche Verteilung ist in Abbildung 2.5 dargestellt. Die Grundwasserneubildung wird auf der Modelloberkante des Grundwassermodells als Randzustrom angesetzt.

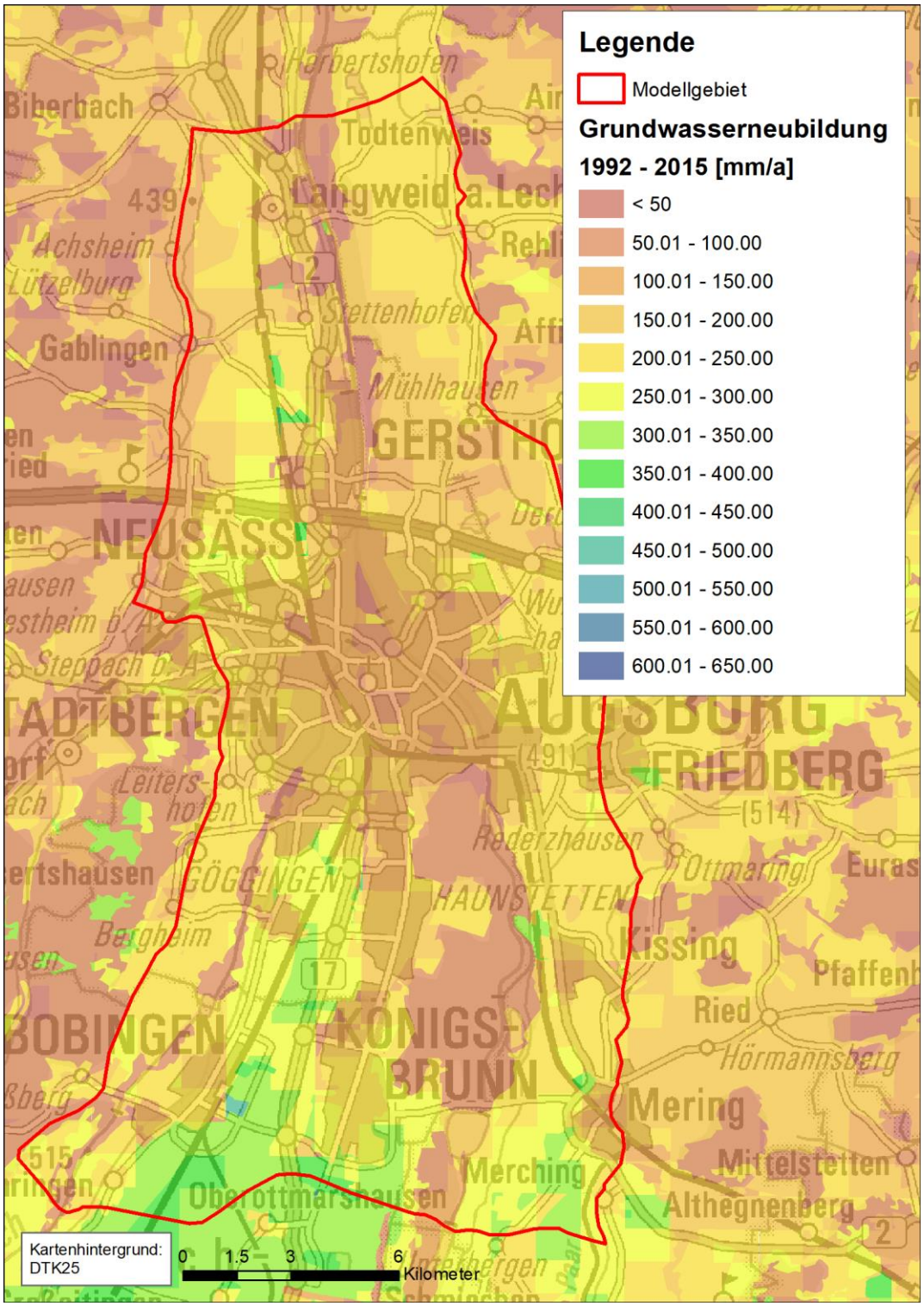

Abbildung 2.5: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung im Zeitraum 1992 bis 2015

2.5.2.3 Oberirdische Fließgewässer

Fließgewässer werden im Grundwassermodell in Form von Leakagerandbedingungen umgesetzt. In Feflow werden diese Randbedingungen „Fluid-Transfer-BCs“ genannt. Die Leakage-Höhen (Wasserspiegel) werden auf Knoten angesetzt, die Berechnung der Austauschrate erfolgt dann auf Grundlage der Kontaktfläche zwischen 3(horizontal) bzw. 4 (vertikal) benachbarten Knoten. Daher können Fließgewässer im Grundwassermodell auf zwei Arten umgesetzt werden:

- Als 2D-Gewässer (Kontaktfläche entspricht dem Element zwischen 3 mit der Randbedingung belegten Knoten auf einer Schicht) (s. Abbildung 2.6)

- Als 1D-Gewässer (Kontaktfläche zwischen 2 Knoten auf Schicht 1 und 2 Knoten auf Schicht 2). Bei Verzweigungen kann es vorkommen, dass auch horizontale Kontaktflächen entstehen. Diese sind im Verhältnis zur vertikalen Kontaktfläche deutlich größer und würden zu einer Verfälschung der Kalibrierung führen (lokal stark erhöhter Austausch). Daher werden diese Elemente mit geringen Leakage-Koeffizienten belegt. (s. Abbildung 2.6)

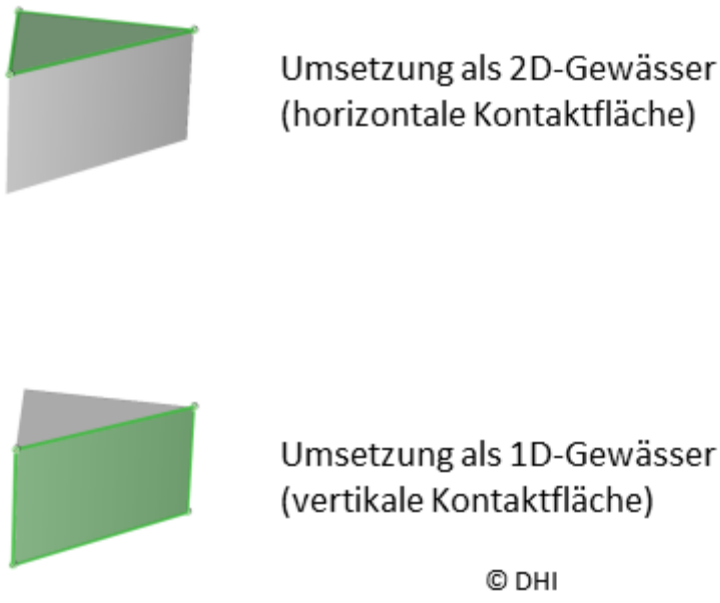

Abbildung 2.6:2D- und 1D-Kontaktflächen einer Leakage-Randbedingung in Feflow (DHI Wasy GmbH, 2017)

Paar

Die Paar verläuft innerhalb des Modellgebiets entlang des östlichen Modellrands.

Für die Paar liegen folgende Datensätze vor:

- MNW Messung aus dem Jahr 1992
- Querprofilmessungen
- HQ-Modellierungen (HQ5, HQ100 vor und nach 2007) (WWA Donauwörth, 2017)

Da keine Berechnungen für Mittelwasser vorliegen, müssen Wasserspiegel aus den Wasserspiegellagen der MNW-Messung approximiert werden. Es ist davon auszugehen, dass während MW und MNW ähnliche Fließverhältnisse vorliegen (die Wasserspiegel bei MW sind nicht sehr viel höher als bei MNW). Damit sind die Geschwindigkeiten während MW und MNW vergleichbar und der Durchfluss nur noch vom durchflossenem Querschnitt abhängig. Daher wurden die Wasserspiegellagen für MW wie folgt abgeschätzt:

- Zunächst wurde in jedem Querprofil die durchflossene Querschnittsfläche bei MNW berechnet
- Anschließend wurde über den Abfluss die Querschnittsfläche bei MW berechnet ($A_{MW}=Q_{MW}/Q_{MNW}*A_{MNW}=1,94/1,21*\ A_{MNW}$)
- Auf Grundlage der Querprofile wurde ein neuer Wasserstand berechnet.
- In Stauwurzelbereich einiger Wehre wurden die errechneten Wasserspiegel an die Stauziele angepasst. Abbildung 2.8 zeigt die Wasserspiegel entlang der Paar im Längsschnitt. Die Überfallhöhen der Wehre wurden der MNW-Messung entnommen.

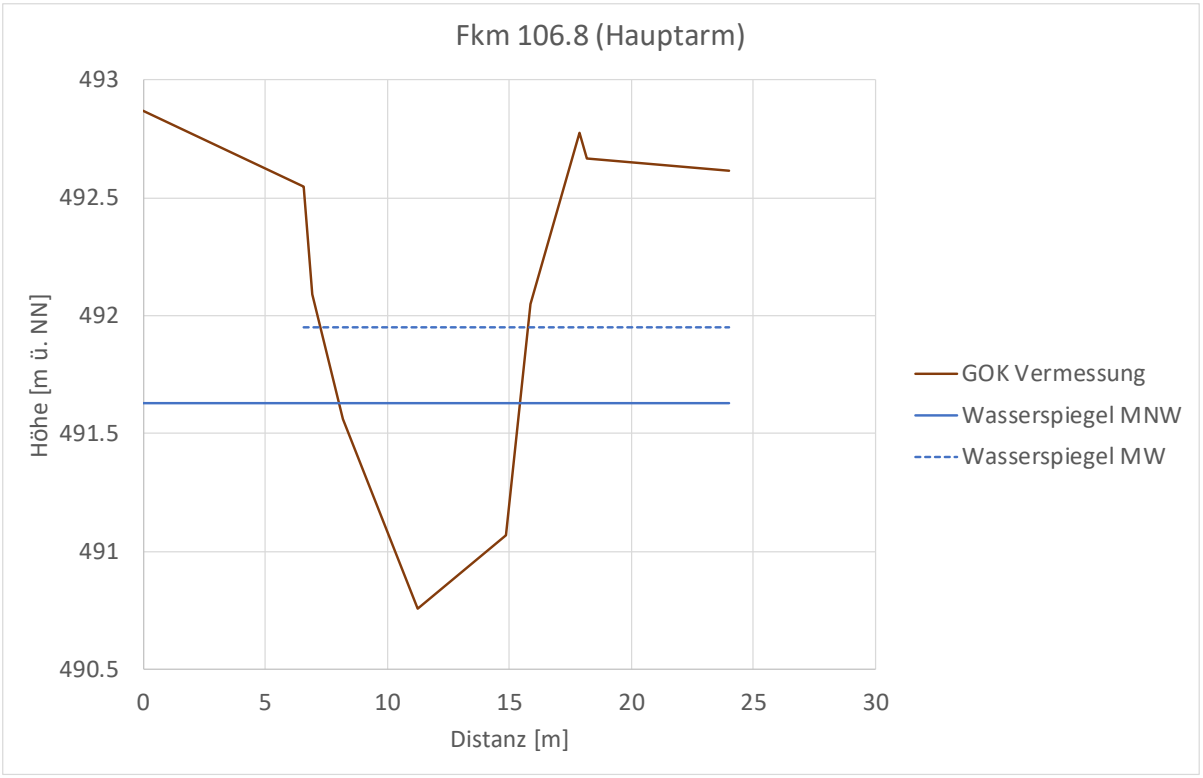

Abbildung 2.7:Ermittlung des MW-Wasserspiegels am Beispiel des Querschnitts bei Fkm 106,8.

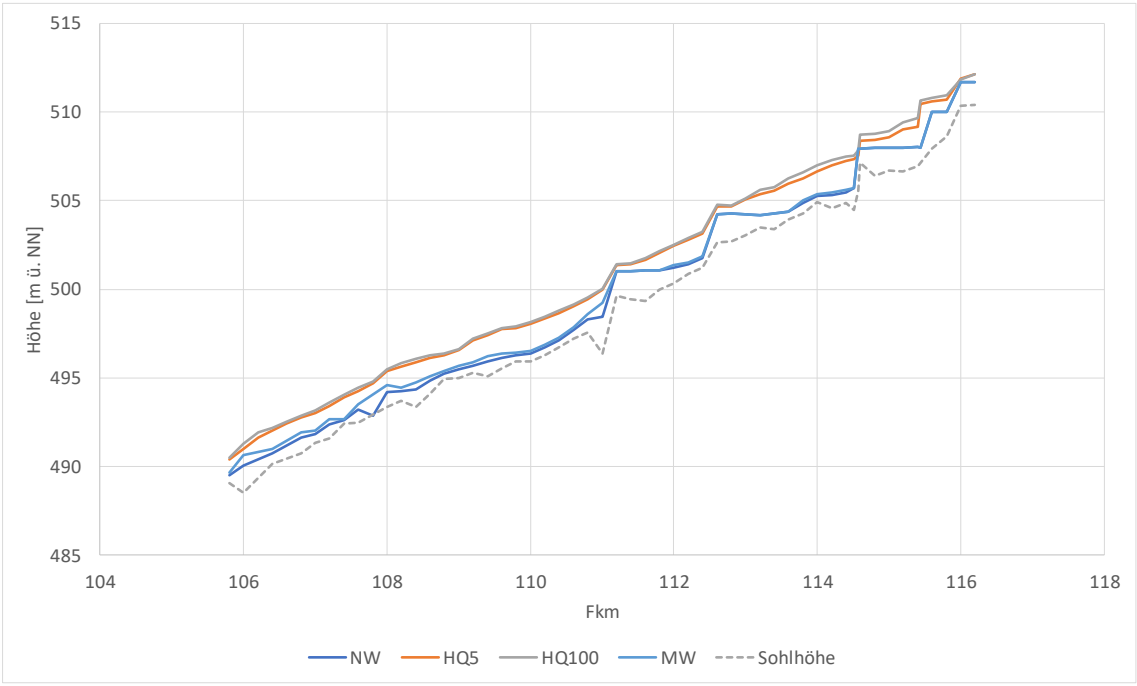

Abbildung 2.8:Wasserspiegel entlang der Paar

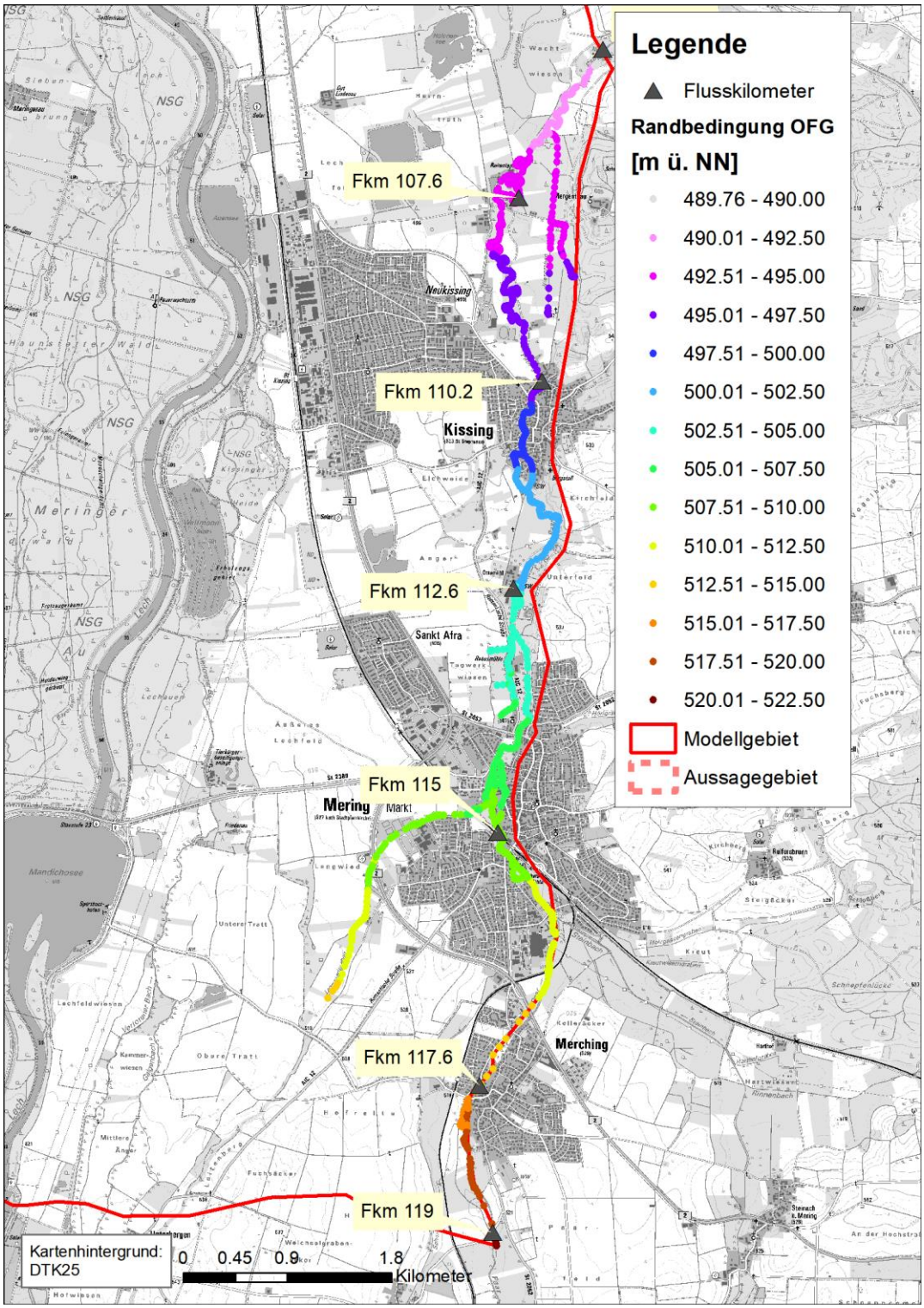

Abbildung 2.9:Wasserspiegel im Einzugsgebiet der Paar (Nebengewässer und Paar südlich von Fkm 116 wurden mit Wasserspiegeln aus dem Geländemodell belegt).

Bäche im Stadtgebiet Augsburg (Stadtbäche)

Die Innenstadt Augsburg wird durch ein weit verzweigtes Netz an Stadtbächen geprägt, welche hauptsächlich durch Lech-Wasser gespeist werden (Ausleitung am Hochablass sowie indirekt durch den Lochbach).

Im Stadtgebiet liegen Wasserspiegelmessungen einer Stichtagsmessung vor (TBA Augsburg, 2005). Diese werden in Form einer Leakage-Randbedingung zeitlich konstant ins Grundwassermodell übernommen. Ein Vergleich zwischen Messung und interpolierten Wasserspiegellagen ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

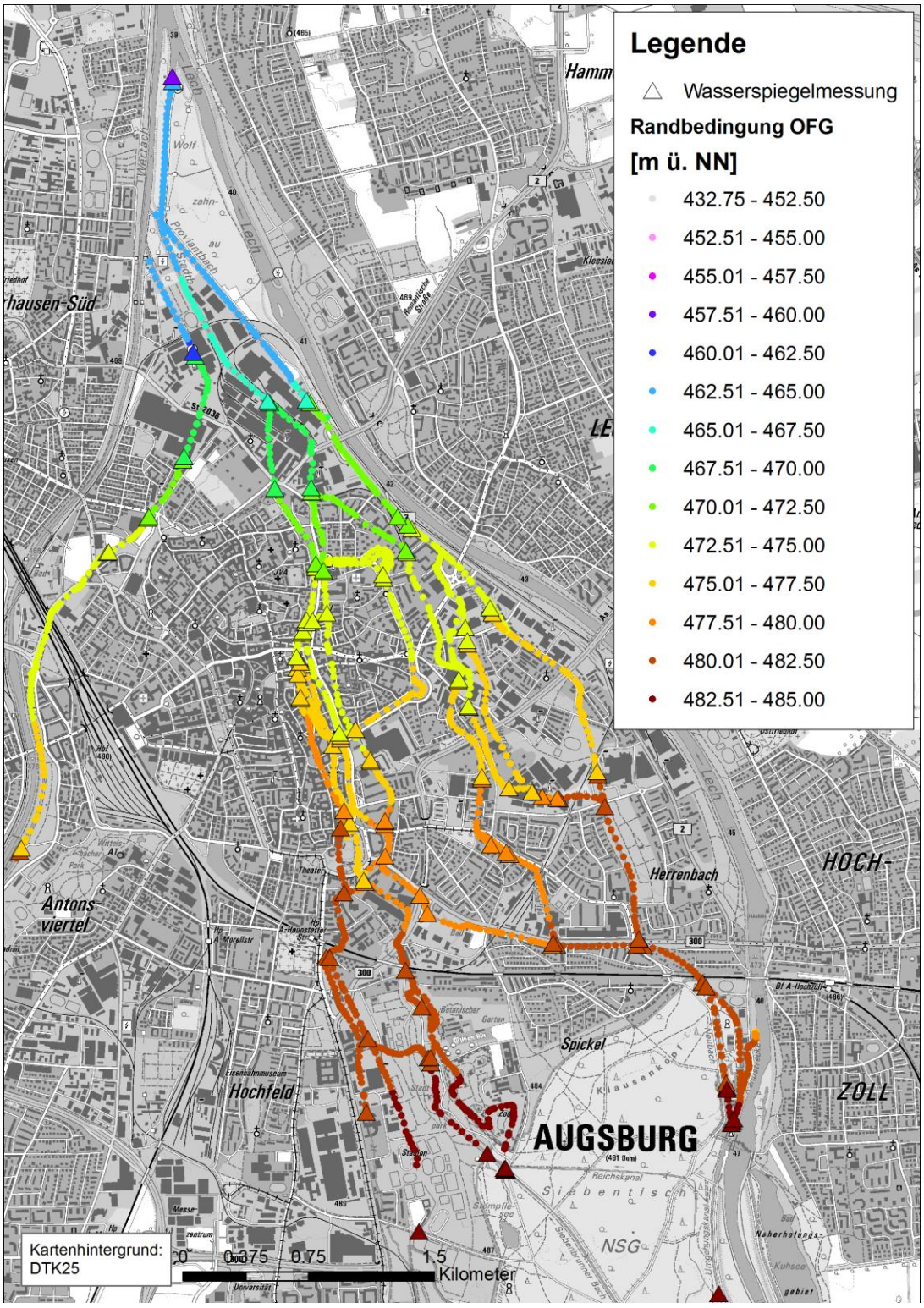

Abbildung 2.10: Interpolierte Wasserspiegellagen der Stadtbäche (Punkte entsprechen Randbedingungen im Modell, Dreiecke entsprechen Messwerten)

Lochbach, Bäche im Stadtwald Augsburg und Verlorener Bach/Hagenbach

Der Lochbach wird aus einer Ausleitung bei Staustufe 22 gespeist, während die Bäche im Stadtwald ihr Wasser aus dem Lochbach beziehen. Der Verlorene Bach (unterstrom Übergang in den Hagenbach) verläuft östlich des Lechs und entspringt außerhalb des südlichen Modellrands. Eine Übersicht über die Lage aller o.g. Bäche wird in Anlage 6.2.3 gegeben.

Im Stadtwald und am Lochbach liegt eine Vielzahl von Aufnahmen der Wasserspiegellagen vor ((TBA Augsburg, 2005), (E.ON Wasserkraft GmbH, Werkgruppe Lech, 2002) und (KUP, 2015)). Das Gewässernetz im Stadtwald ist äußerst verzweigt, hierauf musste bei der Wahl der Interpolation besonders Rücksicht genommen werden. Grundsätzlich wurde mit der Interpolation der Wasserspiegel an den größeren Gewässern begonnen (Lochbach, Gießer, …). Die errechneten Wasserspiegel an Aus-/Einleitungen der größeren Gewässer wurden anschließend als weiterer Fixpunkt für die Interpolation der Nebengewässer/Verbindungen zwischen den Gewässern verwendet.

Für einige Nebengewässer, die durch Quellen im Stadtgebiet gespeist werden (Ochsenbach, Jägerbach, Ölbachsystem, nicht benanntes Gewässer zwischen Lochbach und Königsbrunner Heide sowie das Ziegelmoorbächlein) liegen keine Wasserspiegelmessungen vor. An diesen Gewässern wurden die Wasserspiegellagen aus dem Höhenmodell entnommen (DGM-Tiefpunkt in einem Umkreis von 10 m). An den Gewässern Mittelbach und Verlorener Bach wurde die Wasserspiegellage bereichsweise ebenfalls aus dem Höhenmodell entnommen, da diese Gewässer große Unterschiede im Gefälle aufweisen, die durch die Vermessung nicht aufgelöst wurden.

Das interpolierte Gewässernetz ist in Abbildung 2.11 dargestellt.

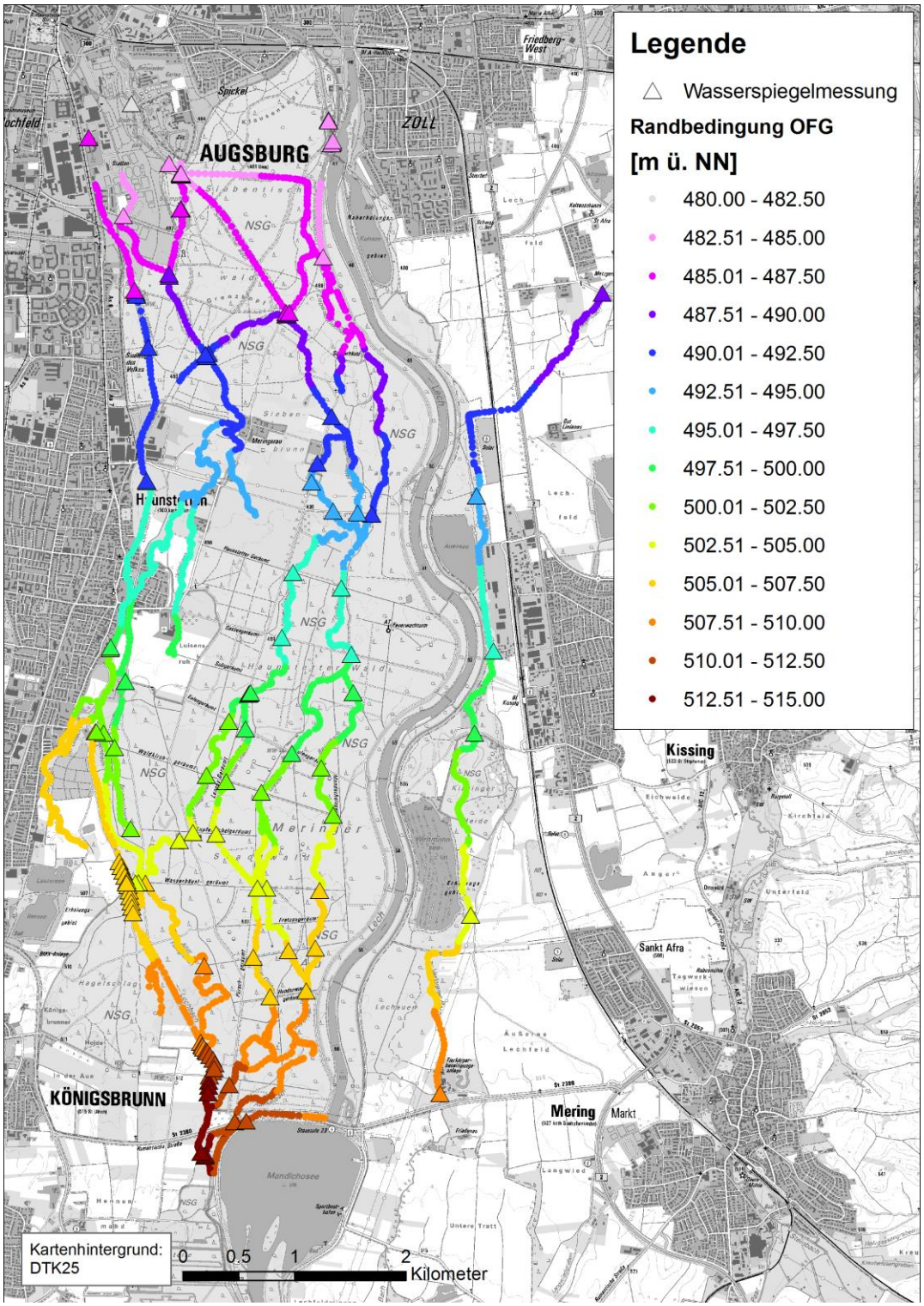

Abbildung 2.11: Interpolierte Wasserspiegellagen des Lochbachs, der Bäche im Stadtwald sowie am Verlorenen Bach/Hagenbach (Punkte entsprechen Randbedingungen im Modell, Dreiecke entsprechen Messwerten)

Lech

Der Lech ist der wichtigste Vorfluter im Modellgebiet. Der mittlere Abfluss beträgt etwa 81 m³/s, während eines HQ100 beträgt der Abfluss über 1000 m³/s. Wasserspiegellagen werden aus folgenden Modellen entnommen:

- Bereich Süd: 1D-Modell für den Bereich zwischen Staustufe 23 (Mandichosee) und dem südlichen Modellrand (Staustufe 22)
- Bereich Planung: 2D-Modell für den Bereich unterstrom der Staustufe 23 (Mandichosee) bis zum Fkm 36 (Unterwasser Gersthofener Wehr)
- Bereich Nord: 2D-Modell für den Lech unterstrom von Fkm 36 bis zum nördlichen Modellrand

Der Lech ist im Grundwassermodell als 2D-Gewässer umgesetzt (vgl. Kapitel 2.5.2.3), das heißt neben der Wasserspiegelhöhe beeinflusst auch die Breite des Gewässers (Kontaktfläche) die Simulation. Die Wasserspiegellagen bei Mittelwasser werden in Abbildung 2.12 aufgeführt.

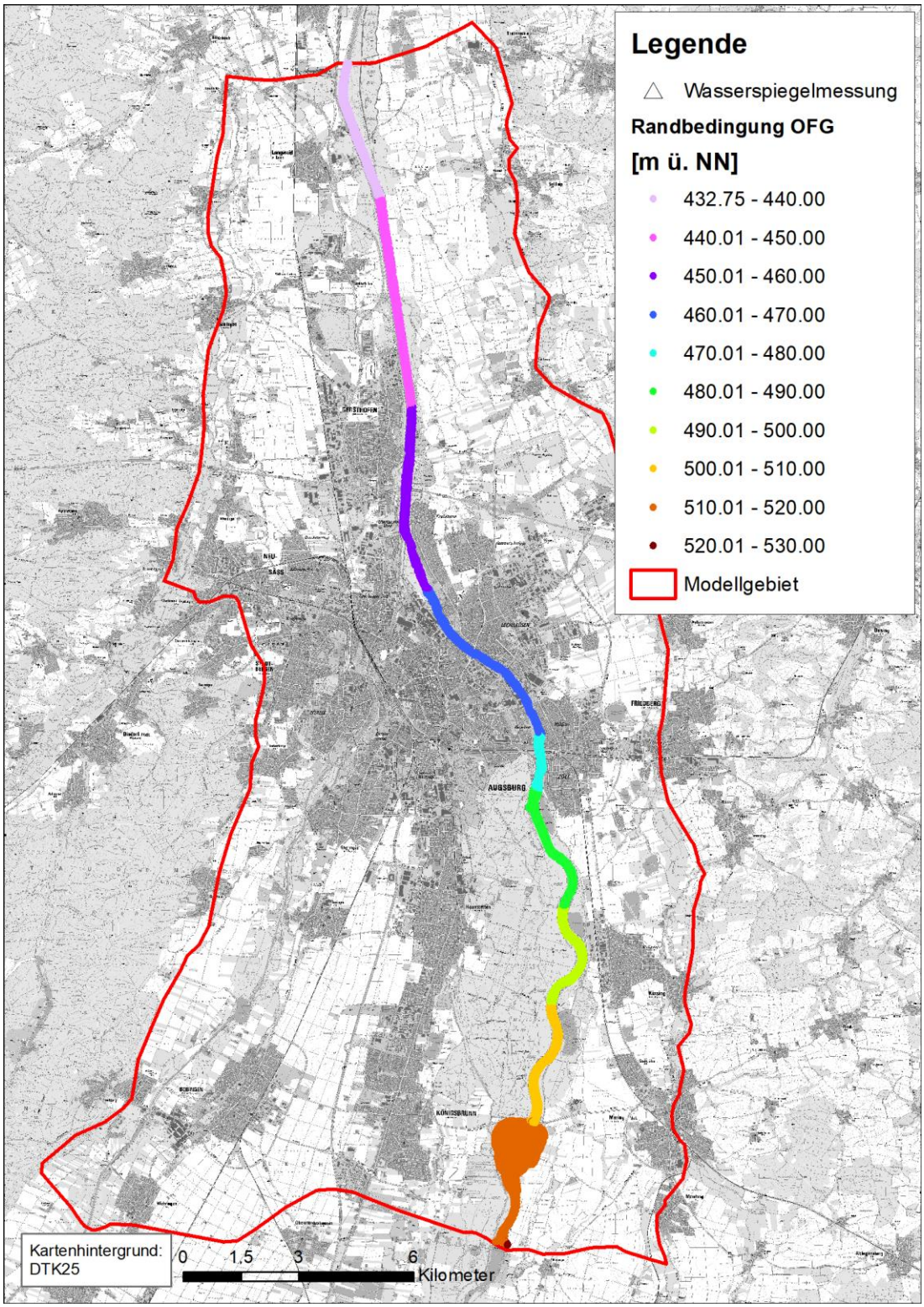

Abbildung 2.12: Wasserspiegellagen des Lechs

Wertach/ Singold

Das Tal der Wertach liegt westlich des Planungsbereichs, die Wertach mündet in den Lech nördlich der Innenstadt Augsburgs. Ein weiteres größeres Gewässer stellt die Singold dar, diese vereinigt sich mit der Wertach weit außerhalb des Aussagegebiets.

Für die Wertach und Singold liegen folgende Datensätze vor:

- 2D-Modell Wertach Nord: MQ-, HQ5-, HQ10-, HQ100-Berechnung zwischen Wertachmündung und Unterwasser der Staustufe Inningen (Fkm 13,5) (Stand vor 2015)
- 2D-Modell Wertach Süd: HQ5-, und HQ100-Berechnung zwischen der Staustufe Inningen (Fkm 13,5) und dem südlichen Modellrand (Stand vor 2015)
- Weitere Modellierungsdaten an der Wertach für den Stand nach 2015
- Modell Singold: HQ5-, HQ10-, HQ100-Berechnungen

Abbildung 2.13 zeigt Wasserspiegellagen der Wertach im Grundwassermodell (MW-Verhältnisse). Da für Singold und die Wertach südlich der Staustufe Inningen keine MW-Simulationen vorliegen, wurden hier die Wasserspiegellagen vereinfachend aus dem Höhenmodell entnommen.

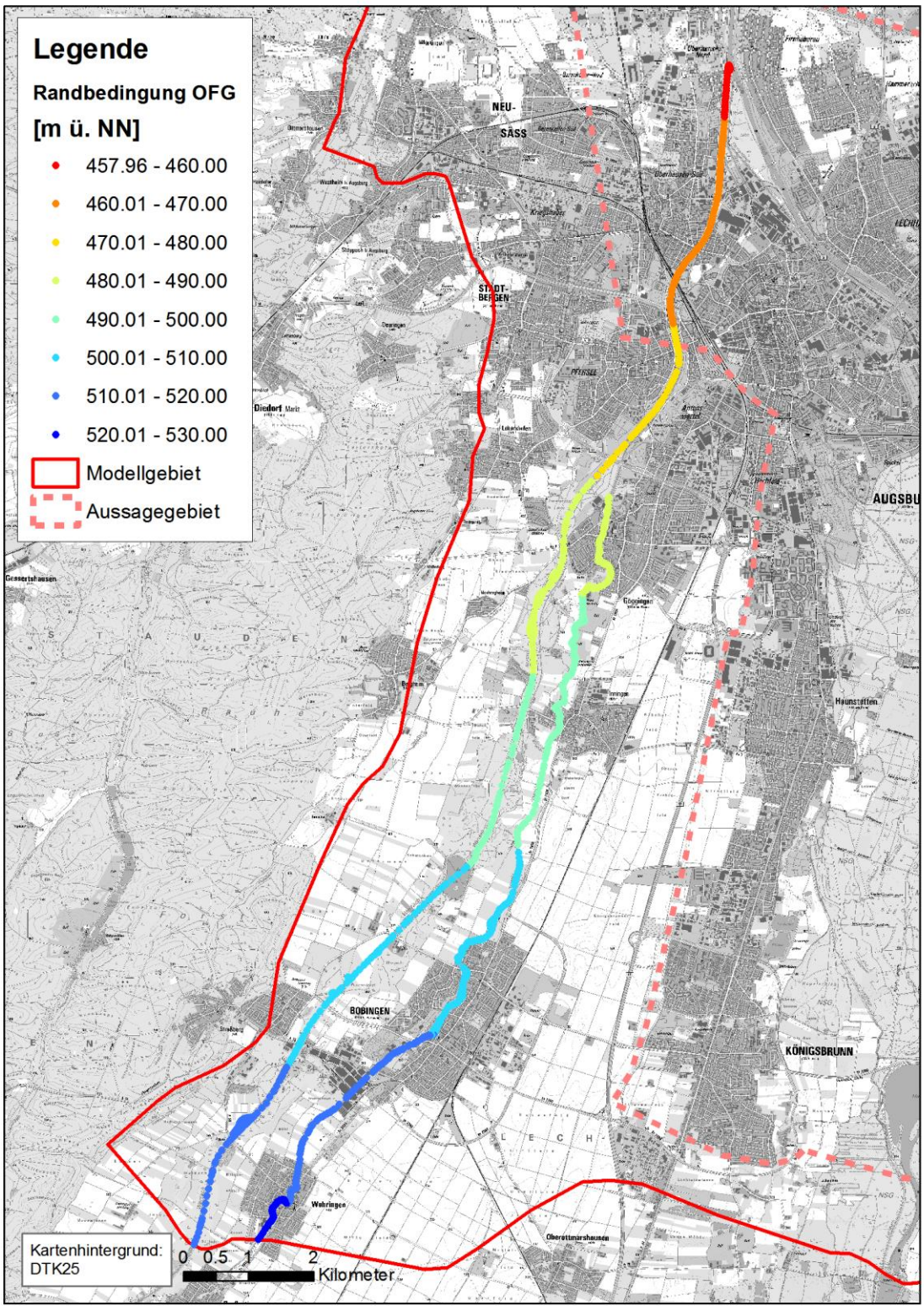

Abbildung 2.13: Wasserspiegellagen der Wertach und Singold

Schmutter

Die Schmutter verläuft entlang des westlichen Modellrands (ab etwa Höhe Neusäss) bis zum nördlichen Modellrand. Die Schmutter hat für das Aussagegebiet aufgrund der großen Entfernung und der Abtrennung durch die Hochterrasse eine sehr geringe Relevanz. Dennoch wurden hier Wasserspiegel aus einer Vermessung angesetzt. Entsprechend dem Vorgehen an den Bächen im Stadtwald wurden zunächst Gewässerspiegel entlang des Hauptarms der Schmutter interpoliert. Die interpolierten Wasserspiegellagen werden in Abbildung 2.13 dargestellt.

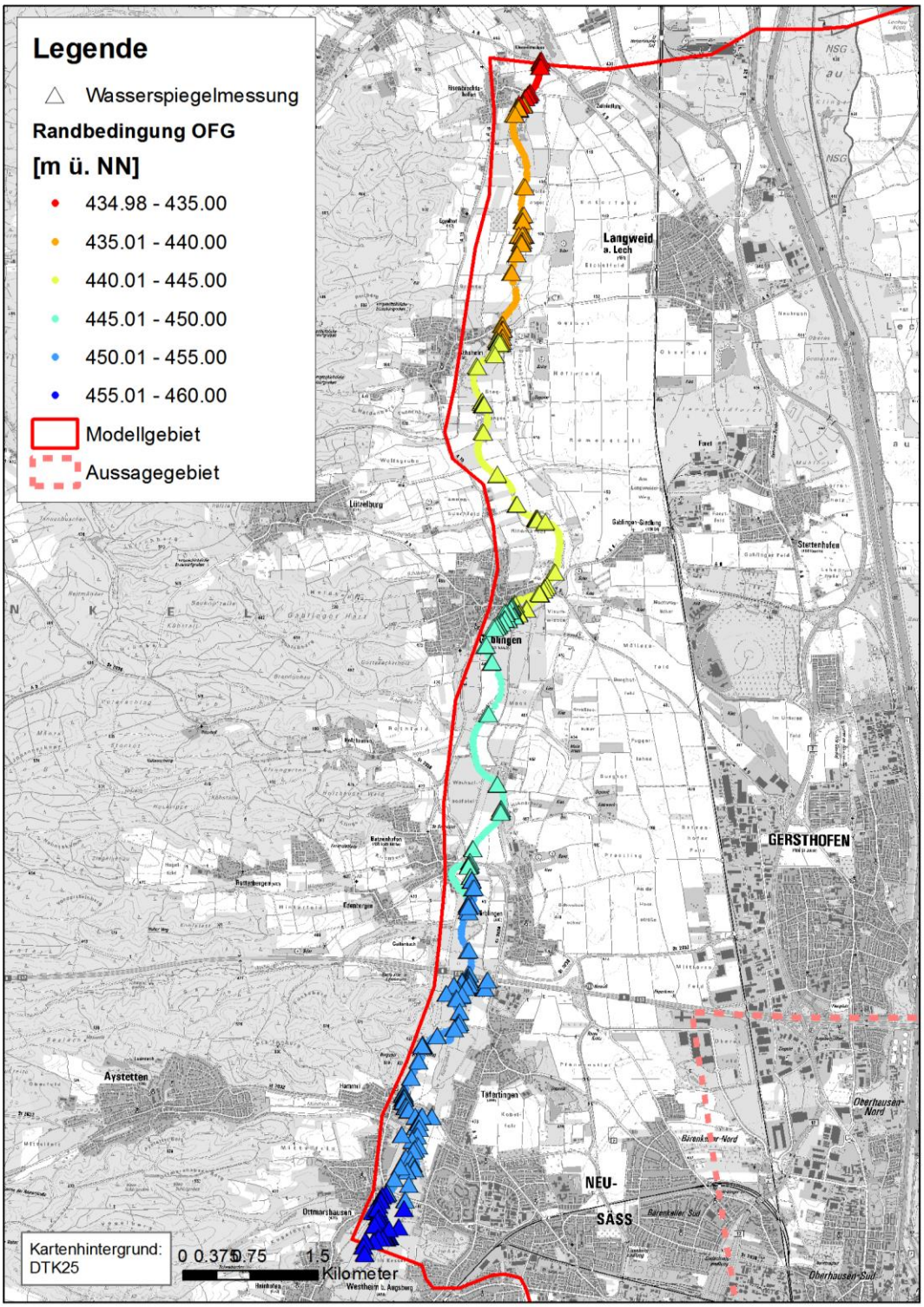

Abbildung 2.14: Interpolierte Wasserspiegellagen der Schmutter (Punkte entsprechen Randbedingungen im Modell, Dreiecke entsprechen Messwerten)

Geländesenken am Absturz bei Lech-Fkm 50,4

Unterstrom des Absturz 50,4 tritt links und rechts des Lechs Grundwasser in Teichen aus und strömt dem Lech zu. Die Höhe des Wasserspiegels wurde dem Geländemodell entnommen.

Abbildung 2.15: Austretendes Grundwasser unterstrom des Absturz 50,4 (hier: westlich des Lechs). Bild links: Teich, Bild rechts: Abfluss vom Teich zum Lech.

Seen

Seen werden im Grundwassermodell vereinfacht durch einen Bereich hoher Durchlässigkeit und einem Speicherkoeffizienten 1 abgebildet. Der Anschluss an den umliegenden Grundwasserleiter wird über eine Kolmationsschicht (Bereich niedriger Durchlässigkeiten um den See) im Grundwassermodell berücksichtigt.

Kuhsee und Weitmannsee besitzen Abläufe, daher wurden an diesen Seen maximale Wasserstände gemäß dem Bericht zum HGM (Kuhsee: 484,5 m ü. NN, Weitmannsee: 502,7 m ü. NN) angesetzt. Diese Randbedingung greift in der Regel nur bei Hochwasserereignissen. An den verbleibenden Seen sind keine Abläufe bekannt, daher stellt sich hier der Wasserspiegel in Abhängigkeit des umliegenden Grundwassers ein.

Sonstige Gewässer

An den übrigen Gewässern (überwiegend kleinere Bäche und Gräben) wurden Geländetiefpunkte in einem Umkreis von etwa 10m je Gewässerknoten als Wasserspiegel angesetzt. Unter Berücksichtigung dieser Gewässer ergibt sich das in Anlage 6.2.5 dargestellte gesamte Gewässernetz als Randbedingung für das Grundwassermodell.

2.5.2.4 Austritte bei ins Tertiär eingeschnittenem Lech im Innenstadtbereich

Eine Besonderheit stellt der Lech im Innenstadtbereich dar: Hier ist der Lech stark eingetieft, sodass bereichsweise bereits der Lech im Tertiär liegt. Die im Vergleich zu den regionalen Grundwasserständen geringen Lech-Wasserstände führen dazu, dass Grundwasserstände an etwas entfernt liegenden Messstellen wenig Reaktion auf Wasserspiegelschwankungen des Lechs zeigen. Es ist davon auszugehen, dass in diesen Bereichen der Lech durch seine Lage im Tertiär vom System entkoppelt ist und Grundwasser z.B. anteilig in Form von Hangquellen an der Geländeoberkante austritt oder an der Grenze zwischen Quartär und Tertiär wie bei Hangschuttquellen unterirdisch abfließt. Im Grundwassermodell muss exfiltrierendes Grundwasser am Lech im Innenstadtbereich entnommen werden. Dies wurde über eine Brunnenrandbedingung umgesetzt. Weil Messungen des Grundwasserstands in diesem Bereich nur geringe/gedämpfte Schwankungen zeigen, wird dieser Abfluss stationär angenommen. Die benachbarte Randbedingung des Lechs im Innenstadtbereich wird instationär umgesetzt, das heißt durch Überlagerung der beiden Randbedingungen ergibt sich die beobachtete, gedämpfte Instationarität im Innenstadtbereich.

2.5.2.5 Nutz- und Brauchwasserentnahmen

Das Grundwassermodell berücksichtigt Entnahmen für Brauch- und Trinkwasserzwecke. Aufgrund der Größe des Modellgebiets wurden Brunnen aus den folgenden Datensätzen zusammengeführt:

- Stadt Augsburg, Jahreswerte, ab 100000 m³/s
- Entnahmen Landkreis Aichach-Friedberg (LKrAicFr), Jahreswerte, ab 0 m³/s
- Öffentliche Entnahmen des Landkreises Augsburg (LKrA (öff.)), Jahreswerte, ab 0 m³/s
- Private Entnahmen des Landkreises Augsburg (LKrA (privat)), Jahreswerte, ab 100000 m³/s
- Gemeinde Kissing, Monatswerte, ab 0 m³/s
- Stadtwerke Augsburg (SWA), Monatswerte, ab 0 m³/s

Einen Überblick über die Lage von Brunnen in den vorliegenden Datensätzen gibt Abbildung 2.16. Die Brunnen werden farblich nach dem Herkunftsdatensatz unterschieden, weiterhin gibt die Legende Auskunft über die Zeitlichkeit der Brunnen

(Monats- oder Jahreswerte) sowie ob auch Angaben zu Brunnen mit bewilligten Entnahmen < 100000m³/a vorliegen.

Im Grundwassermodell werden weitgehend ausschließlich Entnahmen im Quartär berücksichtigt. Zusätzlich werden für Entnahmen der Stadtwerke Augsburg sowie der Stadt Königsbrunn Entnahmen aus dem Oberen Tertiär ins Grundwassermodell übernommen. Im Bericht zum Grundwassermodell Augsburg Süd (HydroConsult, 2014) wird zu einigen tertiären Entnahmen abgeschätzt, welche Anteile aus welchen Grundwasserstockwerken entnommen werden. Betroffene Entnahmen wurden entsprechend reduziert angesetzt.

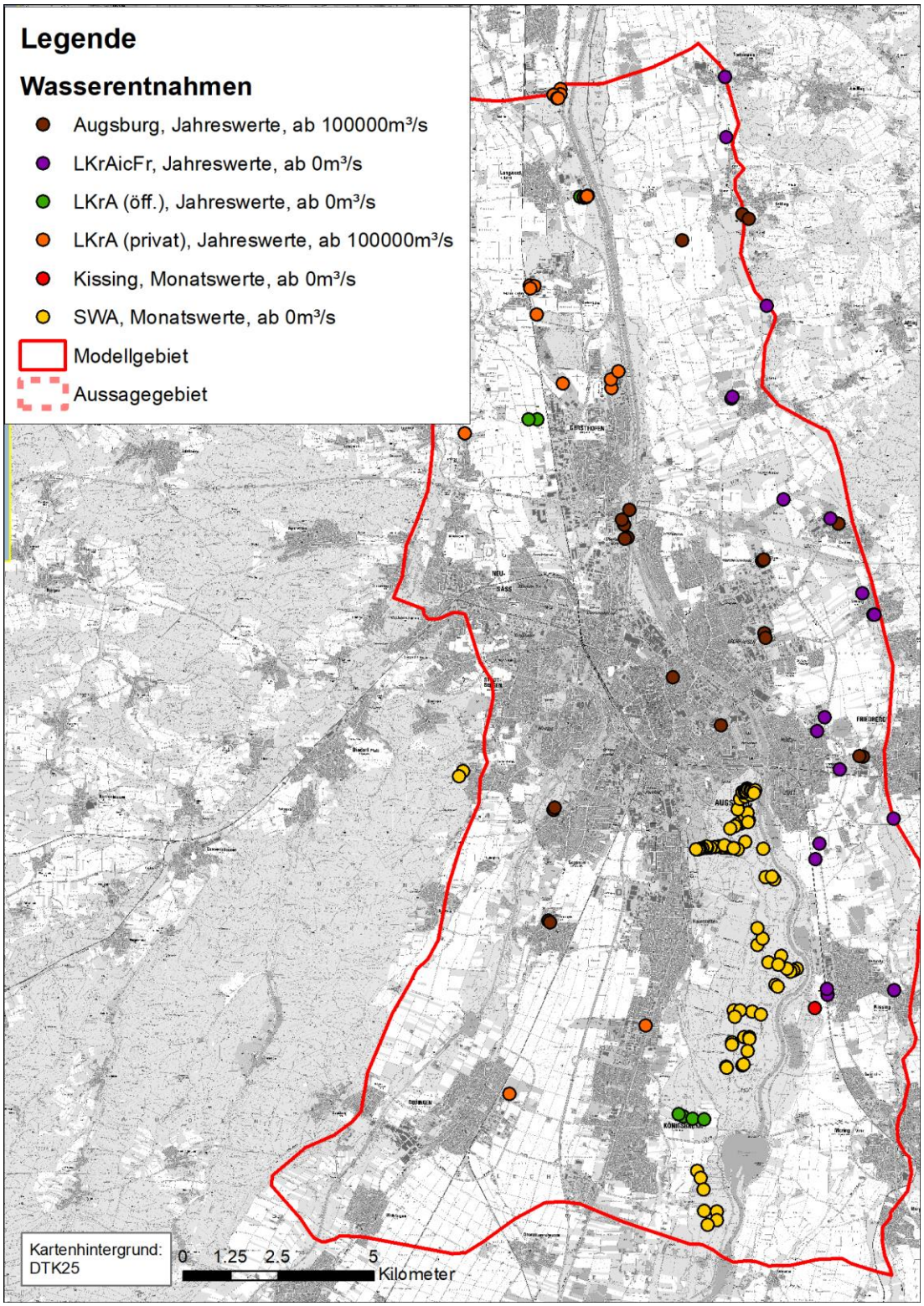

Abbildung 2.16: Grundwasserbrunnen im Modellgebiet

2.5.2.6 Grundwasserhaltungen

In der Innenstadt Augsburg werden vier Grundwasserhaltungen betrieben (Don-Bosco-Sammler seit 1959, Schleifen-, Prinz- und Reichenbergstraße seit 2001 und später). Eine Übersicht über Auslegung und Inbetriebnahme wird in Tabelle 2.1 gegeben. Zu ersteren drei Grundwasserhaltungen sind die Drainagehöhen der Schächte bekannt, daher werden diese als Leakage-Randbedingung ins Grundwassermodell übernommen. Die Umsetzung als Leakage-Randbedingung ermöglicht, dass sich die Entnahmeraten in Abhängigkeit des Grundwasserstands erhöhen/absenken: Bei hohen Grundwasserständen ist davon auszugehen, dass den Schächten größere Mengen Grundwasser zufließen als bei niedrigen Grundwasserständen. Die für die Randbedingung erforderliche Kontaktfläche (vgl. 2.5.2.3) ergibt sich aus dem Element der nächstgelegenen 3 Knoten der Quartärkiesunterkante. Die zugehörigen Leakage-Koeffizienten werden mit dem Grundwassermodell kalibriert. Zu den drei Schächten des Don-Bosco-Sammlers sind keine Drainagehöhen bekannt, hier wird die von HydroConsult (2012) gemessene Entnahmerate von 44l/s als Brunnen ins Grundwassermodell übernommen. Abbildung 2.17 zeigt die Lage der Grundwasserhaltungen im Stadtgebiet.

Tabelle 2.1: Angaben zu den Grundwassersammlern in Augsburg

Grundwassersammler	**Betrieb ab**	**Entnahmerate [l/s]**	**Drainagehöhen [m ü. NN]**
Schleifenstraße	Brunnen 1-13 ab 1/2001 *1)	330*1)	471.0 bis 473.1*1)
Prinzstraße	Brunnen 14-20 ab 1/2003 *1)	200*1)	473.8 bis 474.3*1)
Don-Bosco-Sammler	1959*1)	44*1)	
Reichenbergstraße	Ende 2008*2)	unbekannt	472.9 bis 474.5*3)

*1) HydroConsult (2012)
*2) Telefonische Angabe des Tiefbauamts
*3) Planmaterial des WWA Donauwörth

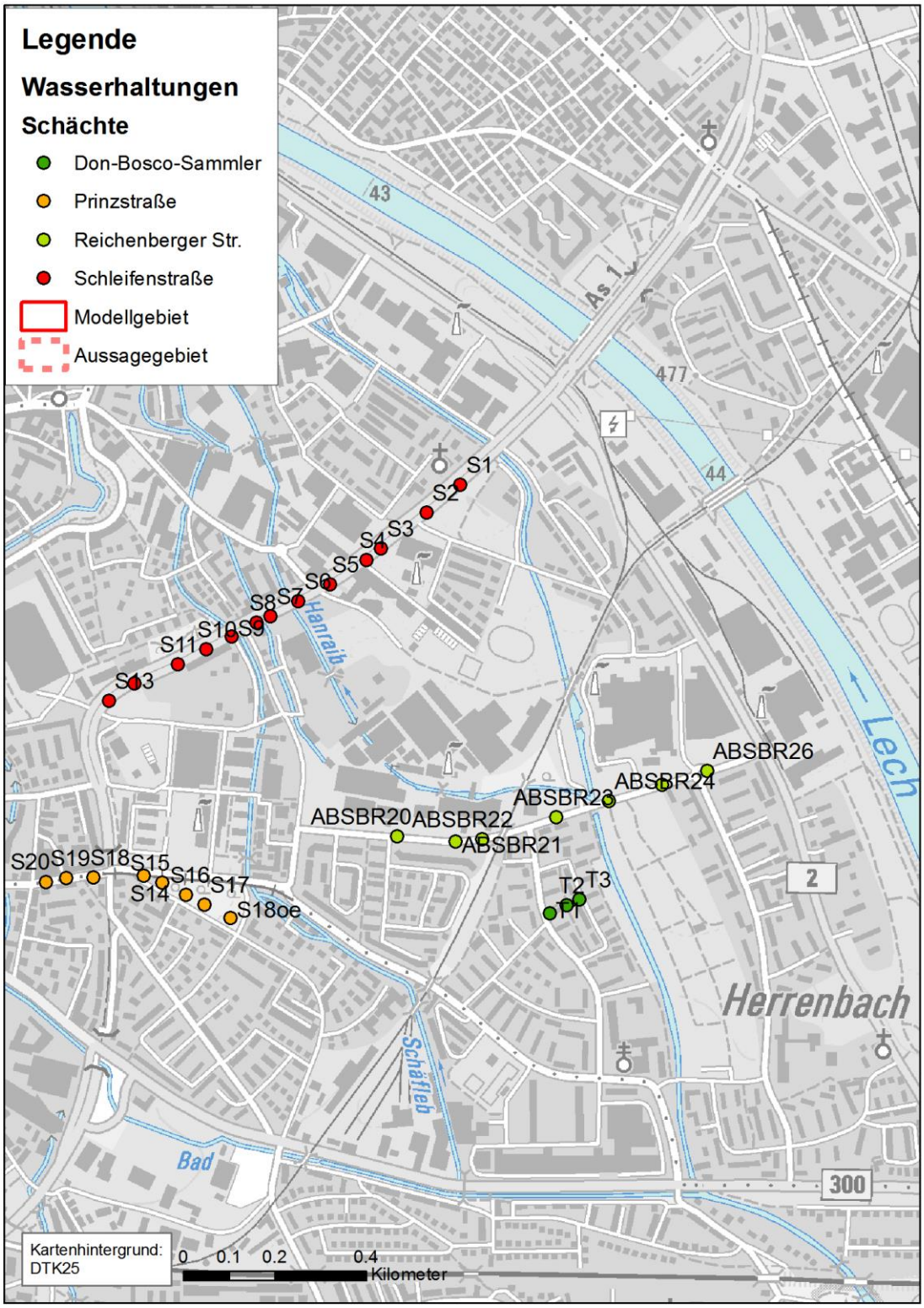

Abbildung 2.17: Grundwasserhaltungen in der Innenstadt Augsburg

2.5.2.7 Kanalisation

Ähnlich zur Randbedingung der Grundwassersammler werden Verluste durch undichte Abwasserkanäle im Einzugsgebiet der Kläranlage Augsburg durch eine Leakage-Randbedingung im Grundwassermodell umgesetzt. Die Umsetzung als Leakage-Randbedingung ermöglicht, dass Grundwasser nur in Bereichen entnommen wird, an denen der Grundwasserstand über den Kanälen liegt. Weiterhin wirken Kanäle, die weit unter dem Grundwasserspiegel stärker entwässernd, als Kanäle die nur gering unterhalb des Grundwasserspiegels liegen. Hierzu wurden durch die Stadtentwässerung Augsburg die Schachthöhen der Hauptsammler digital zur Verfügung gestellt. Diese Höhen wurden (außerhalb der Hochterrassen) als Leakage-Randbedingung auf der 10ten Modellschicht angesetzt. Beim zugehörigen Leakage-Koeffizienten handelt es sich um einen Kalibrierparameter, der so angepasst wird, dass die durch die Stadtentwässerung Augsburg ermittelten monatlichen Fremdwasserraten erzielt werden.

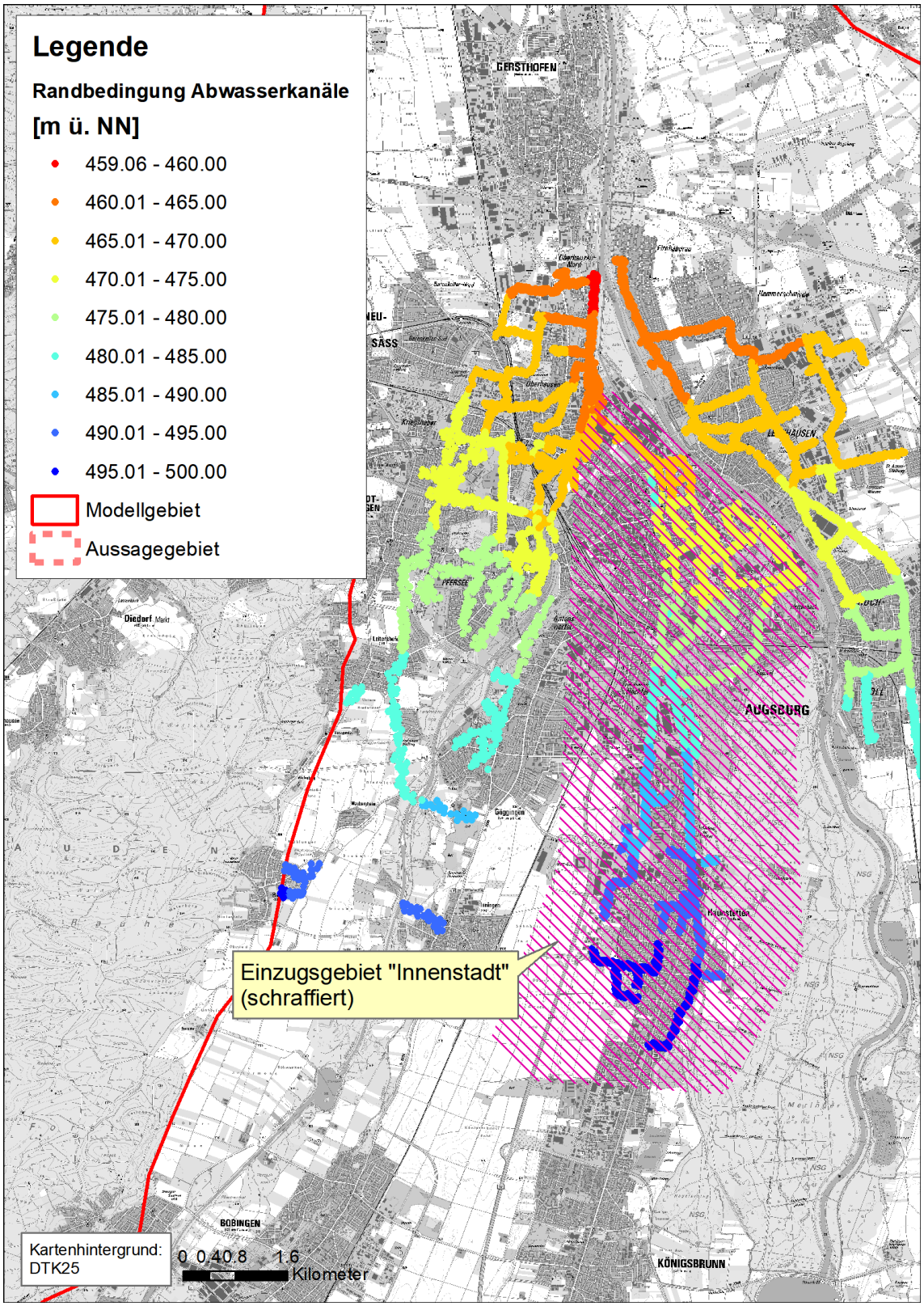

Abbildung 2.18: Höhen der Abwasserkanäle

2.6 Instationäre Modellrandbedingungen

Im Folgenden werden die Ansätze zur Umsetzung von instationären Randbedingungen beschrieben. Folgende Randbedingungen wurden stationär beibehalten:

- Zuflussränder
- Festpotentialrand im Norden: Dieser Modellrand ist sehr weit vom Aussagegebiet entfernt und kann daher beibehalten werden
- Lochbach und Bäche im Stadtwald, Verlorener Bach/Hagenbach: Der Lochbach wird geregelt und weist keine wesentlichen Wasserstandsschwankungen auf. Zu den genannten kleineren Bächen liegen keine Messungen während Hochwasserereignissen vor
- Singold: Die Singold ist sehr weit vom Aussagegebiet entfernt und kann daher beibehalten werden

2.6.1 Äußere Randbedingungen

2.6.1.1 Festpotentialränder

Der Festpotentialrand im Süden muss aufgrund seiner Nähe zum Aussagegebiet instationär aufgebaut werden. Der Rand lässt sich grob in die Bereiche Wertachtal, Lechtal und Hochterrasse einteilen. Daher wurden je Bereich folgende Festlegungen getroffen:

- Modellrand Lechtal: Im Lechtal liegt keine Grundwassermessstelle direkt auf dem Modellrand, daher wurde die Ganglinie der Messstelle Koe11 auf den Modellrand übertragen (je nach Lage des Modellrands wurde die instationäre Ganglinie um einen zeitlich konstanten Wert erhöht) (Lage s. Abbildung 2.19, Ganglinie im Jahr 1999 s. Abbildung 2.20).
- Modellrand Wertachtal: Die Messstelle GKD_8179 liegt auf dem Modellrand und wurde auf dem gesamten Modellrand im Wertachtal als Festpotential angesetzt (Lage s. Abbildung 2.19, Ganglinie im Jahr 1999 s. Abbildung 2.20).
- Modellrand Hochterrasse: Hier wurde zwischen den beiden o.g. Modellrändern zeitlich und räumlich linear interpoliert.

Der Festpotentialrand der Paar nördlich Kissing (vgl. Anlage 6.2.2) wird instationär mit dem am nächstgelegenen Modellknoten hinterlegten Wasserspiegel der Paar moduliert.

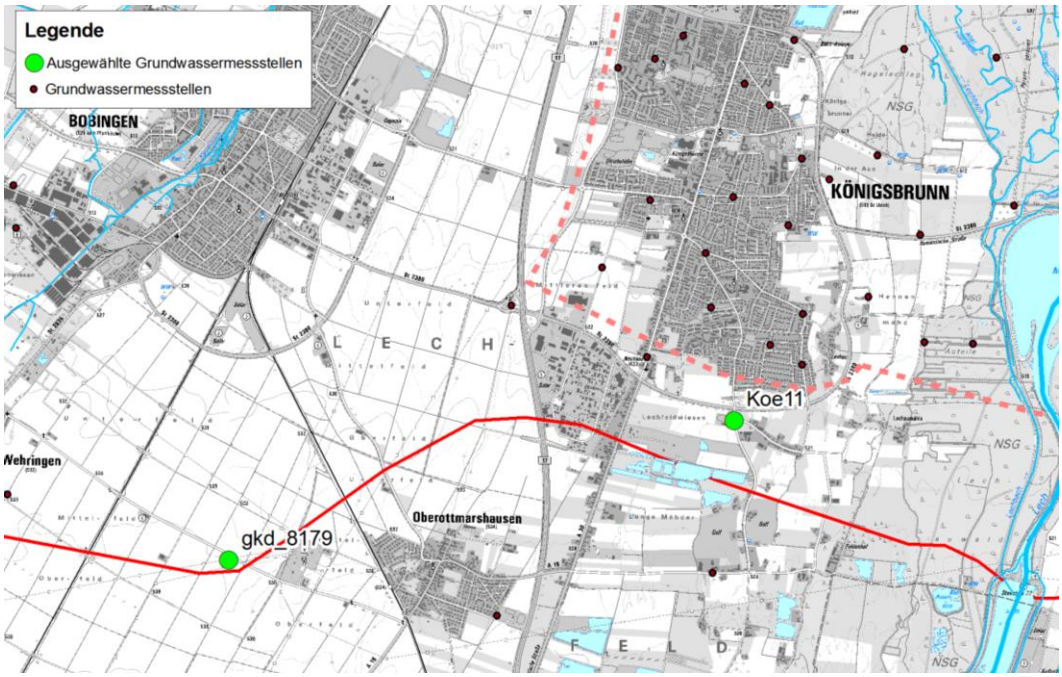

Abbildung 2.19: Messstellen am Südrand

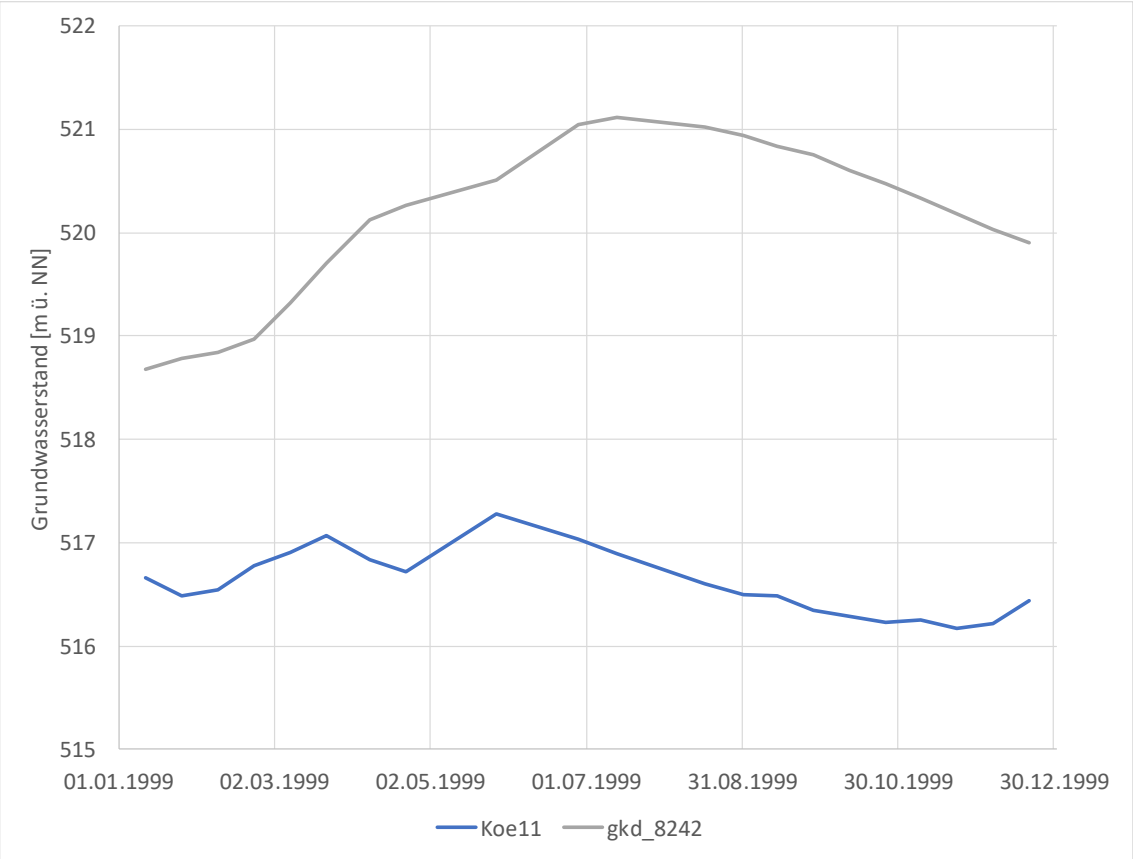

Abbildung 2.20: Ganglinien der Messstellen Koe11 (Lechtal) und gkd_8242 (Wertachtal)

2.6.2 Innere Randbedingungen

2.6.2.1 Grundwasserneubildung

Im instationären Grundwassermodell wird die Grundwasserneubildung instationär hinterlegt. Die Grundwasserneubildung wird während der Hochwasserphasen (Mai bis einschließlich Juni) auf Tagesbasis hinterlegt, außerhalb der Hochwasserphasen wird die Grundwasserneubildung bis maximal auf Wochenbasis aufsummiert. Das gesamte Modellgebiet wird durch diese Berechnungen abgedeckt und der Zustrom erfolgt auf der obersten Modellschicht. Die instationäre Bilanz ist in Abbildung 2.21 dargestellt.

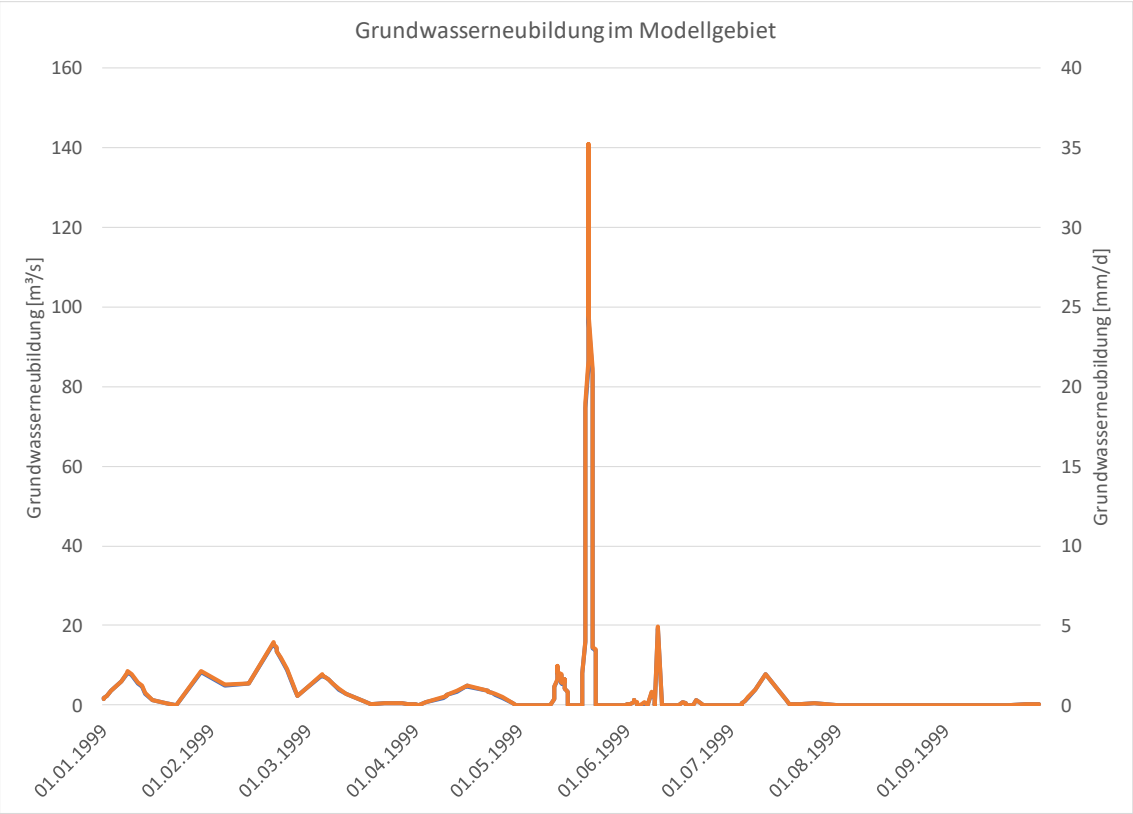

Abbildung 2.21: Grundwasserneubildung des gesamten Modellgebiets

2.6.2.2 Oberirdische Fließgewässer

Paar

Wie bereits in Kapitel 2.5.2.3 ausgeführt, liegen an der Paar flächige Wasserspiegellagen für MNQ, MQ, HQ_5 und HQ_{100} vor. Hieraus werden nach dem in Anhang 3 beschriebenen Vorgehen instationäre Wasserspiegellagen für alle Knoten berechnet, die auch schon im stationären Fall mit einer Randbedingung belegt wurden. Die Modulation der Wasserspiegel erfolgt auf Grundlage der Messungen an der Abflussmessstelle Mering. Des Weiteren liegt während des Pfingsthochwassers eine instationäre Wasserspiegellagenberechnung vor, diese wurde ebenfalls ins Grundwassermodell für den abgebildeten Zeitraum übernommen. Abbildung 2.22 zeigt den Vergleich des modulierten Wasserspiegels (aus o.g. flächigen Wasserspiegeln berechnete Ganglinie, sowie instationäre Wasserspiegelberechnung während des Pfingsthochwassers) und den gemessenen Wasserspiegeln an der Messstelle Mering. Es ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung.

Während des Pfingsthochwassers ufert die Paar stark aus. Da die Paar im Grundwassermodell als 1D-Gewässer hinterlegt ist, wird die Ausuferung über eine

zeitlich begrenzte flächige Leakage-Randbedingung (Dauer 1Tag) zusätzlich im Grundwassermodell angesetzt. Die räumliche Lage der Überflutungsflächen ist Abbildung 2.23 zu entnehmen.

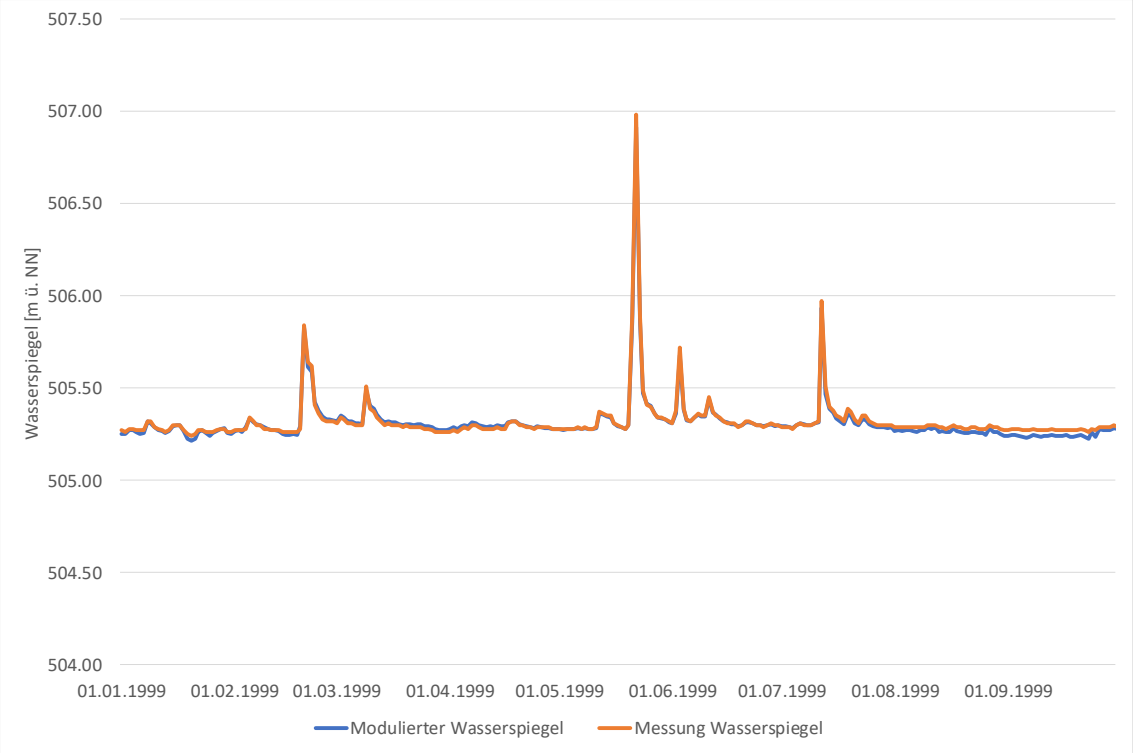

Abbildung 2.22: Ganglinie des Wasserspiegels an der Messstelle Mering (Vergleich zwischen Messung und den modulierten, flächigen Wasserspiegeln)

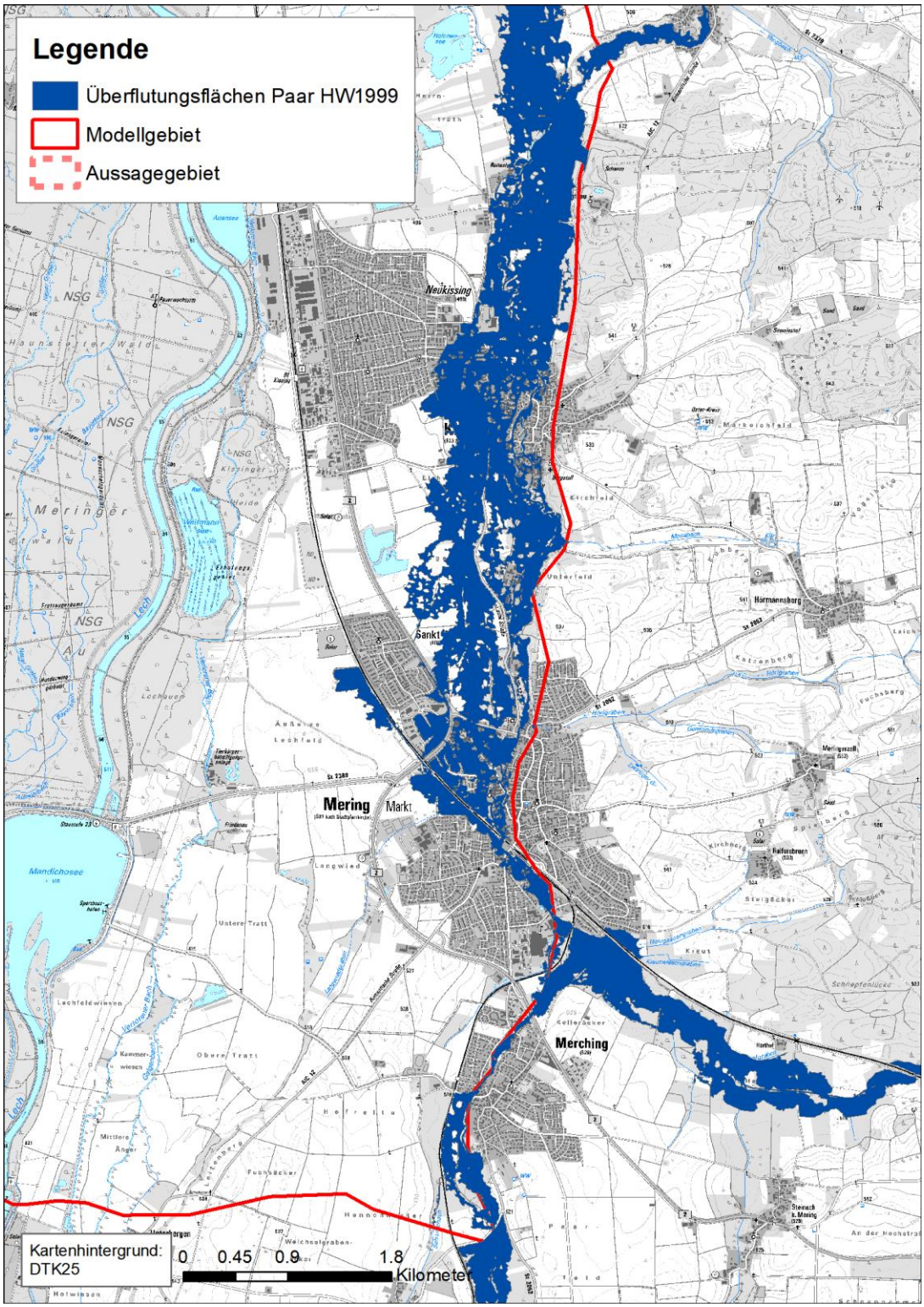

Abbildung 2.23: Ausuferungsflächen der Paar (Simulationsergebnis aus der instationären Wasserspiegelsimulation für das HW1999)

Bäche im Stadtgebiet Augsburg

Wasserspiegelmessungen an den Stadtbächen liegen erst ab dem Jahr 2008 vor. Die Wasserspiegel dieser Ganglinien weisen eher geringe Schwankungen auf (vgl. Bericht zum HGM, Kapitel 4.5.4, (ARGE SKI KUP UIBK, 2018)). Eine Übernahme von konstanten Wasserspiegeln ins Grundwassermodell ist ausreichend. Während der zweimal jährlich stattfindenden Bachablässen kommt es jedoch zu einer Absenkung der Wasserspiegel. Es wird angenommen, dass diese etwa 50 cm beträgt (die Messungen ab 2008 zeigen Absenkungen um ca. 50 – 80cm).
Im Zeitraum der instationären Kalibrierung werden einige Gewässer vom 10.04. – 22.04.1999 abgelassen (HydroConsult, 2012). Hierzu wird der Zustrom über die Ausleitung am Hochablass reduziert, der Zufluss durch den Lochbach wird nicht reduziert. Eine Abflussmessung oder Abschätzung von Restwassermengen während der Ablässe liegt nicht vor. Folgende Gewässer sind betroffen:

- Kaufbach
- Schäfflerbach
- Schwallech
- Sparrenlech
- Mittlerer Lech
- Hinterer Lech
- Vorderer Lech
- Stadtbach
- Lochbach (ab Neugrabenschleuse)
- Wolfsbach

Außerhalb dieses Zeitraums wurde der Wasserspiegel aus dem stationären Grundwassermodell MW2010 übernommen.

Lech im Planungsbereich

Generell orientiert sich das Verfahren zur Ermittlung der instationären Wasserspiegeln des Lechs im Planungsbereich an der in Anhang 3 beschriebenen Vorgehensweise, allerdings ist die Wasserspiegellage unterstrom des Wolfzahnauwehrs zusätzlich vom Abfluss der Wertach abhängig. Daher wurden von Seiten der ARGE deutlich mehr stationäre Wasserspiegelberechnungen zur Verfügung gestellt (z.B. Wasserspiegel bei MQ Lech und MQ Wertach, Wasserspiegel bei MQ Lech und MNQ Wertach, usw.), welche dann über die Abflussganglinien von Lech und Wertach (letztere Ganglinie

wurde aus der Differenz der Abflüsse vom Pegel Haunstetten, Lochbach und dem Lechpegel unterhalb der Wertachmündung gebildet) für das Grundwassermodell auf Tagesbasis gebracht wurden. Während des Vatertags- und Pfingsthochwasser wurden zusätzlich instationäre Wasserspiegellagenberechnungen im Grundwassermodell angesetzt. Eine weitere Besonderheit stellt die Berücksichtigung von Ausuferungsflächen dar: Wenn Modellknoten des Grundwassermodells von Ausuferungen benetzt werden, wird im Grundwassermodell temporär eine Leakage-Randbedingung aktiviert.

Abbildung 2.25 zeigt den Vergleich des modulierten Wasserspiegels (aus o.g. flächigen Wasserspiegeln berechnete Ganglinie, sowie instationäre Wasserspiegelberechnung während des Vatertags- und Pfingsthochwasser) und den gemessenen Wasserspiegeln an der Messstelle Pegel Haunstetten.

Abbildung 2.24: Ausuferungsflächen an Fkm 52 vor dem Pfingsthochwasser (links) und während des Pfingsthochwassers (rechts) (Ausuferungsflächen werden rot dargestellt)

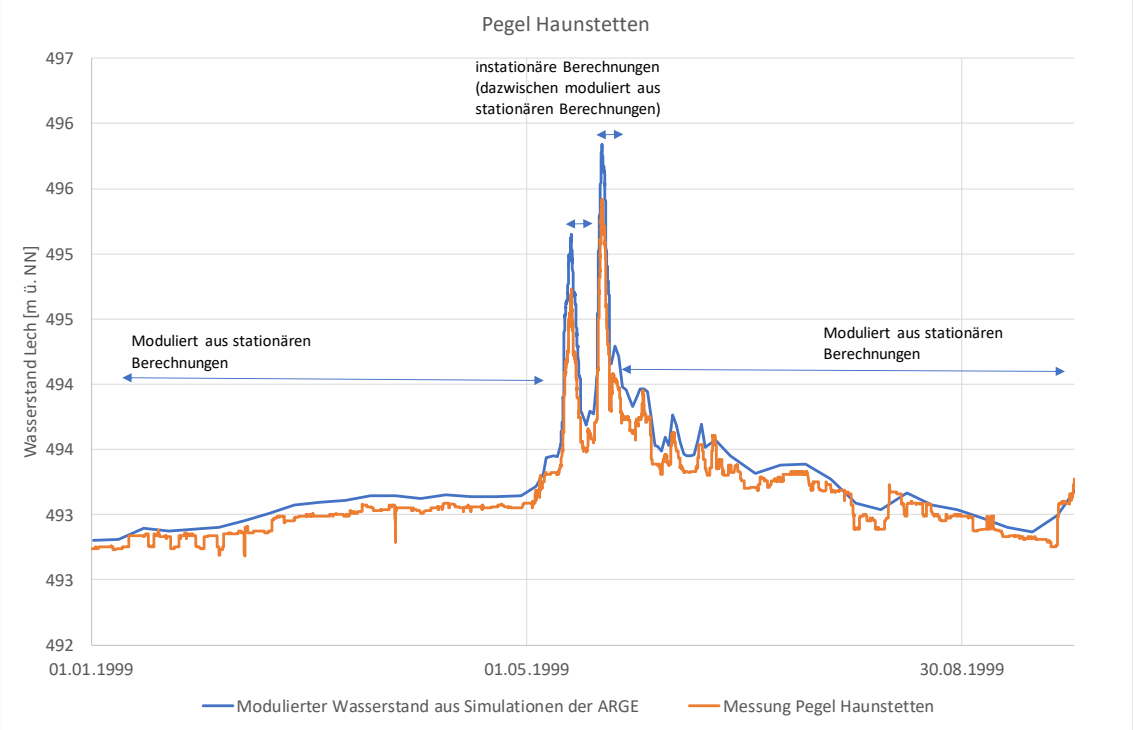

Abbildung 2.25: Ganglinie des Wasserspiegels an der Messstelle Pegel Haunstetten (Vergleich zwischen Messung und den modulierten, flächigen Wasserspiegeln)

Lech südlich der Staustufe 23 und nördlich des Gersthofener Wehrs

Am Lech außerhalb des Planungsbereichs wird der Wasserspiegel aus stationären Wasserspiegellagenberechnungen der ARGE nach dem in Anhang 3 beschriebenen Vorgehen moduliert. Südlich der Staustufe 23 wurde die Abflussganglinie des Pegel Haunstettens und nördlich des Gersthofener Wehrs die Abflussganglinie des Lechs unterhalb der Wertachmündung für die Modulierung verwendet. Im südlichen Bereich liegen nur 1D-Wasserspiegellagenberechnungen vor, daher wurden keine Ausuferungen angesetzt. Im nördlichen Bereich wurde auf eine Übernahme von Ausuferungsflächen aufgrund der geringen Relevanz für das Aussagegebiet ebenfalls verzichtet.

Wertach/Singold

An der Wertach zwischen Wertachmündung und der Staustufe Inningen wurden instationäre Wasserspiegel aus den stationären Wasserspiegellagen für MQ, HQ5, HQ10 und HQ100 moduliert. Da keine Berechnungen zu Abflüssen <MQ vorliegen entspricht der minimale Wasserspiegel dem Wasserspiegel bei MQ. Grundlage der

Modulierung ist die Wasserspiegelganglinie der Wertach, das Verfahren wird in Anhang 3 beschrieben.

Die Wertach wird im Grundwassermodell als 1D-Gewässer umgesetzt. Während des Pfingsthochwassers kommt es jedoch zu starken Ausuferungen. Ähnlich zum Vorgehen an der Paar, wird die Ausuferung über eine zeitlich begrenzte flächige Leakage-Randbedingung (Dauer 1Tag, Wasserspiegel HQ100) zusätzlich im Grundwassermodell angesetzt. Die räumliche Lage der Überflutungsflächen ist Abbildung 2.23 zu entnehmen.

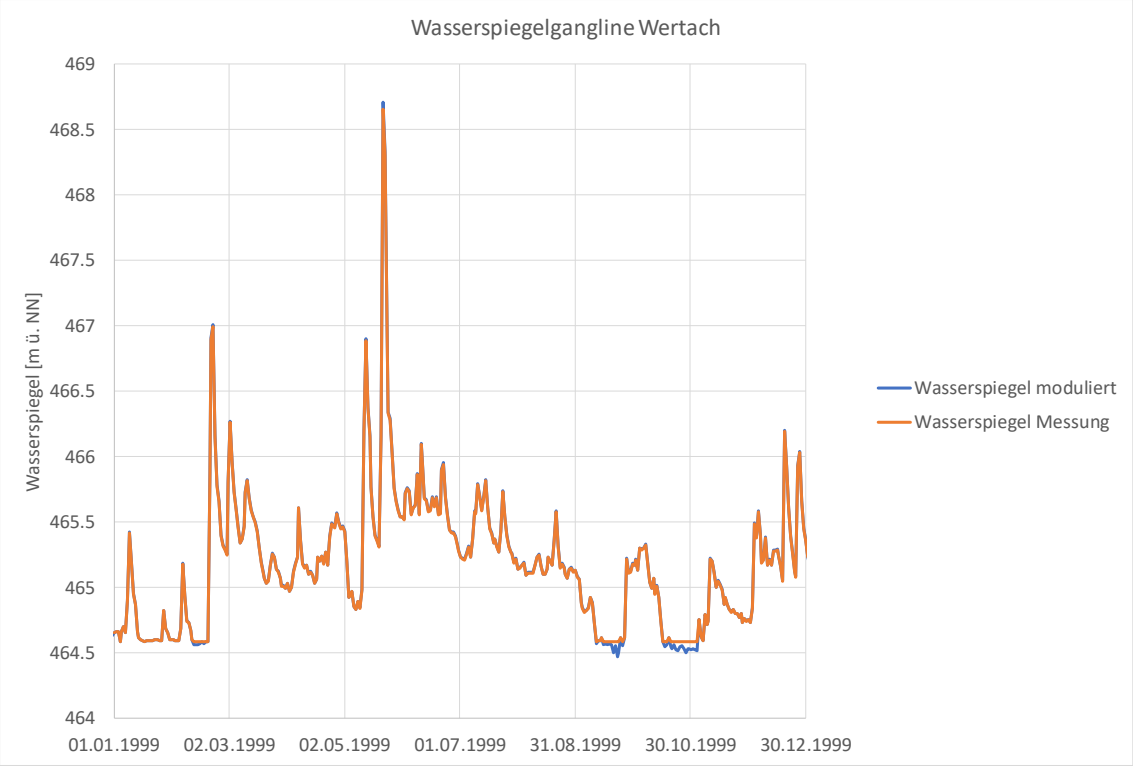

Abbildung 2.26: Vergleich zwischen modulierter und gemessener Wasserspiegelganglinie am Pegel Oberhausen

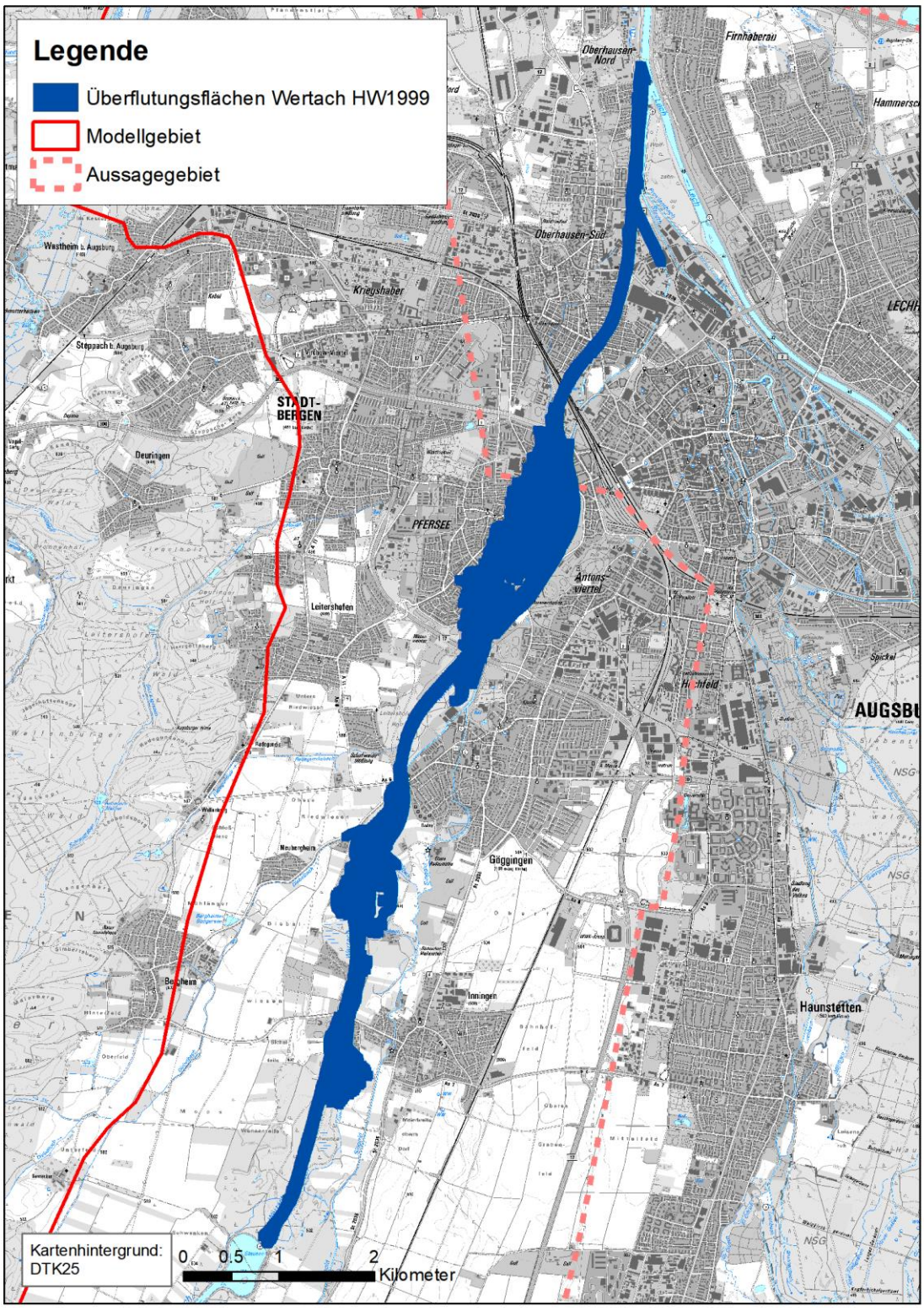

Abbildung 2.27: Ausuferungsflächen der Wertach (Stationäre Berechnung HQ100)

2.6.2.3 Nutz- und Brauchwasserentnahmen

Im Jahr 1999 liegen folgende Entnahmedaten vor:

- Tageswerte der Grundwasserentnahmen der Stadtwerke Augsburg
- Monatswerte der Grundwasserentnahme der Stadt Kissing
- Jahreswerte für folgende Datensätze (vgl. Kapitel 2.5.2.5):
    - Stadt Augsburg, Jahreswerte, ab 100000 m³/s
- Folgende Datensätze liegen im Jahr 1999 nicht vor, hier wurde auf Werte der Folgejahre zurückgegriffen:
    - Entnahmen Landkreis Aichach-Friedberg (LkrAicFr), Jahreswerte, ab 0 m³/s (Entnahmen im Jahr 2000)
    - Öffentliche Entnahmen des Landkreises Augsburg (LkrA (öff.)), Jahreswerte, ab 0 m³/s (Entnahmen im Jahr 2000)
    - Private Entnahmen des Landkreises Augsburg (LkrA (privat)), Jahreswerte, ab 100000 m³/s (Entnahmen im Jahr 2002)

Die Grundwasserentnahmen wurden entsprechend ins Grundwassermodell übernommen (teilweise wurden Tageswerte je nach Zeitschrittlänge des Modells auf Wochenwerte summiert).

2.7 Initiale Parametrisierung

Im Grundwassermodell müssen alle Modellparameter initial mit Werten belegt werden, damit auf diesem Parametersatz die Kalibrierung aufgebaut werden kann. Die initiale Parametrisierung sollte möglichst genau an den Gegebenheiten im Modellgebiet orientiert sein.

2.7.1 Durchlässigkeiten

Die Durchlässigkeit bzw. Der Durchlässigkeitsbeiwert zählt zu den bedeutenden grundwasserhydraulischen Parametern. Er beschreibt die Fähigkeit des Untergrunds zur Abführung von Grundwasser. Die Quartärkiese des Lechtals sind bekanntermaßen ein hochdurchlässiger Grundwasserleiter.

Generell wurden bei der Belegung der Durchlässigkeiten für das Grundwassermodell die Angaben im Bericht zum Hydrogeologischen Modell übernommen. Im Zuge der Modellanpassung und der damit einhergehenden höheren Detailschärfe der

Betrachtungen wurden die in Tabelle 2.2 aufgeführten Durchlässigkeiten zusätzlich ins Grundwassermodell übernommen. Im Bereich Königsbrunn wurden weitestgehend die im Grundwassermodell Königsbrunn (HydroConsult, 2003) hinterlegten Durchlässigkeiten übernommen. In diesem Bereich wurden ein Großpumpversuch (Geotechnisches Büro Prof. Dr. Schuler, Dr.-Ing. Gödecke, 1999) und die Absenkung des Ilsesees (HydroConsult, 2005) durchgeführt, sodass Durchlässigkeiten relativ gut abgesichert sind. Für Seen wird eine Durchlässigkeit von 1 angesetzt.

Gemessene Angaben zur vertikalen Anisotropie liegen nicht vor, es wurde daher ein Faktor von 5 angenommen ($k_{f,x} = k_{f,y} = 5*k_{f,z}$). Diese Wert basiert auf allgemeinen Erfahrungen. Er ist für die Modellierung für Licca liber nur von geringer Bedeutung (siehe Sensitivitätsstudie).

Tabelle 2.2: Literaturangaben zu Durchlässigkeiten im Modellgebiet

Bereich	**Literaturangabe**	**Umsetzung im Modell**
Wertachtal	Auenstufe Wertach: 5E-3m/s Postglazial Wertach: 1.5E-3m/s (BCE, 2015)	Übernahme für Auenstufe: 5E-3m/s, Übernahme für Postglazial: 1.5 E-3m/s
K_f-Werte der Altmoräne südlich Mering	-	Annahme 5E-4 m/s
K_f-Werte der Auenstufe der Paar	-	Aufgrund des kleineren Einzugsgebiets (verglichen mit dem Lech) handelt es sich wahrscheinlich um eher etwas feineres Material verglichen mit der Auenstufe des Lechs. Daher wurde ein k_f-Wert von 1E-2 angenommen.
Postglazial außerhalb des Wertachtals	Der K_f-Wert liegt laut dem Bericht zum WSG Kissing (Büro für Hydrogeologie, angewandte Geologie und Wasserwirtschaft, 2001) zwischen 1,4E-2 bis 1,8E-2 (Pumpversuch von 1999). Geringere Durchlässigkeiten wurden im Rahmen eines Pumpversuchs in 1958 ermittelt. Auch die k_f-Werte im	Annahme für das Postglazial außerhalb des Wertachtals: 2E-2 m/s

	Grundwassermodell Königsbrunn sind höher als die im Bericht zum HGM dokumentierten.	
Hochterrasse zwischen Schmutter- und Lechtal	Durchlässigkeit 1E-4 m/s (HydroConsult, 2016)	1E-4 m/s
Schmuttertal	-	5E-3

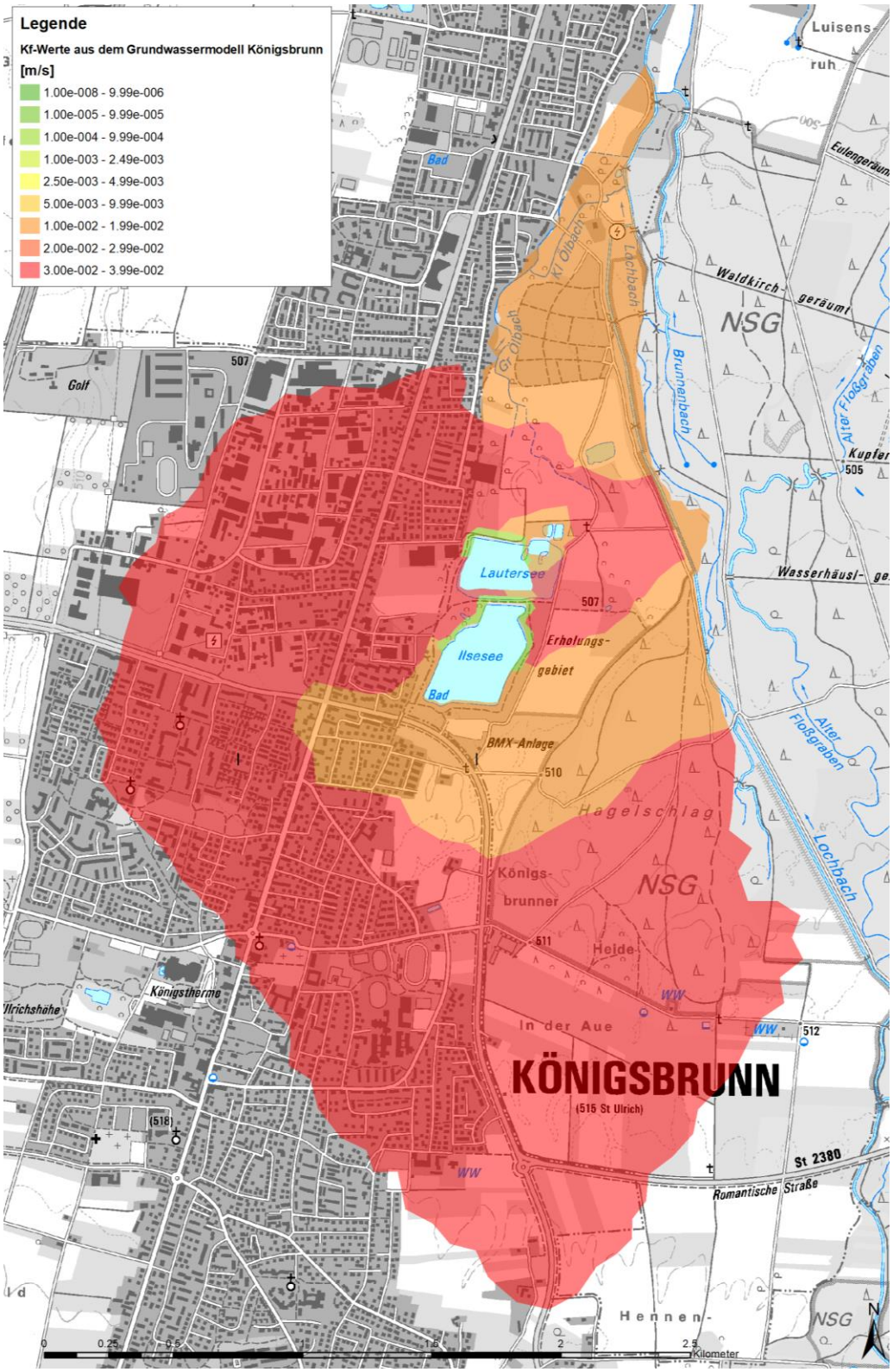

Abbildung 2.28: Durchlässigkeiten des Grundwassermodells Königsbrunn (HydroConsult, 2003)

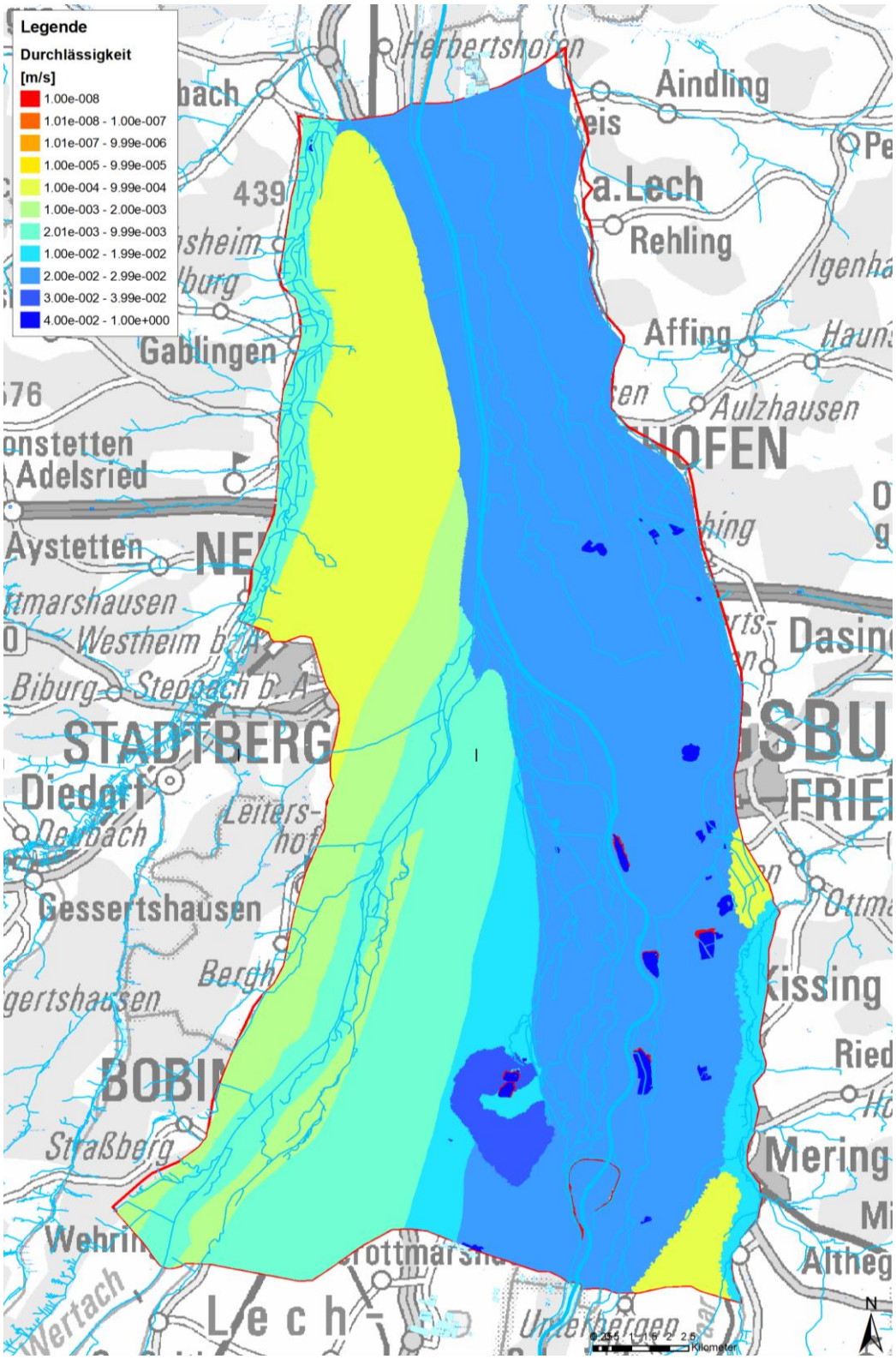

Abbildung 2.29: Initiale Durchlässigkeitsverteilung

2.7.2 Speichernutzbarer Hohlraumanteil

Dieser Parameter beschreibt die Fähigkeit des Untergrunds, Grundwasser zu speichern. Er ist u.a. dafür verantwortlich, wie stark das Grundwasser nach einem Niederschlag und der entsprechenden Neubildung ansteigt.

In den Grundwassermodellen Königsbrunn, Augsburg Mitte (Auenstufe) sowie dem Grundwassermodell Wertach Vital (Auenstufe) wurde ein speichernutzbarer Hohlraumanteil von 0,2 angesetzt. Für die übrigen hydrogeologischen Einheiten wird in den Grundwassermodellen Königsbrunn und Wertach Vital ein geringerer speichernutzbarer Hohlraumanteil angesetzt. Im Grundwassermodell wird daher initial für die Auenstufe ein Wert von 0,2 und für Hoch- und Niederterrasse sowie das Postglazial ein Wert von 0,15 angesetzt.

Eine Übersicht über den angesetzten speichernutzbaren Hohlraumanteil gibt Anlage 6.2.12.

Tabelle 2.3: Literaturangaben zum speichernutzbaren Hohlraumanteil im Modellgebiet

Bereich	**Literaturangaben**
Wertachtals	Wertach Vital (HydroConsult, 2012): Auenstufe 0.2 Postglazial 0.12
Lech südlich Augsburg	Grundwassermodell Königsbrunn (HydroConsult, 2003): Auenstufe 0.2 Postglazial 0.18 Niederterrasse 0.16 Hochterrasse 0.14 Grundwassermodell Augsburg Mitte (HydroConsult, 2012): Niederterrasse 0.16 Postglazial Siebentischwald/Textilviertel 0.2

2.7.3 Leakage-Koeffizient

Der Austausch über eine Leakage-Randbedingung wird neben dem Leakage-Koeffizienten auch durch die Netzdiskretisierung (Austauschfläche) bestimmt. Daher sind Literaturangaben zu Leakage-Koeffizienten, die nicht flächenspezifisch sind, für eine initiale Parameterbelegung kaum zu verwenden.
Aus diesem Grund wird initial folgende Parameterbelegung verwendet:

- Leakage-Koeffizient Infiltration (In-Transfer Rate): 1E-5 m/s
- Leakage-Koeffizient Exfiltration (Out-Transfer Rate): 8E-5 m/s

Die Parameter konnten nicht gleich belegt werden, da sonst lokal die Lösung nicht konvergiert (durch starkes Trockenfallen vor allem an tief einschneidenden Gewässern wie dem Lech im Innenstadtbereich).

2.8 Visualisierung des Grundwassermodells (Blockbild)

Abbildung 2.30 zeigt einen vereinfachten Überblick über im Modell angesetzte Randbedingungen, Schichtlagerung, Grundwassergleichen sowie die Morphologie des Grundwassermodells (Blockbild).

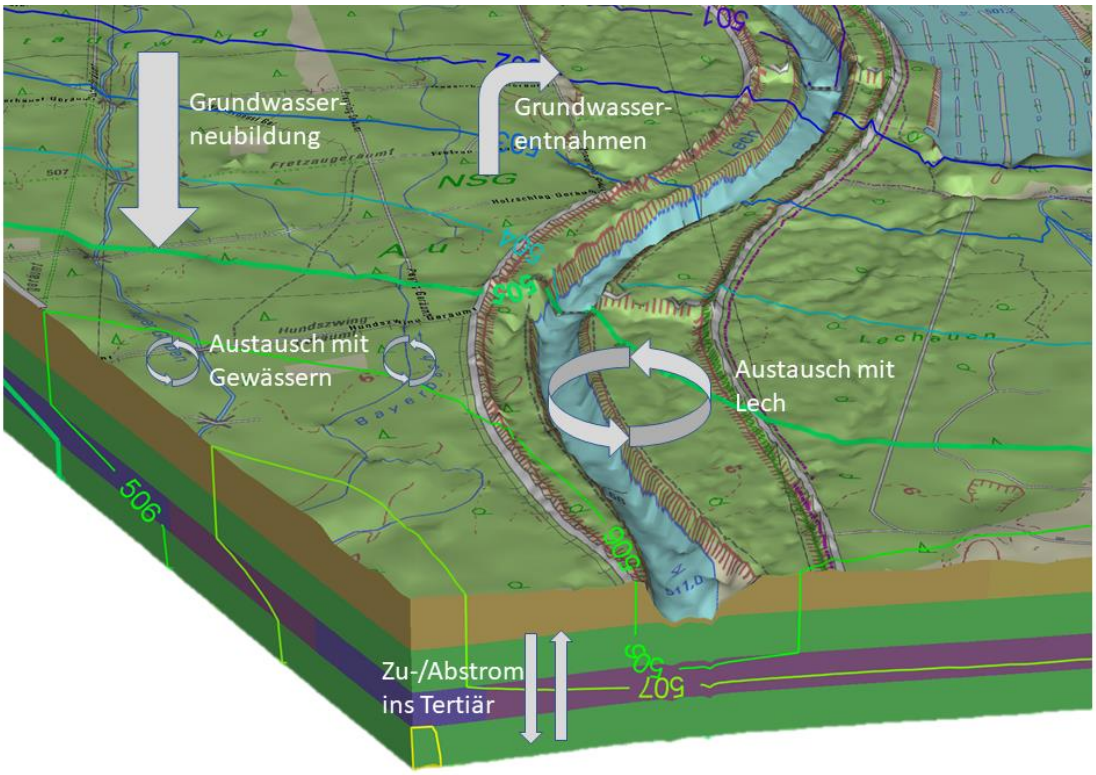

Abbildung 2.30: Blockbild des Grundwassermodells Licca Liber mit Angaben zu Randbedingungen und den Modellschichten.

3 Stationäre Kalibrierung

3.1 Übersicht

3.1.1 Betrachtungszeitraum

Für die stationäre Kalibrierung wurde der Zeitraum April/Mai 2010 aus folgenden Gründen ausgewählt:

- Als Kalibrierzeitraum sollte grundsätzlich ein möglichst aktueller Zeitraum gewählt werden. Im vorliegenden Fall ist die Wahl eines möglichst aktuellen Zeitraums besonders relevant, da sich die Lechsohle historisch verändert (hauptsächlich durch Eintiefung) und das Grundwassermodell als Prognoseinstrument einen möglichst aktuellen Stand abbilden muss.
- Die Datenlage verbessert sich, je aktueller der Kalibrierzeitrum ist (vor allem durch den Einbau von Datensammlern, die Wasserstände auf Tagesbasis aufzeichnen)
- Die Grundwasserstände bewegen sich im Zeitraum April/Mai 2010 für vergleichsweise lange Zeit im Bereich des Mittelwassers
- Die Grundwasserneubildung liegt mit 12,5 mm/mon nahe der mittleren, langjährigen Grundwasserneubildung (1992 bis 2016)
- Die wichtigsten Vorfluter (Lech und Paar) weisen über längere Zeiträume nur geringe Schwankungen um MQ-Abflüsse auf.

Die für die Kalibrierung verwendete Datenlage ist in Tabelle 3.1 dokumentiert

Tabelle 3.1: Zusammenstellung der für die stationäre Kalibrierung des Grundwassermodells verwendeten Daten

Größe	Auswertungszeitraum
Grundwasserstände	Mittelwert 11.04.2010 bis 11.05.2010
Grundwasserneubildung	Mittlere Grundwasserneubildung aus Zeitraum 01.11.2009 bis 11.5.2010
Wasserspiegel Lech im Planungsbereich	Mittelwert der simulierten Wasserspiegellagen (ARGE SKI KUP UIBK, 2017) aus dem Zeitraum 11.04.2010 bis 11.05.2010
Wasserspiegel aus Messdaten	Stadtbäche, Bäche im Stadtwald, Verlorener Bach/Hagenbach, Schmutter (E.ON Wasserkraft GmbH, Werkgruppe Lech, 2002), (TBA Augsburg, 2005), (WWA Donauwörth, 2016)
Wasserspiegel berechnet aus Messdaten	Paar (siehe Kapitel 2.5.2.3)
Grundwasserentnahmen	Brunnen an denen Monats-/Tageswerte vorliegen: Mittlere Entnahme April 2010, übrige Brunnen: Mittlere Entnahme Jahr 2010
Fremdwasser in der Kanalisation	0.28 m^3/s

3.1.2 Vergleichs- und Kalibriergrößen

Im Folgenden werden die wesentlichen Teilschritte der Kalibrierung aufgeführt. Bei der Kalibrierung handelt es sich um einen iterativen Prozess. Anhang 2 zeigt für ausgewählte Kalibrierschritte die sukzessive Verbesserung der Anpassungsgüte (vgl. auch Kapitel 3.3).

3.1.2.1 Austausch mit dem Tertiär

Im Rahmen des Berichts zum HGM wurde der vertikale Austausch mit dem Tertiär abgeschätzt. Diese betragen (Vergleichsgrößen):

- Grundwasseraufstieg (Tertiär → Quartärkies): +73 l/s
- Grundwasserabstieg (Quartärkies → Tertiär): -133 l/s.

Kalibriergröße:

- Der Austausch wird über die trennende Wirkung des Sub- und Toptons gesteuert. Im Grundwassermodell wird dies durch die Durchlässigkeit (in allen drei Raumrichtungen identisch) der Schicht 11 abgebildet.

Ziel der Kalibrierung ist durch eine Anpassung der Durchlässigkeiten o.g. Austauschraten (Vergleichsgrößen) abzubilden.

3.1.2.2 Austausch mit Lochbach, Bächen im Stadtwald, Verlorenen Bach/Hagenbach, Paar und Lech im Planungsraum zwischen Hochablass und Staustufe 23

Dieser Kalibrierschritt umfasst die Anpassung des Austauschs mit zahlreichen Oberflächengewässern. Die Leakage-Raten müssen gesamthaft angepasst werden, da eine Veränderung des Austauschs eines einzelnen Gewässers über die Veränderung des Grundwasserstands immer auch den Austausch mit Nachbargewässern beeinflusst. Die im Folgenden zitierten Abflussmessungen wurden bei MW-Verhältnissen durchgeführt und können für die Kalibrierung daher trotz abweichendem Stichtagen verwendet werden.

Vergleichsgrößen:

- Aus Abflussmessungen ermittelte Austauschraten mit dem Lochbach (WWA Donauwörth und TBA Augsburg, 2016), (Peschke, 2009), (HydroConsult, 2012)
- Aus Abflussmessungen ermittelte Austauschraten mit dem Gewässernetz im Stadtwald (WWA Donauwörth, 2016) , (HydroConsult, 2012)
- Aus Abflussmessungen ermittelte Austauschraten mit dem Verlorenen Bach/Hagenbach (WWA Donauwörth, 2016)
- Aus Abflussmessungen und Seiteneinzugsgebieten abgeschätzte Austauschraten mit der Paar:
    - Aus den beiden Seiteneinzugsgebieten strömen der Paar etwa 100l/s zu
    - Die Abflussmessung ergibt eine etwa ausgeglichene Bilanz zwischen der nördlichen und südlichen Abflussmessung (-100l/s), (WWA Donauwörth, 2016)
    - Wasserspiegel liegen bei Mittelwasser nahezu ausschließlich über dem Grundwasserstand, daher ist eine Exfiltration unwahrscheinlich. Unter Berücksichtigung der Fehlertoleranz des Messgeräts (5% Fehler bei

einer guten Messung) wird pauschal eine Infiltration von 100 l/s auf der gesamten Fließstrecke angenommen.

- Grundwasserstände an lechnahen Grundwassermessstellen

Die aus den Abflussmessungen ermittelten In- und Exfiltrationen sowie Grundwasserstände an den Referenzmessstellen sind in Tabelle 3.2 bzw. Tabelle 3.3 aufgeführt.

Kalibriergrößen:

- Leakage-Koeffizienten in Gewässerabschnitten

Um die gemessenen Austauschraten je Gewässerabschnitt erzielen zu können, müssen je Abschnitt individuelle Austauschraten kalibriert werden. Abbildung 3.1 gibt Aufschluss über die Lage der Gewässerabschnitte.

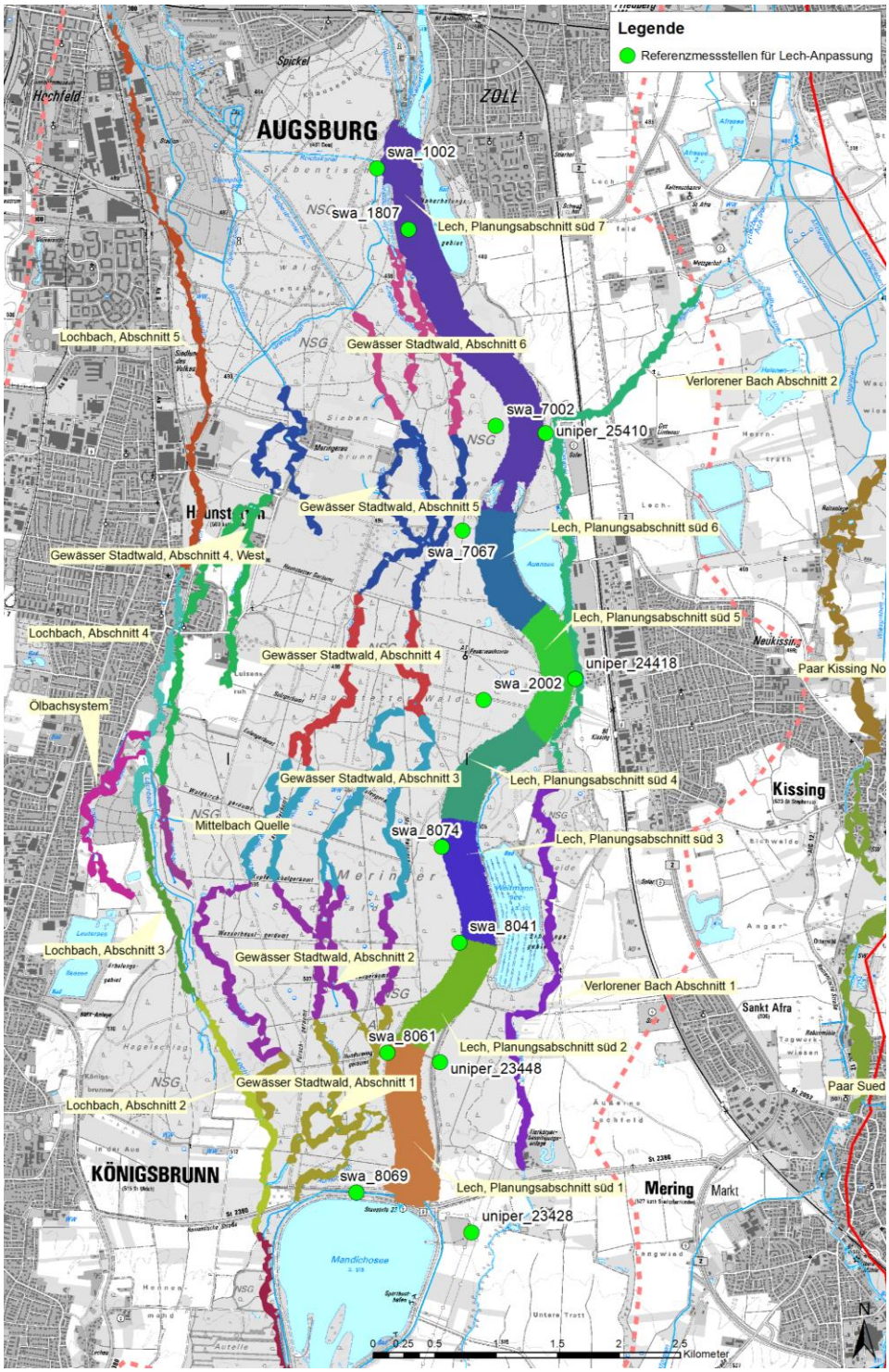

Abbildung 3.1: Kalibrierabschnitte an den Gewässern im Stadtwald, rechts des Lechs sowie Referenzmessstellen für die Anpassung des Lechs.

Tabelle 3.2: Vergleichsgrößen für die Kalibrierung von Leakage-Koeffizienten im Stadtwald, hier: Bilanzgrößen

Abschnitt	**Infiltration (+) / Exfiltration (-) [m³/s]**	
	Messung	**Quelle**
Lochbach Abschnitt 1	0.34	(WWA Donauwörth und TBA Augsburg, 2016), (HydroConsult, 2012)
Lochbach Abschnitt 2	0.30	
Lochbach Abschnitt 3	0.32	
Lochbach Abschnitt 4	0.12	
Lochbach Abschnitt 5	0.00	
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 1	0.77	(WWA Donauwörth, 2016)
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 2	-0.09	
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 3	0.13	
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 4	0.04	
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 4 West	-0.12	
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 5	0.10	
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 6	0.03	
Mittelbach Quelle	-0.30	
Ölbachsystem	-0.16	(HydroConsult, 2012)
Verlorener Bach, Abschnitt 1	0.18	(WWA Donauwörth, 2016)
Verlorener Bach, Abschnitt 2	0.28	
Paar, gesamt	0.10 *(Die Auswertung der Abflussmessung deutet eine geringere Infiltration an, einem konservativen Ansatz folgend wird jedoch eine etwas höhere Infiltration angenommen.)*	(WWA Donauwörth, 2016)

Tabelle 3.3: Vergleichsgrößen für die Kalibrierung von Leakage-Koeffizienten im Stadtwald, hier: Grundwassermessstellen

Referenzmessstelle	**Grundwasserstand [m ü. NN]**
	Messung (Grundwasserstände April/Mai 2010)
swa_1002	482.95
swa_1807	484.60
swa_2002	495.47
swa_7002	487.61
swa_7067	491.86
swa_8041	501.83
swa_8061	505.23
swa_8069	507.98
swa_8074	500.08
uniper_23428	509.74
uniper_23448	504.50
uniper_24418	495.19
uniper_25410	488.01

3.1.2.3 Kanalisation

Im Bericht zum HGM wurden Auswertungen zum Fremdwasser in der Kanalisation gezeigt. Hier zeigt sich, dass der Fremdwasseranteil in der Kanalisation seit Beginn der 2000er stark abgenommen hat. Für die Monate 11/2009 bis 4/2010 lag die mittlere Fremdwasserrate bei etwa 280 l/s. Eine Auswertung der Abflüsse an den Hauptsammlern der Kanalisation ergibt, dass im Jahr 2010 etwa 50% des Abflusses aus dem Innenstadtbereich (Bereich zwischen Wertach und Lech) stammt. Daher wird angenommen, dass auch der Fremdwasseranteil etwa zu 50% aus dem Innenstadtbereich entnommen wird. Es wurden daher zwei Kalibriergrößen definiert:

- Leakage-Koeffizient Innenstadtbereich (s. Abbildung 2.18)
- Leakage-Koeffizient übrige Stadtbereiche

Vergleichsgrößen:

- Innenstadtbereich -0,14 m³/s (Kanalisation muss 0,14 m³/s aufnehmen)

- übrige Stadtbereiche -0,14 m³/s (Kanalisation muss 0,14 m³/s aufnehmen)

3.1.2.4 GW-Sammler, Stadtbäche und Lech zwischen Hochablass und Gersthofener Wehr

Dieser Kalibrierschritt umfasst die Kalibrierung von Leakage-Koeffizienten in folgenden Bereichen (Kalibriergrößen):

- Leakage-Koeffizienten der GW-Sammler (je Sammler unabhängige Leakage-Koeffizienten)
- Leakage-Koeffizienten der Stadtbäche:
- Leakage-Koeffizienten des Lechs im Innenstadtbereich und Austritte bei in das Tertiär eingeschnittenem Lech (s. Abbildung 3.2, vgl. Kapitel 2.5.2.3)

Folgende Vergleichsgrößen liegen vor:

- GW-Sammler: Da keine Messung für den GW-Sammler Reichenberger Straße vorliegt, wird eine Entnahmerate von 50 l/s angenommen. An den übrigen GW-Sammlern liegen die in Kapitel 2.5.2.6 dokumentierten Entnahmeraten als Vergleichsgrößen vor.
- Messwerte der Grundwassermessstellen
- An den Stadtbächen wurden Abflussmessungen durch das WWA Donauwörth und das TBA Augsburg durchgeführt, die Gesamtbilanz der Stadtbäche ist etwa ausgeglichen (das heißt das den Stadtbächen zufließende Wasser aus Hochablass, Stadtwald und Lochbach entspricht in etwa dem in den Lech abfließenden Wasser, s. (ARGE SKI KUP UIBK, 2018)). Aufgrund der Höhe der Abflüsse (Gesamtsumme bis zu 20 m³/s) sind unter Berücksichtigung einer Fehlertoleranz von 5 % (1 m³/s) sowohl Infiltrationen als Exfiltration möglich. Die Wasserspiegellagen der Stadtbäche liegen nahezu ausschließlich über dem Grundwasser und Grundwasserstände sinken während Bachablässen ab, daher ist von infiltrierenden Verhältnissen auszugehen. Im Grundwassermodell Augsburg Mitte wird von einer Infiltration von bis zu 900 l/s ausgegangen (HydroConsult, 2010). Diese Größenordnung der Infiltration erscheint plausibel und wird für die stationäre Kalibrierung als Vergleichsgröße übernommen.

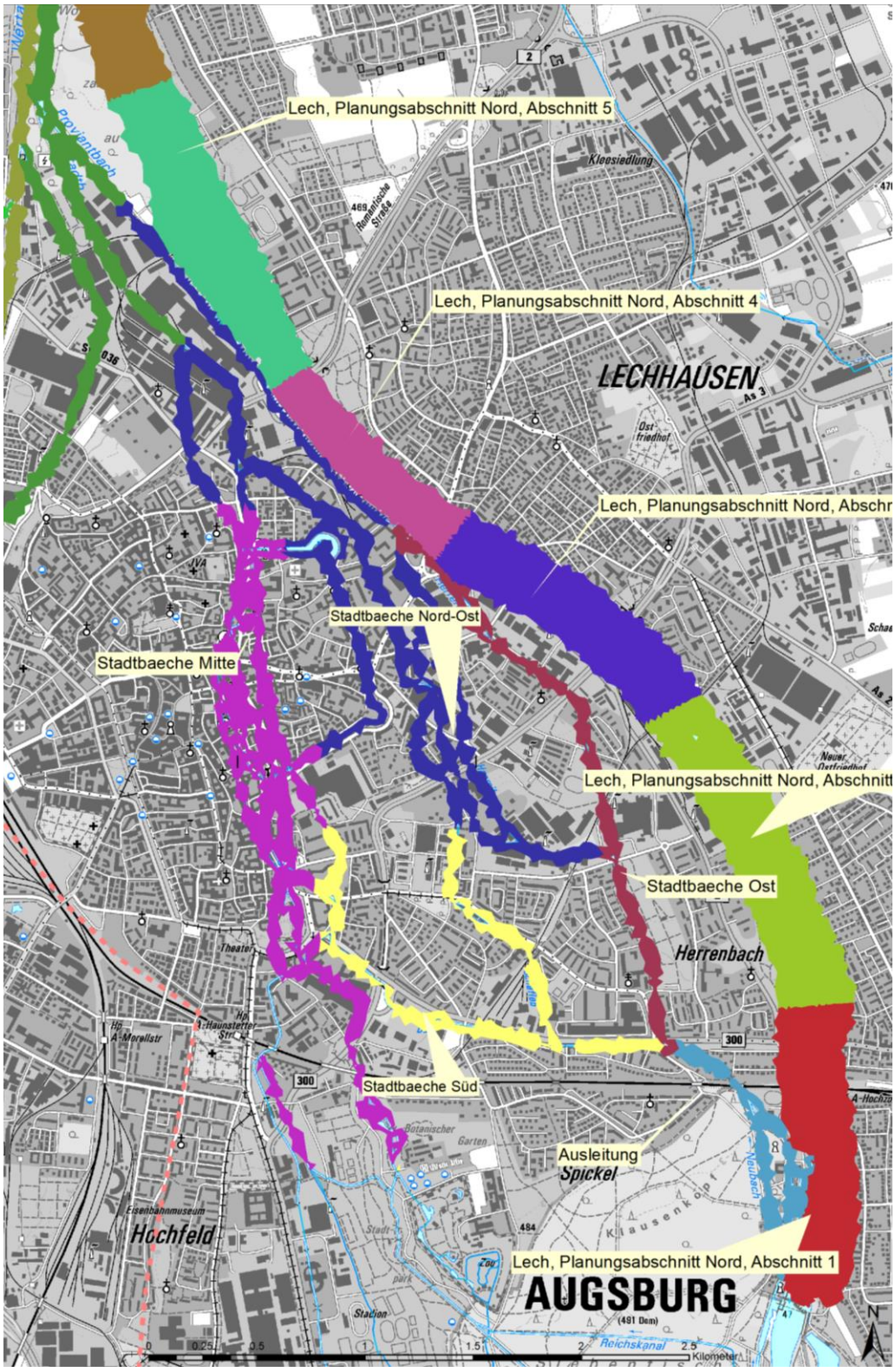

Abbildung 3.2: Kalibrierabschnitte an den Gewässern im Stadtgebiet

3.1.2.5 Lech oberstrom der Staustufe 23 und unterstrom des Gersthofener Wehrs

In diesen Bereichen liegen keine Abflussmessungen o.ä. vor, durch die sich der Austausch mit den Gewässern abschätzen lässt. Daher erfolgt die Anpassung auf Grundlage von Messungen des Grundwasserstands an lechnahen Grundwassermessstellen. Lech-Abschnitte innerhalb des Planungsraums wurden in Kapitel 3.1.2.2 und 3.1.2.4 kalibriert.

Kalibriergrößen:

- Leakage-Wert Lech oberstrom der Staustufe 23 (Mandichosee).
- Leakage-Koeffizient unterstrom des Gersthofener Wehrs

Vergleichsgrößen:
Die Anpassung erfolgt auf Grundlage der Grundwasserstände entlang des Lechs.

3.1.2.6 Wertach

Im Wertachtal liegen keine Abflussmessungen o.ä. vor, durch die sich der Austausch mit den Gewässern abschätzen lässt. Daher erfolgt die Anpassung auf Grundlage von Messungen des Grundwasserstands.

Kalibriergrößen:

- Die Anpassung erfolgt für 5 unabhängige Bereiche, diese sind in Abbildung 3.3 dargestellt.

Als Vergleichsgrößen dienen Grundwassermessungen der BEW und des TBA im Wertachtal.

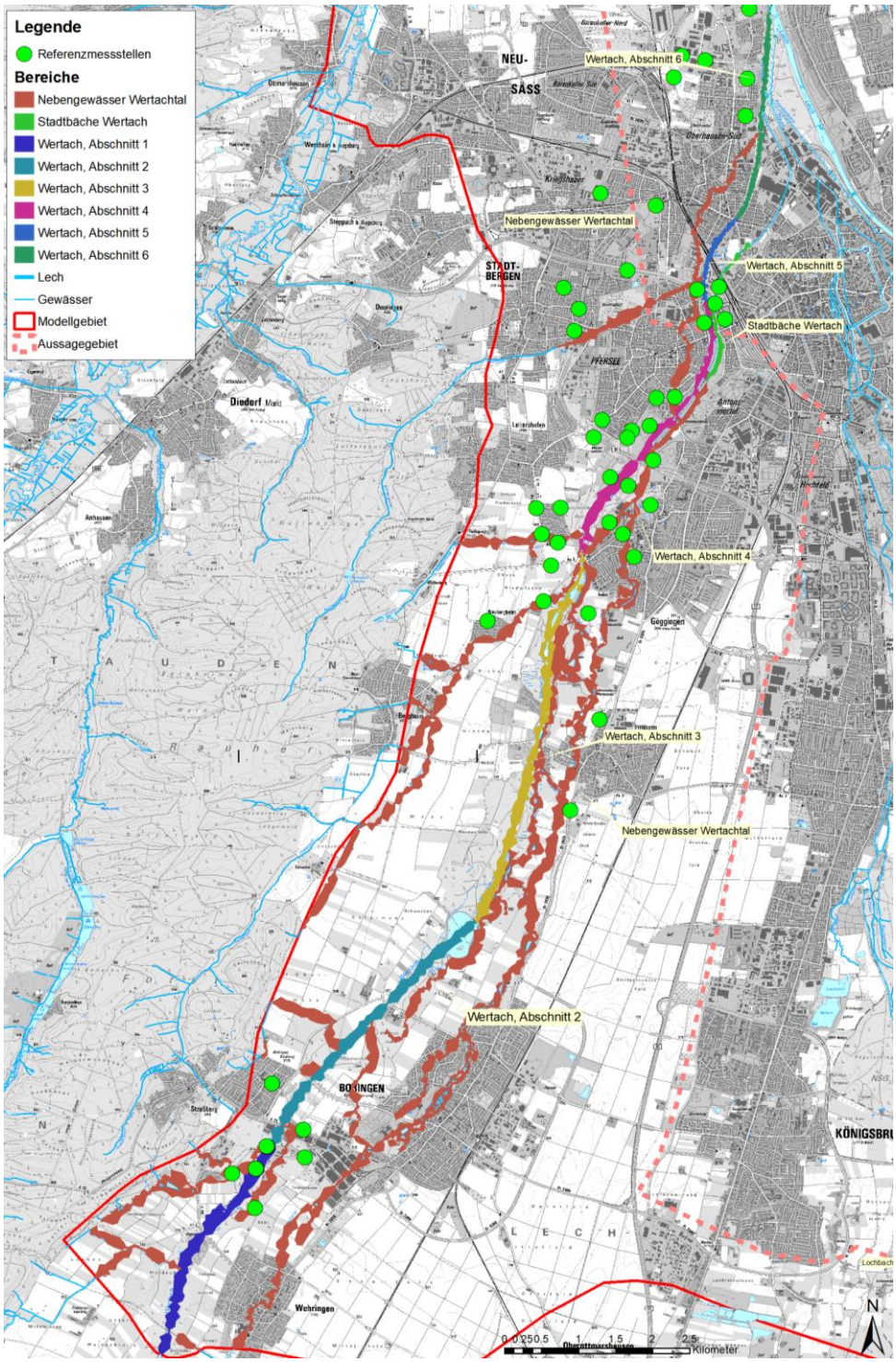

Abbildung 3.3: Kalibrierabschnitte an den Gewässern im Wertachtal

3.1.2.7 Kolmationsschicht der Seen

Der Austausch des Grundwassers mit Seen wird von der Kolmationsschicht (Dichtung der Seesohle) bestimmt.

Kalibrierparameter Kolmationsschicht: Diese ist im Grundwassermodell durch eine den See bereichsweise umgebende gering durchlässige Schicht berücksichtigt. Die Ausdehnung der Kolmationsschicht (Anteil des Ufer-/Sohlbereichs mit gering durchlässigen Modellelementen) wird variiert. Für folgende Seen wurde bereichsweise eine Kolmationsschicht angenommen:

- Ilsesee
- Lautersee
- Weitmannsee
- Auensee
- Kuhsee
- Herrentratsee (nördlich Kissing)

Vergleichsgröße: Im Rahmen der stationären Kalibrierung wird die Ausdehnung der Kolmationsschicht variiert, bis die Simulation die Messungen an benachbarten Grundwassermessstellen und beobachteten Seewasserspiegeln möglichst genau abbildet.

3.1.2.8 Durchlässigkeiten

Für das Grundwassermodell wird eine möglichst einheitliche Belegung der k_f-Werte je hydrogeologischer Einheit (Auenstufe, Postglazial, Niederterrasse, Hochterrasse) angestrebt.

Kalibrierparameter:

- Weitestgehende Übernahme der initialen Durchlässigkeiten
- Gegebenenfalls Anpassung von Durchlässigkeiten je HGE
- Gegebenenfalls lokale Anpassung (z.B., wenn der Grundwasserumsatz lokal anzupassen ist)

Vergleichsparameter:

- Messungen an Grundwassermessstellen im gesamten Modellgebiet

3.2 Ergebnisse

3.2.1 Berechnete Piezometerhöhen

Als Ergebnis für die stationäre Kalibrierung ergeben die sich in Anlage 6.2.9 und Anlage 6.2.10 dargestellten Grundwassergleichen für den quartären Grundwasserleiter. Zusätzlich sind die aus Messdaten ermittelten Grundwassergleichen abgebildet; die farblich differenzierten Abweichungen (Punkte) entsprechen zugleich den Stützstellen der Interpolation. Es handelt sich bei den interpolierten Grundwassergleichen der Messung um eine reine Interpolation von Messdaten, auf eine weitergehende Interpretation (z.B. Verformung der Grundwassergleichen an Gewässern durch lokale Infiltration) wurde in den gemessenen Gleichen verzichtet. Daher kann es insbesondere in Gewässernähe zu größeren Abweichungen kommen, weil im Grundwassermodell die Interaktion mit Gewässern berücksichtigt wird.

Auf eine Darstellung von Grundwassergleichen außerhalb des Aussagegebiets wird verzichtet, weil die Grundwasserfließverhältnisse dort nur qualitativ abgebildet werden.

3.2.2 Wasserbilanz

Neben den Piezometerhöhen spielen im Grundwassermodell Licca Liber zahlreiche Abflussmessungen an Gewässern, GW-Sammlern sowie in den Abwasserkanälen eine besondere Rolle, da hierdurch der Austausch mit dem Grundwasser gut abgeschätzt werden kann.

Tabelle 3.4 fasst den Austausch der Gewässer mit dem Grundwasser im Bereich südlich des Hochablasses zusammen. Es wird deutlich, dass die Austauschmengen mit dem Lochbach exakt abgebildet werden können, die Anpassung in den übrigen Bereichen ist ebenfalls sehr gut. Einige kleinere Exfiltrationen an Gewässern können nicht abgebildet werden, da die Wasserspiegel an den Gewässern über dem Grundwasserspiegel liegen (damit ist eine Exfiltration physikalisch nicht möglich). Der Lech nimmt bis zu 2,56 m³/s Grundwasser auf (s. Tabelle 3.5, Summe aus Ex- und Infiltration).

Auch im Innenstadtbereich ist der Lech der wichtigste Vorfluter (Exfiltration von 1,30 m³/s, s. Tabelle 3.7), weiterhin werden durch die GW-Sammler etwa 0,63 m³/s abgeführt (s. Tabelle 3.6). Letzterer Wert liegt gering über den durch HydroConsult

(2012) gemessenen Werten an den GW-Sammlern, liegt aber noch im Bereich der Fehlertoleranz. Eine Minderung dieser Austauschmengen würde zu einer Überschätzung des Grundwasserspiegels führen.

Tabelle 3.8 führt den Austausch des Grundwassers mit der Wertach auf, der Austausch mit weiteren Randbedingungen ist in Tabelle 3.9 und Tabelle 3.10 aufgeführt. Die Gesamtbilanz der Grundwassermodells Licca Liber für das MW2010 kann Tabelle 3.11 entnommen werden: Es wird deutlich, dass der größte Wasserumsatz im Grundwassermodell durch den Austausch mit Gewässern hervorgerufen wird, des Weiteren nehmen die Gewässer mehr Wasser auf, als sie abgeben. Dies entspricht der Abschätzung aus dem Bericht zum Hydrogeologischen Modell (ARGE SKI KUP UIBK, 2018)

Der gesamte Wasserumsatz im Grundwassermodell beträgt etwa 15 m^3/s. Der Fehlbetrag in der Bilanz ist vernachlässigbar (1 l/s). Anlage 6.2.11 stellt die wichtigsten stationären Wasserbilanzen (soweit möglich) in der Übersichtskarte dar.

Tabelle 3.4: Gemessene und simulierte Wasserbilanz im Bereich südlich des Hochablasses

Abschnitt	**Infiltration (+) /Exfiltration (-) [m³/s]**	
	Messung	**Simulation**
Lochbach Abschnitt 1	0.34	0.34
Lochbach Abschnitt 2	0.30	0.30
Lochbach Abschnitt 3	0.32	0.32
Lochbach Abschnitt 4	0.12	0.11
Lochbach Abschnitt 5	0.00	-0.01
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 1	0.77	0.77
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 2	-0.09	0.00
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 3	0.13	0.12
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 4	0.04	0.03
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 4 West	-0.12	-0.11
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 5	0.10	0.09
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 6	0.03	0.03
Mittelbach Quelle	-0.30	-0.25
Ölbachsystem	-0.16	0.00
Verlorener Bach, Abschnitt 1	0.18	0.19
Verlorener Bach, Abschnitt 2	0.28	0.28
Paar, gesamt	0.10	0.10

Tabelle 3.5: Simulierte Wasserbilanz im Bereich südlich des Hochablasses *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)*

Abschnitt	**Infiltration (+) /Exfiltration (-) [m³/s]**
	Simulation
Lech, Planungsabschnitt Süd 1	-0.20
Lech, Planungsabschnitt Süd 2	-0.24
Lech, Planungsabschnitt Süd 3	-0.46
Lech, Planungsabschnitt Süd 4	-0.26
Lech, Planungsabschnitt Süd 5	-0.23
Lech, Planungsabschnitt Süd 6	-0.10
Lech, Planungsabschnitt Süd 7	-1.07
Lech, Planungsabschnitt Süd, gesamt	-2.56

Tabelle 3.6: Gemessene und simulierte Wasserbilanz im Bereich Innenstadt

Abschnitt	**Infiltration (+) /Exfiltration (-) [m³/s]**	
	Messung	**Simulation**
GW-Sammler		
Schleifenstraße	-0.33	-0.34
Prinzstraße	-0.20	-0.24

Tabelle 3.7: Simulierte Wasserbilanz im Bereich Innenstadt *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)*

Abschnitt	**Infiltration (+) / Exfiltration (-) [m³/s]**
	Simulation
Lech, Planungsabschnitt Nord 1	-0.13
Lech, Planungsabschnitt Nord 2	-0.16
Lech, Planungsabschnitt Nord 3	-0.06
Lech, Planungsabschnitt Nord 4	-0.02
Lech, Planungsabschnitt Nord 5	-0.13
Lech, Planungsabschnitt Nord 6	-0.16
Lech, Planungsabschnitt Nord 7	-0.11
Austritte bei ins Tertiär eingeschnittenem Lech	-0.54
Lech, Planungsabschnitt Nord, gesamt	-1.30
Stadtbäche Mitte	0.23
Stadtbäche Nord	0.08
Stadtbäche Ost	0.30
Stadtbäche Süd	0.18
Ausleitung Hochablass	0.10
Stadtbäche, gesamt	0.90
GW-Sammler	
Reichenbergerstraße	-0.05

Tabelle 3.8: Wasserbilanz im Wertachtal *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)*

Abschnitt	**Infiltration (+) /Exfiltration (-) [m³/s]**
	Simulation
Wertach, Abschnitt 1	-0.08
Wertach, Abschnitt 2	-0.17
Wertach, Abschnitt 3	-0.51
Wertach, Abschnitt 4	-0.18
Wertach, Abschnitt 5	-0.20
Wertach, Abschnitt 6	-0.01
Wertach, gesamt	-1.15

Tabelle 3.9: Gemessene und simulierte Wasserbilanz weiterer Randbedingungen

Abschnitt	**Infiltration (+) /Exfiltration (-) [m³/s]**	
	Vergleichsgröße/ Messung	**Simulation**
Aufstieg aus dem Tertiär	0.07	0.07
Abstieg ins Tertiär	-0.13	-0.14
Abwasserkanäle	-0.28	-0.32

Tabelle 3.10: Simulierte Wasserbilanz weiterer Randbedingungen *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)*

Abschnitt	**Infiltration (+) /Exfiltration (-) [m³/s]**
	Simulation
Festpotentialrand Südrand	1.76
Festpotentialrand Nordrand	-0.75
Festpotentialrand HGW2	-0.07
Zuflussrand Ost	0.28
Zuflussrand Nordwest	0.18
Zuflussrand West	0.06
Zuflussrand Südwest	0.12

Tabelle 3.11: Wasserumsatz des Modells

Art Randbedingung	**Umsatz [m³/s]**		
	Zufluss	**Abfluss**	**Netto**
Festpotentialränder (RB 1. Art)	5.481	4.492	0.989
Zuflussränder (RB 2. Art)	0.641	0.000	0.641
Gewässer, GW-Sammler, Abwasserkanäle (RB 3. Art)	7.353	9.241	-1.889
Brunnen, Austritte bei ins Tertiär eingeschnittenem Lech (RB 4. Art)	0.000	1.331	-1.331
Grundwasserneubildung	1.589	0.000	1.589
Wasserumsatz	15.063	15.064	-0.001

3.2.3 Modellparameter

3.2.3.1 Kalibrierte Durchlässigkeiten

Initial wurden die in Kapitel 2.7.1 beschriebenen horizontalen Durchlässigkeiten im Grundwassermodell angesetzt. In folgenden Bereichen wurden Durchlässigkeiten angepasst:

- Anpassung k_f-Wert Auenstufe im Lechtal: Für den initialen k_f-Wert von 1E-2 m/s in der Auenstufe nördlich Königsbrunn ergeben sich in Königsbrunn zu hohe Grundwasserstände, weil die großen Mengen infiltrierenden Wassers des

Lochbachs und des südlichen Stadtwalds mit diesem k_f-Wert schlecht abgeführt werden können. Eine Erhöhung auf 3E-2 m/s ergibt eine bessere Anpassung (siehe Anhang 2). Daher wurde die gesamte Auenstufe nördlich der Staustufe 23 mit diesem k_f-Wert belegt.

- Anpassungen entlang des südlichen Modellrands: Östlich des Lechs zwischen der Staustufe 23, der Moränenablagerung bei Mering und dem südlichen Modellrand war eine Erhöhung des k_f-Werts auch im Postglazial notwendig, um den Grundwasserumsatz etwas zu erhöhen
- Im Bereich zwischen Lech und Friedberg wurde die Auenstufe etwas nach Osten ausgedehnt um dort den Grundwasserumsatz etwas zu erhöhen.

Die finale Durchlässigkeitsverteilung ist in Anlage 6.2.6 dargestellt. Zusätzlich werden in Anhang 1 die Parametrisierungen entlang einiger Quer- bzw. Längsschnitte durch das Modellgebiet dokumentiert.

3.2.3.2 Kalibrierte Leakage-Koeffizienten

Der Wasserumsatz im Grundwassermodell wird wesentlich vom Austausch mit den Gewässern geprägt. Zahlreiche Abflussmessungen an Gewässern ermöglichen eine hohe räumliche Differenzierung von Leakage-Koeffizienten. Im Grundwassermodell wird nach Leakage-Koeffizienten für Infiltration und Exfiltration unterschieden. Die stationär kalibrierten Leakage-Koeffizienten sind für die Infiltration an den Gewässern in Anlage 6.2.7 und für Exfiltration in Anlage 6.2.8 dargestellt. Zusätzlich werden in Anhang 1 die Parametrisierungen entlang einiger Quer- bzw. Längsschnitte durch das Modellgebiet dokumentiert.

Zusätzlich wurden für die Kanalisation und GW-Sammler die in Tabelle 3.12 aufgeführten Leakage-Koeffizienten kalibriert.

Tabelle 3.12: Leakage-Koeffizienten der Kanalisation und der GW-Sammler

Einrichtung	Leakage-Koeffizient [m/s]
Kanalisation außerhalb der Innenstad	4.76E-8
Kanalisation innerhalb der Innenstad	1.03E-7
GW-Sammler Schleifenstraße	2.78E-5
GW-Sammler Prinzstraße	9.50E-6

GW-Sammler Reichenbergerstraße	3.08E-6

3.3 Anpassungsgüte

Folgende Parameter werden zur Bewertung der Anpassungsgüte herangezogen. In die Berechnung der Parameter fließen gemessene („Messung“) und berechnete („Rechnung“) Grundwasserstände bzw. Piezometerhöhen ein.:

- Mittlere Absolute Abweichung: $dh_{abs} = \frac{\sum_{k=0}^{n} |Messung - Rechnung|}{n}$
  Kriterium nach der Technischen Regel – Arbeitsblatt DVGW W 107 (A), Februar 2016
- Root Mean Square: $RMS = \sqrt{\frac{\sum_{k=0}^{n} (Messung - Rechnung)^2}{n}}$
  Vergleichbar mit der mittleren absoluten Abweichung, aber stärkere Betonung von größeren Abweichungen, da Abweichungen quadriert werden
- Mittlere Abweichung: $dh = \frac{\sum_{k=0}^{n} (Messung - Rechnung)}{n}$
  Kriterium sollte möglichst gegen 0 tendieren, damit Wasserbilanz des Grundwassers nicht über-/unterschätzt wird.

Die mittlere absolute Abweichung sollte für eine sehr gute Anpassung maximal 1 % (gut bis maximal 5%) der gesamten Piezometerhöhendifferenz im Modellgebiet betragen (DVGW, 2016). Da das Aussagegebiet im vorliegenden Grundwassermodell deutlich kleiner als das Modellgebiet ist, wird die Piezometerhöhendifferenz zwischen südlichem Modellrand und dem nördlichen Rand des Aussagegebiets herangezogen, diese beträgt etwa 65 m. Das für das Projekt gewählte Kriterium ist folglich im Aussagegebiet strenger als in der Technischen Regel vorgegeben. Daher ist für eine sehr gute Anpassung eine maximale Abweichung von 65 cm zulässig. Dieser Wert entspricht dem Kalibrierziel der stationären Kalibrierung (0,65 m - Kriterium).

Die Parameter werden je Messstelle ermittelt und für folgende Bereiche gemittelt (Lage der Bereiche s. Abbildung 3.4):

- Stadtwald (Messstellen SWA)
- Königsbrunn/Haunstetten (Messstellen Stadt Königsbrunn, SWA und TBA)
- Bereich zwischen Paar und Lech (Messstellen Uniper und GKD)
- Innenstadt Augsburg (Messstellen TBA)
- Augsburg Ost (Messstellen TBA und GKD)

- Wertachtal (Messstellen BEW und TBA)
- Lechtal Nord (Messstellen BEW)
- Aussagegebiet
- Gesamtgebiet

Die berechneten Güteparameter sind in Tabelle 3.13 aufgeführt. Es wird deutlich, dass im gesamten Modellgebiet (auch in Bereichen außerhalb des Aussagegebiets, z.B. Lechtal Nord) eine sehr gute Anpassung erreicht wird. Die mittlere absolute Abweichung liegt mit 0,37 m sogar wesentlich unter dem Kalibrierziel. Die beste Anpassung wird an Messstellen des Stadtwalds erreicht, dies ist u.a. auf die gute Messstellendichte und die genaue Kenntnis des Wasserumsatzes (Abflussmessungen) zurückzuführen. Im Bereich zwischen Lech und Paar ist die Anpassungsgüte etwas geringer (aber immer noch sehr gut), dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass einige Messstellen außerhalb des Aussagegebiets darin berücksichtigt werden. Werden im Bereich zw. Lech und Paar nur Messstellen innerhalb des Aussagegebiets berücksichtigt, beträgt die mittlere absolute Abweichung 0,37 m. Der Parameter RMS unterscheidet sich nur gering vom Parameter der mittleren absoluten Abweichung, das heißt die Zahl größerer Abweichungen ist eher gering. Die räumliche Lage der einzelnen Messstellen sowie die farblich differenzierte Höhe der Abweichung ist Abbildung 3.5 zu entnehmen. Einen detaillierten Überblick geben hierzu Anlage 6.2.9 und Anlage 6.2.10.

Abbildung 3.6 zeigt den Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Grundwasserständen im Diagramm. Abbildung 3.7 beschreibt die Abweichung zwischen Messung und Simulation als Funktion des Grundwasserstands. Beide Abbildungen belegen die sehr gute Anpassung des Grundwassermodells, des Weiteren sind keine systematischen Abweichungen (z.B., dass ein Bereich von Grundwasserständen systematisch zu hoch simuliert wird) erkennbar.

Tabelle 3.13: Güteparameter für das stationär kalibrierte Grundwassermodell

Bereich	Mittlere absolute Abweichung [m] (prozentuale Abweichung in Klammern)	RMS	Mittlere Abweichung
Stadtwald	0.26 (0.40%)	0.35	-0.07
Königsbrunn/Haunstetten	0.31 (0.48%)	0.42	0.10
davon Messstellen Stadt Königsbrunn	0.33 (0.51%)	0.41	0.09
Bereich zw. Lech u. Paar	0.43 (0.66%)	0.54	0.02
Innenstadt	0.32 (0.49%)	0.40	-0.03
Stadtgebiet Ost	0.38 (0.58%)	0.45	-0.18
Wertachtal	0.43 (0.66%)	0.45	0.03
Lechtal Nord	0.40 (0.62%)	0.59	-0.01
Aussagegebiet	0.34 (0.53%)	0.44	-0.01
Gesamtgebiet	0.37 (0.57%)	0.48	-0.03

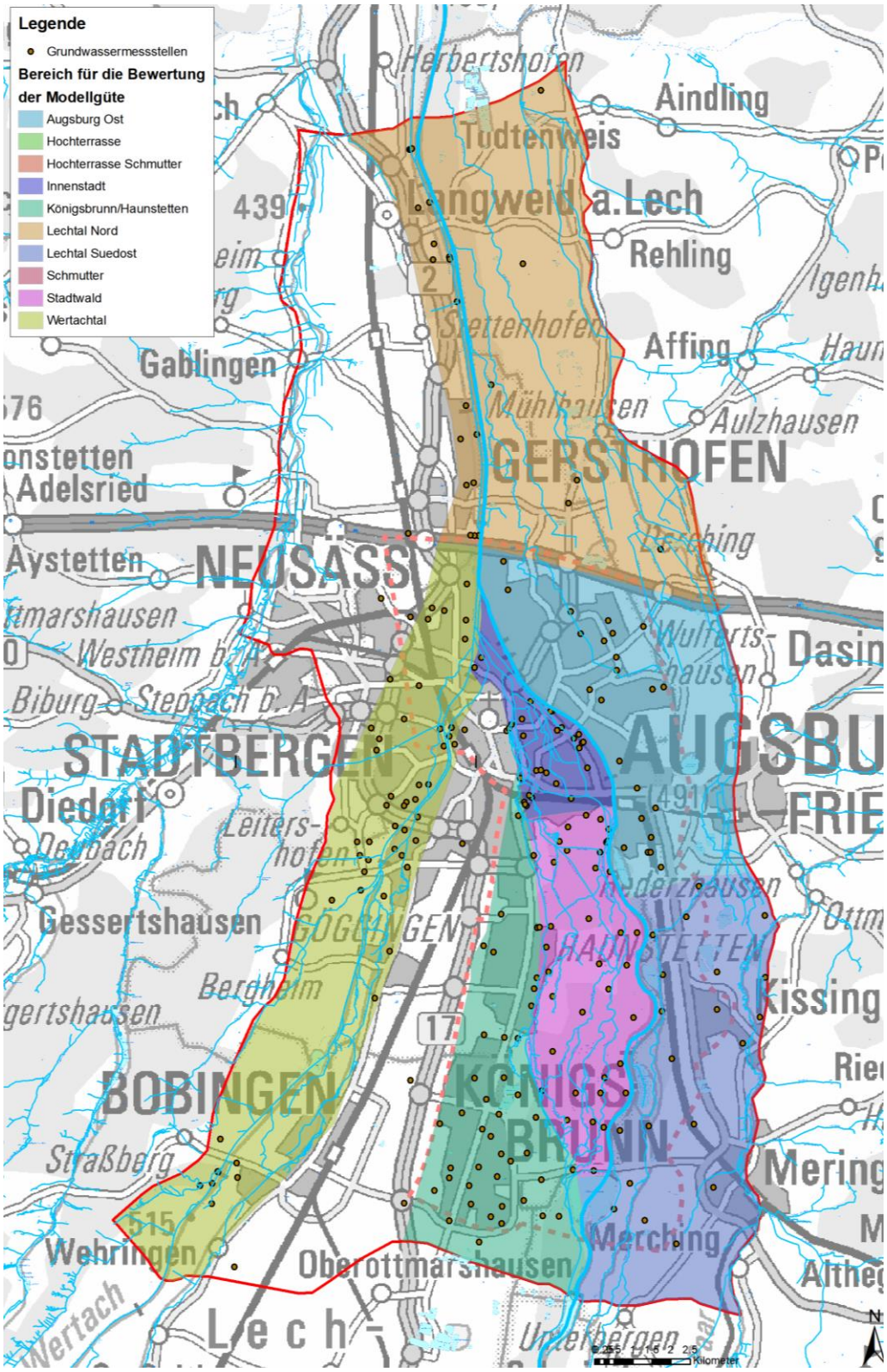

Abbildung 3.4:Bereiche für Bewertung der Modellgüte

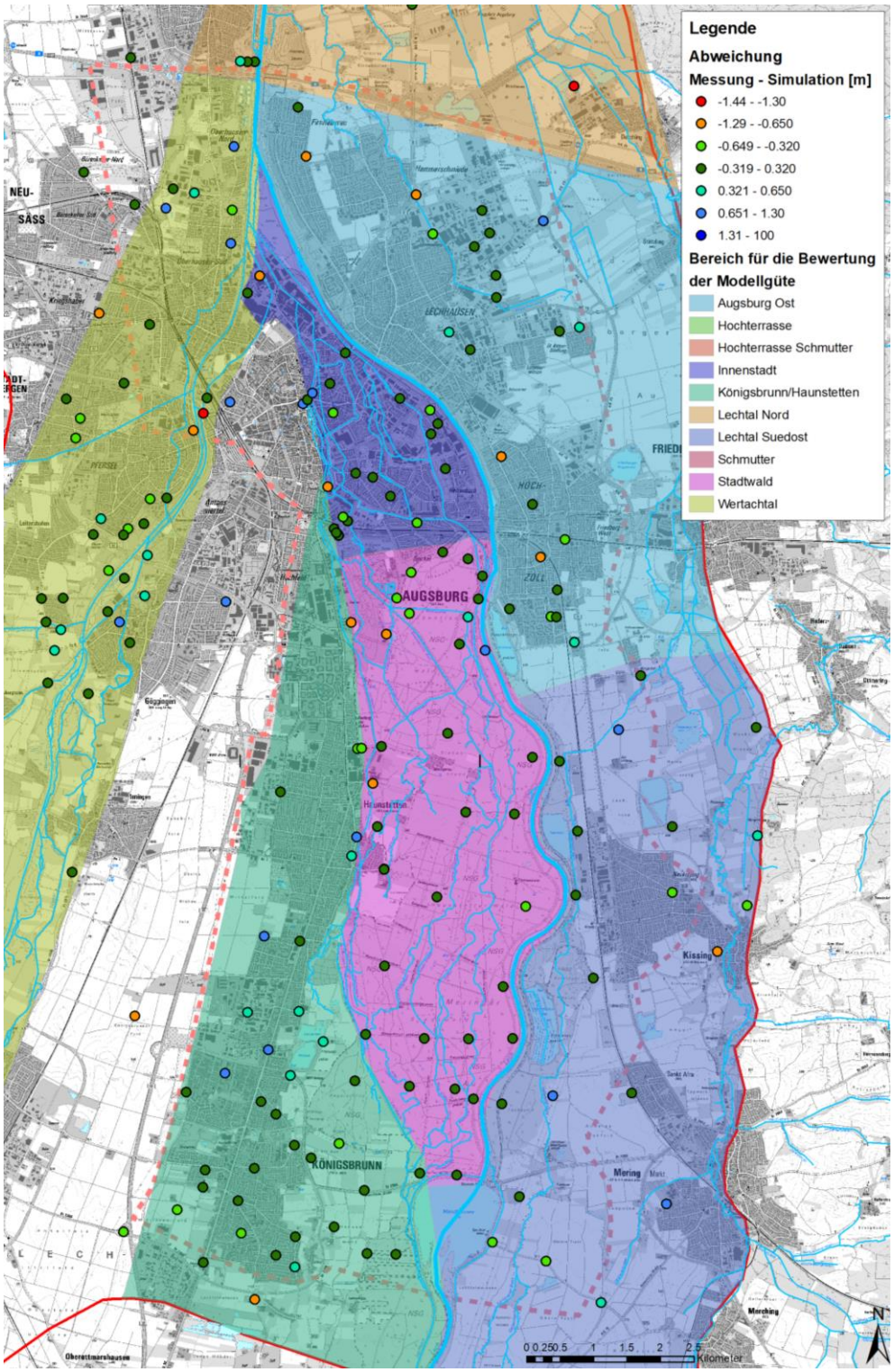

Abbildung 3.5: Räumliche Verteilung der Anpassungsgüte der Simulation im Aussagegebiet

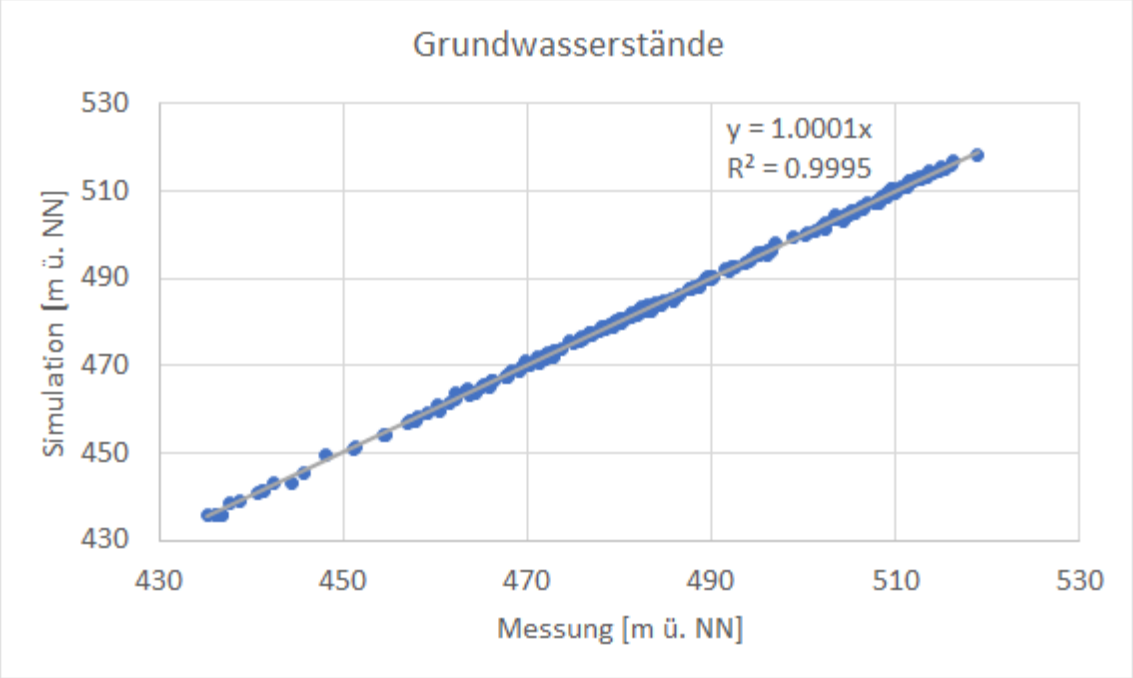

Abbildung 3.6: Gegenüberstellung von gemessenen und simulierten Grundwasserständen

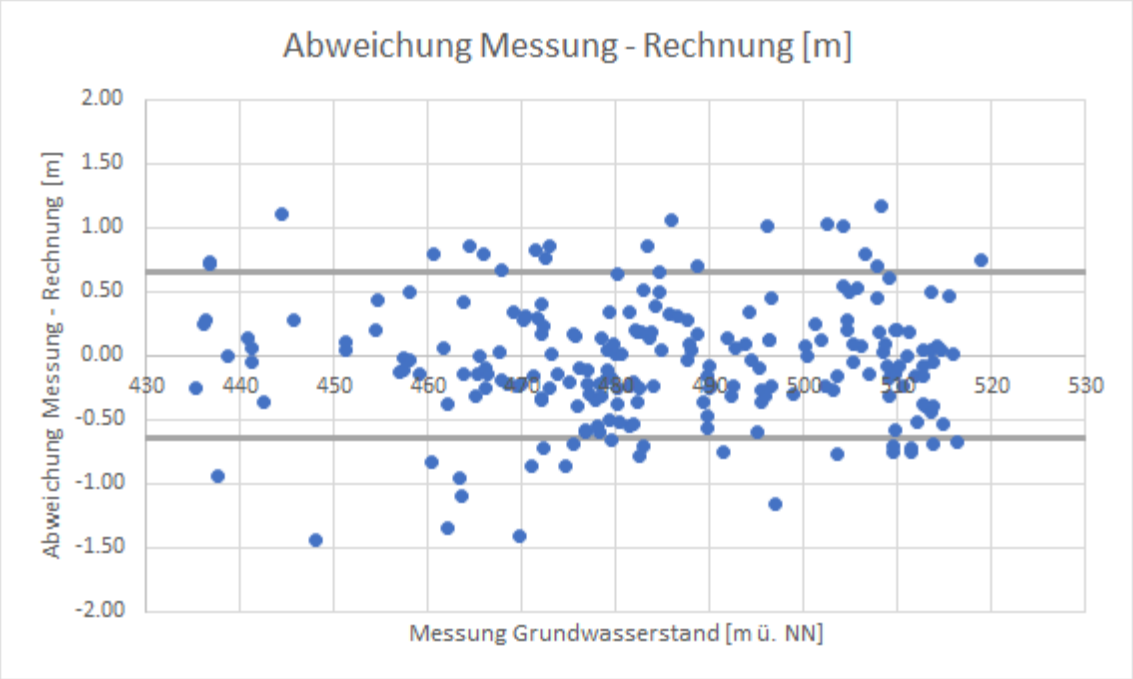

Abbildung 3.7: Abweichung zwischen Messung und Simulation in Abhängigkeit des Grundwasserstands

4 Instationäre Kalibrierung

4.1 Übersicht

Grundsätzliches Ziel einer instationären Kalibrierung ist, die Modellparameter festzulegen, mit denen die gemessenen Grundwasserganglinien möglichst genau nachgebildet werden. Eine erste Anpassung von Modellparametern (insbesondere die Durchlässigkeitsverteilung) erfolgte bereits im Zuge der stationären Kalibrierung.

Bei vielen Anwendungen erfolgt im Zuge der instationären Kalibrierung eine Absicherung der Durchlässigkeiten und die Festlegung der Speicherkoeffizienten Im vorliegenden Grundwassermodell für Licca liber ergab sich darüber hinaus die Notwendigkeit, zusätzliche Anpassungen der Leakage-Koeffizienten vorzunehmen (Kapitel 4.4.3). Auch die Berücksichtigung der Grundwassersammler und die Drainagewirkung der Kanalisation musste gegenüber der stationären Kalibrierung modifiziert werden (Kapitel 4.4.1).

4.2 Betrachtungszeitraum, Startbedingung und zeitliche Diskretisierung

Die instationäre Kalibrierung betrachtet den Zeitraum um das Lech-Hochwasser 1999 (1.1.1999 bis 30.9.1999). Instationär bedeutet in diesem Kontext, dass zeitlich variable Randbedingungen angesetzt werden. Insbesondere der Wasserspiegel des Lechs unterliegt während der Hochwässer starken Änderungen. Der Kalibrierzeitraum umfasst neben dem Pfingsthochwasser 1999 (23.05.1999) auch das Vatertagshochwasser (13./14.05.1999). Die Überlagerung dieser beiden Hochwässer führte zu einem starken Anstieg des Grundwasserstands. In dessen Folge kam es zu Vernässungen von Kellern.

Für eine instationäre Modellierung muss eine Grundwasserstandsverteilung als Startbedingung vorgegeben werden. Hierzu wurden zwei Alternativen untersucht:

- Start mit Mittelwasserverhältnisse aus dem Jahr 2010 entsprechend dem Ergebnis der stationären Kalibrierung.
- Start von einer stationären Lösung für den 1.1.1999: An allen Randbedingungen werden die Werte des instationären Modells für den 1.1.1999 angesetzt.

Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass der Einschwingvorgang, d.h. der Zeitpunkt in dem sich die Auswirkungen der Startbedingungen abgebaut sind,

mindestens 2 Monate benötigt (an Messstellen mit wenig Relevanz für das Aussagegebiet auch deutlich länger). Die Anpassungsgüte wird daher erst ab dem 1.3.1999 bewertet, um hieraus resultierende Unsicherheiten durch „Einschwingen“ zu kompensieren.

Die Zeitschrittgröße wird von der Modellierungssoftware automatisch angepasst und orientiert sich an den Zeitschritten der Randbedingungen. Der Wasserspiegel des Lechs wird während der Hochwasserphasen vierteltäglich vorgegeben, dies entspricht dann dem maximalen Zeitschritt. Bei großen Änderungen in der Grundwasserströmung wird der Zeitschritt von Feflow zusätzlich reduziert.

4.3 Vergleichs- und Kalibriergrößen

4.3.1 Grundwasser-Sammler und Kanalisation

Im Jahr 1999 waren (mit Ausnahme des DonBosco-Sammlers) keine GW-Sammler in Augsburg in Betrieb. Diese müssen daher für das Jahr 1999 im Grundwassermodell deaktiviert werden.

Die Variation der Wirkung von GW-Sammlern am Grundwassermodell für den HW1999-Zeitraum zeigt, dass ein Verzicht auf diese GW-Sammler zu unplausibel hohen Grundwasserständen in der Innenstadt führt (vgl. Kapitel 4.4.1).

Der Fremdwasseranteil in der Kanalisation der Stadt Augsburg hat seit dem Jahr 1999 stark abgenommen. 1999 betrug die Fremdwassermenge etwa 800l/s, im Jahr 2016 nur noch etwas über 300l/s. Dies hängt zum einen mit dem Bau von Grundwasser-Sammlern zusammen, hier werden etwa 530l/s entnommen (HydroConsult, 2012). Zum anderen wurden umfangreiche Kanalsanierungen durchgeführt (Stadtentwässerung Augsburg, 2017-1) (Stadtentwässerung Augsburg, 2017-2).

Die auf das MW2010 kalibrierten Abwasserkanäle müssen für das Jahr 1999 unabhängig kalibriert werden, um den damals schlechteren Zustand der Abwasserkanäle abbilden zu können.

Kalibrierparameter:

- Leakage-Koeffizient für Abwasserkanäle im Innenstadtbereich (s. Abbildung 2.18)

Vergleichsgrößen:

- Fremdwassermengen für das Jahr 1999 (Gesamtgebiet, s. Abbildung 4.1)

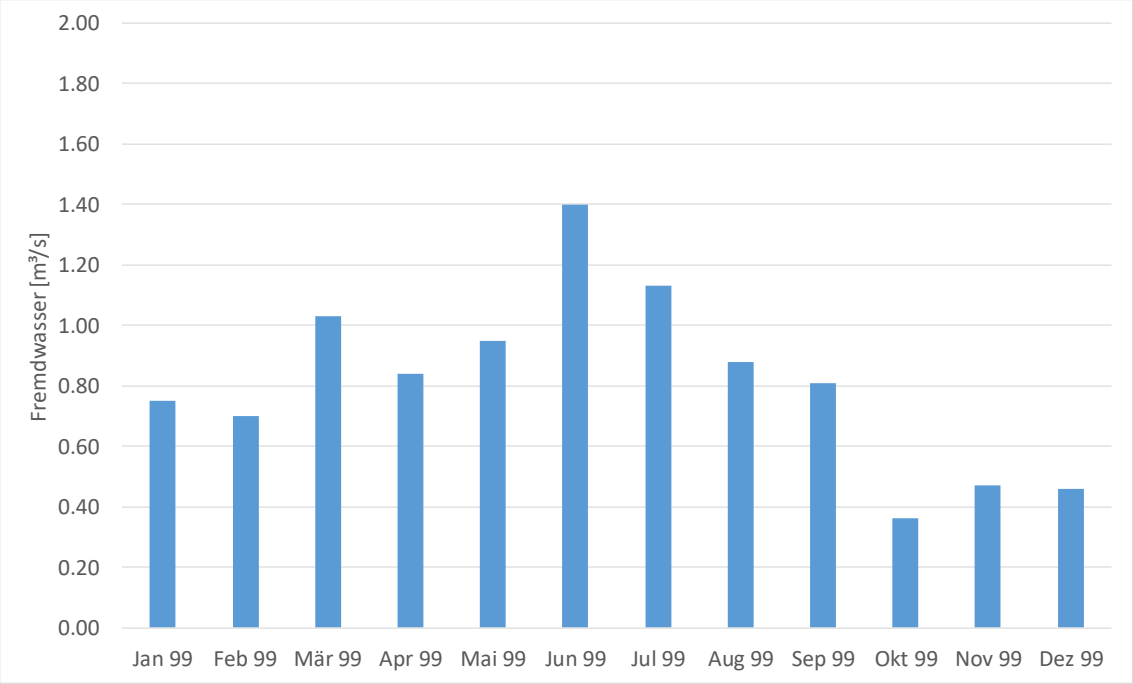

Abbildung 4.1:Fremdwasser der Kanalisation Augsburg für das Jahr 1999 (TBA, 2017)

4.3.2 Überflutungsflächen Paar und Wertach

Paar und Wertach uferten um das Hochwasser 1999 stark aus. Die Ausuferungsflächen und die dort stattfindende Infiltration von Oberflächenwasser in das Grundwasser müssen im Grundwassermodell adäquat berücksichtigt werden. Die Ausuferungen werden als temporäre Leakage-Randbedingung (d.h. während des Hochwassers) im Grundwassermodell umgesetzt.

Kalibrierparameter:

- Leakage-Koeffizient der ausufernden Bereiche

Vergleichsparameter:

- Gemessene Grundwasserstandsganglinien

4.3.3 Veränderung der Sohleigenschaften des Lechs

Am Lech werden in regelmäßigen Abständen Sohlvermessungen durchgeführt. Die Sohlaufnahmen vor und nach dem Hochwasser 1999 zeigen, dass es in diesem Zeitraum bereichsweise zu starken Sohlumlagerungen kam (s. Abbildung 4.2. Diese sind auf das Hochwasser 1999 zurückzuführen. Sohlumlagerungen führen zur temporären Veränderung oder Auflösung der Kolmationsschicht.

Kalibrierparameter:

- Leakage-Koeffizient des Lechs während und nach einer Hochwasserwelle

Vergleichsparameter:

- Gemessene Grundwasserstandsganglinien

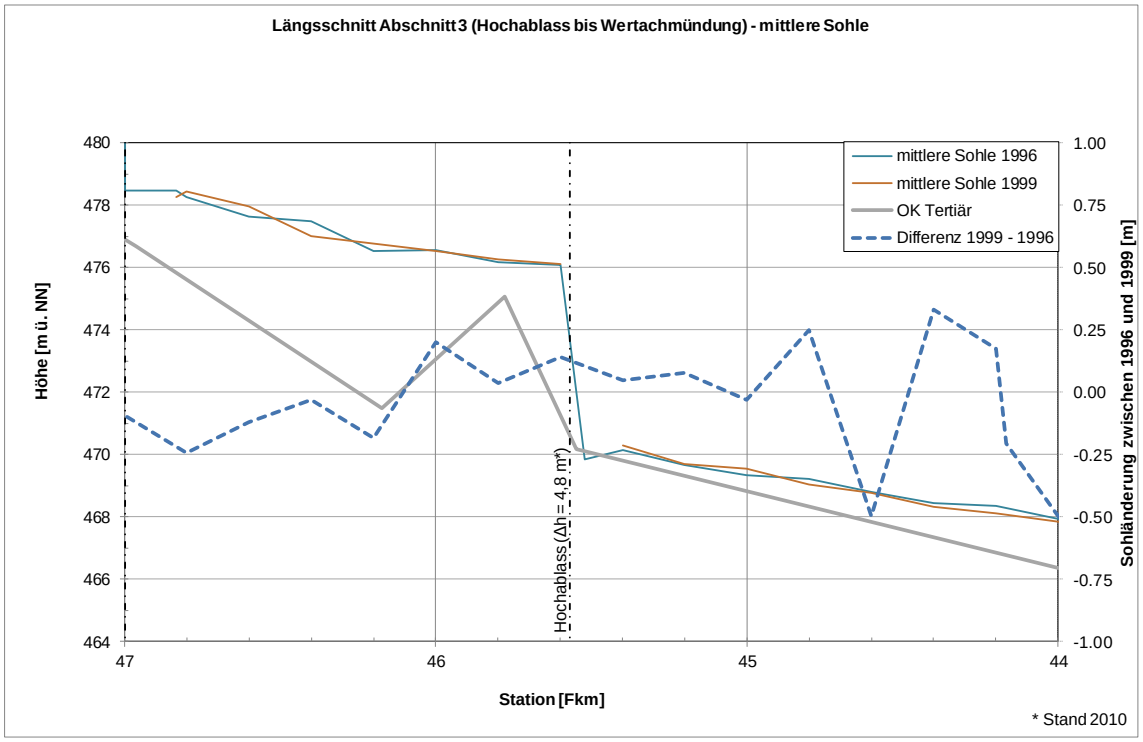

Abbildung 4.2: Mittlere Sohle ober- und unterstrom des Hochablasses vor und nach dem HW1999

4.3.4 Leakage-Koeffizient des Lechs für Exfiltration ohne Bezug zum Mittelwasser

Durch die Erhöhung der Grundwasserstände während der Hochwasser-Ereignisse kommt es zur Umkehr des Austauschs mit Gewässern (Wechsel von Infiltration zu Exfiltration). Der Leakage-Koeffizient für Exfiltration muss daher kalibriert werden.

Kalibrierparameter:

- Leakage-Koeffizient des Lechs für Exfiltration

Vergleichsparameter:

- Gemessene Grundwasserstandsganglinien

4.4 Variation ausgewählter Kalibriergrößen und der modelltechnischen Umsetzung von instationären Prozessen

4.4.1 Grundwassersammler und Kanalisation

Im Jahr 1999 waren keine GW-Sammler im Betrieb, daher werden diese für die folgenden Simulationsläufe deaktiviert. Um die Wirkung des Fremdwassers in der Kanalisation zu zeigen, wurden zwei Simulationen berechnet:

- Simulation mit Leakage-Koeffizienten für die Abwasserkanäle der MW2010-Kalibrierung (keine GW-Sammler im Betrieb) (im Diagramm: *Leakage-K. MW2010*)
- Simulation mit einem rekalibrierten Leakage-Koeffizienten für die Abwasserkanäle in der Innenstadt sodass die gemessenen Fremdwasser-Raten erzielt werden (keine GW-Sammler im Betrieb) (im Diagramm: *Leakage-K. HW1999*)

Abbildung 4.3 bis Abbildung 4.5 zeigen exemplarisch einige Grundwasserstandsganglinien an Messstellen der Innenstadt. Es wird eindeutig gezeigt, dass der rekalibrierte Leakage-Koeffizient im Innenstadtbereich zu einer besseren Anpassung führt. Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7 zeigen die Bilanz des Fremdwassers in der Kanalisation für beide Simulationen. Es zeigt sich auch hier deutlich, dass die Bilanz der Abwasserkanäle für eine Rekalibrierung des Leakage-Koeffizienten der Abwasserkanäle spricht, da sonst die hohen Fremdwasserraten im Grundwassermodell nicht erzielt werden. Aufgrund dieser eindeutigen Befunde werden

die rekalibrierten Leakage-Koeffizienten ins Grundwassermodell für das HW1999 übernommen.

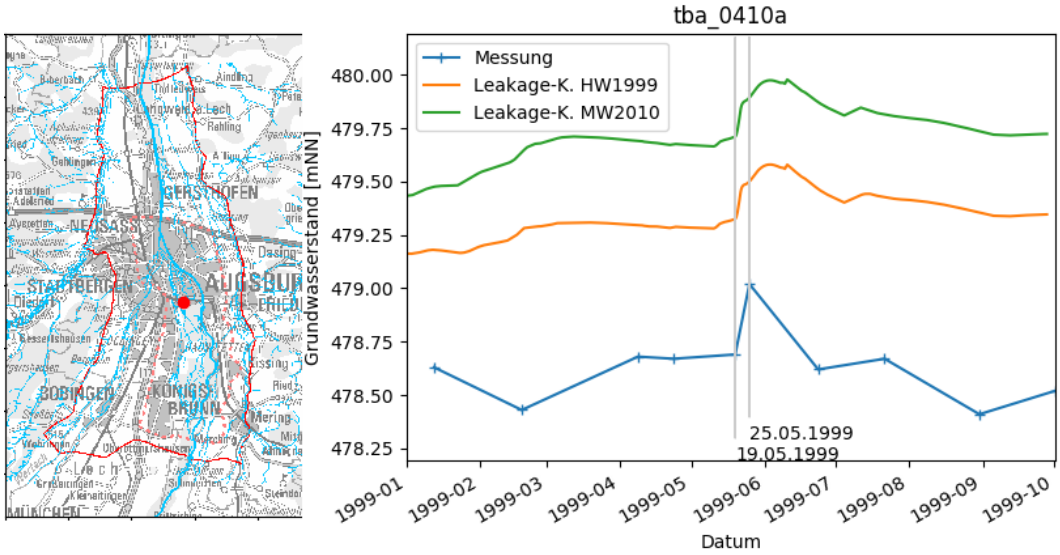

Abbildung 4.3: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen für den Leakage-Koeffizienten der MW2010-Kalibrierung sowie für den rekalibrierten Leakage-Koeffizienten des HW1999 Zeitraums an der Messstelle tba_0410a (Übergangsbereich vom Stadtwald zum bebauten Innenstadtbereich, Lech-fern)

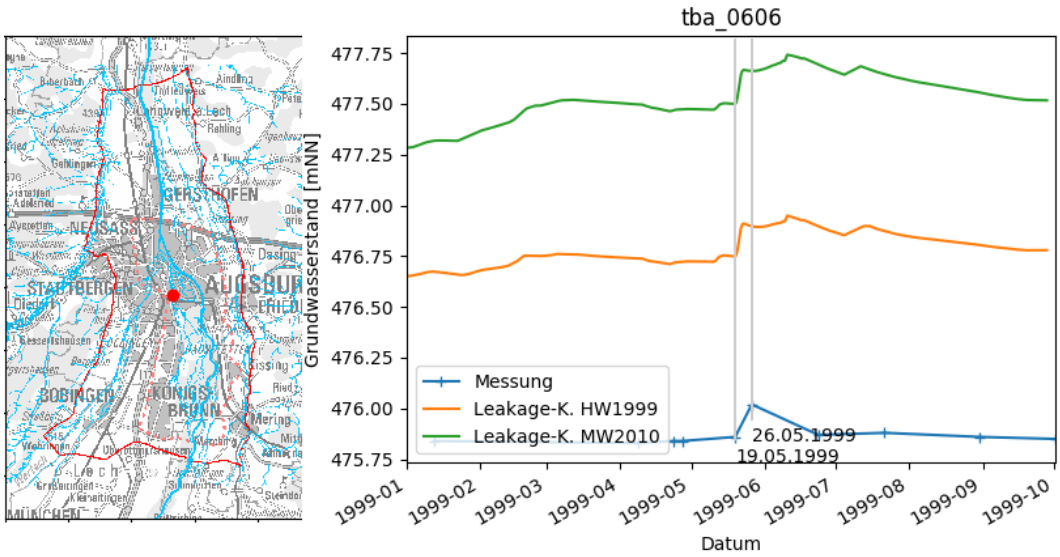

Abbildung 4.4:Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen für den Leakage-Koeffizienten der MW2010-Kalibrierung sowie für den rekalibrierten Leakage-Koeffizienten des HW1999 Zeitraums an der Messstelle tba_0606 (Übergangsbereich vom Stadtwald zum bebauten Innenstadtbereich, Lech-fern)

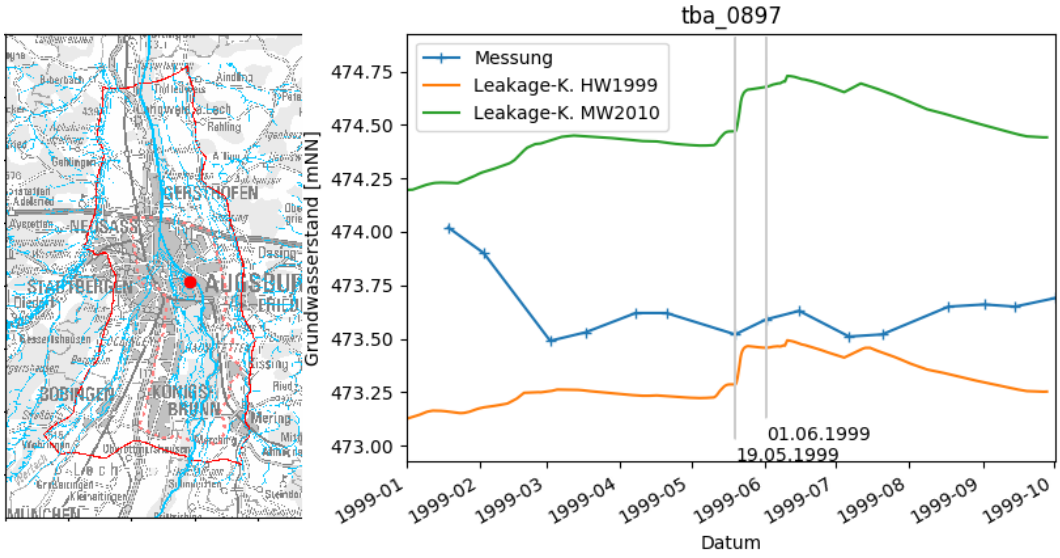

Abbildung 4.5:Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen für den Leakage-Koeffizienten der MW2010-Kalibrierung sowie für den

rekalibrierten Leakage-Koeffizienten des HW1999 Zeitraums an der Messstelle tba_0897 (Innenstadtbereich, Lech-nah)

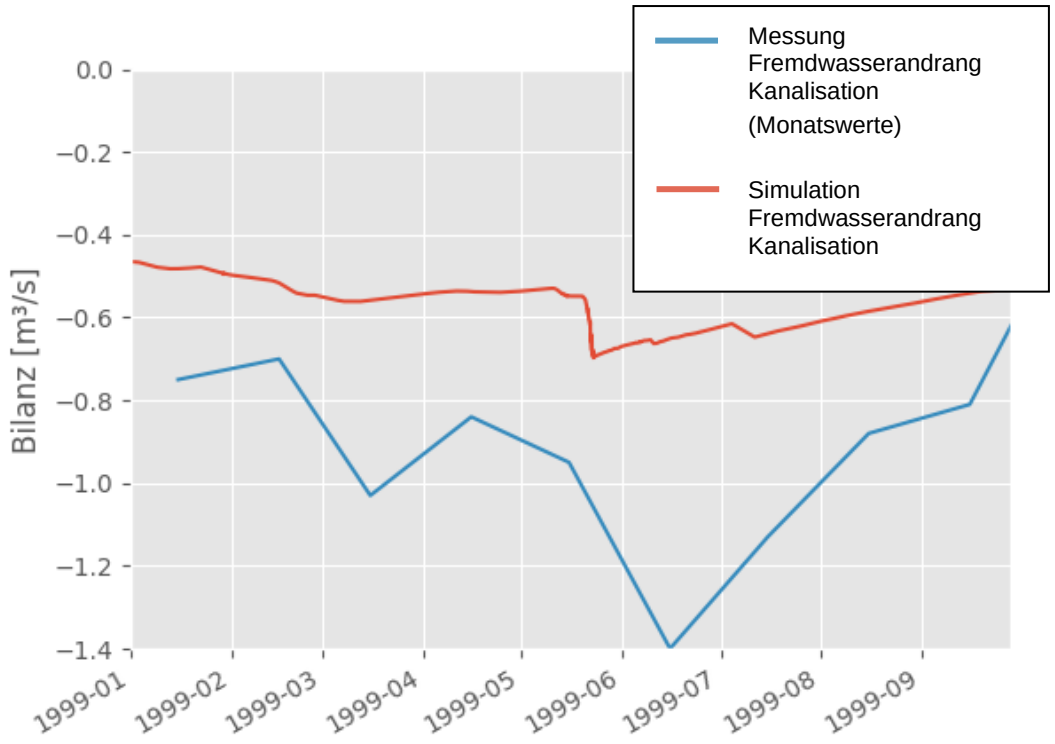

Abbildung 4.6: Bilanz der Abwasserkanäle für den Leakage-Koeffizienten der MW2010-Kalibrierung

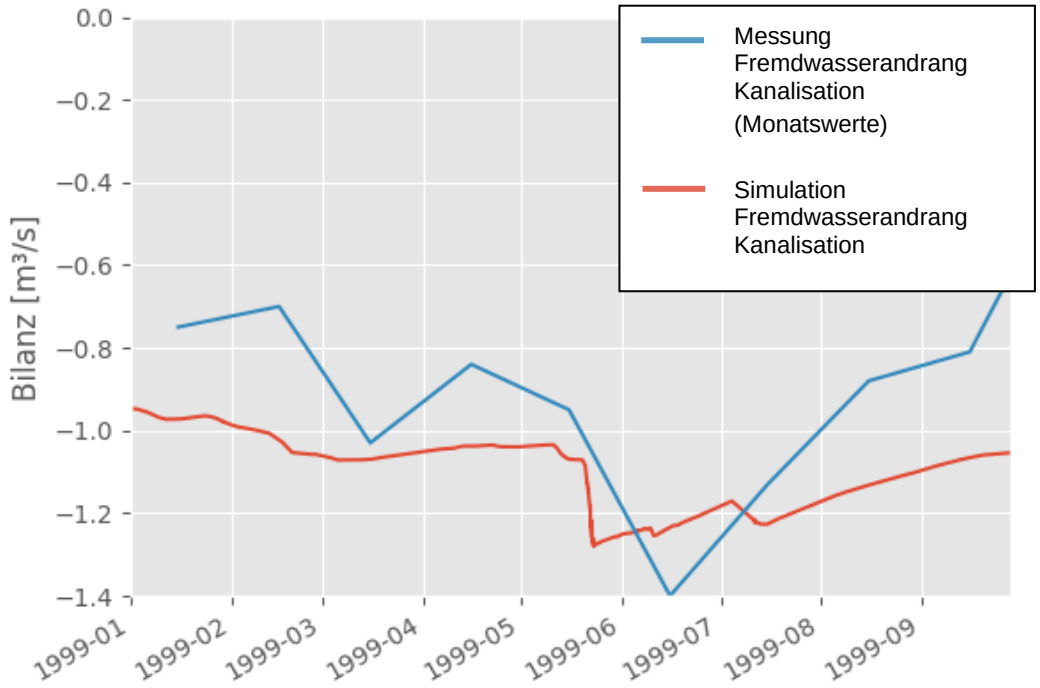

Abbildung 4.7: Bilanz der Abwasserkanäle für den rekalibrierten Leakage-Koeffizienten der HW1999-Kalibrierung

4.4.2 Berücksichtigung von Ausuferungsflächen

Paar und Wertach ufern während des Pfingsthochwassers 1999 stark aus. Die überschwemmten Flächen werden mit einer Leakage-Randbedingung belegt, der hierfür erforderliche Leakage-Koeffizient (In) ist ein Kalibrierparameter.

Folgende Modellläufe wurden durchgeführt, um einen Leakage-Koeffizienten für die Infiltration zu ermitteln:

- Referenzlauf ohne Ausuferung
- Variation des Leakage-Koeffizienten bei Berücksichtigung einer Ausuferung

Paar

Abbildung 4.8 bis Abbildung 4.11 zeigen die Verbesserung der Anpassung an einigen Grundwassermessstellen, die im Einflussbereich der Paar liegen, wenn eine Ausuferung im Grundwassermodell angenommen wird. Die gemessene Reaktion werden unter Annahme von Ausuferungsbereichen besser abgebildet. Eine Lech-nahe Messstelle ist kaum noch beeinflusst von der Ausuferung (s. Abbildung 4.11).

Wertach

Die Wertach uferte 1999 in drei Bereichen aus. im Folgenden wird lediglich die nördlichste Ausuferungsfläche betrachtet (nahe dem Aussagegebiet, vgl. Kapitel 2.6.2.2). Durch die geringe zeitliche Auflösung der Messdaten, wird der Hochwasserscheitel im Grundwasser nicht immer genau aufgelöst. Die Berücksichtigung der Ausuferungsfläche führt zu einer verbesserten Anpassung (s. Abbildung 4.12 und Abbildung 4.13).

Die Berücksichtigung von Ausuferungsflächen führt zu einer Verbesserung des Modells, daher werden sie im Grundwassermodell übernommen.

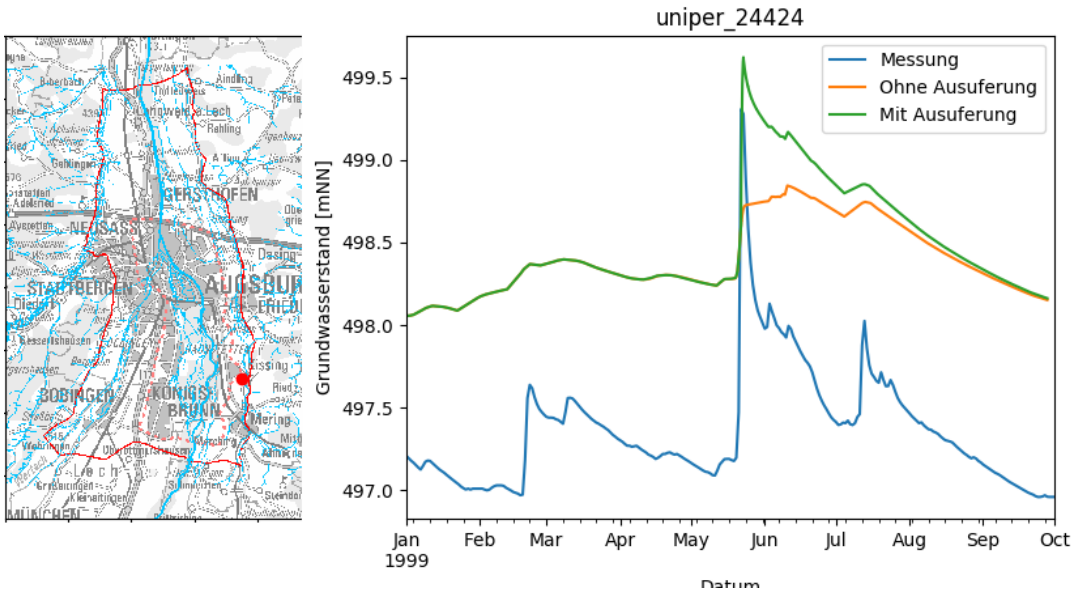

Abbildung 4.8:Wirkung der Ausuferung der Paar auf eine von der Ausuferung betroffene Messstelle in Kissing (Paar-nah)

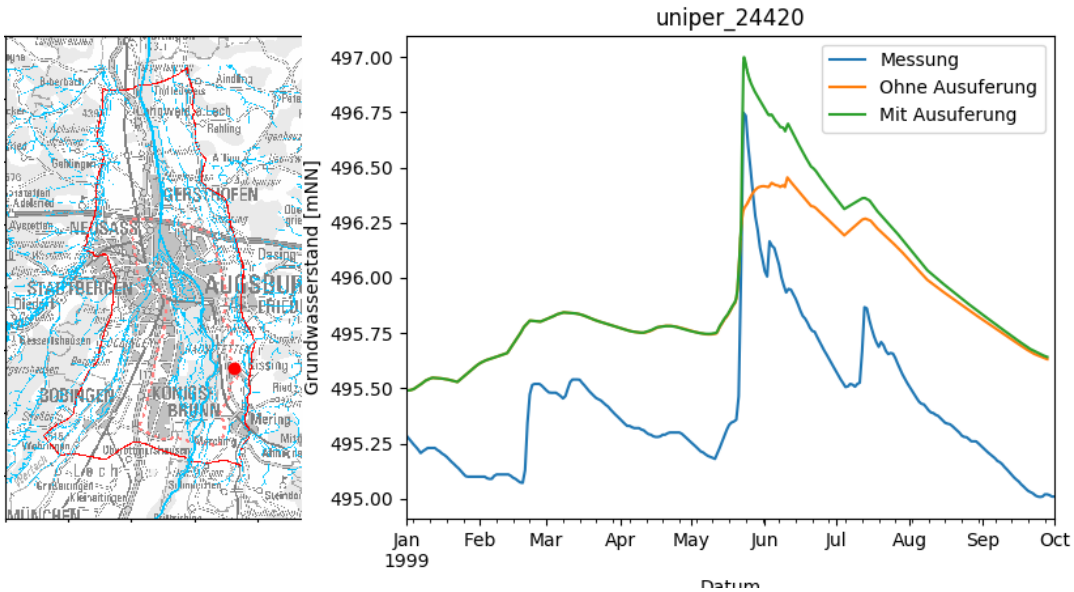

Abbildung 4.9:Wirkung der Ausuferung der Paar auf eine von der Ausuferung betroffene Messstelle in Kissing (Paar-fern)

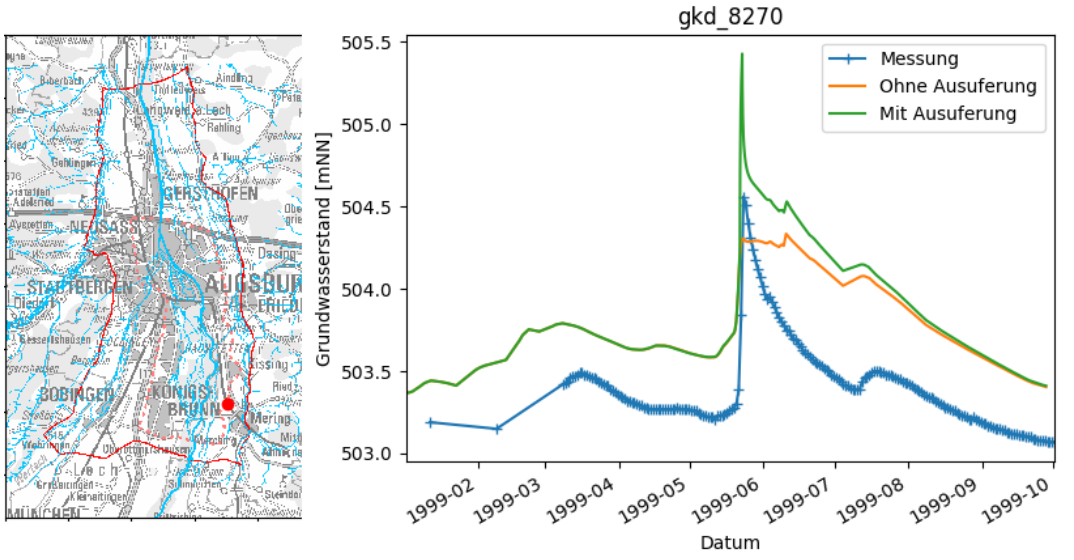

Abbildung 4.10: : Wirkung der Ausuferung der Paar auf eine von der Ausuferung betroffene Messstelle in Mering (Paar-fern)

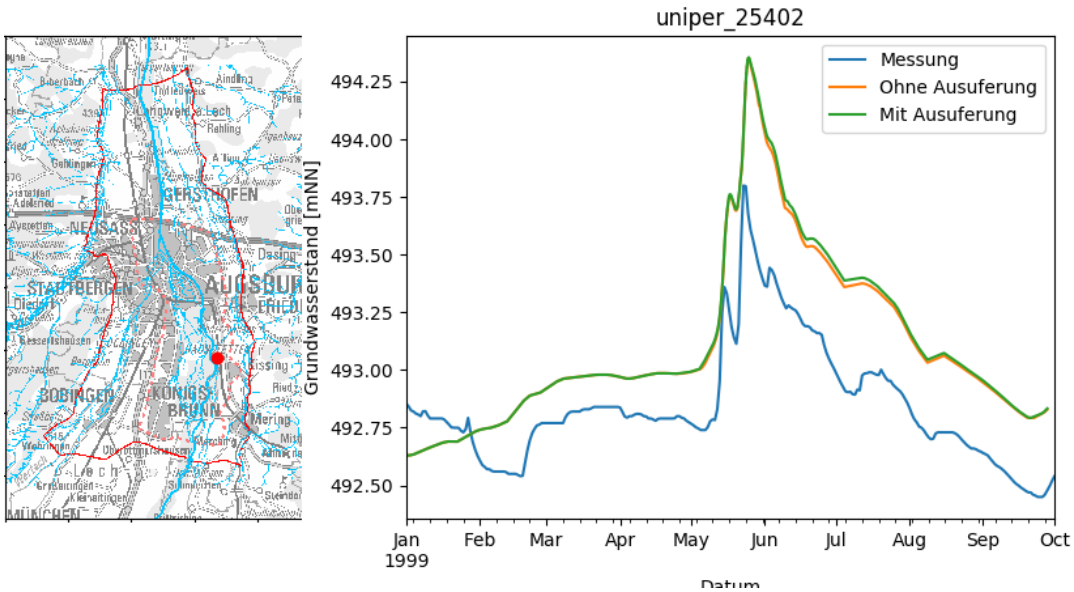

Abbildung 4.11: Wirkung der Ausuferung der Paar auf eine von der Ausuferung nicht betroffene Messstelle am Lech (Paar-fern)

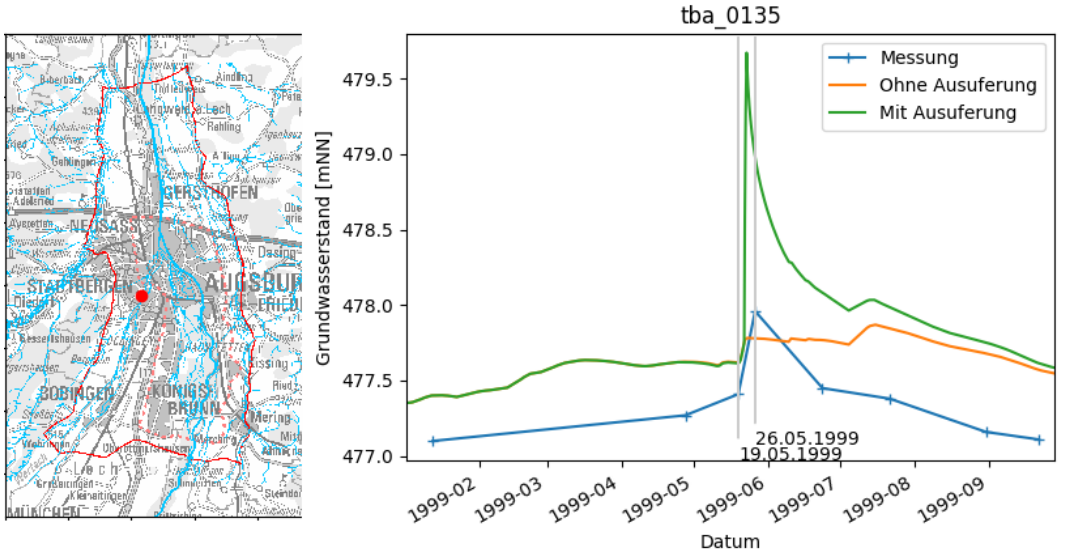

Abbildung 4.12: Messstelle im nördlichen Bereich der Ausuferung der Wertach

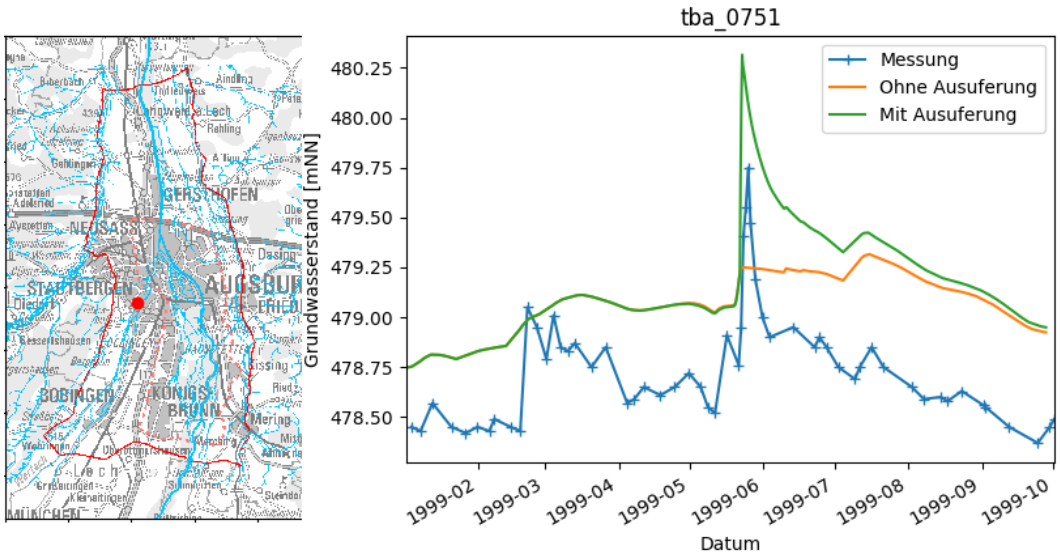

Abbildung 4.13: Messstelle im südlichen Bereich der Ausuferung

4.4.3 Veränderung der Sohleigenschaften des Lechs bei Hochwasser

Im nördlichen Stadtwald zeigen einige Messstellen während des Hochwassers 1999 einen Anstieg der Grundwasserstände, die auf eine temporär durchlässigere Sohle des Lechs im Staubereich des Hochablasses und unterstrom des Hochablasses hindeuten (vgl. 4.3.3). Im Folgenden wird daher geprüft, ob eine temporäre Erhöhung der Durchlässigkeit der Lechsohle (Erhöhung des Leakage-Koeffizienten) zu einer Verbesserung der Anpassung führt.

Für die Untersuchung der Wirkung einer temporären Erhöhung des Leakage-Koeffizienten wurden mehrere Simulationen durchgeführt:

- Referenzlauf mit zeitlich konstantem Leakage-Koeffizient
- Variation des Leakage-Koeffizienten während des Pfingsthochwassers

Abbildung 4.14 bis Abbildung 4.16 zeigen exemplarisch einige Messstellen im Umfeld des Hochablasses. Die Simulation zeigt für einen instationären Leakage-Koeffizient einen deutlich besser zu den Messungen passenden Anstieg der Grundwasserstände während des Pfingsthochwassers. Die Messstelle swa_1083 zeigt zusätzlich den Einfluss einer temporären Erhöhung des Leakage-Koeffizienten für die Exfiltration: Dessen temporäre Erhöhung führt zu einem stärkeren Absinken der Grundwasserstände im Nachgang des Hochwassers.

Die Untersuchung zeigt, dass die Höhe des Anstiegs der Grundwasserstände während dem Pfingsthochwasser nur abgebildet werden kann, wenn eine temporäre Erhöhung des Leakage-Koeffizienten, d.h. eine temporär durchlässigere Lech-Sohle, im Grundwassermodell berücksichtigt wird.

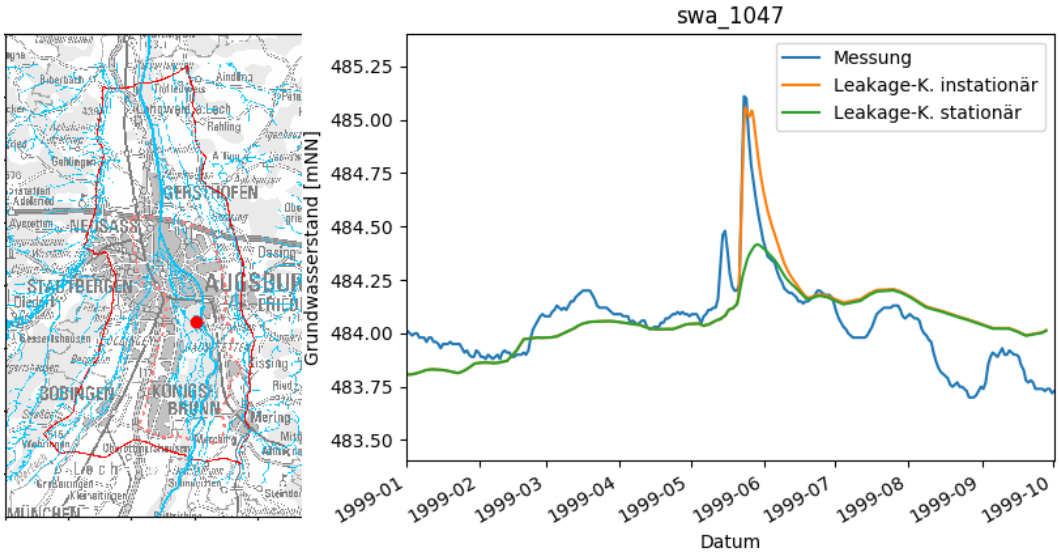

Abbildung 4.14: Lech-nahe Messstelle oberstrom des Hochablasses

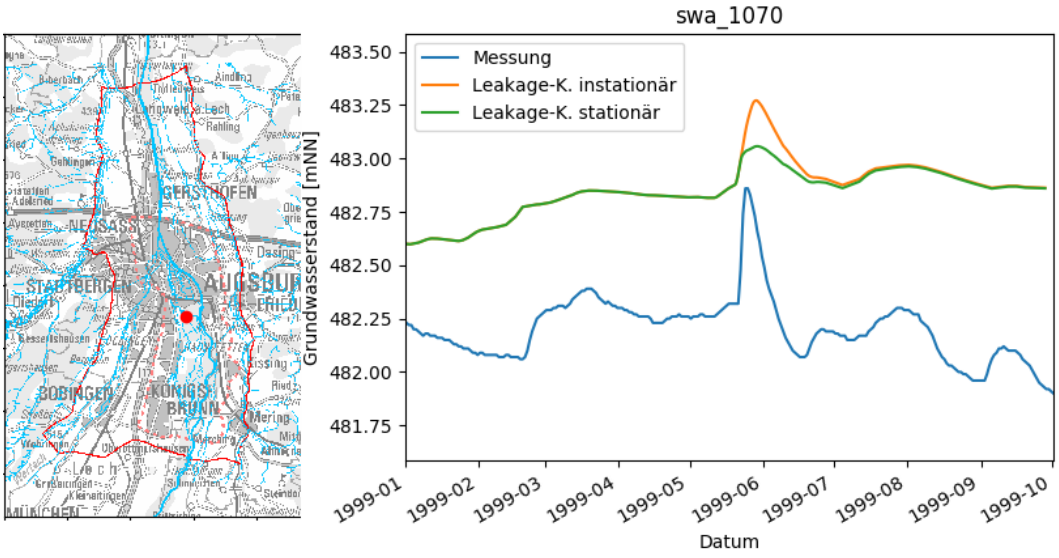

Abbildung 4.15: Lech-ferne Messstelle oberstrom des Hochablasses

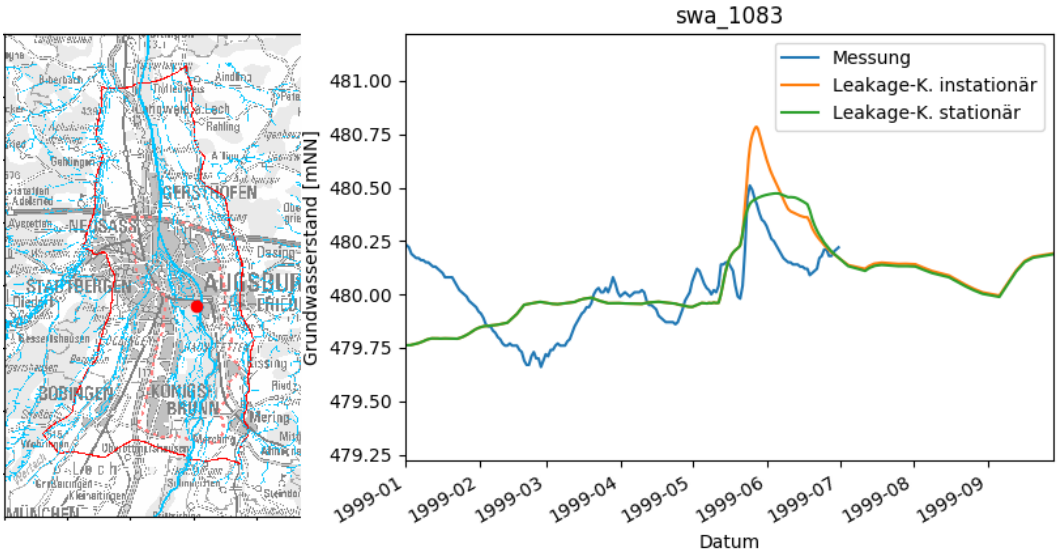

Abbildung 4.16: Lech-nahe Messstelle unterstrom des Hochablasses

4.4.4 Berücksichtigung von Wasserspiegelanstiegen der Bäche im Stadtwald in Folge der Lechhochwässer

Im Stadtwald kommt es während den Hochwasserphasen zu starken Grundwasseranstiegen, in deren Folge die Infiltration aus den Bächen im Stadtwald

stark abnimmt (s. Abbildung 4.20). Der Zustrom in die Gewässer durch den geregelten Lochbach sind relativ konstant, das heißt diese Erhöhung des Abflusses im Gewässer (geringeren Verlust durch Infiltration) führt zu einer Erhöhung der Wasserspiegel im Gewässer. Im Grundwassermodell sind zunächst zeitlich konstante Wasserspiegel hinterlegt, im Folgenden wird daher geprüft, welche Auswirkungen eine temporäre Erhöhung der Wasserspiegel an den Gewässern auf die Ergebnisse der Grundwassermodellierung hat.

Folgende Simulationen wurden durchgeführt:

- Referenzlauf mit konstanten Wasserspiegeln entsprechend den Ansätzen der stationären Kalibrierung
- Simulationslauf mit instationären Wasserspiegeln im Stadtwald während des Pfingsthochwassers. Die Wasserspiegel wurden vom 21.05.1999 bis zum 24.05.1999 linear erhöht (um bis zu 0,2 m) und daran anschließend bis zum 15.06.1999 linear wieder auf den Ausgangswert abgesenkt. Die Abschätzung der Aufhöhung erfolgt auf Grundlage der Auswertung der mittleren Breite und der mittleren Geschwindigkeit je Bilanzabschnitt während der Abflussmessung des WWAs Donauwörth (WWA Donauwörth, 2016) (s. Abbildung 4.17). Aus den beiden Größen wurde ermittelt, welcher Anstieg des Wasserspiegels zu erwarten ist, wenn die Gewässer je Bilanzabschnitt zusätzlich 500 l/s abführen müssen. Hieraus geht hervor, dass die Wasserspiegel mehrheitlich um weniger als 30 cm ansteigen. Im nördlichsten Bilanzabschnitt fehlen Angaben zu einigen Gewässern, daher ist der Anstieg von 55 cm stark überschätzt.

Die größten Änderungen in der Bilanz sind im südlichen Stadtwald zu erwarten, da hier die größte Infiltration aus den Bächen im Stadtwald vorliegt. An den Grundwasserstandsganglinien im südlichen Stadtwald sind durch die temporäre Erhöhung der Wasserspiegel an den Bächen im Stadtwald jedoch keine wesentlichen Änderungen zu bemerken (s. Abbildung 4.18 und Abbildung 4.19). Abbildung 4.20 und Abbildung 4.21 zeigen die Bilanz der betrachteten Gewässerabschnitte. Die Infiltration im ersten Gewässerabschnitt nimmt um etwa 100 l/s ab. Da sich die Grundwasserganglinien der Messstellen kaum verändern, ist eine Übernahme ins Grundwassermodell nicht notwendig.

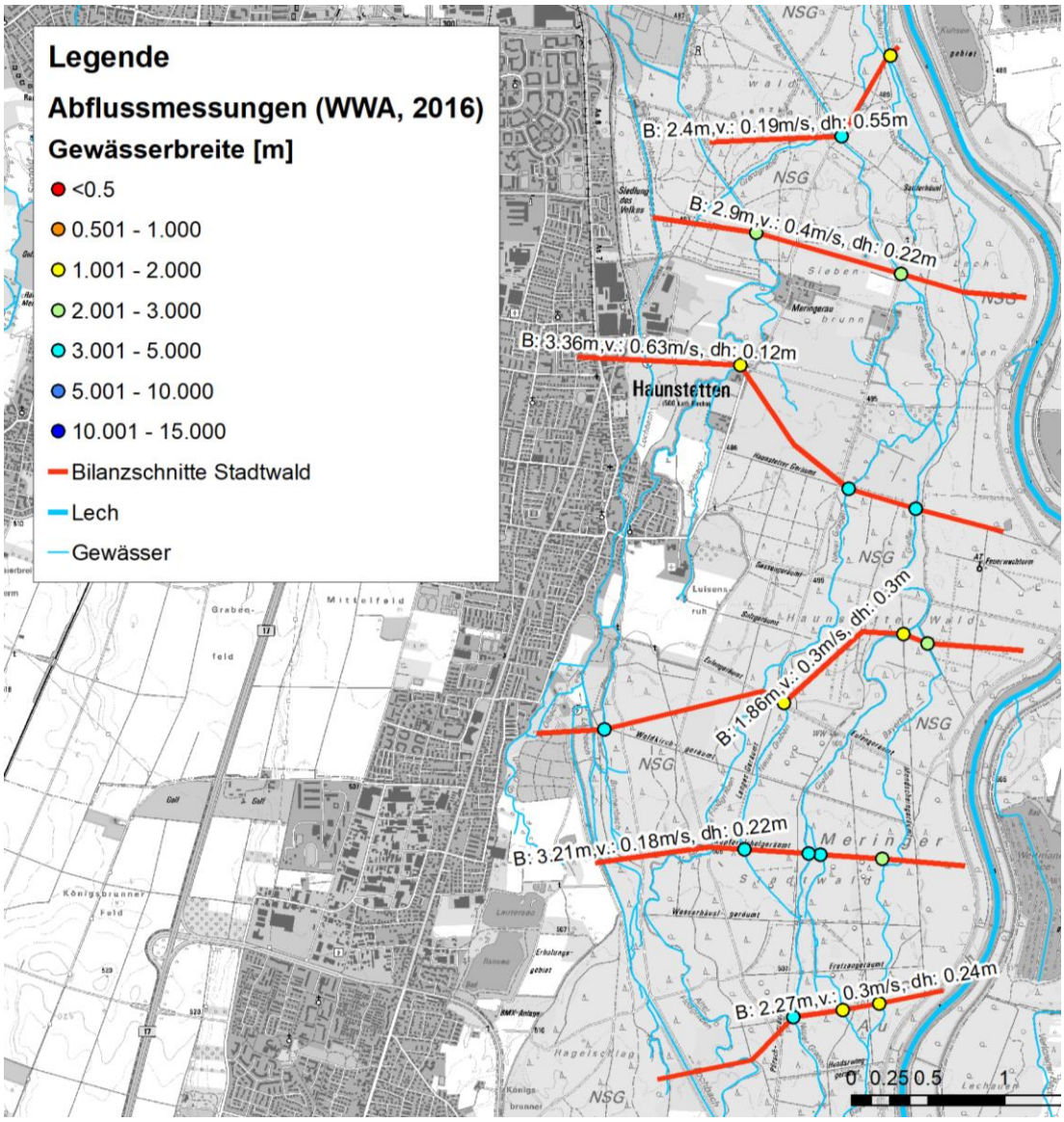

Abbildung 4.17: Auswertung der Abflussmessung (WWA Donauwörth, 2016) je Bilanzabschnitt (rote Linie) in Bezug auf die mittlere Breite (B), mittlere Geschwindigkeit (v) und mittleren Anstieg der Wasserspiegel durch eine Zunahme des Abfluss im Bilanzabschnitt um 500 l/s.

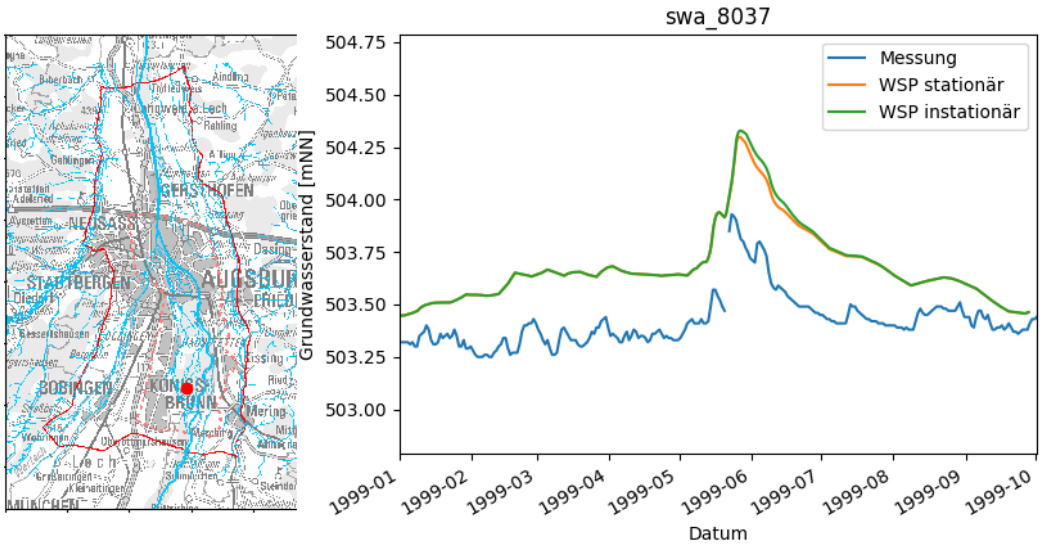

Abbildung 4.18: Lech-ferne Messstelle im Stadtwald mit geringer Änderung während des Hochwasserereignis durch eine instationäre Wasserspiegel-Anpassung an den Bächen im Stadtwald

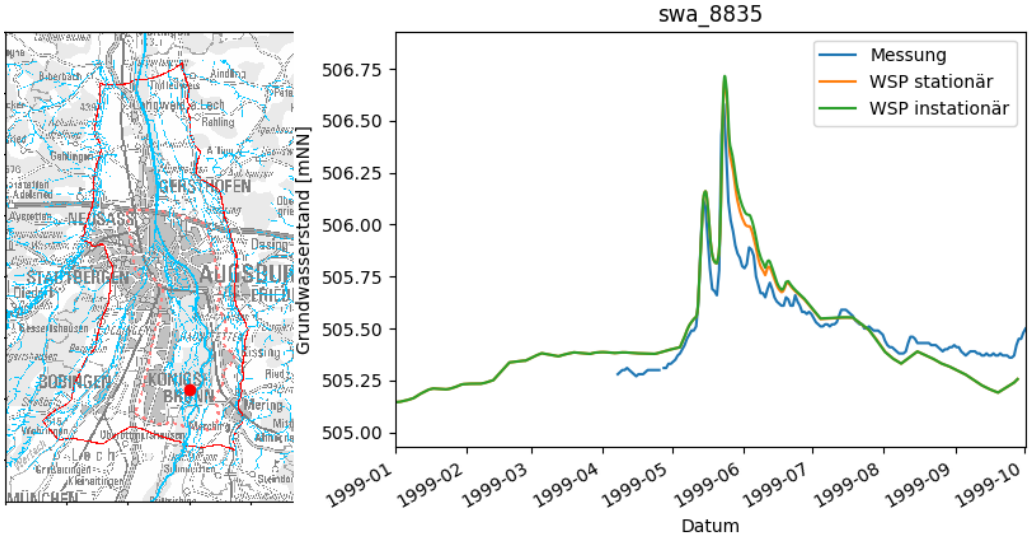

Abbildung 4.19: Lech-nahe Messstelle im Stadtwald mit geringer Änderung während des Hochwasserereignis durch eine instationäre Wasserspiegel-Anpassung an den Bächen im Stadtwald

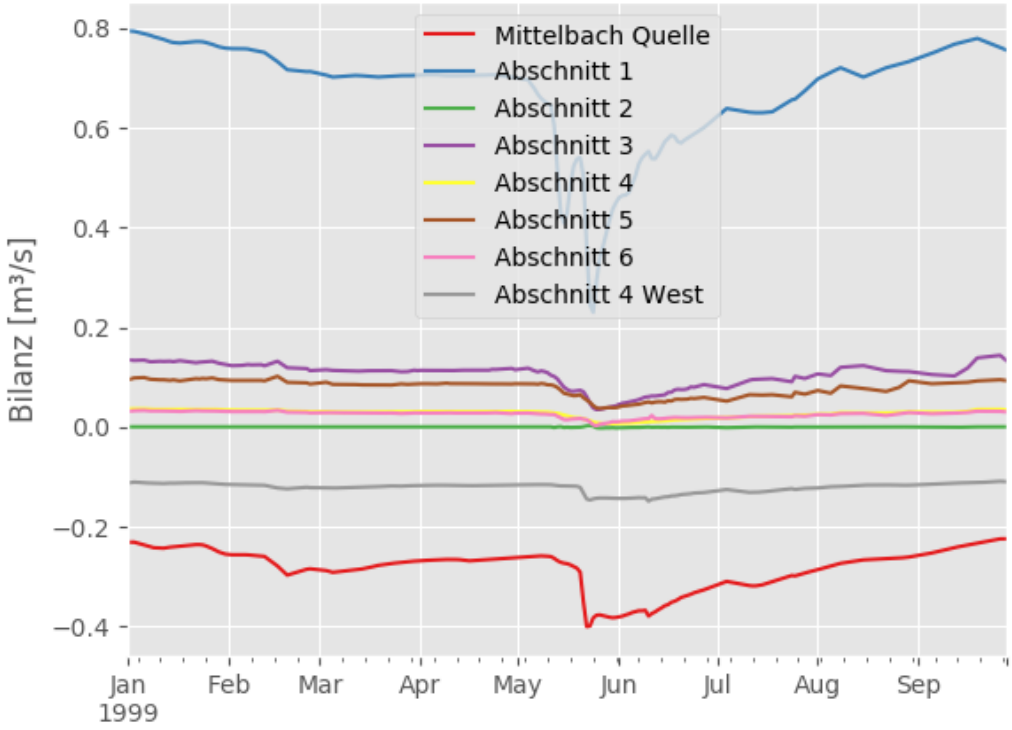

Abbildung 4.20: Hochwasserbedingte Abnahme der Infiltration in einigen Bilanzabschnitten des Stadtwalds ohne Berücksichtigung einer Erhöhung von Wasserspiegeln (vgl. Abbildung 3.1 zur Lage der Bilanzabschnitte)

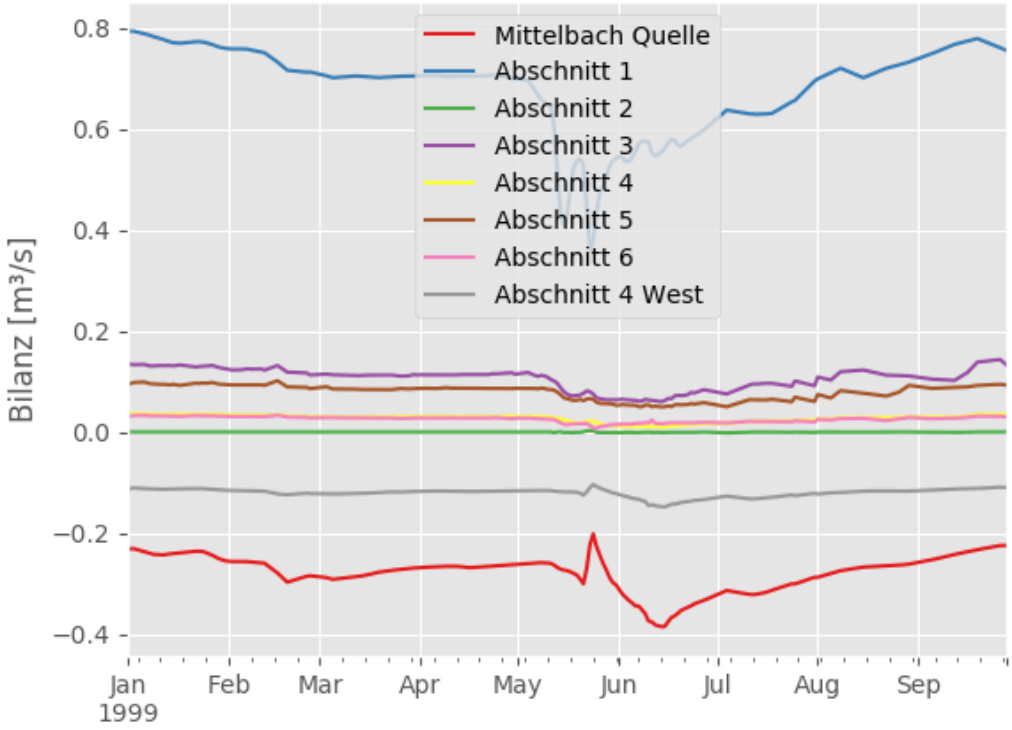

Abbildung 4.21: Hochwasserbedingte Abnahme der Infiltration in einigen Bilanzabschnitten des Stadtwalds bei Berücksichtigung einer Erhöhung von Wasserspiegeln (vgl. Abbildung 3.1 zur Lage der Bilanzabschnitte)

4.4.5 Speichernutzbarer Hohlraumanteil

Als initiale Parametrisierung wurde im Grundwassermodell Licca Liber ein speichernutzbarer Hohlraumanteil (im Folgenden Porosität) von 0,15 außerhalb der Auenstufen angesetzt, für die Auenstufe beträgt die Porosität 0,2. Im Folgenden wird exemplarisch die Wirkung einer erhöhten Porosität außerhalb der Auenstufe dargestellt:

- Referenzlauf: Porosität wie initiale Parametrisierung
- Vergleichslauf: Simulation mit einer Porosität von 0,2 im gesamten Modellgebiet

Abbildung 4.22 und Abbildung 4.23 zeigen exemplarisch zwei Messstellen im Postglazial. In Königsbrunn ist die Wirkung der Erhöhung der Porosität eher gering, während im Bereich zwischen Lech und Paar eine Erhöhung zu einer geringfügig schlechteren Nachbildung der Dynamik führt.

Die durchgeführten Simulationen bestätigen die angenommene Größenordnung der Porosität. Weitere Untersuchungen zur Variabilität der Porosität werden im Rahmen der Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

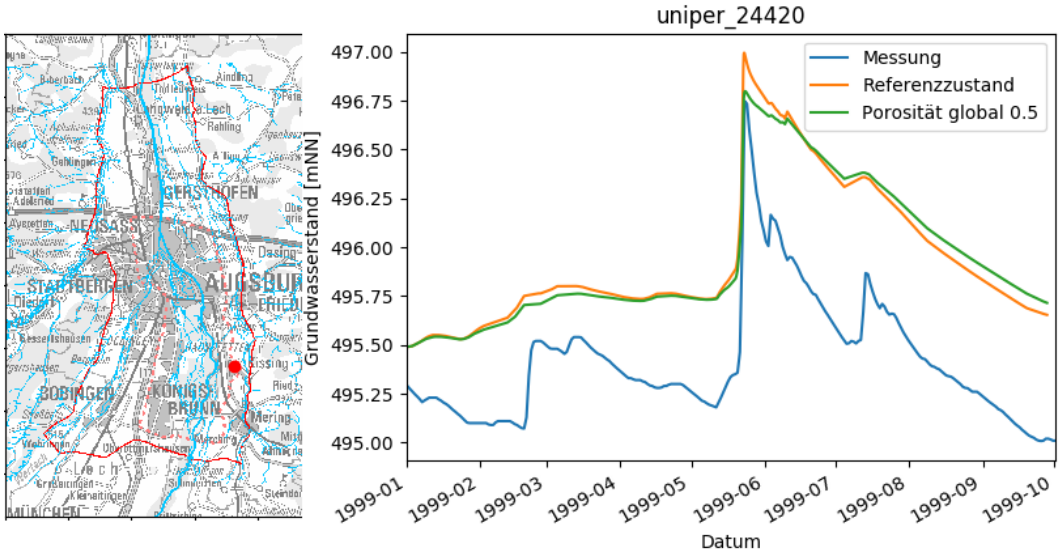

Abbildung 4.22: Messstelle im Postglazial zwischen Lech und Paar

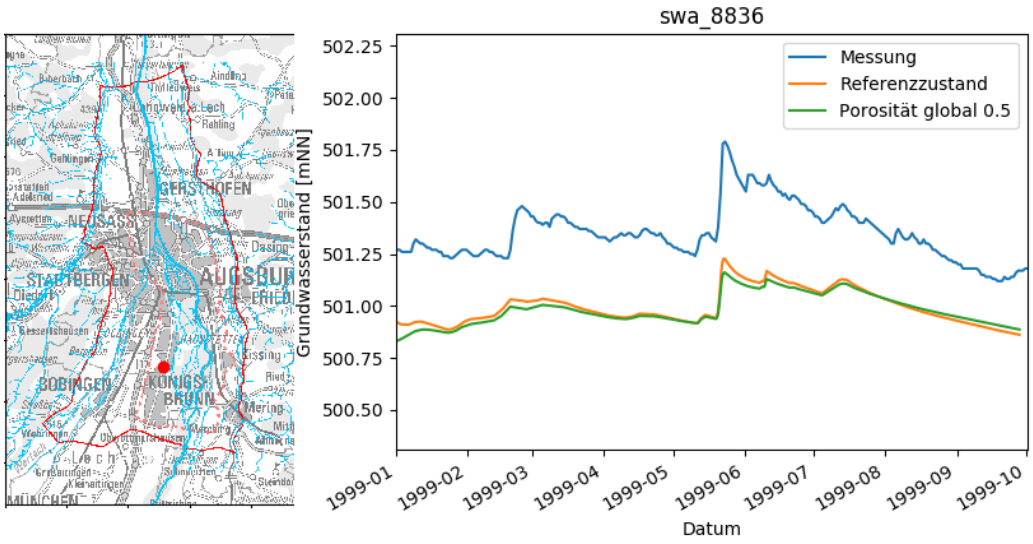

Abbildung 4.23: Messstelle im Postglazial im Bereich Königsbrunn/Haunstetten

4.5 Ergebnisse

4.5.1 Berechnete Grundwasserganglinien

4.5.1.1 Bereich Königsbrunn

Die Grundwasserstände im Bereich der Stadt Königsbrunn werden, wie in den folgenden Abbildungen gezeigt, sehr gut abgebildet. Die Bewertung erfolgt weitestgehend mit Grundwassermessstellen der Stadtwerke Augsburg (s. Abbildung 4.24 und Abbildung 4.25), da diese eine höhere zeitliche Auflösung der Messungen aufweisen als die der Stadt Königsbrunn (vgl. Abbildung 4.26), an denen überwiegend keine Messwerte für den Hochwasserscheitel vorliegen. Zur Verdeutlichung dieses Sachverhalts werden in den entsprechenden Diagrammen die Zeitpunkte durch die Eintragung eines Balkens visualisiert. Generell zeigen östliche Messstellen eine größere Dynamik als Messstellen der Niederterrasse.

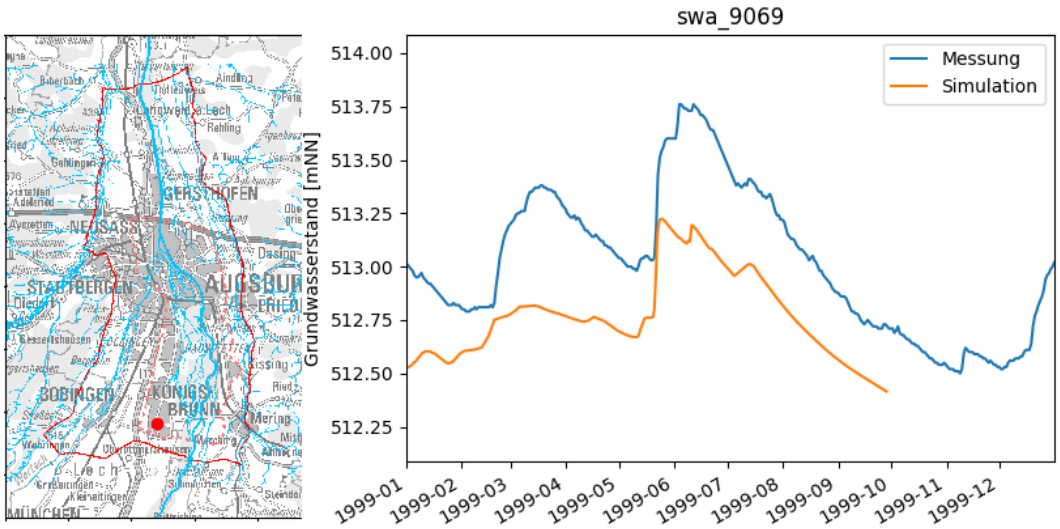

Abbildung 4.24: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_9069

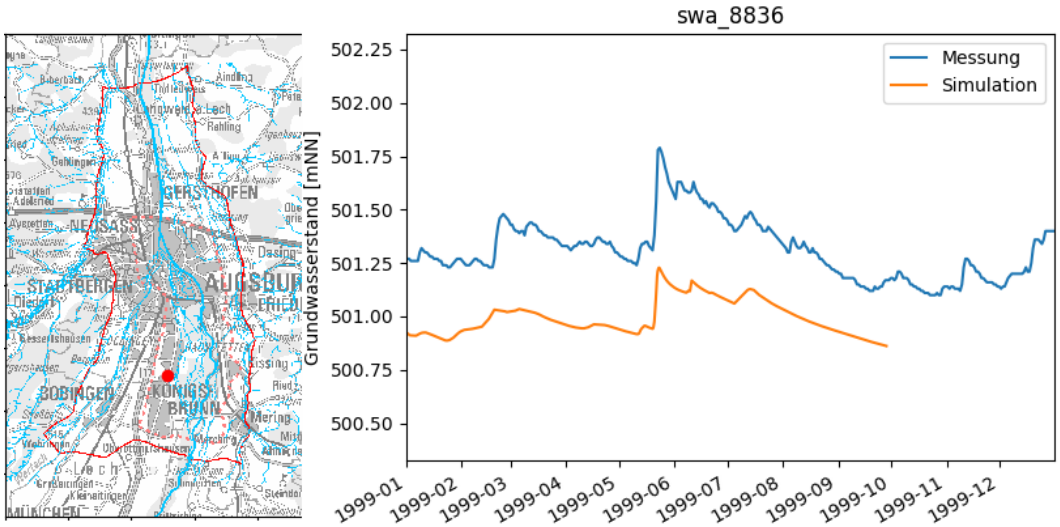

Abbildung 4.25: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8836

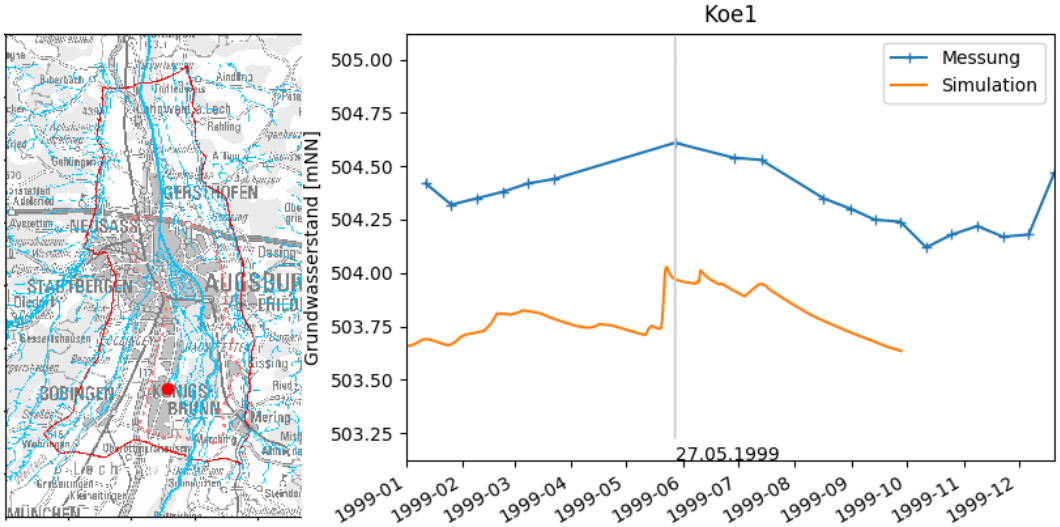

Abbildung 4.26: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle Koe1

4.5.1.2 Bereich Stadtwald

Der Stadtwald lässt sich in drei Teilbereiche (Süd, Mitte Nord) untergliedern. In allen drei Teilbereichen ist die Anpassung gut (s. Abbildung 4.27 bis Abbildung 4.34), an mehreren Messstellen (vgl. Abbildung 4.30) ist eine starke Beeinflussung durch Grundwasserentnahmen der Stadtwerke zu erkennen. Wenige Messstellen zeigen in der Messung eine höhere entnahmebedingte Dynamik als die Simulation, dies ist darauf zurückzuführen, dass für einige Brunnen nur summarische Angaben über mehrere Brunnen vorliegen (z.B. liegt am Hochablass nur eine Ganglinie für die Gesamtentnahme an 14 Brunnen vor). Lech-nahe Messstellen zeigen in Simulation und Messung eine höhere Dynamik als Lech-ferne Messstellen, weiterhin nimmt die Dynamik von Süden nach Norden ab.

Bereichsweise wird die Dynamik an Messstellen im westlichen Stadtwald (Lech-fern, vgl. Abbildung 4.30 und Abbildung 4.31) etwas unterschätzt. Grund hierfür können lokal verstärkte Neubildungsprozesse sowie eine stark drainierende Wirkung von Gewässern im Grundwassermodell sein.

Lech-nahe Messstellen werden im Allgemeinen sehr gut abgebildet (s. Abbildung 4.27, Abbildung 4.29 und Abbildung 4.32). In der Nähe des Hochablasses variiert die Anpassung innerhalb weniger Meter, vermutlich weil Teile des Lechs im Staubereich stark kolmatiert sind (vgl. Abbildung 4.32 und Abbildung 4.33). Das Modell löst diese lokalen Effekte nicht auf, da ein einheitlicher Leakage-Koeffizient zwischen dem Hochablass und etwa Fkm 48,3 hinterlegt ist.

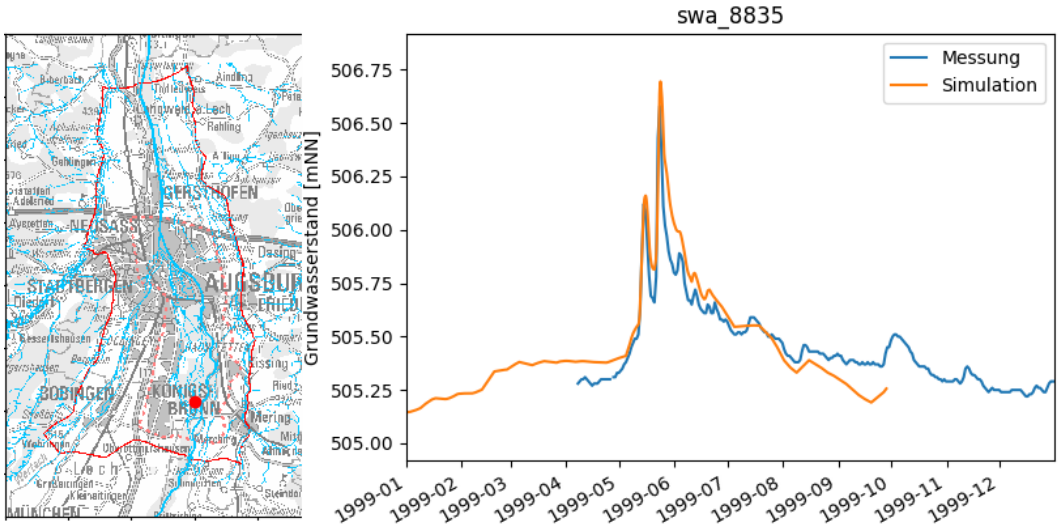

Abbildung 4.27: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8835 (südlicher Stadtwald, Lech-nah)

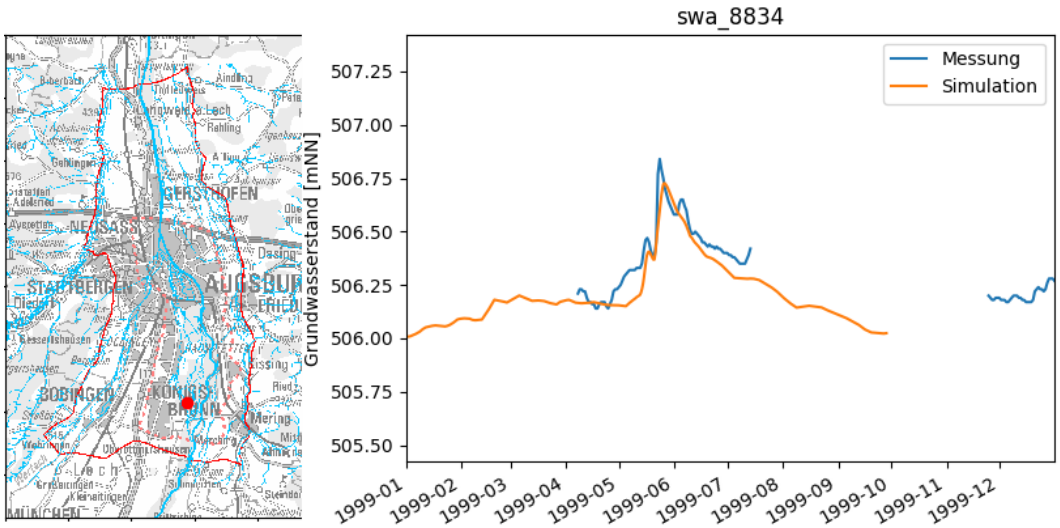

Abbildung 4.28: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8834 (südlicher Stadtwald, Lech-fern)

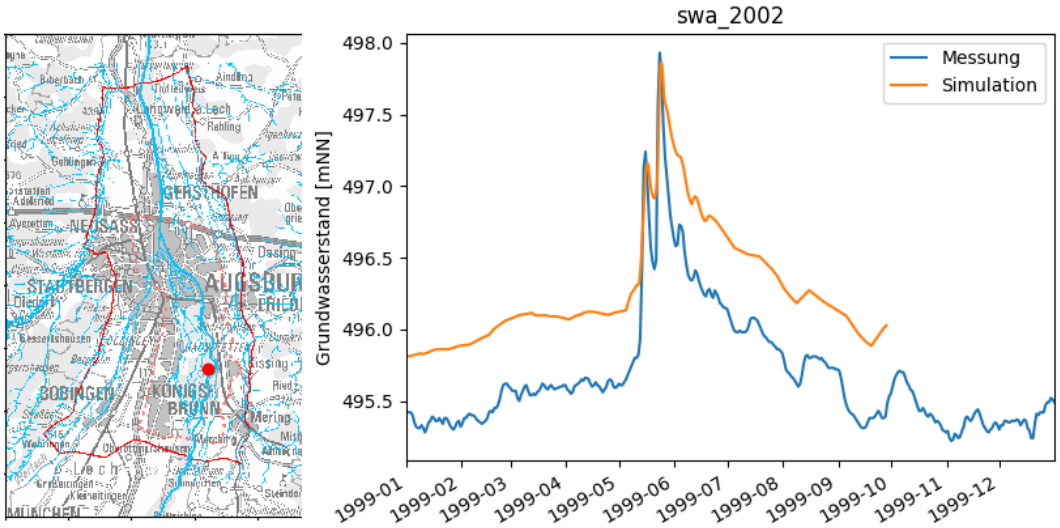

Abbildung 4.29: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_2002 (mittlerer Stadtwald, Lech-nah)

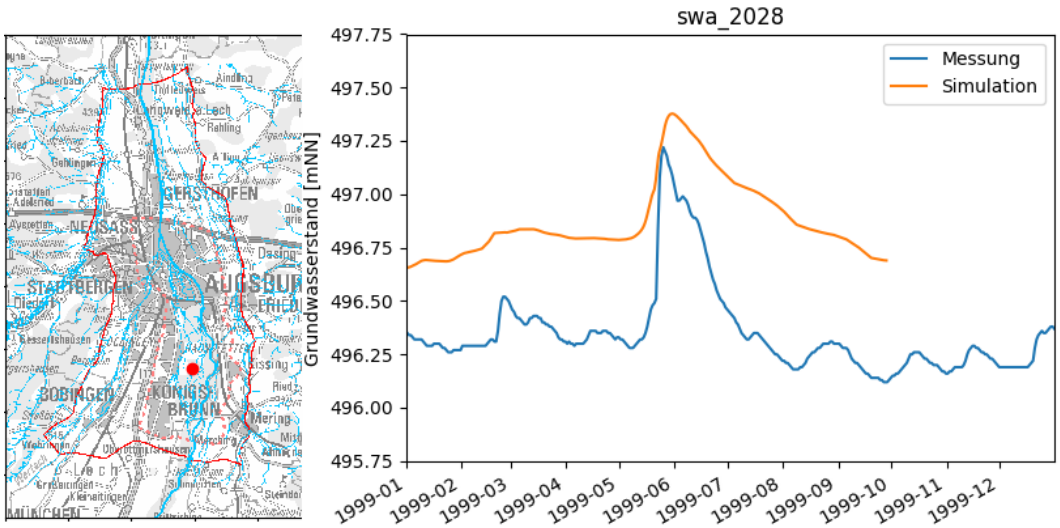

Abbildung 4.30: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_2028 (mittlerer Stadtwald, Lech-fern)

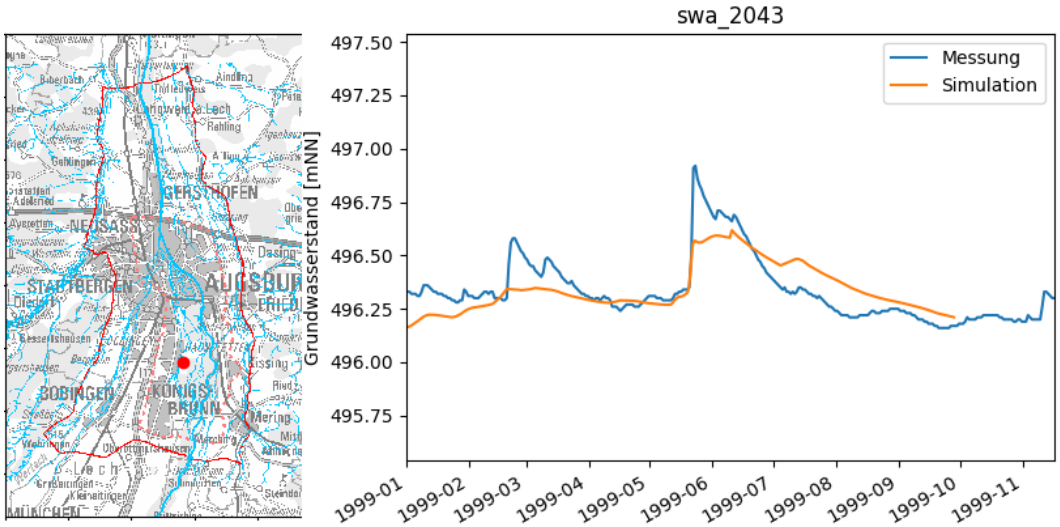

Abbildung 4.31: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_2043 (mittlerer Stadtwald, Lech-fern)

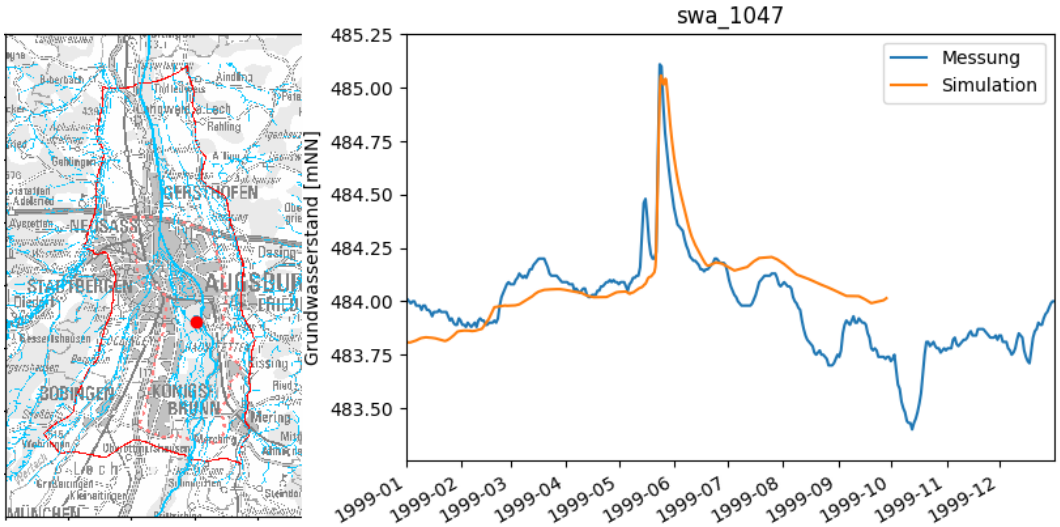

Abbildung 4.32: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_1047 (nördlicher Stadtwald, Lech-nah)

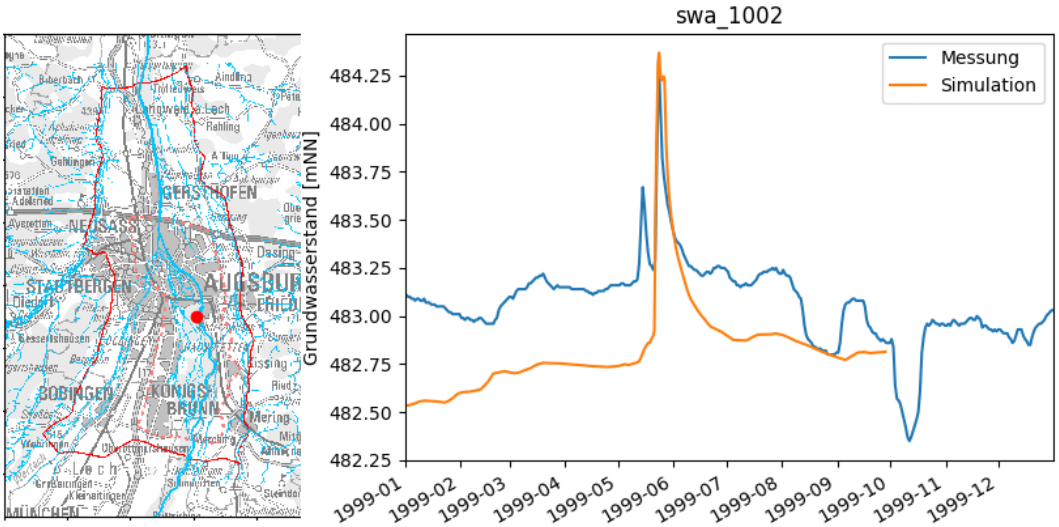

Abbildung 4.33: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_1002 (nördlicher Stadtwald, Lech-nah)

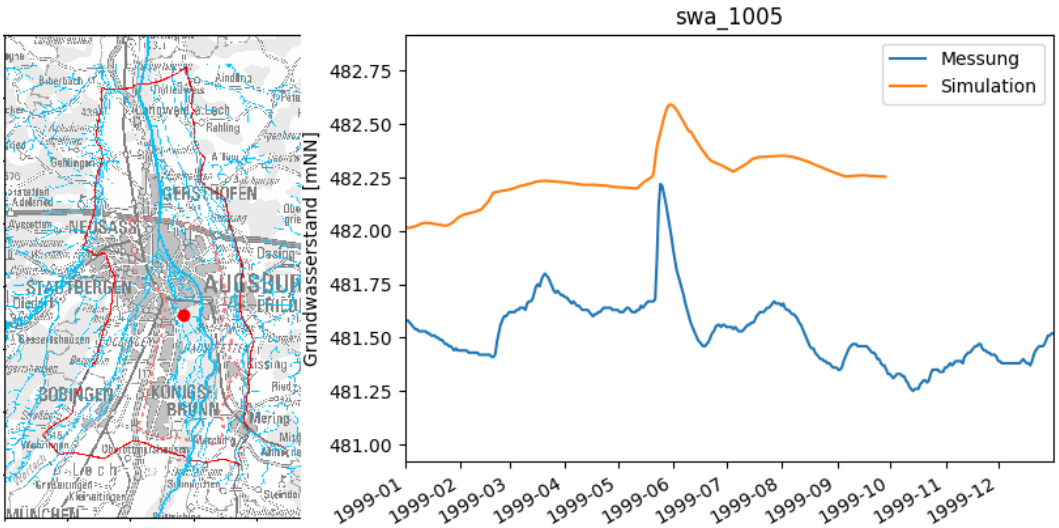

Abbildung 4.34: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_1005 (nördlicher Stadtwald, Lech-fern)

4.5.1.3 Bereich zwischen Lech und Paar

In diesem Bereich liegt die Gemeinde Kissing. Durch die Gemeinde Kissing werden zwar Grundwassermessungen durchgeführt, diese werden aber nicht dauerhaft gespeichert, sodass im Folgenden nur Messungen der UNIPER und des GKD berücksichtigt werden können.

Im Stadtwald nimmt die Dynamik mit steigender Entfernung vom Lech stark ab. Im Bereich zwischen Lech und Paar ist dieser Effekt geringer, da die Dynamik auch von der östlich gelegenen Paar die Grundwasserstände beeinflusst wird und generell der geringmächtigere Quartärkies stärker auf Wasserspiegelschwankungen an den Gewässern reagiert (s. Abbildung 4.35 bis Abbildung 4.38).

Messstellen außerhalb des Aussagegebiets (teilweise zwischen Paar und östlichem Modellrand) zeigen teilweise Dynamiken die weder von Paar noch vom Lech stammen. Dem Grundwassermodell werden derartige unbekannte Dynamiken nicht als Randbedingungen vorgegeben. Daher können sie im Grundwassermodell nicht abgebildet werden (s. Abbildung 4.39).

Bereits bei der stationären Kalibrierung ist die Abweichung der Messstelle uniper_24402 auffällig, auch im instationären Fall ist die absolute Abweichung relativ hoch. Die Dynamik der Messstelle wird hingegen sehr gut abgebildet (s. Abbildung 4.35).

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Simulationsergebnisse im Bereich Stadtwald

Startbedingung und Einschwingphase	Die Startbedingung ist tendenziell etwas zu tief. Während der Einschwingphase (etwa Januar/Februar) steigen die simulierten Grundwasserstände etwas an (die Messungen deuten während dieser Phase eher auf fallende bis konstante Verhältnisse hin).
Systematische Abweichung	Die systematische Abweichung entspricht in etwa der systematischen Abweichung der stationären Kalibrierung für MW2010,
Dynamik	Die Dynamik wird innerhalb des Aussagegebiets gut abgebildet. Generell zeigen Lech-nahe Messstellen eine größere Dynamik als Messstellen nahe der Paar. Paar-nahe Messstellen zeigen

	teilweise eine deutlich ausgeprägtere Dynamik als die Simulation.

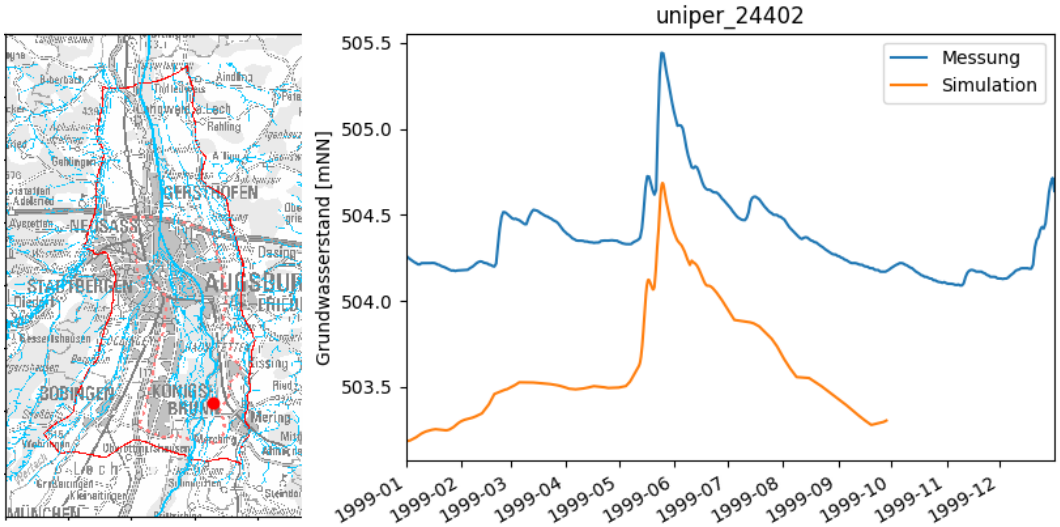

Abbildung 4.35: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24402 (südöstlicher Bereich zwischen Lech und Paar, Lech-nah)

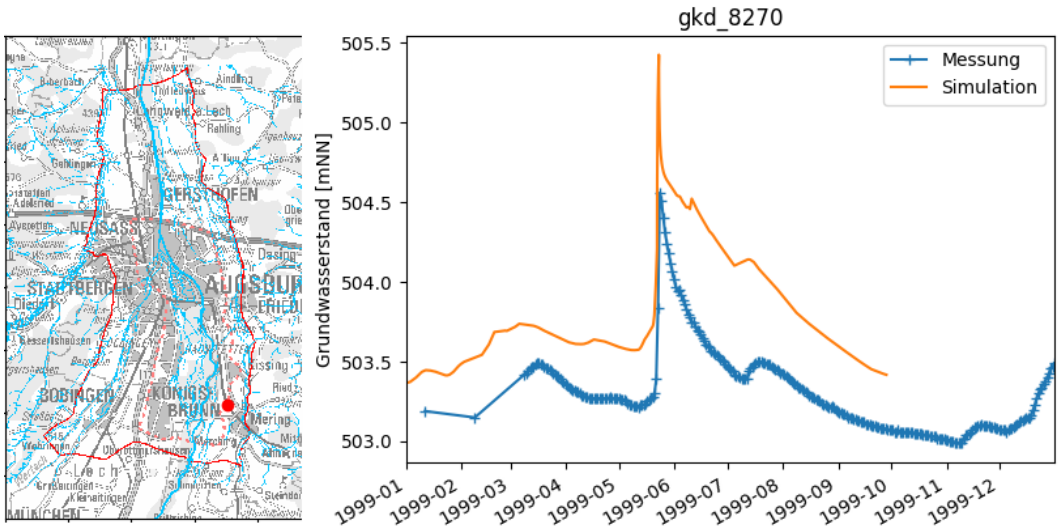

Abbildung 4.36: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle gkd_8270 (südöstlicher Bereich zwischen Lech und Paar, Lech-fern)

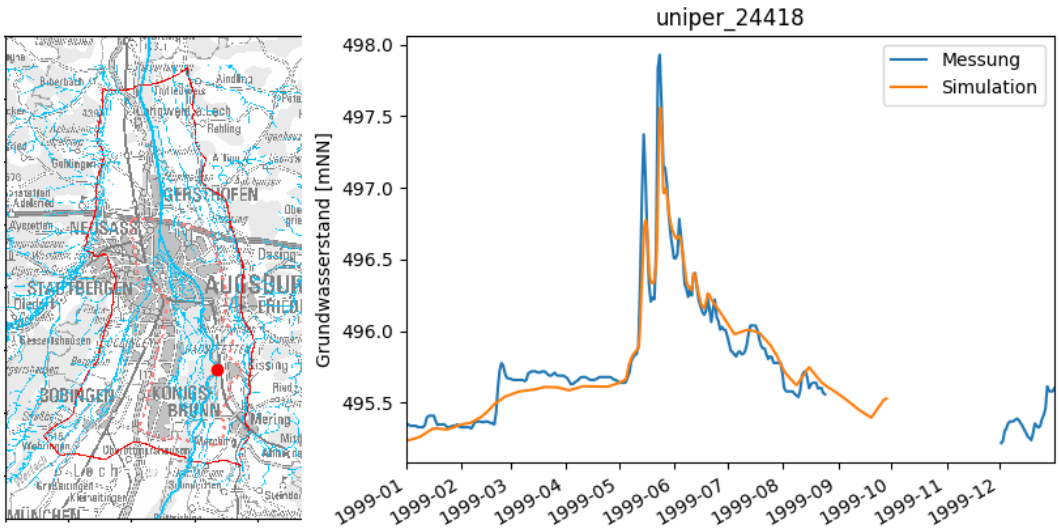

Abbildung 4.37: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24418 (nördlicher Bereich zwischen Lech und Paar Höhe Kissing, Lech-nah)

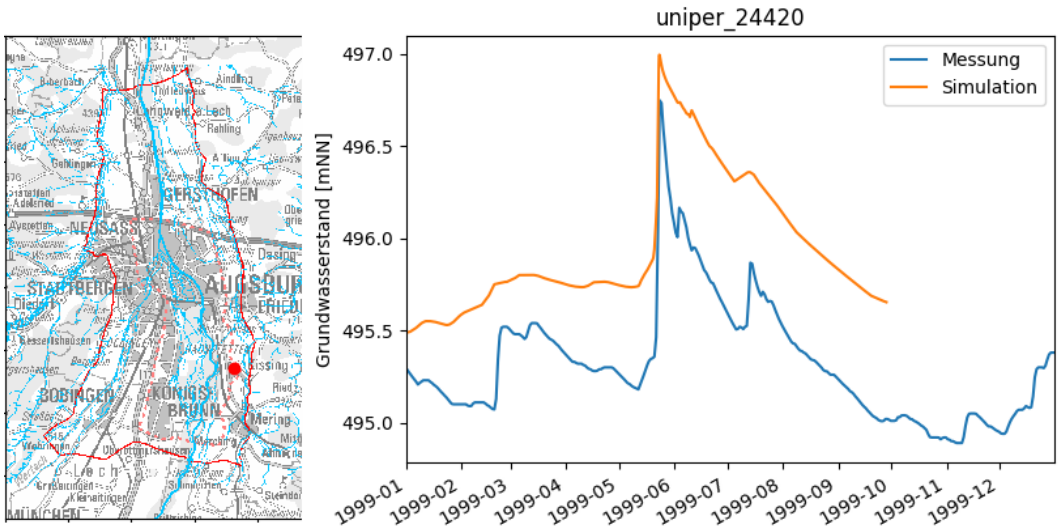

Abbildung 4.38: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24420 (nördlicher Bereich zwischen Lech und Paar Kissing, Lech-fern)

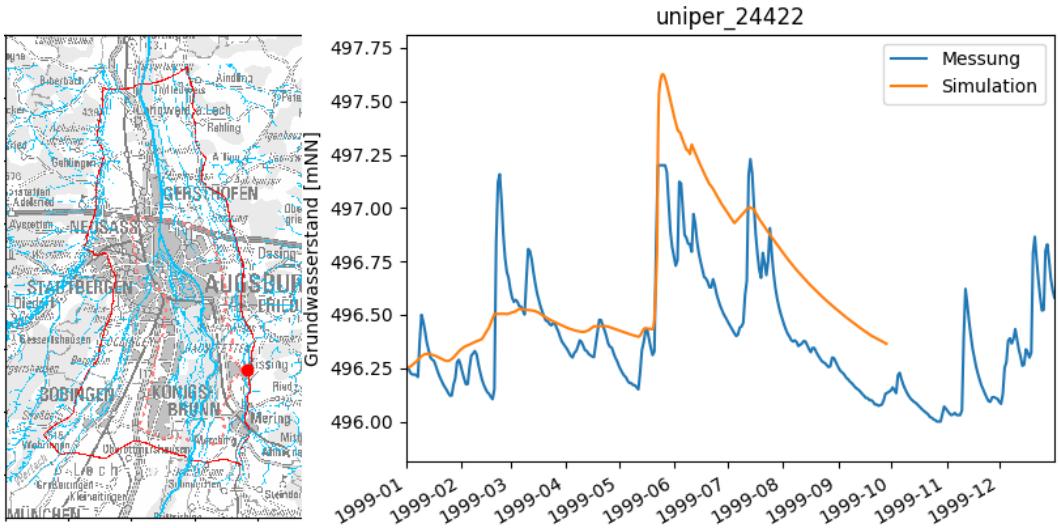

Abbildung 4.39: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24422 (nördlicher Bereich zwischen Lech und Paar, außerhalb Aussagegebiet Kissing, Lech-fern)

4.5.1.4 Bereich der Innenstadt Augsburg

Die Grundwasserganglinien im Innenstadtbereich sind von wesentlich geringerer Dynamik geprägt, als beispielsweise der Stadtwald. Die zeitliche Auflösung der gemessenen Grundwasserstände ist gering, dennoch wird das Ansteigen der Grundwasserstände während des Pfingsthochwassers durch zwei Messungen belegt.

Die größten Reaktionen auf das Pfingsthochwasser zeigen Grundwassermessungen im Wirkungsbereich des Hochablasses (s. Abbildung 4.40). Dagegen sind im nördlichen Innenstadtbereich kaum Grundwasserstandsreaktionen auf das Hochwasser 1999 zu erkennen.
Generell zeigt sich, dass der Innenstadtbereich relativ entkoppelt von der Dynamik des Lechs ist. Dies liegt u.a. an der dämpfenden Wirkung der Entnahmen durch die Kanalisation / GW-Sammlern sowie dem in das Tertiär eingeschnittenen Lech. Im Grundwassermodell ist die Wirkung des Pfingsthochwassers bereichsweise gering überschätzt (s. Abbildung 4.42 und Abbildung 4.43).

Von Interesse sind ferner in den Grundwasserstandsmessungen erkennbare Reaktionen auf Bachablässe. So ist an der Messstelle tba_0431 eine geringe Grundwasserreaktion als Folge der Bachablässe im April 1999 sichtbar. Im Grundwassermodell sind die Bachablässe durch eine temporäre Reduktion der Wasserspiegel berücksichtigt (s. Kapitel 2.6.2.2, Bäche im Stadtgebiet Augsburg). Das Grundwassermodell bildet die geringe Wirkung der Bachablässe analog zu den Messungen ab (s. Abbildung 4.43).

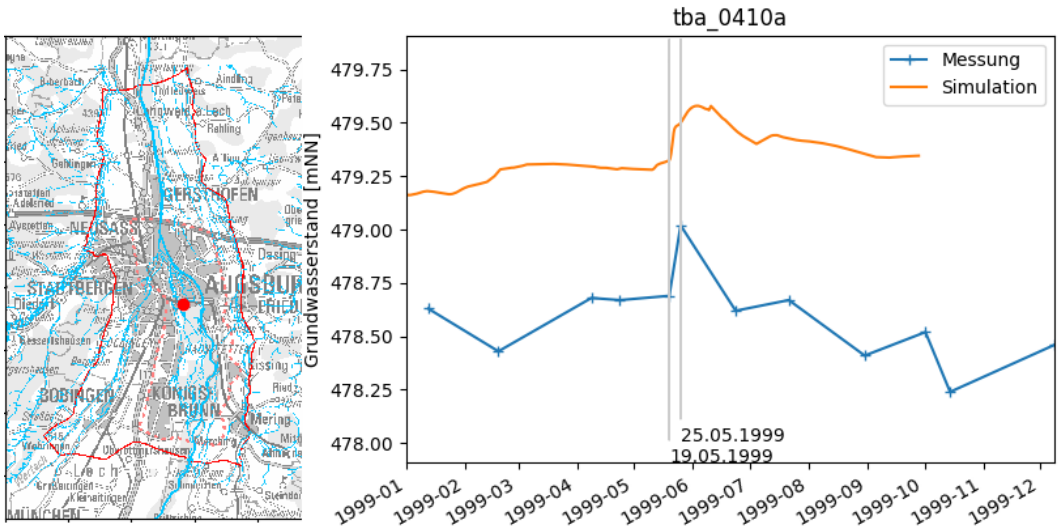

Abbildung 4.40: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0410a (Übergangsbereich vom Stadtwald zum bebauten Innenstadtbereich, Lech-fern)

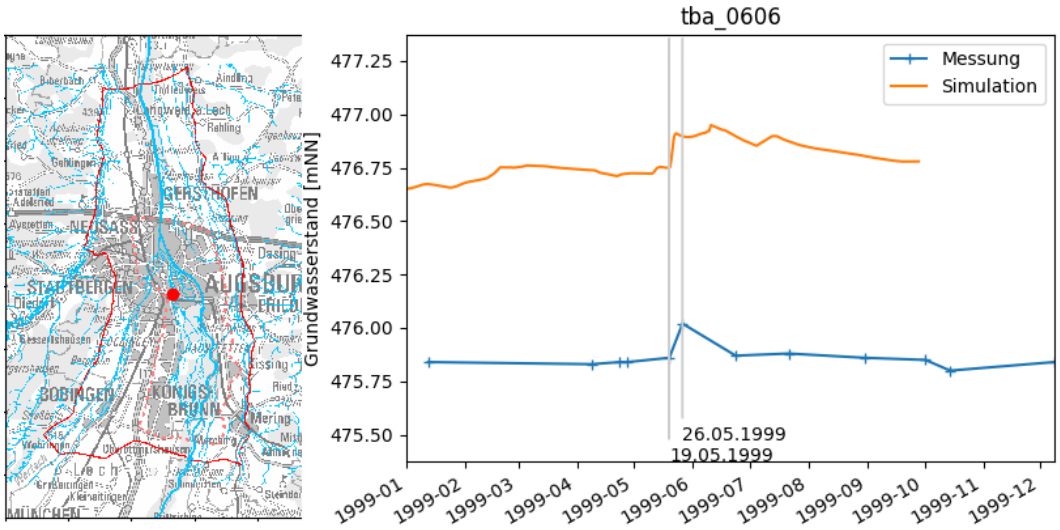

Abbildung 4.41: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0606 (Übergangsbereich vom Stadtwald zum bebauten Innenstadtbereich, Lech-fern)

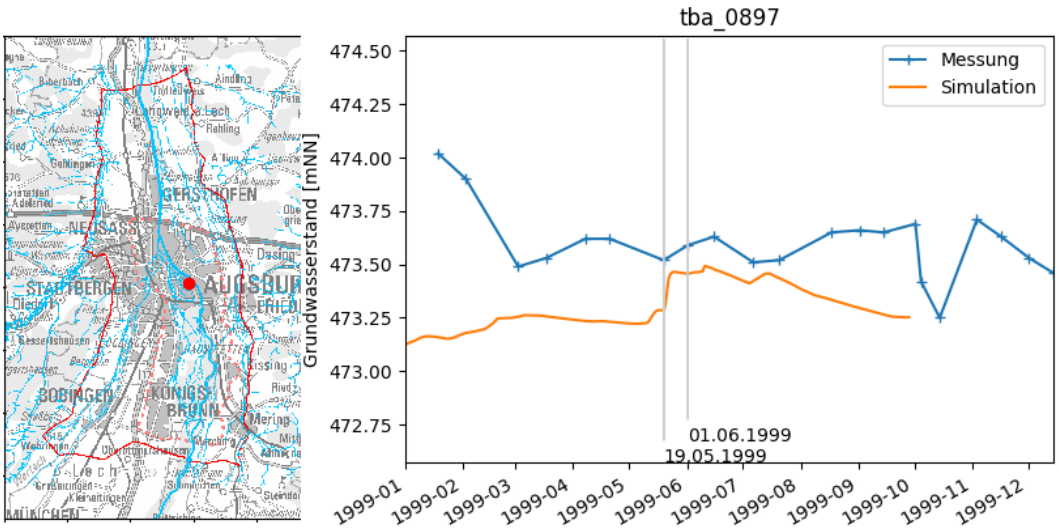

Abbildung 4.42: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0897 (Innenstadtbereich, Lech-nah)

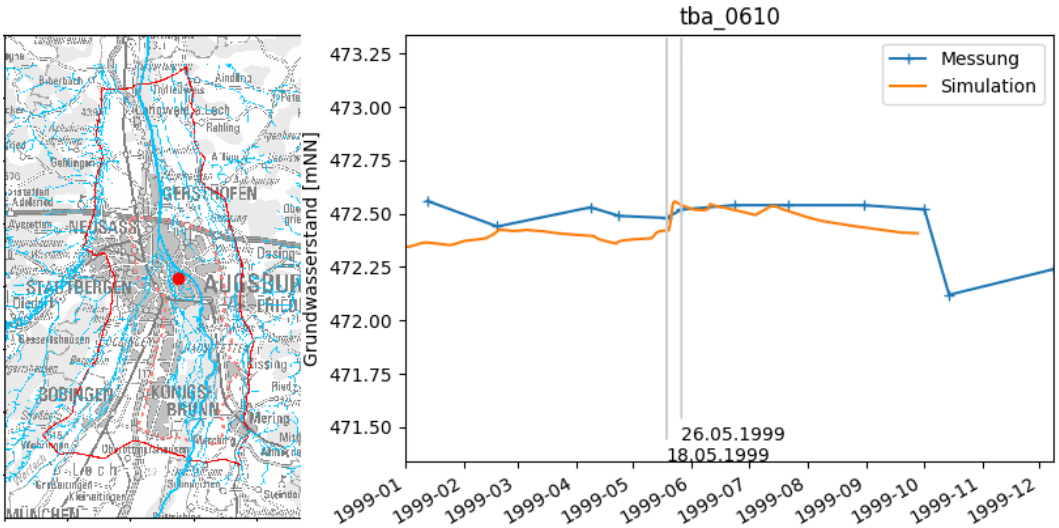

Abbildung 4.43: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0610 (Nördlicher Innenstadtbereich, Lech-nah)

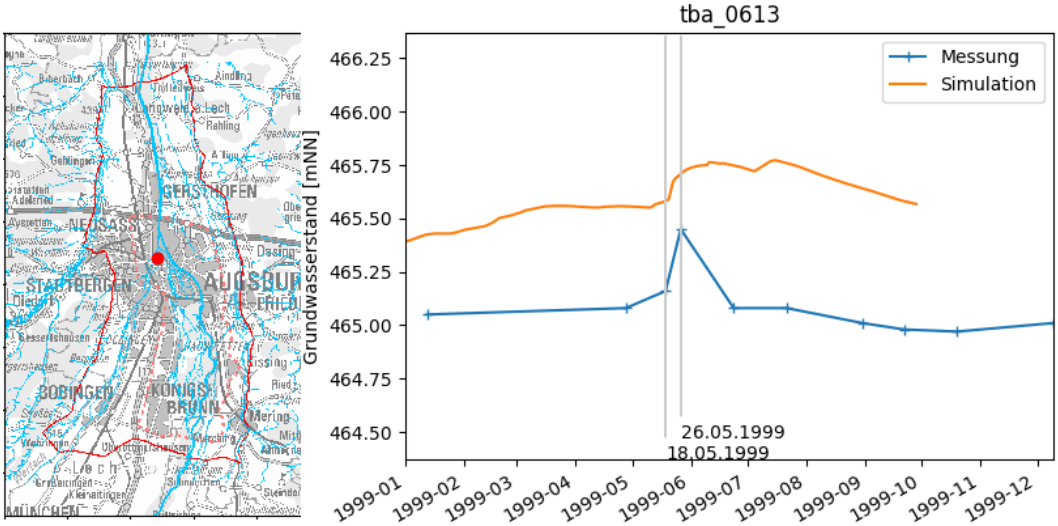

Abbildung 4.44: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0613 (Bereich Wertachmündung, Wertach-nah)

4.5.1.5 Bereich von Augsburg östlich des Lechs

Der Bereich im Augsburger Osten (östlich des Lechs) wird durch Grundwassermessdaten abgedeckt, die eher eine geringe zeitliche Auflösung aufweisen (s. Abbildung 4.45 bis Abbildung 4.49). Im Vergleich zum Innenstadtbereich ist die durch das Hochwasser 1999 ausgelöste Grundwasserstandsdynamik deutlich stärker ausgeprägt.

Das Grundwassermodell ist in der Lage, diesen Prozess nachzuvollziehen. So wird das Ansteigen der Grundwasserstände weitgehend gut abgebildet. Lediglich im Bereich nördlich der Wertachmündung tendiert das Grundwassermodell dazu, die Reaktionen geringfügig zu unterschätzen.

Mit steigender Entfernung vom Lech fallen die Grundwasserstände der Messung etwas stärker als die Simulation. Am östlichen Rand des Aussagegebiets macht sich eine Dynamik bemerkbar, die vermutlich von einem größeren Gewässer stammt (z.B. Friedberger Ach, s. Abbildung 4.47). Wasserstandsänderungen der Friedberger Aach werden dem Grundwassermodell nicht als Randbedingung vorgegeben. Dies erklärt

die gedämpfte Reaktion des Modells in diesem Bereich.

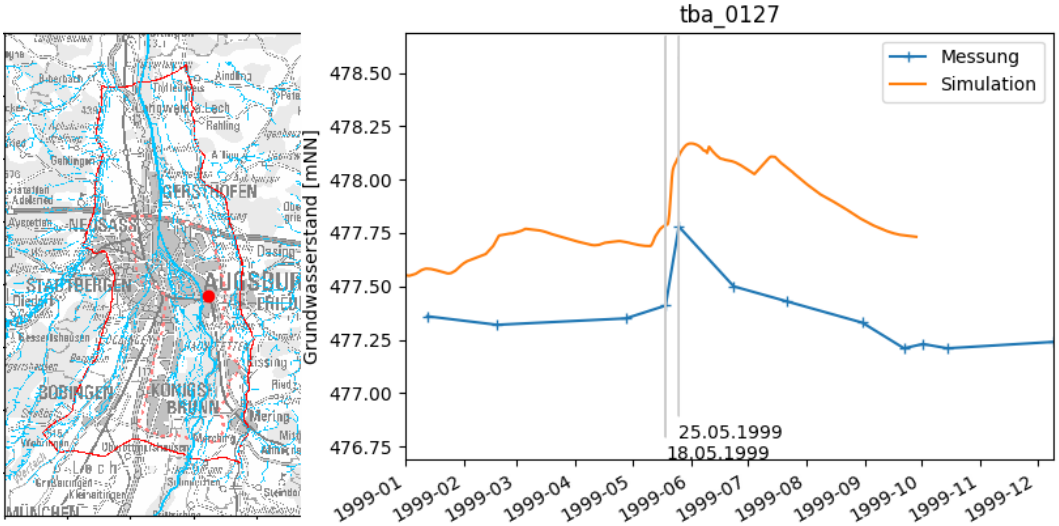

Abbildung 4.45: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0127 (Augsburg Ost, nahe Kuhsee)

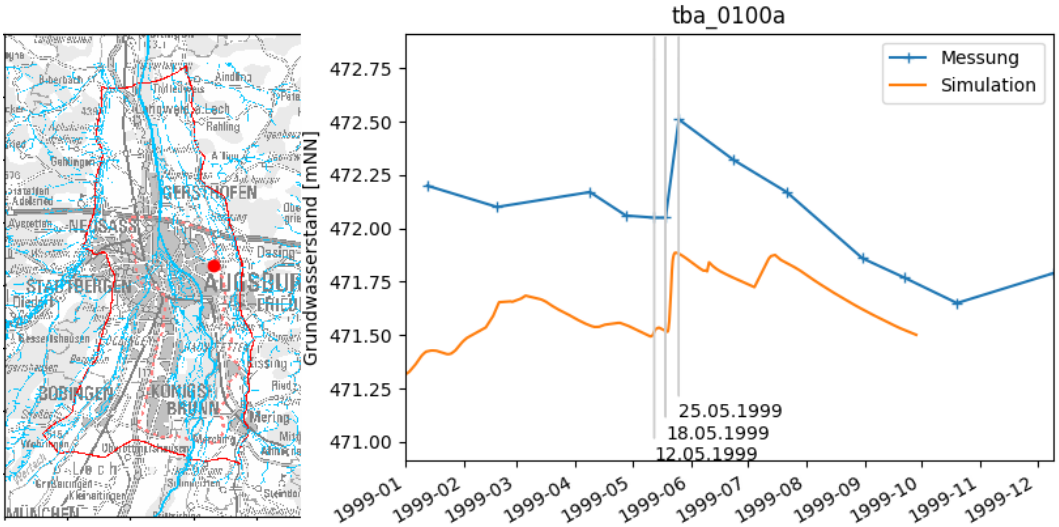

Abbildung 4.46: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0100a (Augsburg Ost, nahe östlicher Grenze des Aussagegebiets, eher Lech-fern)

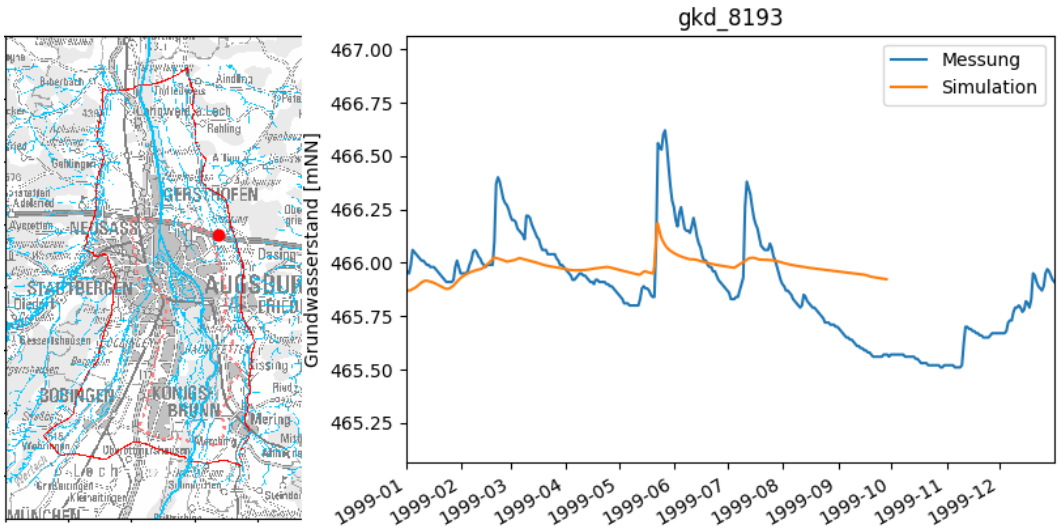

Abbildung 4.47: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle gkd_8193 (Augsburg Ost, außerhalb östlicher Grenze des Aussagegebiets, nahe Autobahn, Lech-fern)

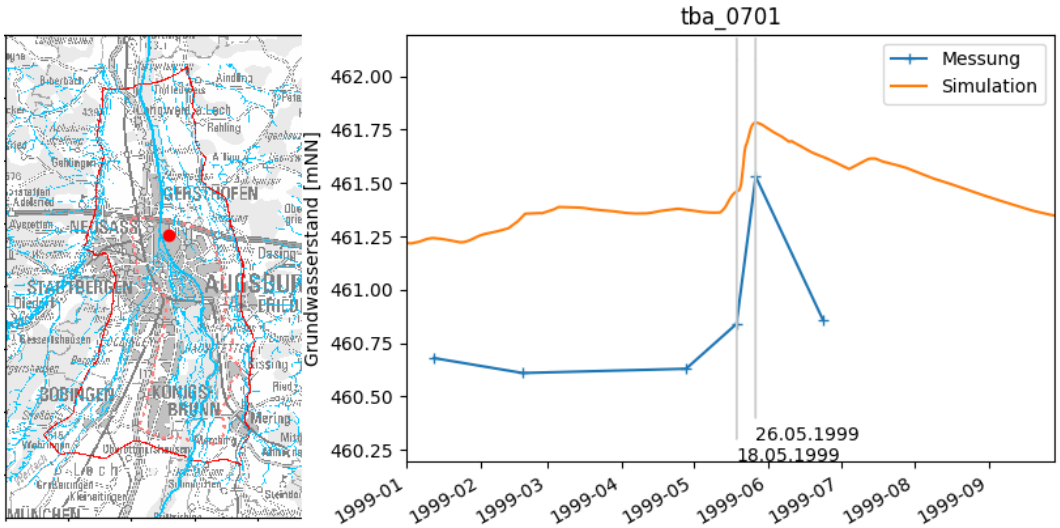

Abbildung 4.48: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0127 (Augsburg Ost, nahe Wertachmündung, Lech-nah)

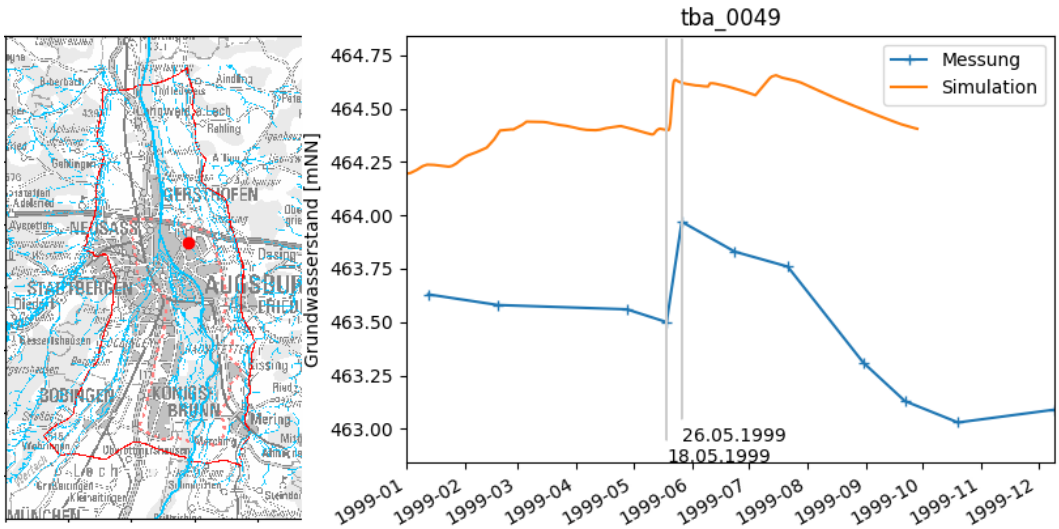

Abbildung 4.49: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0049 (Augsburg Ost, nahe nördlicher Grenze des Aussagegebiets)

4.5.1.6 Bereich Augsburg Nord und Wertachtal

Dieser Bereich umfasst das Aussagegebiet westlich der Wertach bzw. das Aussagegebiet nördlich der Wertachmündung westlich des Lechs. Auf Höhe des Gersthofener Wehrs befindet sich eine Messstelle der BEW (s. Abbildung 4.50), diese umfasst aber keine Messwerte während des Hochwasserereignis. Die Abnahme der Grundwasserstände nach dem Hochwasserereignis wird etwas unterschätzt. Die südlich liegenden Messstelle tba_0661 wird gut abgebildet. Im südlichen Bereich wird die Wertach-nahe Messstelle gut abgebildet, während das Hochwasser-Ereignis der Wertach-fernen Messstelle etwas unterschätzt wird (s. Abbildung 4.52 und Abbildung 4.53).

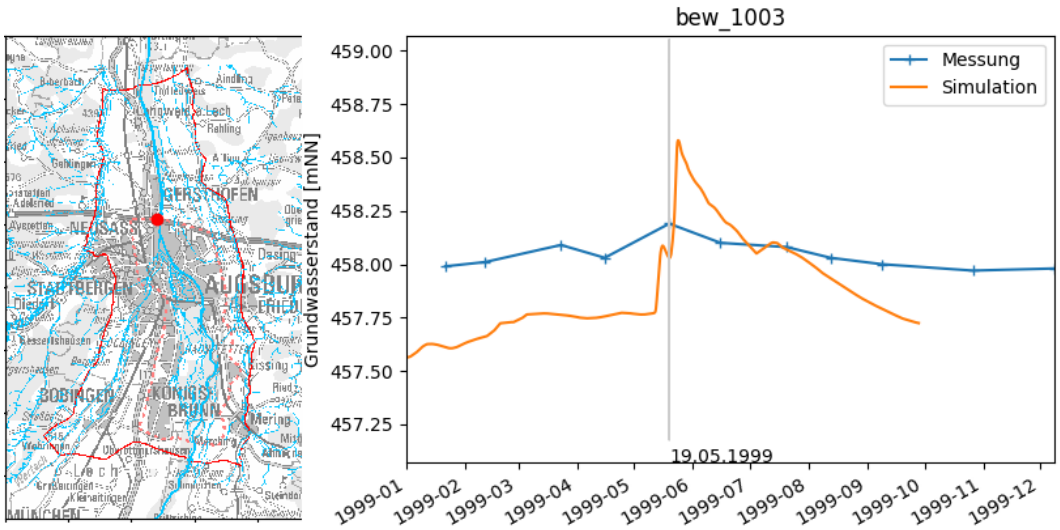

Abbildung 4.50: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle bew_1003 (Augsburg Nord, nahe nördlicher Grenze des Aussagegebiets)

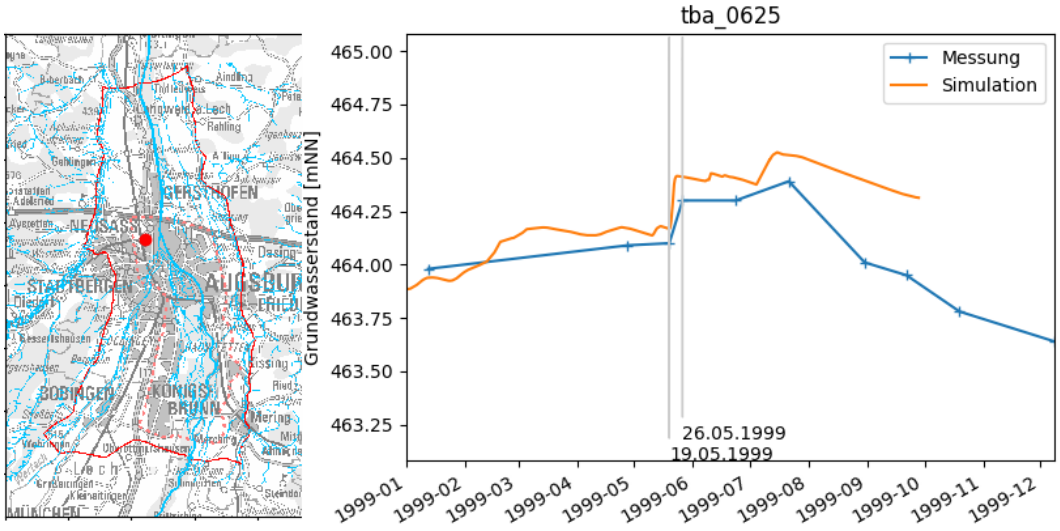

Abbildung 4.51: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0625 (Augsburg Nord, nördlich Wertachmündung)

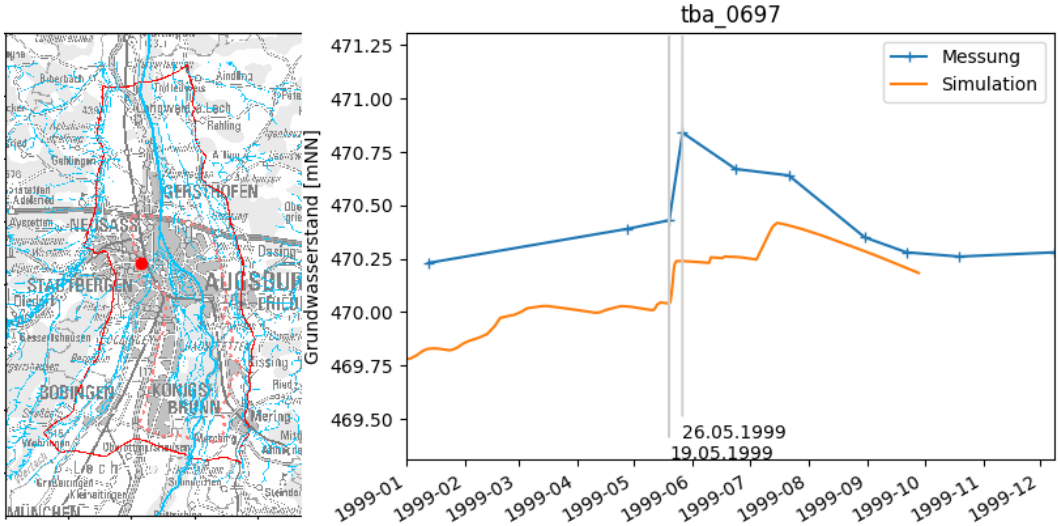

Abbildung 4.52: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0697 (Augsburg Nord, südlich Wertachmündung, Wertach-fern)

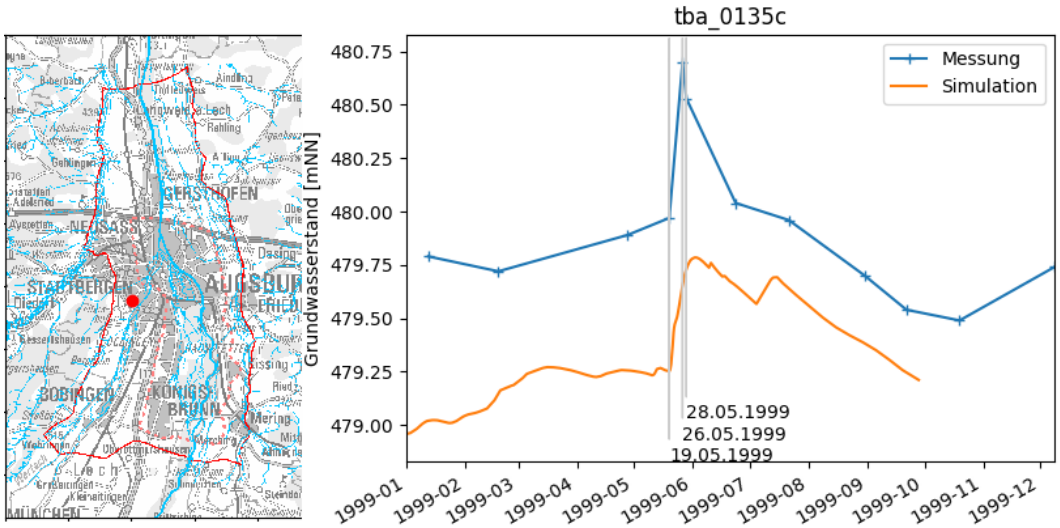

Abbildung 4.53: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0135c (Augsburg Nord, südlich Grenze Aussagegebiet, Wertach-nah)

4.5.2 Berechnete Grundwassergleichen

Als Ergebnis der instationären Kalibrierung ergeben sich je Modellknoten instationäre Ganglinien der Grundwasserstände. Ein wichtiges Ergebnis sind die Grundwasserstände, die während des Pfingsthochwassers im Grundwassermodell auftreten. Die maximalen Grundwasserstände während des Pfingsthochwassers sind in Anlage 6.2.13 und Anlage 6.2.14 dargestellt.

Auf einen visuellen Vergleich mit gemessenen Grundwassergleichen wird aufgrund der bereichsweise schlechten zeitlichen und räumlichen Abdeckung durch Messdaten verzichtet.

4.5.3 Wasserbilanz

Zur Überprüfung eines Grundwassermodells zählen auch Auswertungen zur Wasserbilanz (DVGW 2016). Instationäre Abflussmessungen an Gewässern, mit deren Hilfe man den instationären Austausch abschätzen kann, liegen nicht vor. Derartige Messungen wären nur mit einem unverhältnismäßig großen Aufwand möglich und zudem wäre diese mit Messunsicherheiten behaftet. Im Rahmen des Berichts zum HGM (ARGE SKI KUP UIBK, 2018) wurde aber der Austausch des Lechs mit dem Grundwasser für mehrere Zeiträume abgeschätzt, diese Auswertung wird im folgenden Kapitel als Vergleichsgröße herangezogen.

4.5.3.1 Lech im Planungsraum

Die Wasserbilanz des Lechs im Planungsraum ist in Abbildung 4.54 (südlicher Planungsraum) und Abbildung 4.55 (nördlicher Planungsraum) dargestellt. Bei der im Diagramm dargestellten Bilanz handelt es sich um den Netto-Austausch mit dem Gewässerabschnitt, das heißt der Summe aus Infiltration (Vorzeichen +) und Exfiltration (Vorzeichen -). In einem Gewässerabschnitt mit negativer Bilanz überwiegt die Exfiltration, es kann aber auch lokal zu einer Infiltration kommen.

Im südlichen Planungsraum kommt es während des Hochwassers zu einer starken Erhöhung der Infiltration. Im südlichsten Abschnitt 1 erhöht sich die Infiltration kurzzeitig auf bis über 3 m³/s. Die starken Änderungen im Austausch klingen nach dem Pfingsthochwasser relativ schnell ab, die letzten Nachwirkungen sind aber noch bis etwa Ende Juni sichtbar. Im Planungsabschnitt 1 beträgt die Summe des infiltrierten Wassers vom 21.5.1999 bis zum 23.5.1999 etwa 380000m³, d.h. etwa 290 m³/m

(Infiltration). Dies entspricht der Größenordnung die im Bericht zum HGM (ARGE SKI KUP UIBK, 2018) abgeschätzt wurde (Austausch an einer Messstellentraverse zwischen 400 und 700m³/m).

Im nördlichen Planungsraum ist der Austausch mit dem Lech deutlich ruhiger. Lediglich in den Abschnitten nahe des Gersthofener Wehrs (Abschnitt Nord 7) kommt es zu einer Umkehr des Austauschs (von Exfiltration zur Infiltration). Die durch Sohlumlagerungen bedingte Veränderung der Exfiltration im Abschnitt Nord 1 ist in der Bilanz deutlich zu erkennen.

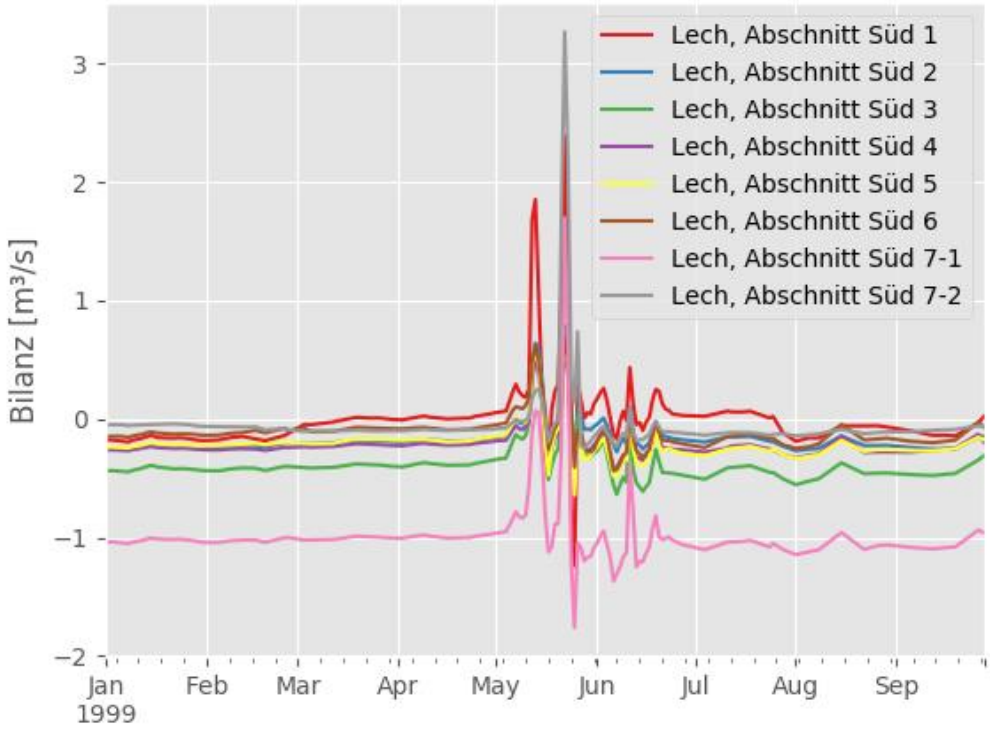

Abbildung 4.54: Wasserbilanz des Lech im südlichen Planungsraum (Lage der Bilanzbereiche siehe Kapitel 3.1.2.2)

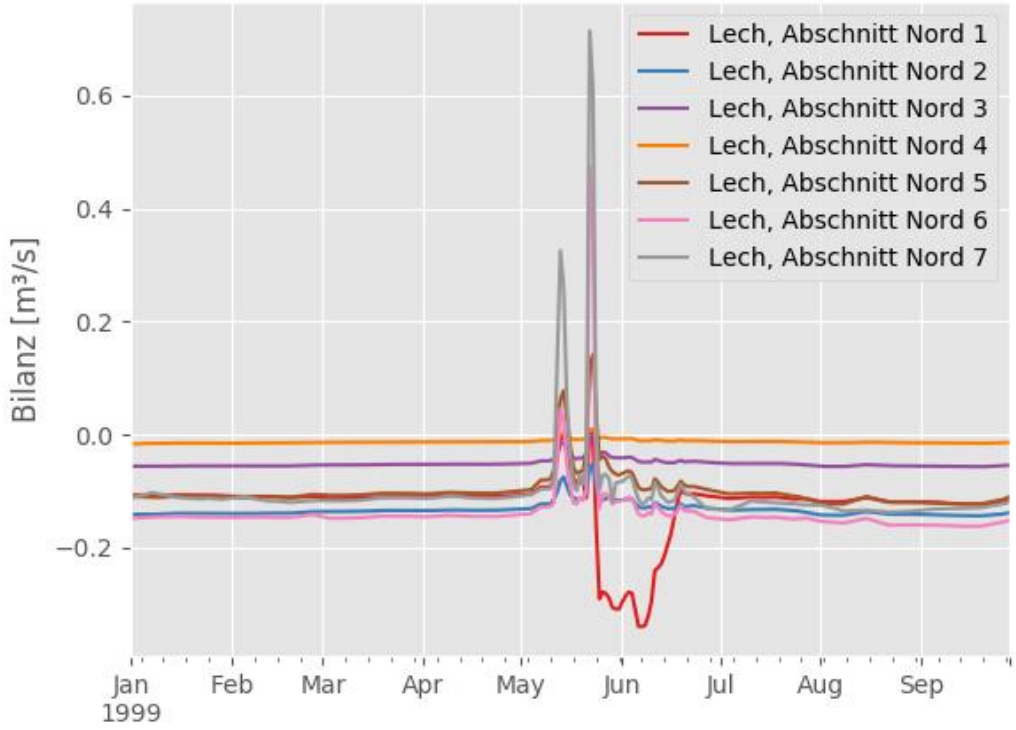

Abbildung 4.55: Wasserbilanz des Lech im nördlichen Planungsraum (Lage der Bilanzbereiche siehe Kapitel 3.1.2.4)

4.5.3.2 Nebengewässer

Im Folgenden wird die Wasserbilanz der wichtigsten Nebengewässer erläutert.

Im Bereich Königsbrunn/Stadtwald infiltriert der Lochbach bei Mittelwasser große Mengen Wasser ins Grundwasser. Abbildung 4.56 zeigt die instationäre Bilanz des Lochbachs. Während des Hochwassers nimmt die Infiltration am Lochbach in den Abschnitten 1, 3 und 4 um jeweils etwa 50-80 l/s ab. Im Abschnitt 2 liegt der Wasserspiegel des Lochbachs weit oberhalb des Grundwassers und wird durch die Spundwände an der Staustufe 23 vom Lech abgeschirmt, sodass hier die Infiltration deutlich weniger abnimmt.

Abbildung 4.57 zeigt die Bilanz der Gewässer im Stadtwald. Die im Vergleich zum Lochbach größere Nähe zum Lech(-Hochwasser) führt zu einer deutlichen Reduktion der Infiltration im südlichen Bereich des Stadtwalds (Abschnitt 1). Die hohen

Grundwasserstände führen im Mittelbach zu einer Zunahme des Abflusses um etwa 100 l/s.

In den Stadtbächen (s. Abbildung 4.58) führt das Pfingsthochwasser erwartungsgemäß nur zu geringen Änderungen im Austausch. Größere Reduktionen der Infiltration sind im Rahmen der Bachablässe zu beobachten.

Kuh- und Weitmannsee sind mit Abflüssen versehen, diese springen bei Erreichen eines maximalen Wasserstands an. Abbildung 4.59 zeigt den Wasserumsatz der beiden Seen. Es wird deutlich, dass aus beiden Gewässern nur während Hochwasserphasen Wasser abläuft. Die Exfiltration beträgt kurzzeitig bis zu 1,5 m^3/s. Dies belegt die große Bedeutung der Seen für die Stabilisierung und letztlich auch Begrenzung der Grundwasserstände.

Die Bilanz der Paar ist in Abbildung 4.60 dargestellt. Außerhalb der Hochwasserphasen beträgt die gesamte Infiltration etwa 100 l/s. Während den Hochwässern findet ein Wechsel von Infiltration zu Exfiltration statt. Dies ist u.a. auf die große Infiltration über die Ausuferungsbereiche der Paar zurückzuführen. Die Bilanz der Ausuferungsflächen ist Abbildung 4.62 zu entnehmen. Die Fläche der Ausuferung der Paar beträgt (innerhalb des Modellgebiets) etwa 5,6 km^2.

Der Austausch des Grundwasserleiters mit der Wertach ist in Abbildung 4.61 dargestellt. Eine wesentliche Erhöhung des Austauschs erfährt die Wertach während des Pfingsthochwassers über drei Ausuferungsbereiche. Die Bilanz der Ausuferungsflächen ist Abbildung 4.62 zu entnehmen. Die Fläche der Ausuferung der Wertach beträgt (innerhalb des Modellgebiets) etwa 1,6 km^2.

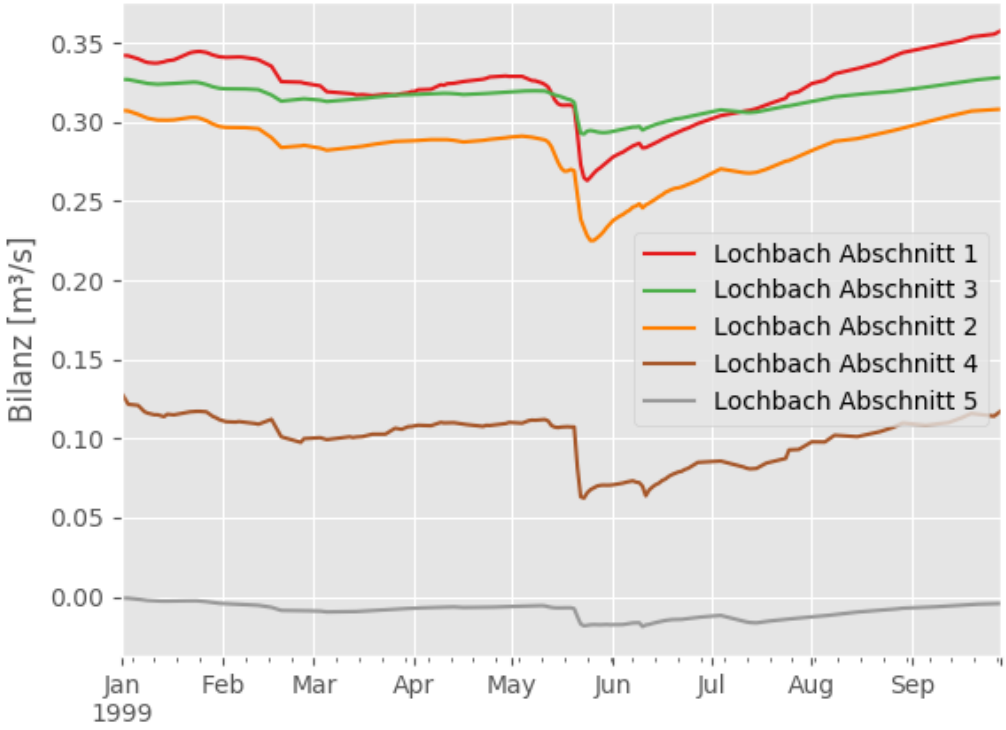

Abbildung 4.56: Bilanz des Lochbachs je Abschnitt

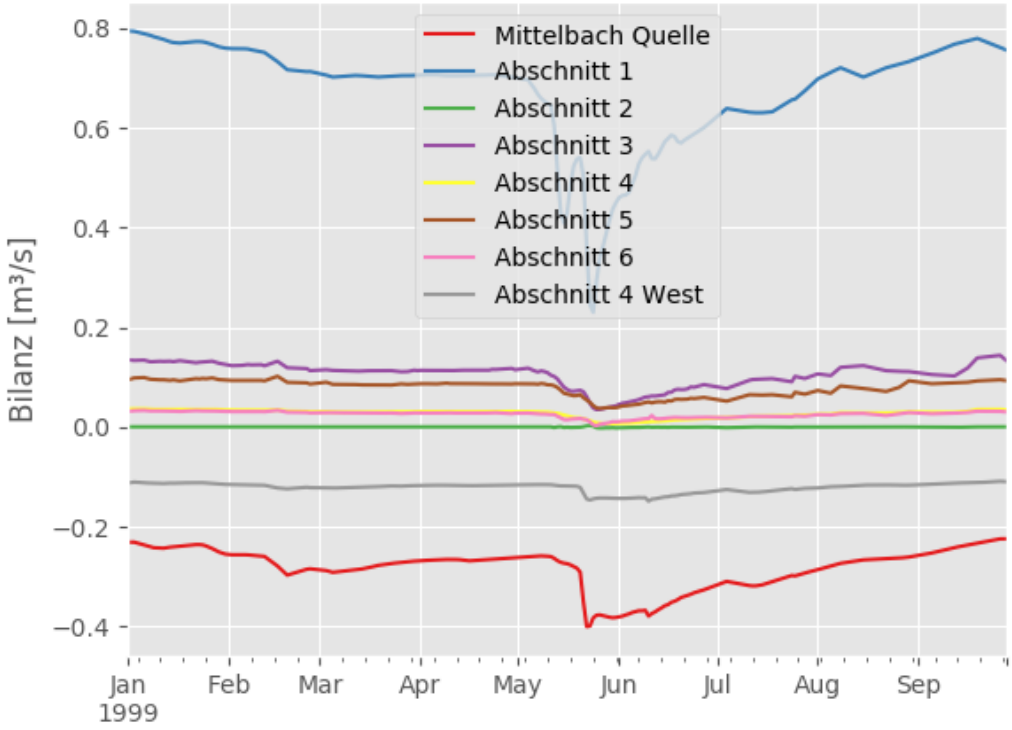

Abbildung 4.57: Bilanz der Gewässer im Stadtwald

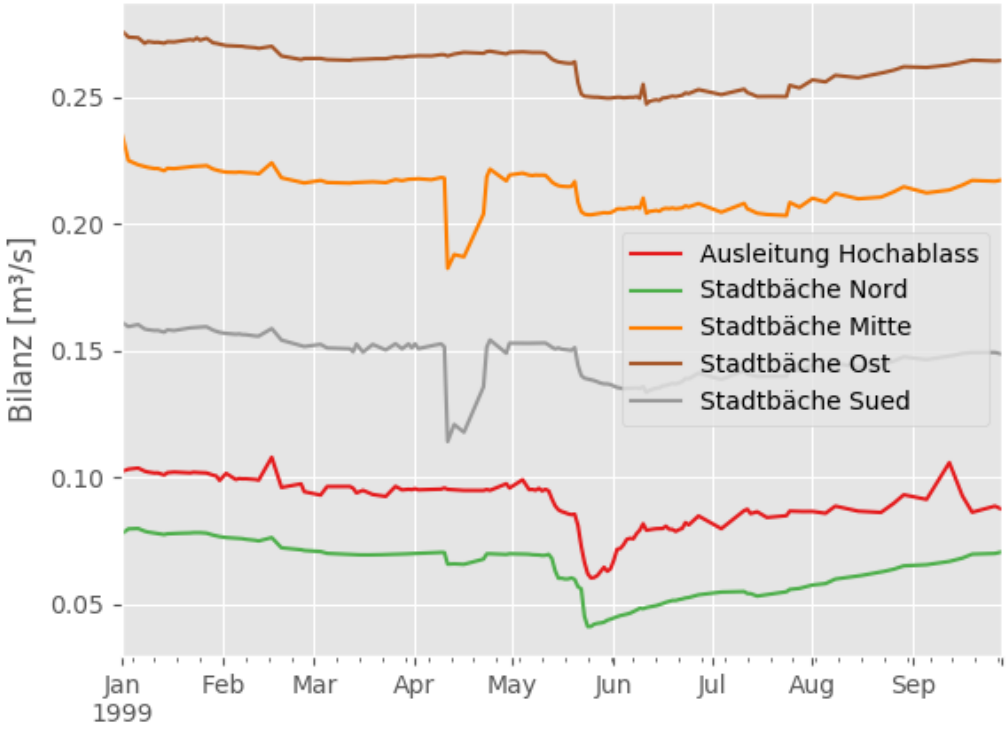

Abbildung 4.58: Bilanz der Stadtbäche

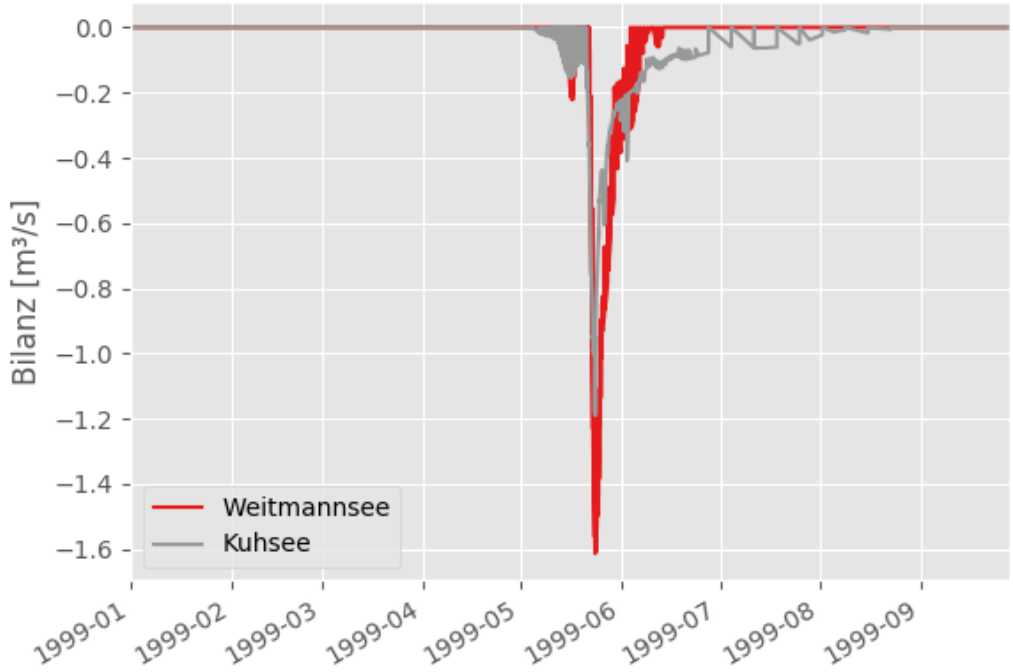

Abbildung 4.59: Bilanz des Kuh- und Weitmannsees (beide Seen sind mit einem Abfluss/Überfall versehen)

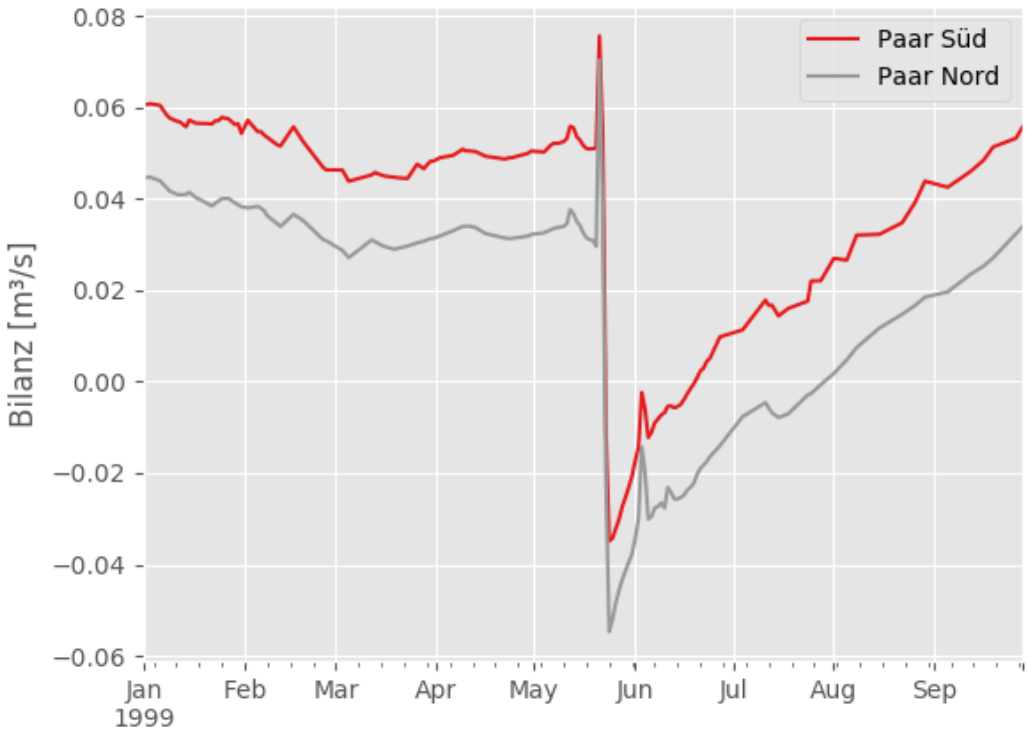

Abbildung 4.60: Bilanz der Paar (im Flussschlauch, Ausuferung wird gesondert betrachtet)

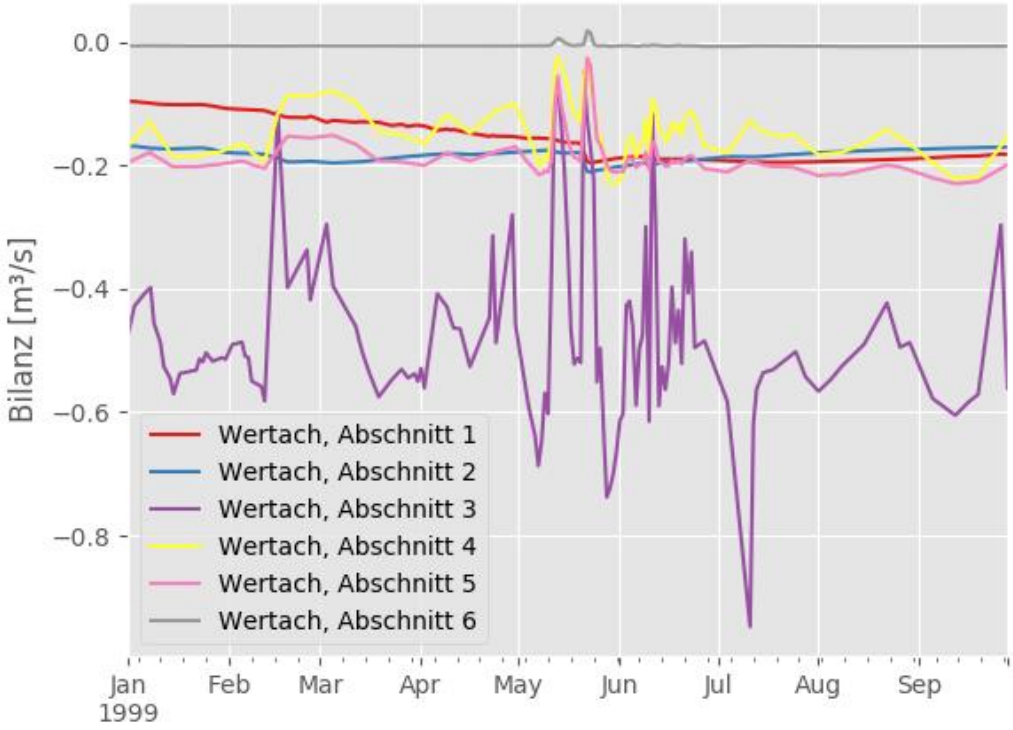

Abbildung 4.61: Bilanz der Wertach je Abschnitt (vgl. Kapitel 3.1.2.6).

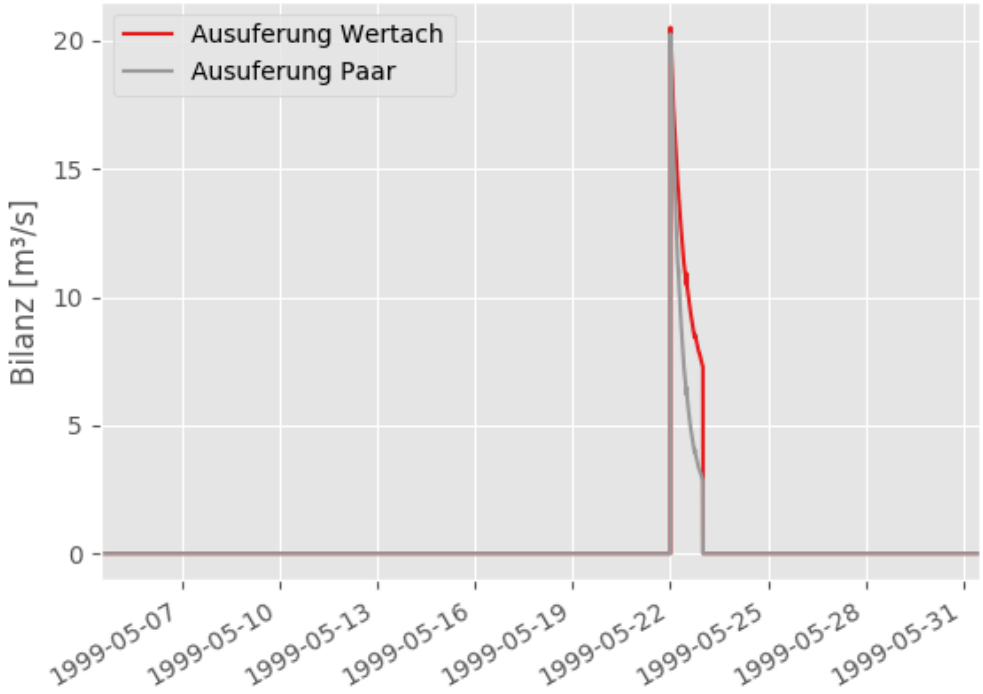

Abbildung 4.62: Bilanz der Ausuferungsflächen während des Pfingsthochwassers

4.5.3.3 Kanalisation

Aufgrund der Umsetzung der Kanalisation als Leakage-Randbedingung ist der Fremdwasserandrang in der Kanalisation abhängig vom Grundwasserstand. Abbildung 4.63 zeigt den „gemessenen“ und simulierten Fremdwasserandrang der Kanalisation. Der Fremdwasserandrang wird gut abgebildet, generell ist die Dynamik der Simulation etwas geringer.

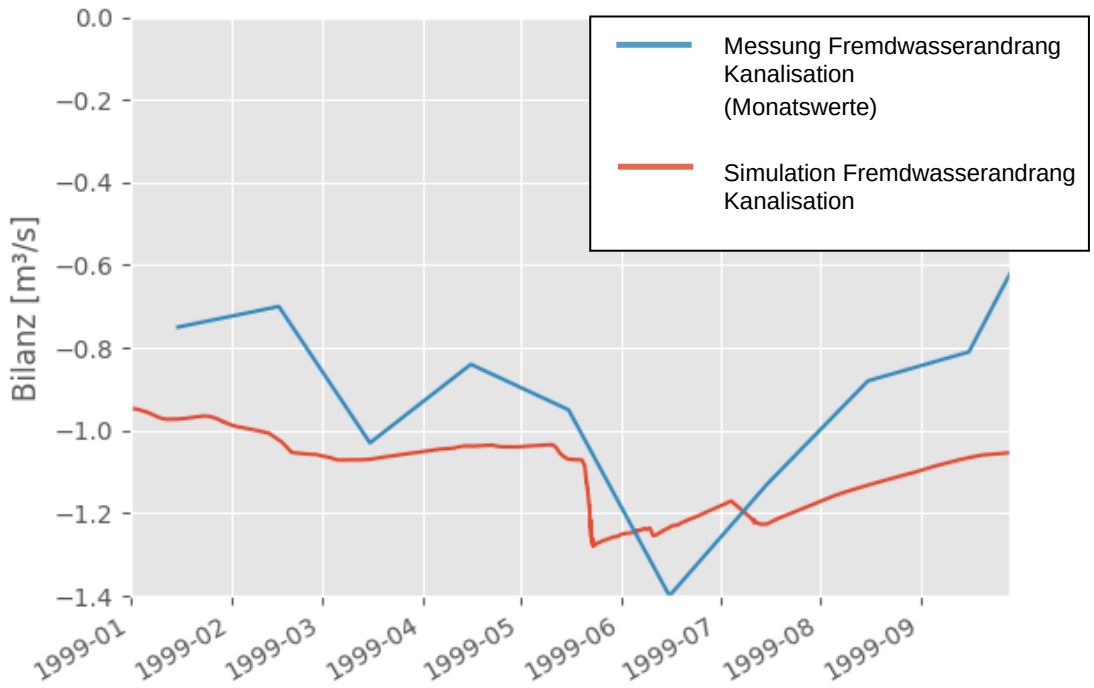

Abbildung 4.63: Bilanz der Kanalisation (Fremdwasserandrang)

4.5.4 Modellparameter

4.5.4.1 Durchlässigkeiten

Aus der instationären Kalibrierung ergibt sich keine Notwendigkeit Durchlässigkeiten anzupassen.

4.5.4.2 Leakage-Koeffizienten

Die stationär kalibrierten Leakage-Koeffizienten ergeben für die instationäre Kalibrierung bereits eine gute Anpassung. Die instationäre Anpassung konnte in folgenden Bereichen durch eine Anpassung von Leakage-Koeffizienten verbessert werden:

- Leakage-Koeffizient für die Exfiltration im Bereich der Augsburg Ost/Nord: 1E-3 m/s

- Leakage-Koeffizient für die Infiltration im Abschnitt oberstrom des Gersthofener Wehrs (bis ca. Fkm 41,6): 2,9E-6 m/s

Diese Anpassungen haben keine Relevanz für die stationär kalibrierten Leakage-Koeffizienten, da es in diesen Bereichen während des Hochwassers zu einem Wechsel der Austauschverhältnisse kam (z.B. von infiltrierenden zu exfiltrierenden Verhältnissen).

Nördlich und Südlich des Hochablass kam es durch die Hochwässer zu einer zeitweisen Erhöhung des Austauschs mit dem Lech. Die beste Übereinstimmung zwischen Simulation und Messungen wird erzielt, wenn in folgenden Bereichen temporär der Leakage-Koeffizient erhöht wird:

- Leakage-Koeffizient für die Infiltration im Abschnitt oberstrom des Hochablasses (bis ca. Fkm 49,5) (Zeitraum 21.05.1999 bis 26.05.1999): 1E-4 m/s
- Leakage-Koeffizient für die Exfiltration im Abschnitt unterstrom des Hochablasses (bis ca. Fkm 44,0) (Zeitraum 21.05.1999 bis 09.06.1999): 1E-6 m/s

Die veränderten Eigenschaften der Kanalisation (vgl. 4.3.1) wurden in Form eines erhöhten Leakage-Koeffizienten von 8.0E-7 m/s für den Innenstadtbereich nördlich des Stadtwalds berücksichtigt.

4.5.5 Speichernutzbarer Hohlraumanteil

Aus der instationären Kalibrierung ergibt sich keine Notwendigkeit den speichernutzbaren Hohlraumanteil anzupassen.

4.6 Anpassungsgüte

4.6.1 Auswertung der zeitlichen Dynamik

Die Technische Regel (DVGW, 2016) beschreibt zur Anpassungsgüte einer instationären Kalibrierung: „*Die Qualität einer instationären Kalibrierung zeichnet sich durch die Erfassung der natürlichen Dynamik und insbesondere der Unterschiede in der Dynamik aus. […] Eine gegenüber der stationären Kalibrierung verbesserte Nachbildung der Absoluthöhen ist von untergeordneter Bedeutung.“* Ein quantitativer Parameter wie die mittlere Abweichung einer stationären Kalibrierung wird nicht definiert.

Zur Analyse der zeitlichen Dynamik von hydrologischen Niederschlags-Abflussmodellen ist bei mehrjährigen hydrologischen Schwankungen unter anderem der *Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient* (NSME) gebräuchlich. Für Grundwassermodelle gibt es im technischen Regelwerk keine entsprechende Größe, so dass der NSME ersatzweise im Sinne einer Objektivierung angewendet wird. Der NSME-Koeffizient ergibt sich für Grundwasserstände zu:

$$NSME = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}(h_m^t - h_s^t)^2}{\sum_{t=1}^{T}\left(h_m^t - \overline{h_m}\right)^2}$$

Mit:

h_m^t Grundwasserstand (Messung) zum Zeitpunkt t.
h_s^t Grundwasserstand (Simulation) zum Zeitpunkt t.
$\overline{h_m}$ Mittlerer Grundwasserstand (Messung).

Aus der Literatur zur hydrologischen Modellierung lässt sich Folgendes ableiten:
Im Optimalfall (Messung und Simulation sind identisch) beträgt der NSME Koeffizient 1,00. Zwischen 0,5 und 1 ist er akzeptabel bis gut. Werte zwischen 0,5 und 0 deuten im Allgemeinen eher auf eine geringere aber akzeptable Anpassungsgüte hin. Negative Werte sind nahezu nicht akzeptabel.

Der NSME Koeffizient berücksichtigt jedoch auch konstant abweichende Absoluthöhen und nicht nur die Dynamik. Weicht eine gemessene Grundwasserstandsganglinie beispielsweise immer um 30 cm von einer simulierten ab, so wirkt sich dies negativ auf den NSME Koeffizient aus. Der NSME-Koeffizient lässt sich jedoch um eine konstante Abweichung der Absoluthöhen wie folgt bereinigen:

$$NSME' = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{T}\left(h_m^t - h_s^t + \left(\overline{h_s} - \overline{h_m}\right)\right)^2}{\sum_{t=1}^{T}\left(h_m^t - \overline{h_m}\right)^2}$$

Mit:

$\overline{h_s}$ Mittlerer Grundwasserstand (Simulation).

Anlage 6.2.13 und Anlage 6.2.14 zeigen eine Auswertung des NSME‘ einiger Grundwassermessstellen. Es wurden nur Datenreihen berücksichtigt, die im Zeitraum 1.3.1999 bis 30.9.1999 mindestens 100 Messwerte aufweisen und damit die natürliche Dynamik angemessen repräsentieren. Die Abbildung belegt die gute instationäre Anpassung. Im nördlichen Stadtwald ist die Anpassungsgüte etwas geringer, d.h. die Simulation ist etwas weniger dynamisch als die Messung. Teilweise ist dies

wahrscheinlich auf die Grundwasserentnahmen in diesem Bereich zurückzuführen: In diesem Bereich gibt es zwei Brunnengruppen für die nur summarische Entnahmewerte vorliegen, sodass es lokal durch die individuelle Brunnenfahrweise zu Modellabweichungen kommt.

4.6.2 Auswertung der absoluten Abweichung

Im Regelwerk DVGW (2016) wird kein quantitatives Kriterium zur Bewertung der Güte eines instationären Grundwassermodells definiert. Analog zum Vorgehen bei der stationären Kalibrierung kann die mittlere absolute Abweichung (DVGW, 2016) je Zeitschritt und als Mittelwert aller Messstellen innerhalb eines Bereichs zur Bewertung der Modellgüte (Bereiche s. Abbildung 3.4) herangezogen werden Als Orientierungswert zur Beurteilung der wird der Wert von 0,65 m verwendet (s. Kapitel 3.3, 0,65 m - Kriterium). An Messstellen der BEW, des TBA und teilweise des GKD liegen nur Messdaten mit etwa monatlicher Auflösung vor, daher erfolgt die Auswertung der Modellgüte nur für Zeitschritte die eine Mindestzahl an Messdaten im Betrachtungszeitraum (1.1.1999 bis 1.10.1999) aufweisen (mindestens 10).

Abbildung 4.64 zeigt die mittlere absolute Abweichung der Messstellen im Bereich Königsbrunn/Haunstetten. Das 0,65 m - Kriterium für die Anpassung wird weitgehend eingehalten.

Die mittlere absolute Abweichung für Messstellen im Stadtwald und im Bereich zwischen Lech und Paar ist in Abbildung 4.65 dargestellt. Die Abweichung liegt deutlich unter 0,65 m. Auch während des Pfingsthochwassers kommt es zu keinen deutlichen Abweichungen.

Auch in den Bereichen Innenstadt, Augsburg Ost und nördliches Lechtal wird das 0,65 m - Kriterium stets eingehalten (vgl. Abbildung 4.66). Im Wertachtal liegen Messstellen der BEW und des TBA, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten Messdaten liefern. Daher wurde das Wertachtal zusätzlich nach Betreibern aufgeteilt. Im nördlichen Bereich (Messstellen des TBA) wird das 0,65 m - Kriterium eingehalten, an Messstellen der BEW liegt die Anpassung über 0,65 m. Diese Überschreitung ist wegen der Entfernung zum Aussagegebiet (südlicher Bereich des Wertachtals) ohne Relevanz.

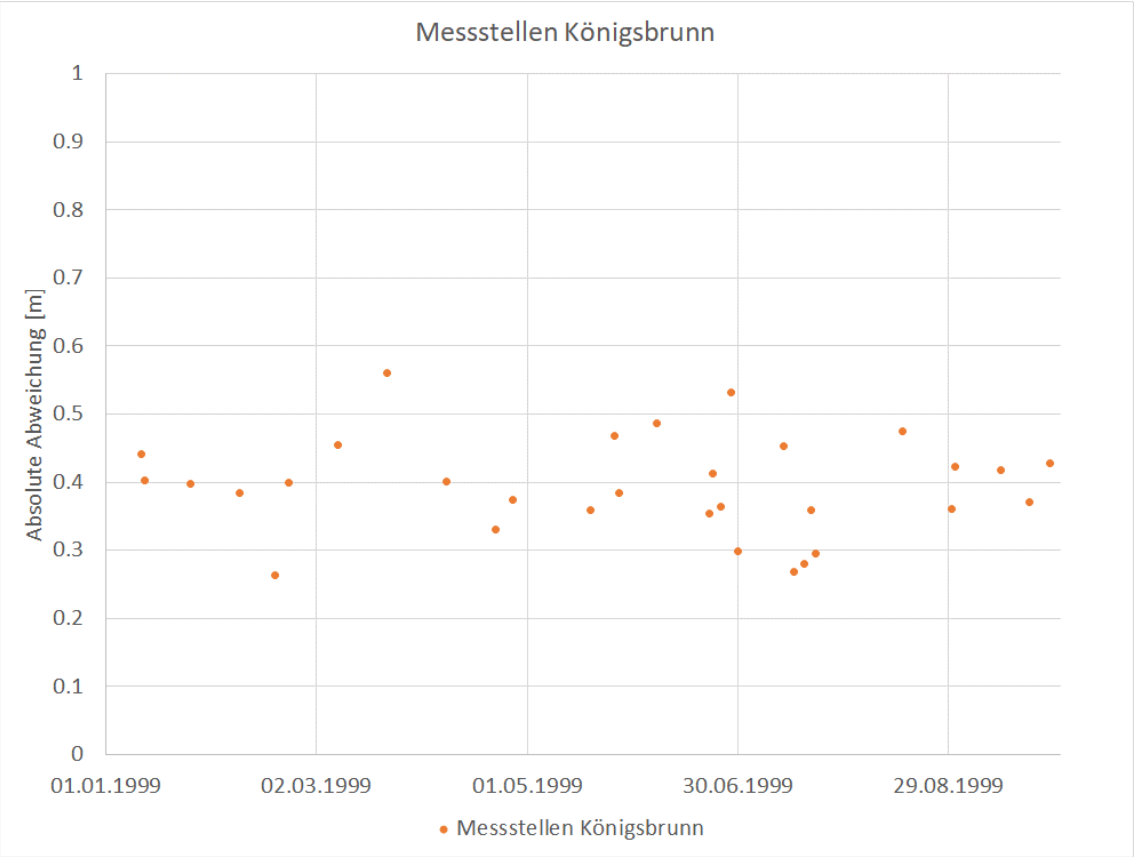

Abbildung 4.64: Absolute Abweichung an Messstellen in Königsbrunn/Haunstetten

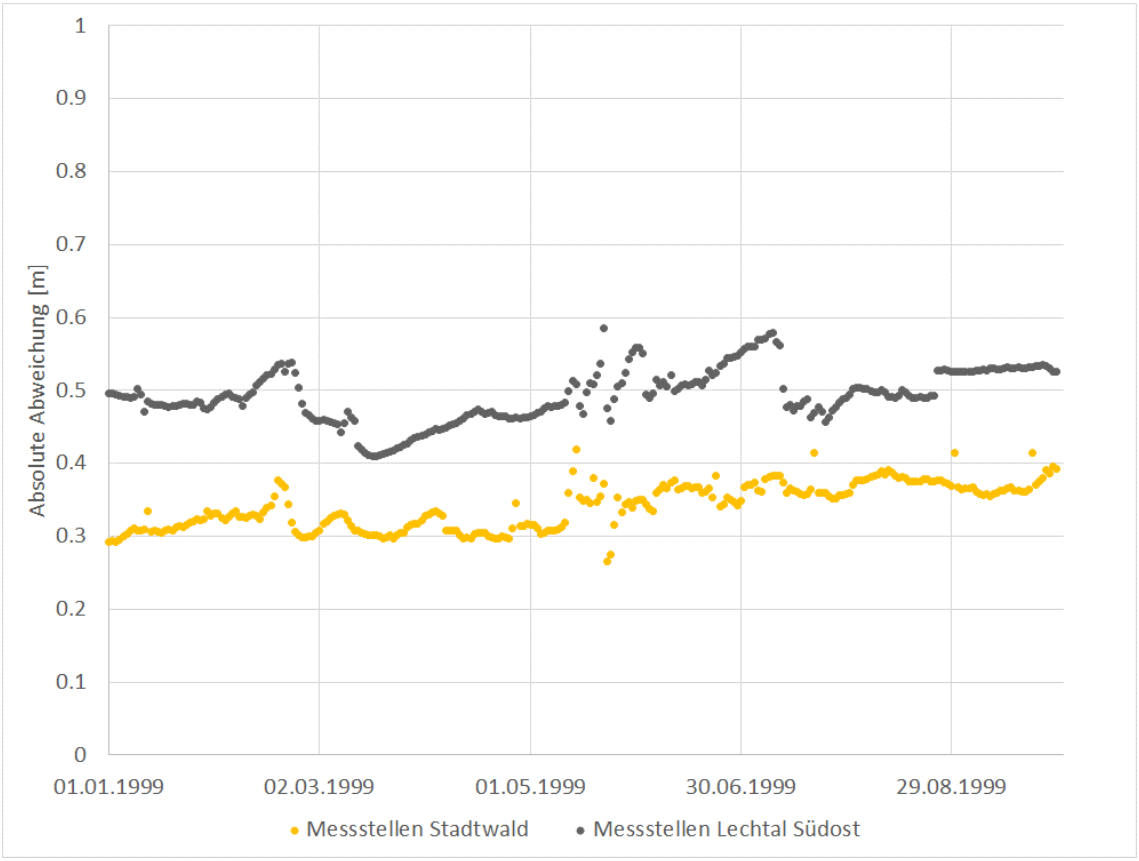

Abbildung 4.65: Absolute Abweichung an Messstellen in Stadtwald und im Bereich zwischen Lech und Paar

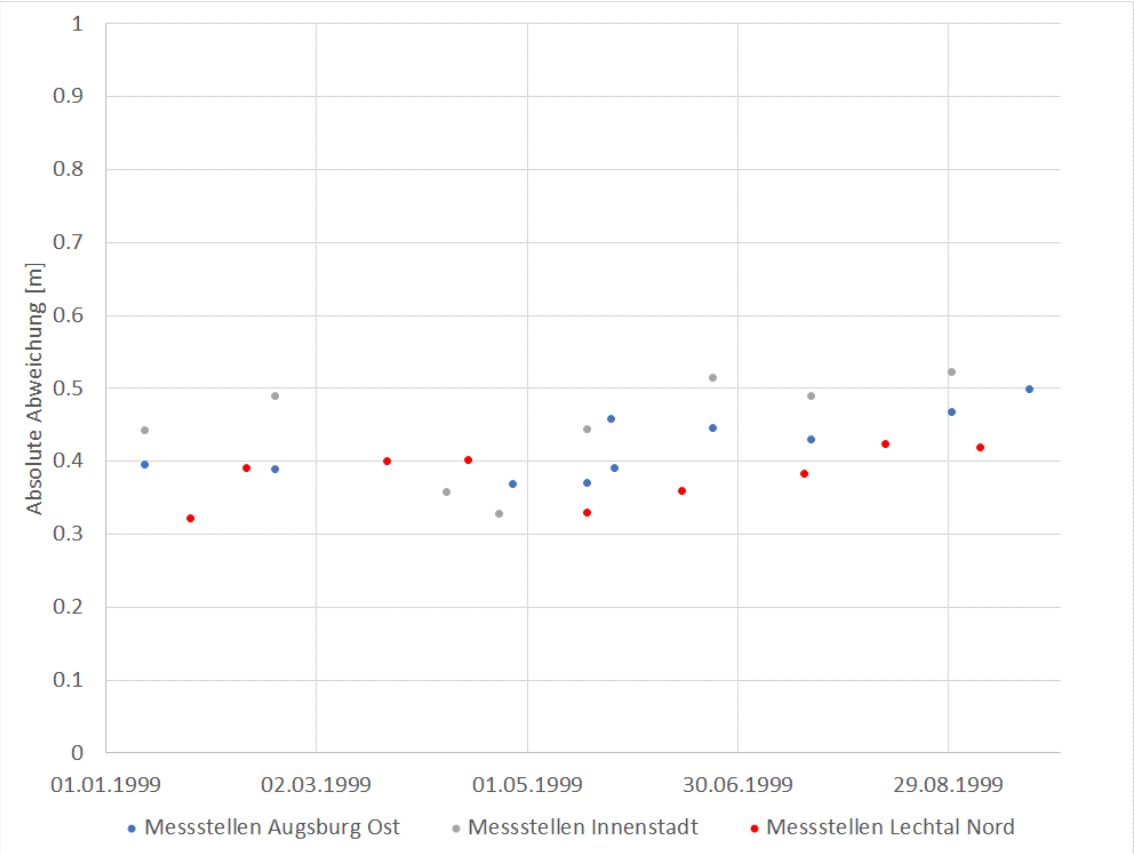

Abbildung 4.66: Absolute Abweichung an Messstellen im Innenstadtbereich, im Augsburger Osten sowie im nördlichen Lechtal

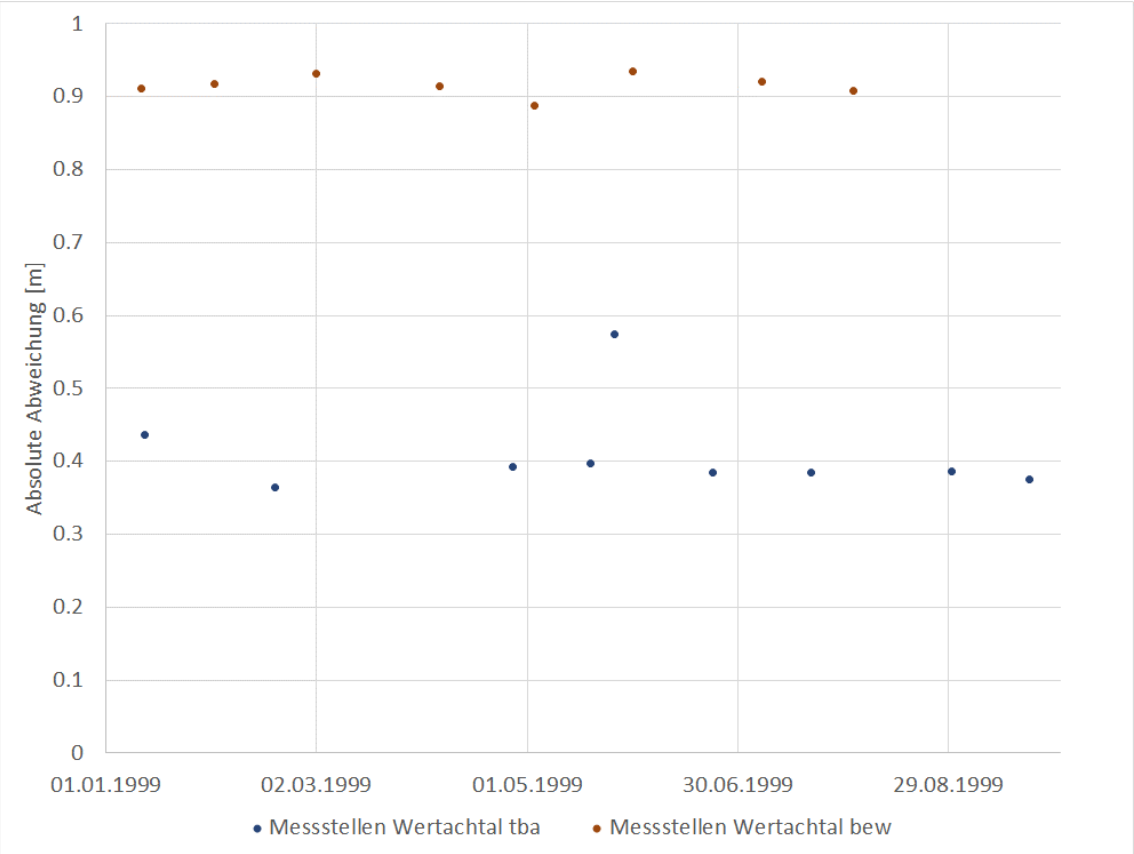

Abbildung 4.67: Absolute Abweichung an Messstellen im Wertachtal

Insgesamt zeigt die instationäre Kalibrierung, dass das Modell die vorherrschenden Dynamiken und insbesondere die im Modellgebiet auftretenden Unterschiede nachbildet. Auch die Abweichungen in den Absoluthöhen zwischen Messung und Rechnung bewegen sich in üblichen Grenzen.

5 Modelltest

5.1 Übersicht

Das Grundwassermodell wurde stationär auf Grundlage des Mittelwasser 2010 (MW2010) und instationär basierend auf dem Zeitraum um das Hochwasser 1999 (HW1999) kalibriert. Als weiterer Schritt ist das Grundwassermodell im Rahmen eines Modelltests (vgl. Wichtige Begriffe) zu überprüfen.

5.2 Betrachtungszeitraum und Startbedingung

Der Modelltest erfolgt für den Zeitraum um das Hochwasser im August 2005. Dieses Hochwasser zählt neben dem HW1999 zu den größten nach dem Bau der Staustufen.

Der Simulationszeitraum beginnt am 23.7.2005 und endet im Anschluss an die Bachablässe im Oktober 2005. Dieser Zeitraum umfasst folgende hydrologische Ereignisse mit großer Relevanz für das Grundwasser:

- HW2005: 23./24.8.2005 (s. Abbildung 5.1)
- Lochbach-Ablass: 17.09 bis 2.10.2005 (HydroConsult, 2005-2).
- Ablass der Stadtbäche/ Reduzierung des Wasserspiegels am Hochablass: 7.10.2005 – 22.10.2005 (dieser Zeitraum wurde aus der Ganglinie der SWA_1807 abgeleitet, da keine Wasserspiegelganglinie des Lechs am Hochablass vorliegt. Die Grundwassermessstelle ist jedoch in Zeiträumen an denen Daten vorliegen nahezu identisch zum Wasserstand des Lechs, Ganglinie s. Abbildung 5.2, Lage der Messstelle s. Anlage 6.2.1)

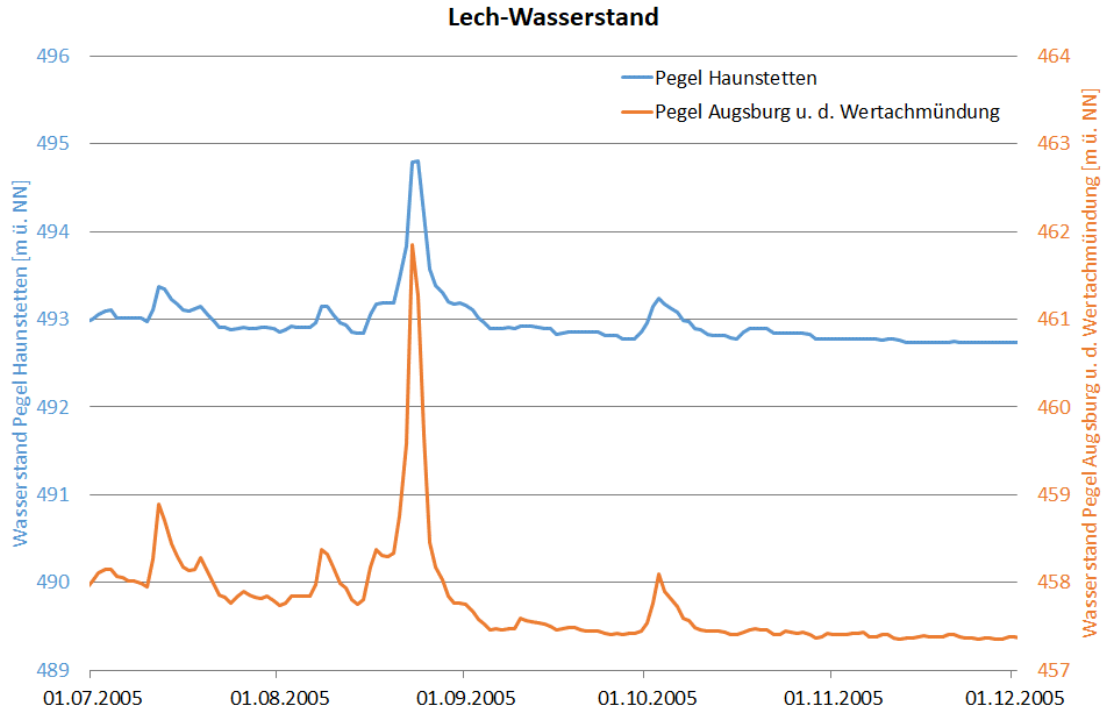

Abbildung 5.1:Wasserstand des Lechs am Pegel Haunstetten und am Pegel unterhalb der Wertachmündung

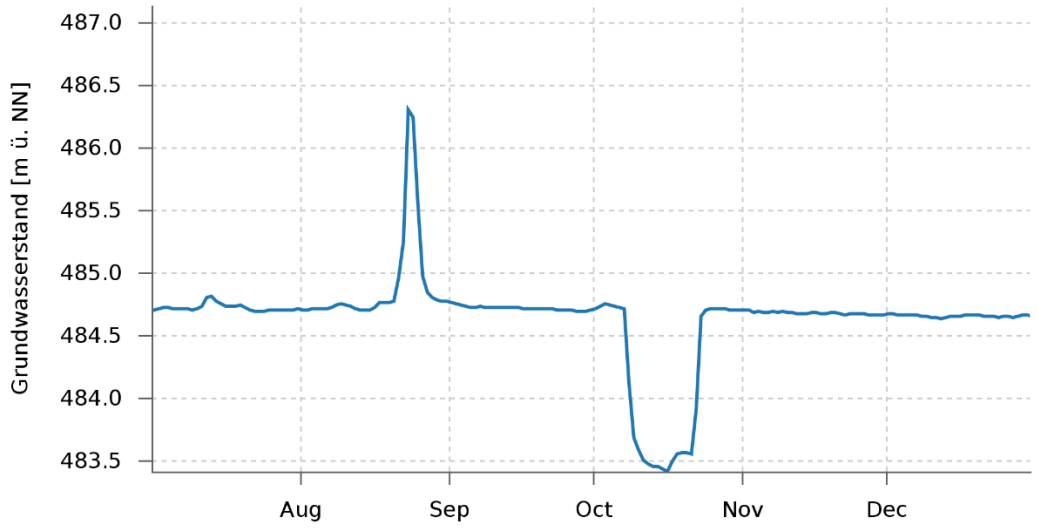

Abbildung 5.2:Ganglinie des Grundwasserstands an der Messstelle SWA_1807

5.3 Randbedingungen

5.3.1 Übersicht

Die Randbedingungen für das HW2005 wurden weitestgehend analog zu den Randbedingungen des HW1999 aufgebaut (s. Kapitel 2.6), dies umfasst:

- Äußere Randbedingungen (Festpotentialränder, Zuflussränder und NoFlow-Ränder)
- Innere Randbedingungen (Grundwasserneubildung, Oberirdische Fließgewässer, Austritte bei ins Tertiär eingeschnittenem Lech, Nutz- und Brauchwasserentnahmen, Grundwasserhaltungen und die Kanalisation)

Die folgenden Kapitel beschreiben Randbedingungen an denen von der Vorgehensweise abgewichen wurde.

5.3.2 Paar

An der Paar liegt für den Zeitraum um das HW2005 keine instationäre Wasserspiegel-Simulation vor, daher wurde der instationäre Wasserspiegel der Paar aus stationären Wasserspiegeln generiert (vgl. Anhang 3).

5.3.3 Überflutungsflächen Paar und Wertach

Der Abfluss der Paar beträgt während des Hochwassers 2005 bis zu 15m³/s und liegt damit deutlich unter dem Abfluss eines HQ5. Es wird daher davon ausgegangen, dass die Paar im Betrachtungszeitraum nicht ausufert.

Auch an der Wertach liegt das Hochwasser am 23.8.2005 weit unterhalb eines HQ100 (Pegel Türkheim: 289m³/s). Daher werden auch an der Wertach keine Ausuferungsflächen angenommen.

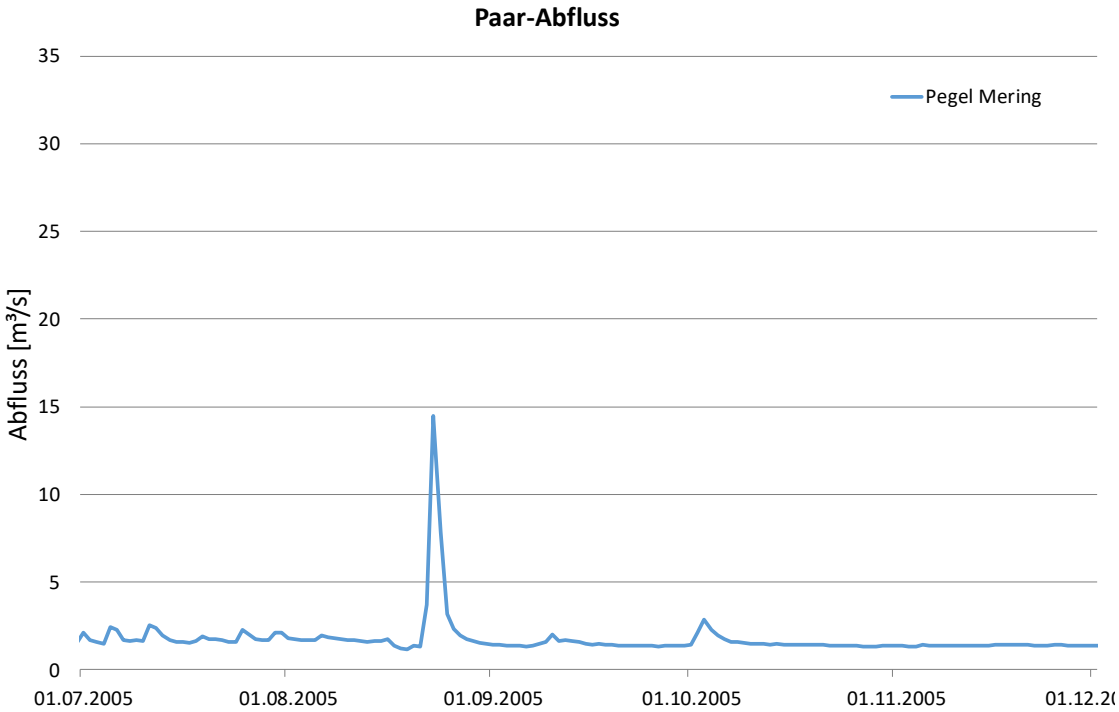

Abbildung 5.3:Abfluss der Paar am Pegel Mering

5.3.4 Lochbach-Ablass

Zusätzlich zu den üblichen Unterhaltmaßnahmen fanden im Lochbach im Zeitraum 17.09 bis 2.10.2005 umfangreichere Baumaßnahmen statt (HydroConsult, 2005-2). In diesem Zeitraum wurden Bereiche des Lochbachs trockengelegt (oberstrom des Hohen Wehrs östlich von Königsbrunn). Der Lochbach führt während der Baumaßnahme eine Restwassermenge von etwa 2 m³/s (s. Abbildung 5.4). Es wird davon ausgegangen, dass die Gewässer Aumühlbach und Neuer Graben noch mit Wasser versorgt werden. Unterstrom der Baumaßnahme infiltriert der Lochbach während des Zeitraums kein Wasser (modelltechnisch wird lediglich Exfiltration zugelassen). Unterstromige Ausleitungen von Bächen in den Stadtwald werden ebenfalls deaktiviert. Konkrete Angaben oder durch Messwerte belegte Abflussverteilungen des stark verzweigten Gewässernetzes liegen nicht vor.

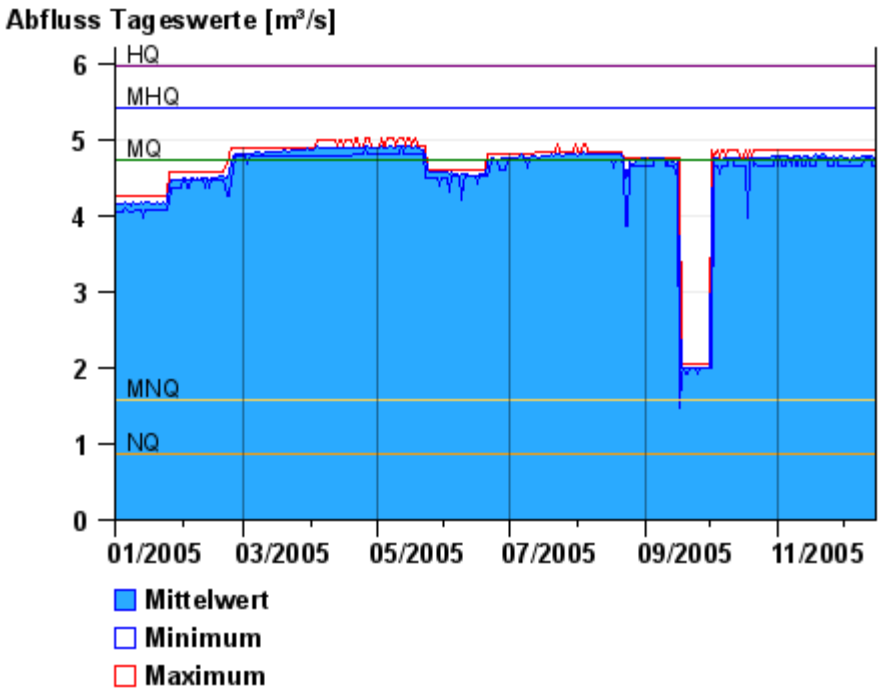

Abbildung 5.4:Abfluss an der Ausleitung des Lochbachs aus dem Lech (Pegel Unterbergen) (LfU, 2017)

5.3.5 Reduzierung des Wasserspiegels am Hochablass und Ablass der Stadtbäche

Im Rahmen der Ablässe der Stadtbäche, die üblicherweise im Herbst stattfinden, werden folgende Gewässer abgelassen bzw. auf eine Restwassermenge im Gewässer abgesenkt (HydroConsult, 2012):

- Hauptstadtbach
- Neubach
- Herrenbach
- Proviantbach
- Fichtelbach
- Hanreibach
- Kaufbach

- Schäfflerbach
- Sparrenlech
- Schwallech
- Mittlerer Lech
- Hinterer Lech
- Stadtbach

Die Absenkung in den genannten Gewässern erfolgt durch eine Reduzierung des Wasserstands im Staubereich des Hochablasses. Abbildung 5.2 zeigt die Ganglinie des Grundwasserstands an der Messstelle SWA-1807 die stark an den Wasserspiegel des Lechs gekoppelt ist. Aus der Abbildung geht hervor, dass die Reduzierung des Wasserstands am Hochablass und der damit verbundene Ablass der Stadtbäche im Zeitraum zwischen dem 7.10.2005 und 22.10.2005 stattfand.

Im Grundwassermodell wird in diesem Zeitraum der Wasserspiegel des Lechs um etwa 1,25 m abgesenkt. Die Stadtbäche werden ab der Ausleitung des Hochablasses bis zur Mündung in Wertach/Lech temporär deaktiviert. Der Lochbach führt in diesem Zeitraum weiterhin Wasser.

5.3.6 GW-Sammler

Im Jahr 2005 waren die GW-Sammler Schleifenstraße und Prinzstraße bereits in Betrieb, der GW-Sammler Reichenbergerstraße ist erst ab ca. 2008 in Betrieb.

5.4 Vergleichsgrößen

5.4.1 GW-Sammler

An den GW-Sammlern liegen die in Kapitel 2.5.2.6 dokumentierten Entnahmeraten als Vergleichsgrößen vor.

5.4.2 Kanalisation

Die monatlichen Fremdwassermengen in der Kanalisation nach Abschätzungen des Tiefbauamts (TBA, 2017) sind in Abbildung 5.5 dargestellt. Die Fremdwassermengen sind zu Beginn des Betrachtungszeitraums (Juli) eher hoch (680 l/s) und sinken bis Ende des Simulationszeitraums auf etwas über 200 l/s stark ab. Im Mittel beträgt die

Fremdwasserrate im Betrachtungszeitraum etwa 455 l/s und liegt damit über der Fremdwasserrate des MW2010 (280 l/s).

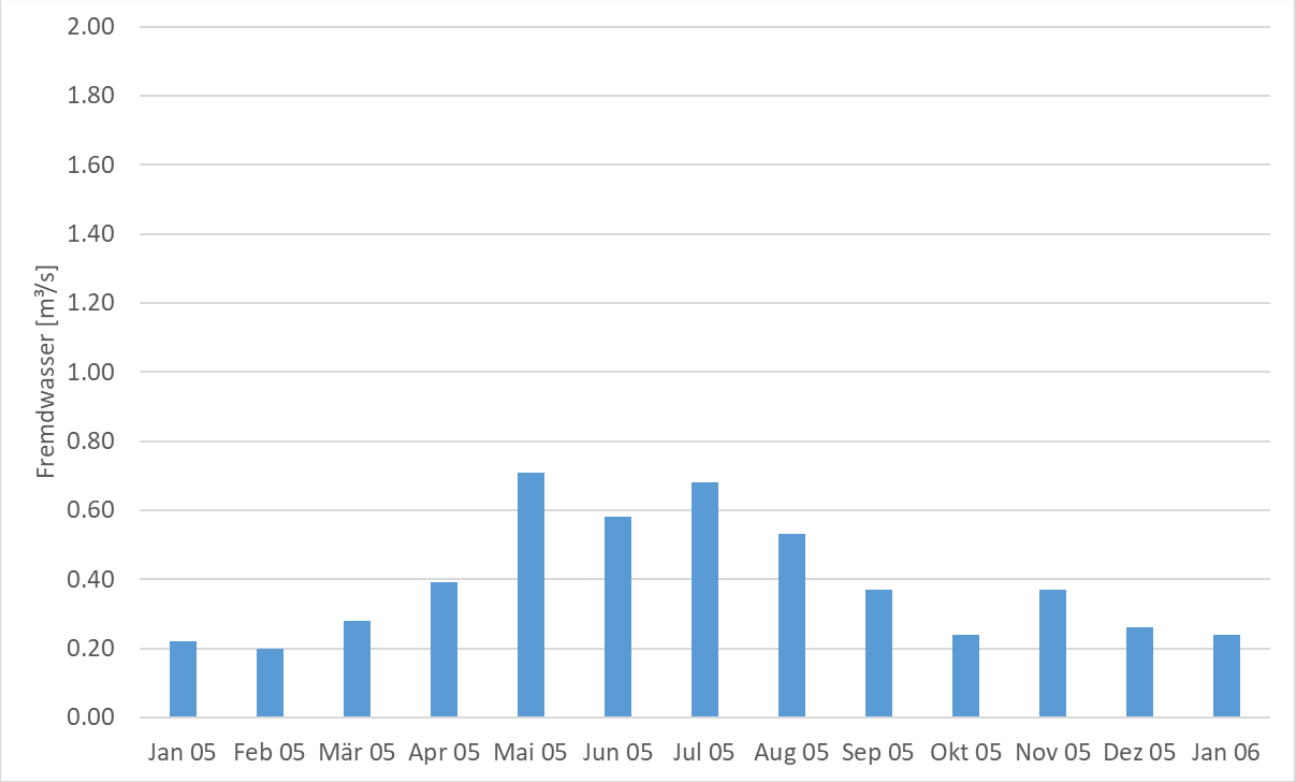

Abbildung 5.5:Fremdwasser der Kanalisation Augsburg für das Jahr 2005 (TBA, 2017)

5.5 Ergebnisse

5.5.1 Berechnete Grundwasserganglinien

5.5.1.1 Bereich Königsbrunn

Die Grundwasserstände im Bereich der Stadt Königsbrunn werden, wie in den folgenden Abbildungen (Abbildung 5.6 und Abbildung 5.9) gezeigt, sehr gut abgebildet. Es werden Messstellen der SWA ausgewertet, da an diesen Messstellen eine höhere zeitliche Messdichte vorliegt. Messdaten zur Messstelle Kö1 liegen nicht vor, stattdessen werden die Messstellen SWA_8033 und swa_8067 dargestellt. Die beiden letzteren Messstellen zeigen neben der Hochwasserspitze in Modell und Messung ein deutliches Absinken der Grundwasserstände während des Lochbach-Ablass.

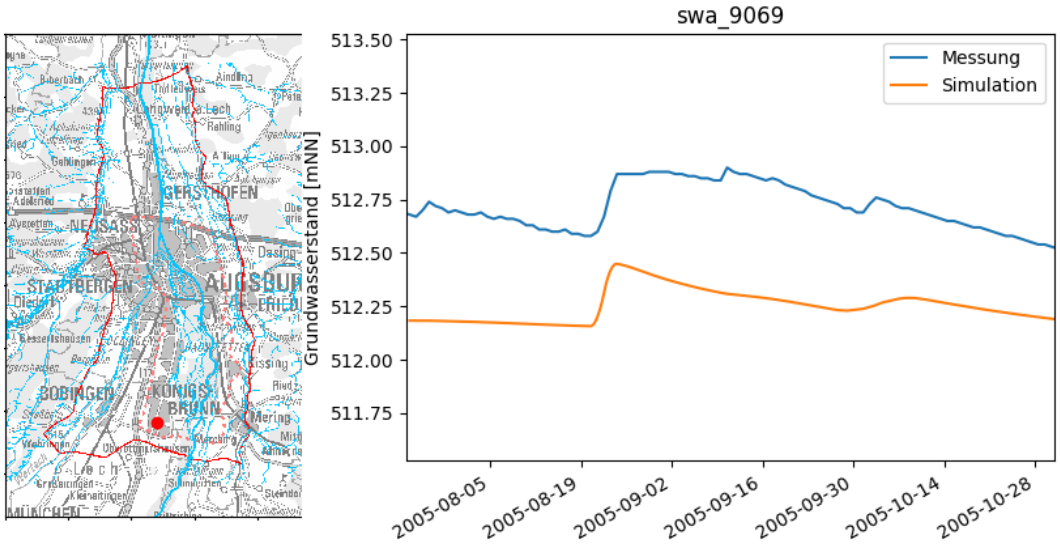

Abbildung 5.6: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_9069

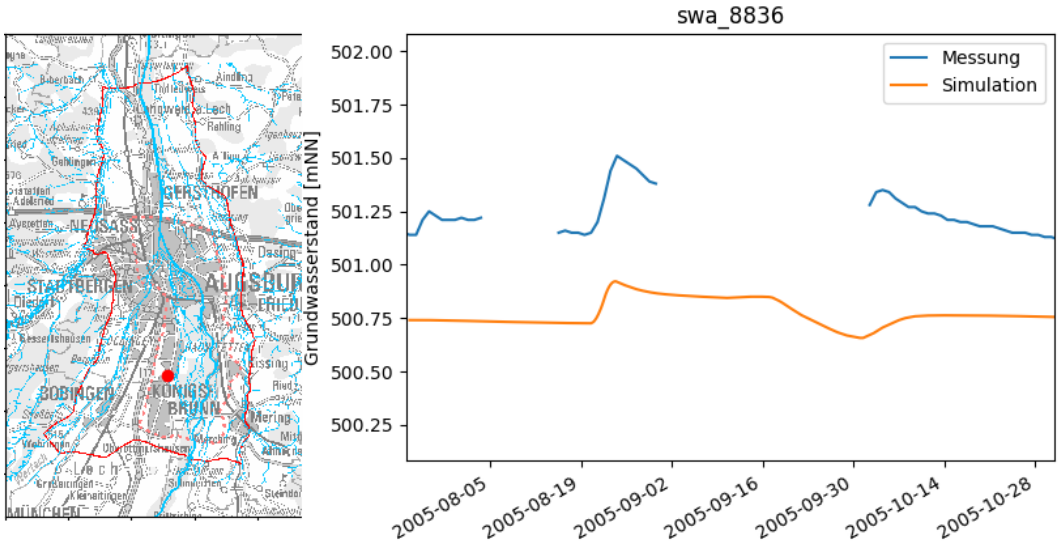

Abbildung 5.7: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8836

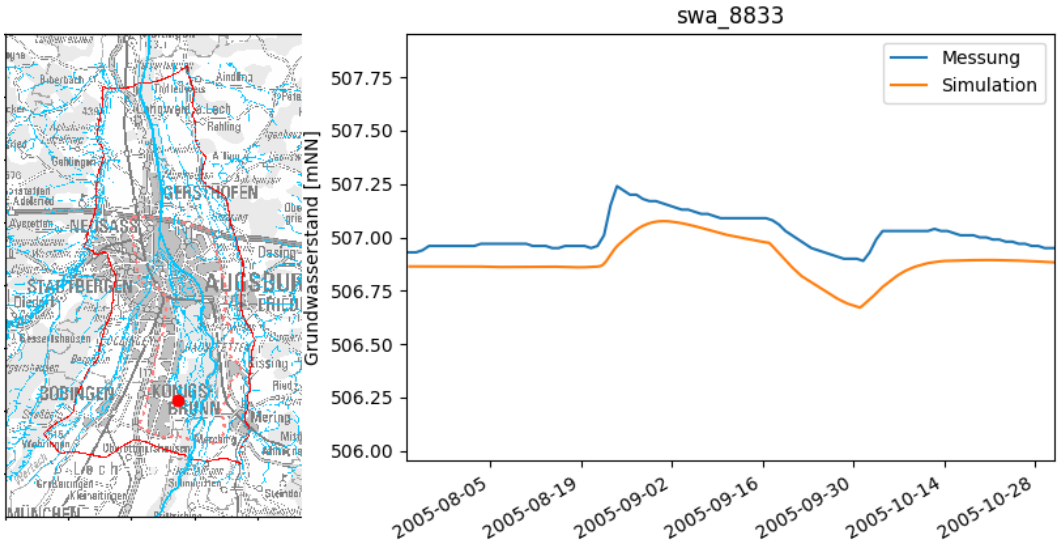

Abbildung 5.8: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8833

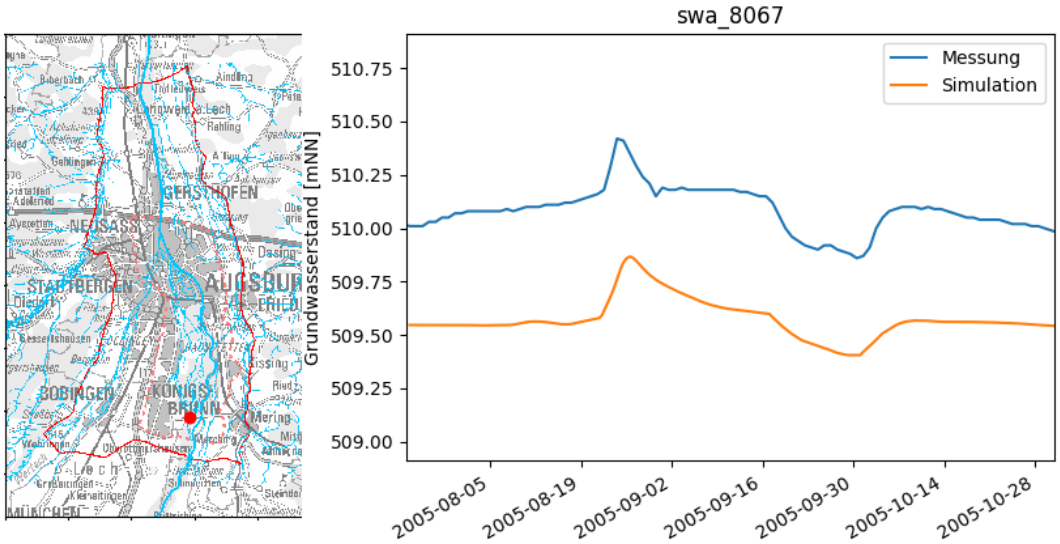

Abbildung 5.9: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8067

5.5.1.2 Bereich Stadtwald

Der Stadtwald lässt sich in drei Teilbereiche (Süd, Mitte, Nord) untergliedern. In allen drei Teilbereichen ist die Anpassung gut (s. Abbildung 5.10 bis Abbildung 5.17), an mehreren Messstellen (vgl. Abbildung 5.15) ist des Weiteren eine starke Beeinflussung durch Grundwasserentnahmen der Stadtwerke zu erkennen. Lech-nahe Messstellen zeigen in Simulation und Messung eine höhere Dynamik als Lech-ferne Messstellen. Weiterhin nimmt die Dynamik von Süden nach Norden ab. An einigen Messstellen ist der Grundwasserhöchststand während des Hochwasserereignisses etwas verspätet (z.B. Messstellen swa_8834 und swa_2002), während an anderen Messstellen der Zeitpunkt des berechneten maximalen Grundwasserstands nahezu identisch zur Messung ist.

Bereichsweise wird die Dynamik an Messstellen im Stadtwald etwas unterschätzt. Grund hierfür können lokal verstärkte Neubildungsprozesse oder eine Überschätzung der drainierenden Wirkung einzelner Bäche im Stadtwald sein.

Im Gegensatz zu den Simulationen des HW1999 wird der Hochwasserpeak an Messstellen nahe dem Hochablass etwas überschätzt. Dies deutet darauf hin, dass die temporäre Erhöhung des Leakage-Koeffizienten für das HW2005 etwas zu hoch ist (hier wurde der identische Wert des HW1999 angesetzt).

Lochbach-nahe Messstellen im südlichen Bereich bilden das Absinken der Grundwasserstände während des Lochbach-Ablasses (17.09 bis 2.10.2005) gut ab (s. Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12), während im nördlichen Bereich des Stadtwalds eine etwas zu geringe Reaktion im Grundwassermodell zu beobachten ist. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass keine Messdaten und nur plausible Annahmen zur Wasserführung der Bäche im Stadtwald während des Lochbach-Ablass vorliegen.

Während der Reduzierung des Wasserspiegels am Hochablass (7.10.2005 – 22.10.2005) wird der Wasserstand am Hochablass auf etwa 483,5 m ü. NN abgesenkt. Die Messstellen SWA_1047, SWA_1002 und SWA_1005 zeigen deutliche Reaktionen auf dieses Ereignis. Lech-nah ist das Absinken des Grundwasserstands etwas unterschätzt, während das Absinken an Lech-fernen Messstellen sehr gut getroffen wird.

Die Messstelle SWA_1839 (s. Abbildung 5.18) zeigt einige im Modell nicht berücksichtigte Prozesse (falls es sich nicht um Messfehler handelt, z.B. durch einen veränderte Absoluthöhe der Messstelle oder Baumaßnahmen an der Ausleitungsstrecke), so fällt während des Hochwasserereignis der Grundwasserstand ab. Weiterhin deuten die Messdaten darauf hin, dass die Wasserführung an der

Ausleitung des Hochablasses während des Lochbach-Ablass verändert wurde, weil auch weit entfernte Messstellen auf den Ablass reagieren. Während des Ablass der Stadtbäche (7.10.2005 – 22.10.2005) fällt der Grundwasserstand in der Nähe des Hochablasses um mehr als 1,5 m ab.

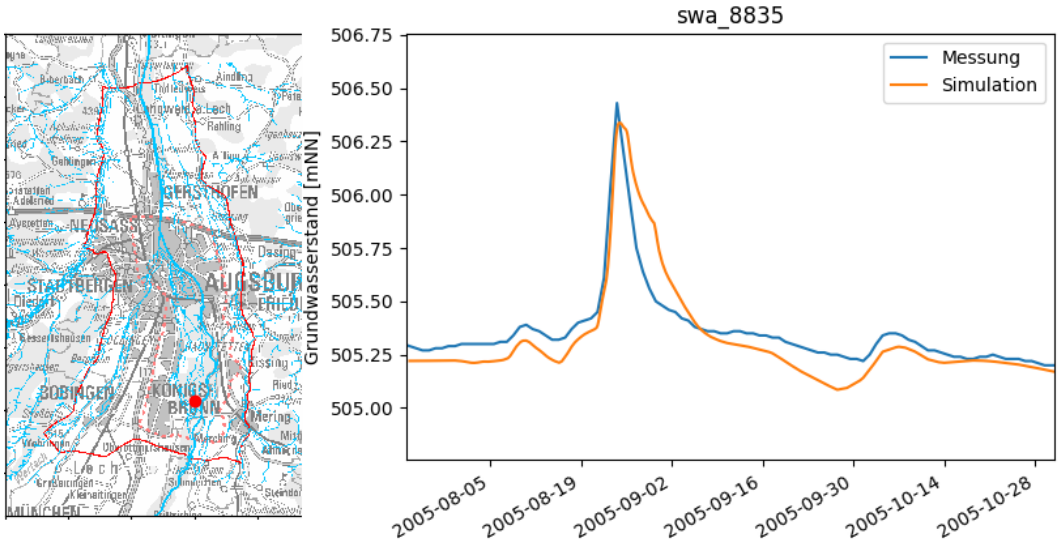

Abbildung 5.10: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8835 (südlicher Stadtwald, Lech-nah)

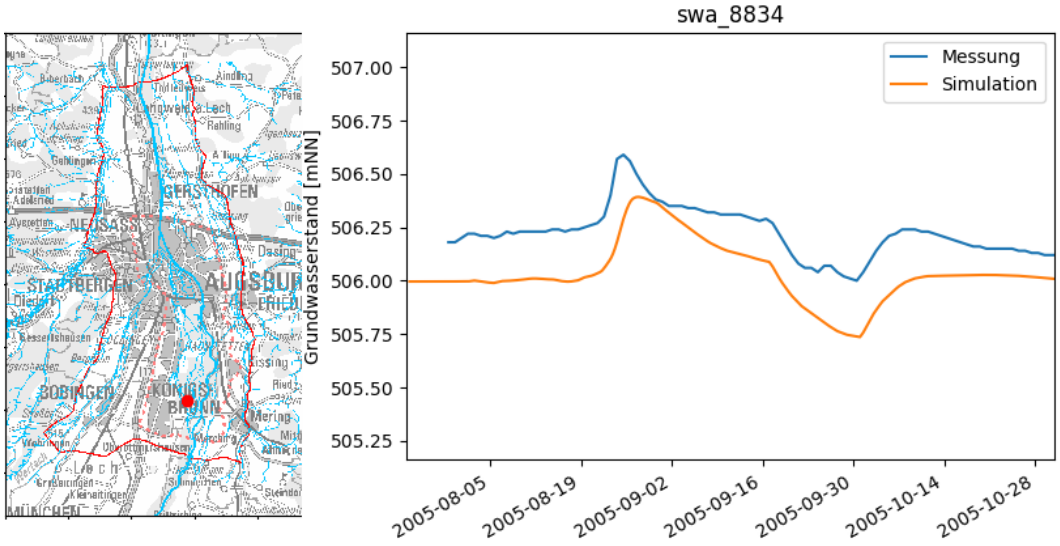

Abbildung 5.11: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_8834 (südlicher Stadtwald, Lech-fern)

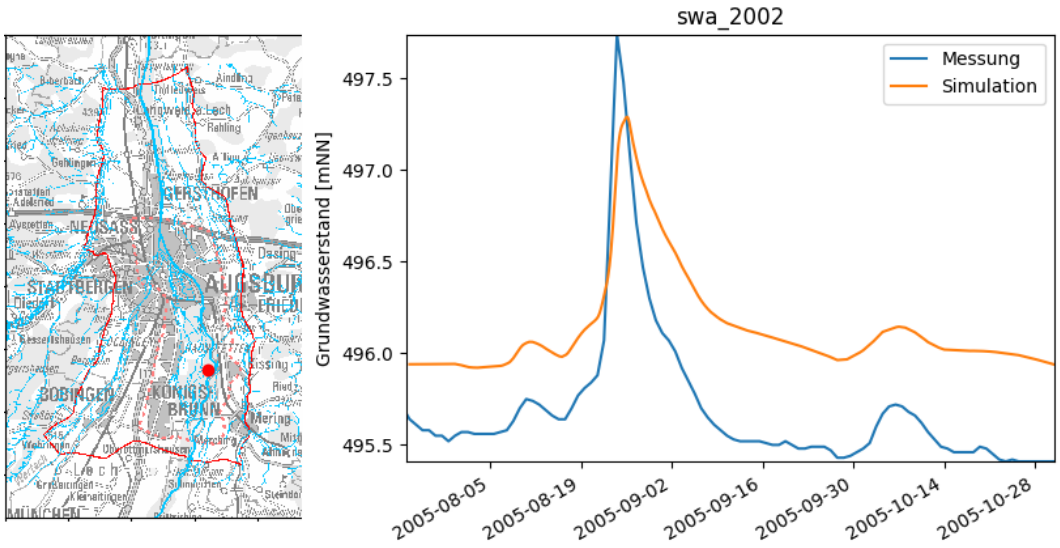

Abbildung 5.12: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_2002 (mittlerer Stadtwald, Lech-nah)

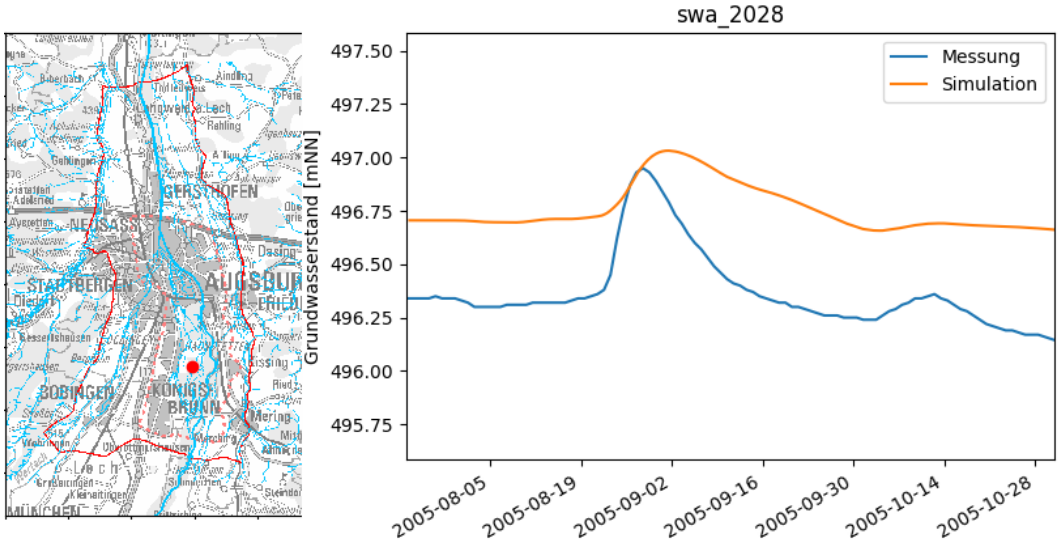

Abbildung 5.13: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_2028 (mittlerer Stadtwald, Lech-fern)

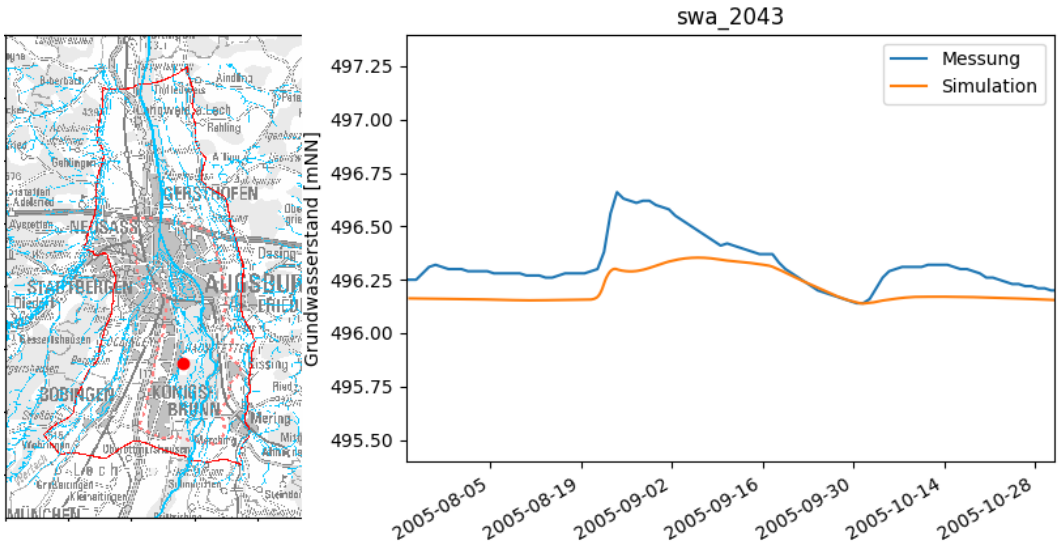

Abbildung 5.14: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_2043 (mittlerer Stadtwald, Lech-fern)

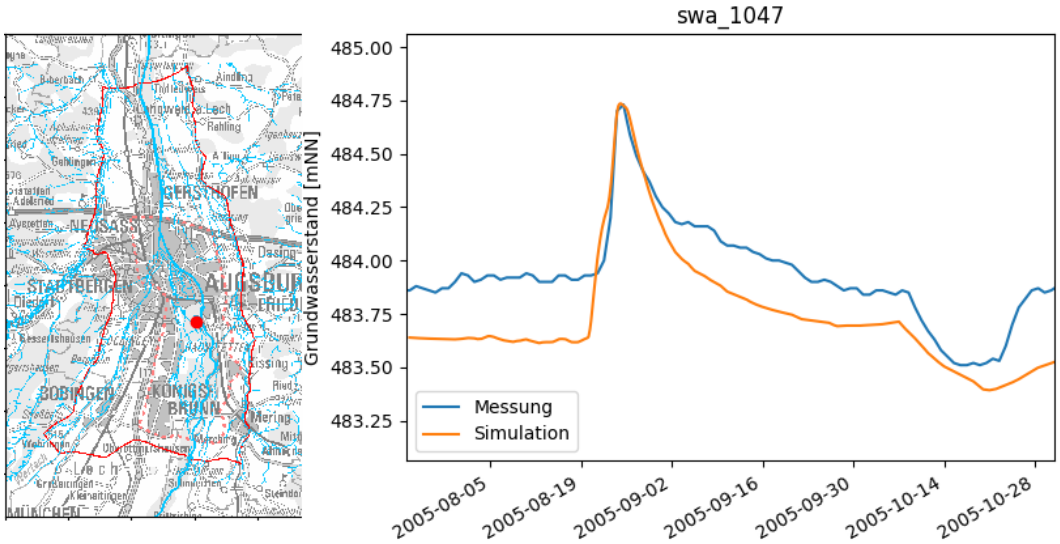

Abbildung 5.15: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_1047 (nördlicher Stadtwald, Lech-nah)

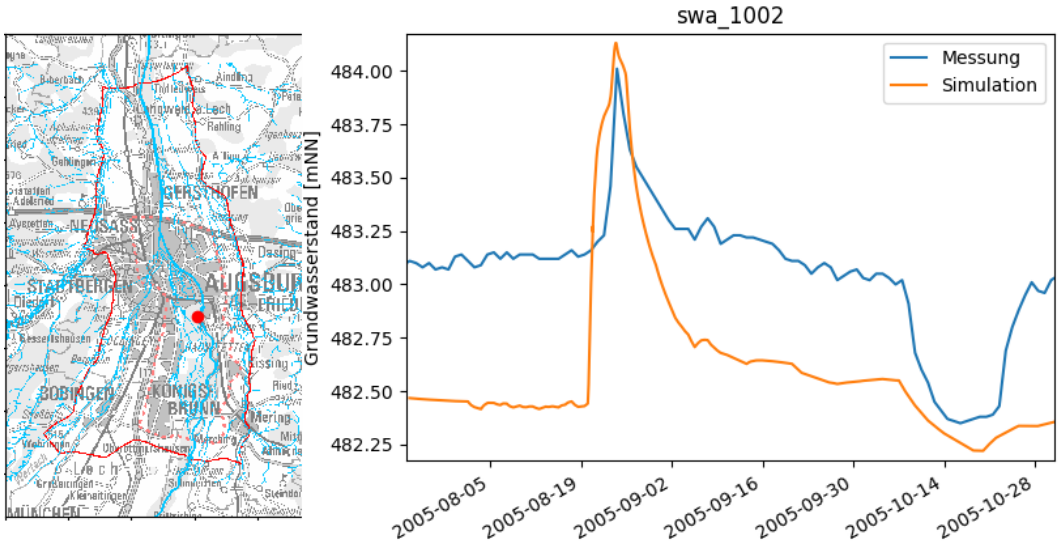

Abbildung 5.16: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_1002 (nördlicher Stadtwald, Lech-nah)

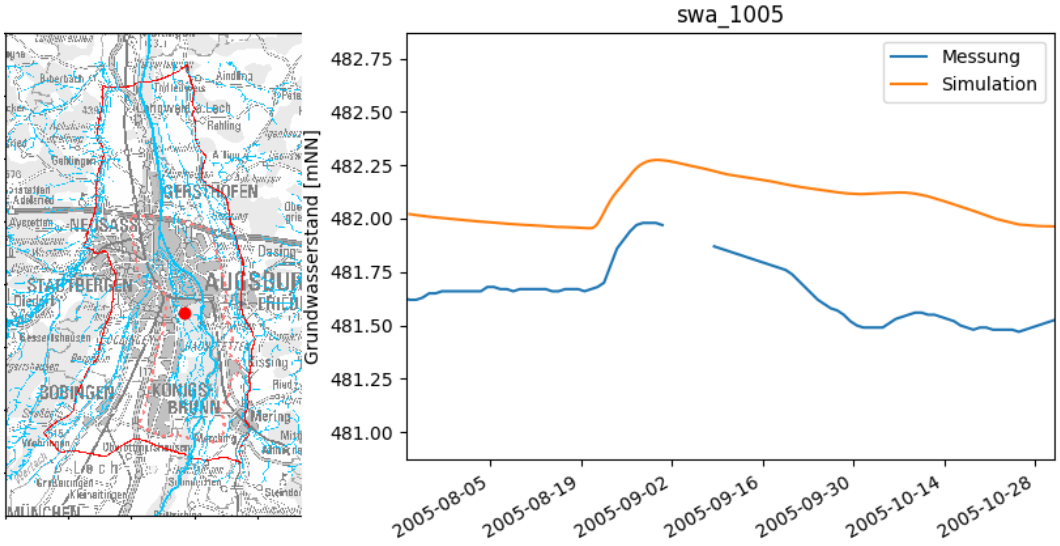

Abbildung 5.17: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_1005 (nördlicher Stadtwald, Lech-fern)

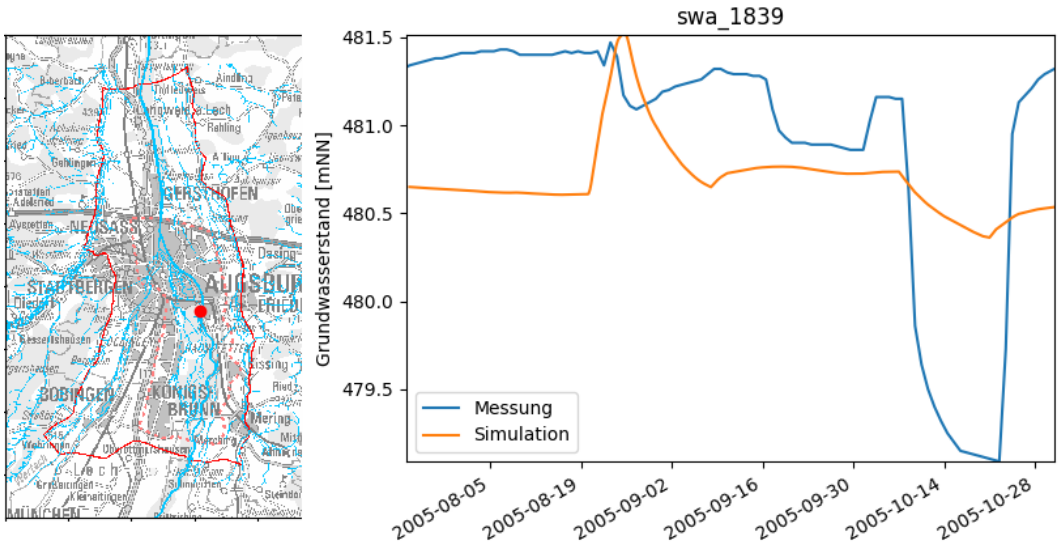

Abbildung 5.18: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle swa_1839 (nördlicher Stadtwald, Lech-nah)

5.5.1.3 Bereich zwischen Lech und Paar

Die Anpassung innerhalb des Aussagegebiets zwischen Paar und Lech ist gut. Die Dynamik wird sehr gut abgebildet, an der Messstelle uniper_24418 wird das Hochwasser-Maximum etwas unterschätzt.

Messstellen außerhalb des Aussagegebiets (teilweise zwischen Paar und östlichem Modellrand) zeigen generell eine etwas geringere Dynamik als die Messung, teilweise stammen diese von unbekannten Einflüssen, die im Grundwassermodell nicht hinterlegt sind (vgl. Kapitel 4.5.1.3).

Bereits bei der stationären und instationären Kalibrierung ist die Abweichung der Messstelle uniper_24402 auffällig, auch beim HW2005 bleibt diese Abweichung bestehen. Die Dynamik wird hingegen sehr gut abgebildet (s. Abbildung 5.19).

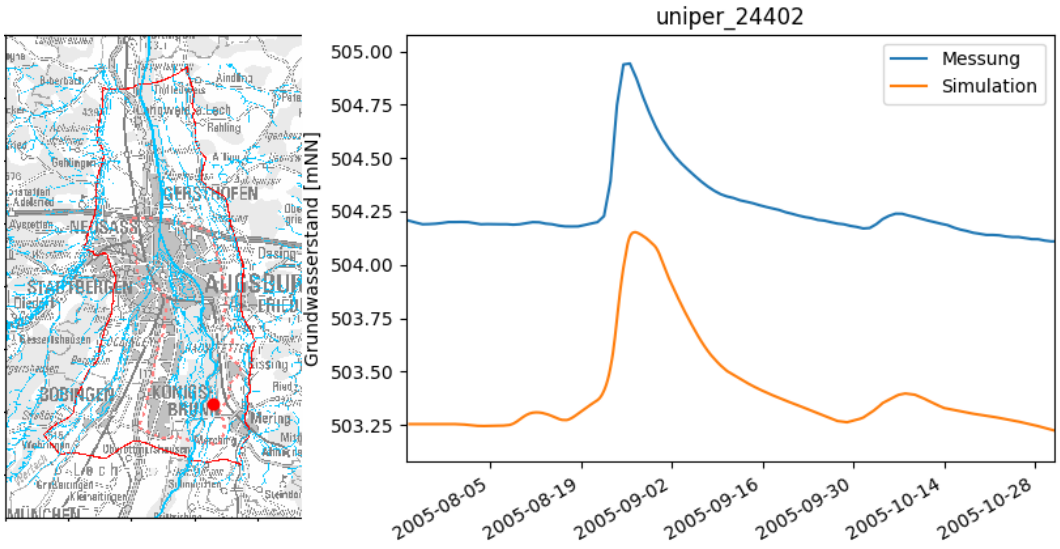

Abbildung 5.19: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24402 (südöstlicher Bereich zwischen Lech und Paar, Lech-nah)

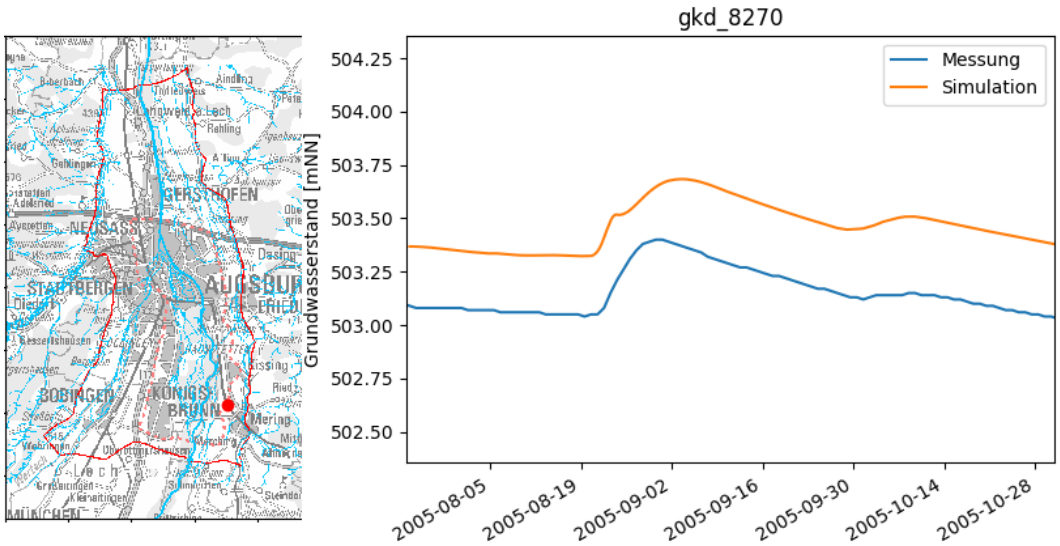

Abbildung 5.20: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle gkd_8270 (südöstlicher Bereich zwischen Lech und Paar, Lech-fern)

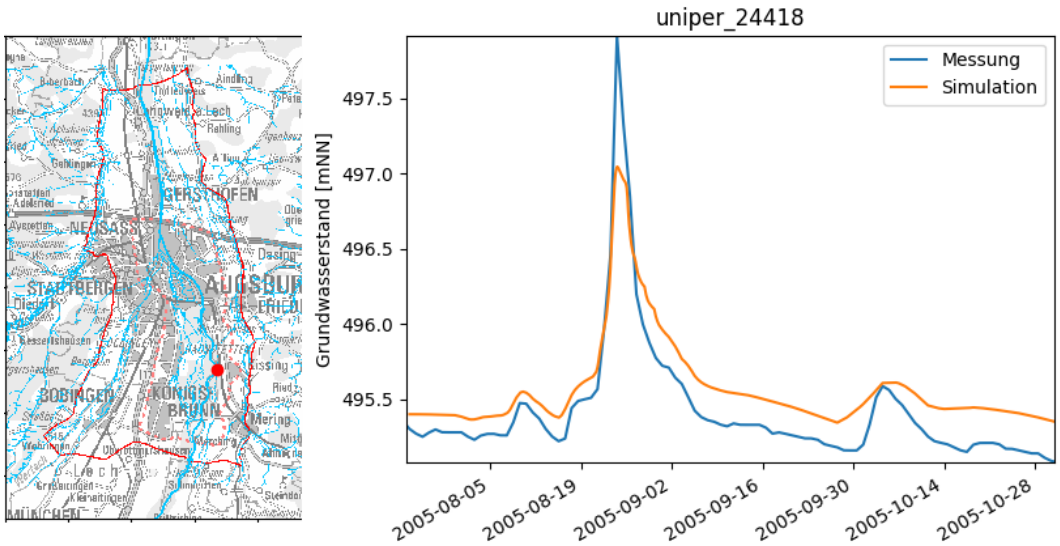

Abbildung 5.21: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24418 (nördlicher Bereich zwischen Lech und Paar Höhe Kissing, Lech-nah)

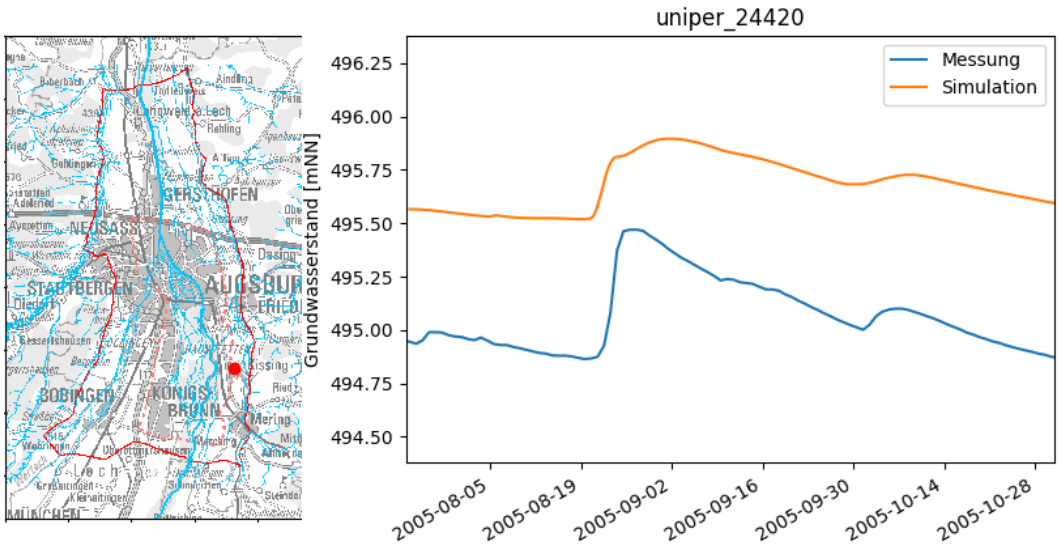

Abbildung 5.22: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24420 (nördlicher Bereich zwischen Lech und Paar Kissing, Lech-fern)

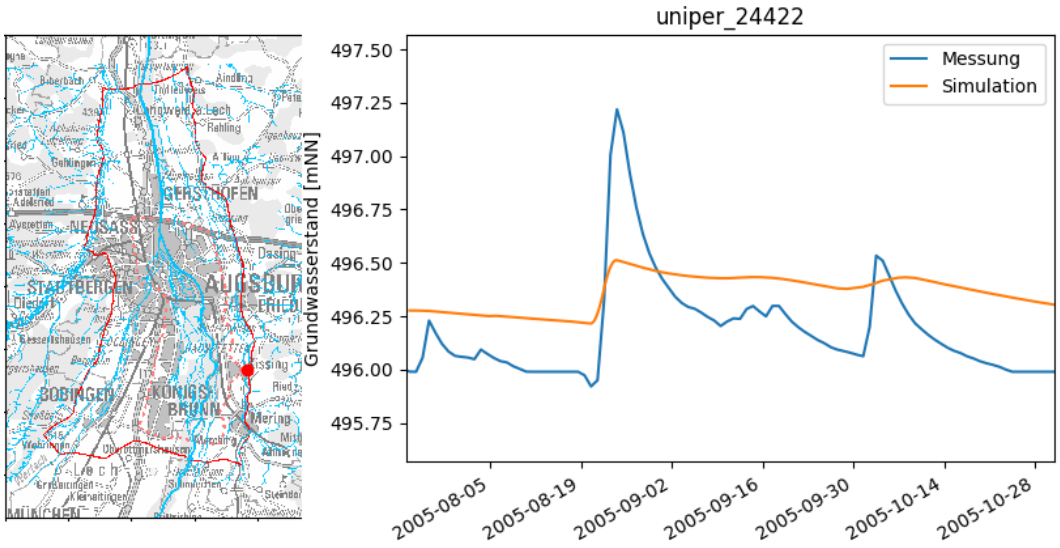

Abbildung 5.23: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle uniper_24422 (nördlicher Bereich zwischen Lech und Paar, außerhalb Aussagegebiet Kissing, Lech-fern)

5.5.1.4 Bereich der Innenstadt Augsburg

Die Grundwasserganglinien im Innenstadtbereich sind von wesentlich geringerer Dynamik geprägt, als beispielsweise Grundwassersstände im Stadtwald. Das Hochwasser-Ereignis spielt eine vergleichsweise geringe Rolle für den Verlauf der Grundwasserstände. Eine größere Rolle spielt der Lochbach-Ablass, sowie der reduzierte Wasserspiegel am Hochablass und der damit verbundene Ablass der Stadtbäche. Die Ganglinien an den Messstellen sind in Abbildung 5.24 bis Abbildung 5.28 dargestellt, zusätzlich wurde an Messstellen mit wenig Messwerten während den Hochwasser- und Ablasszeiträumen die Zeitpunkte der Messung eingezeichnet (s. Abbildung 5.25).

Die Messstellen tba_410a und tba_418 zeigen in der Simulation eine etwas geringere Reaktion auf den Lochbach-Ablass als in der Messung. Weitere Messstellen lösen das Ereignis zeitlich nicht auf. Im südlichen Stadtbereich scheinen auch weiter vom Lochbach entfernt liegende Messstellen auf den Lochbach-Ablass zu reagieren. Eventuell wurde nicht nur der Lochbach während dieses Zeitraums abgelassen (vgl. Kapitel 5.5.1.4).

Die Reduzierung des Wasserspiegels am Hochablass und der gleichzeitige Ablass der Stadtbäche ist in den Messungen und der Simulation gut sichtbar und wird von mehreren Messstellen aufgelöst. Die Anpassung ist gut, das heißt die Höhe der Infiltration an den Stadtbächen im Grundwassermodell wurde realitätsnah angesetzt.

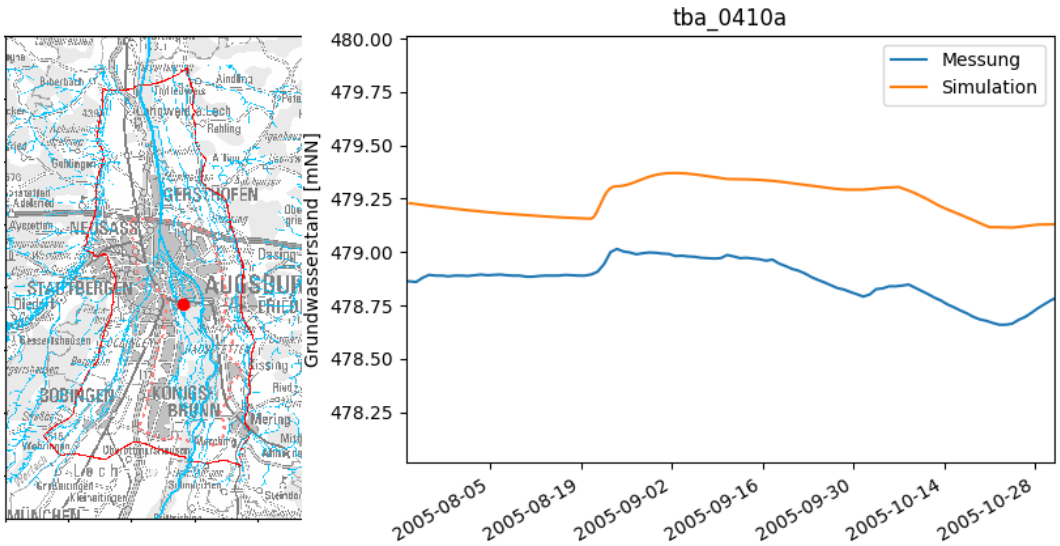

Abbildung 5.24: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0410a (Übergangsbereich vom Stadtwald zum bebauten Innenstadtbereich, Lech-fern)

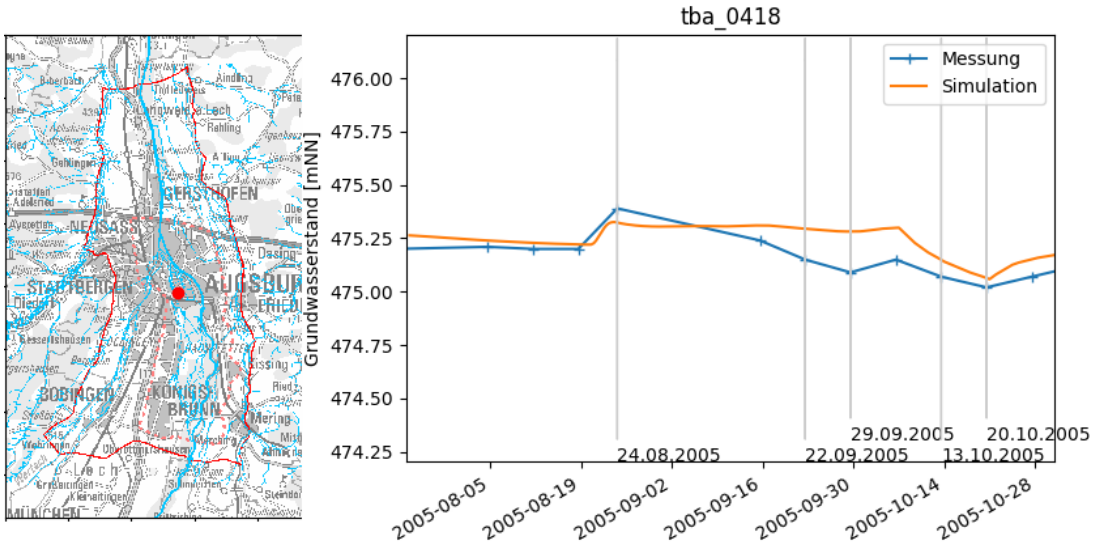

Abbildung 5.25: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0418 (Übergangsbereich vom Stadtwald zum bebauten Innenstadtbereich, Lech-fern)

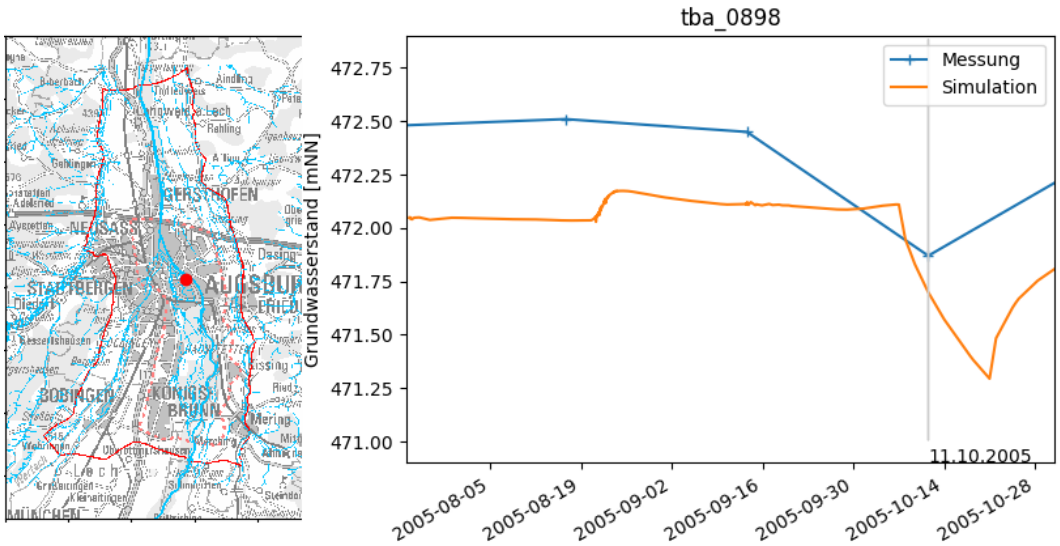

Abbildung 5.26: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0898 (Innenstadtbereich, Lech-nah)

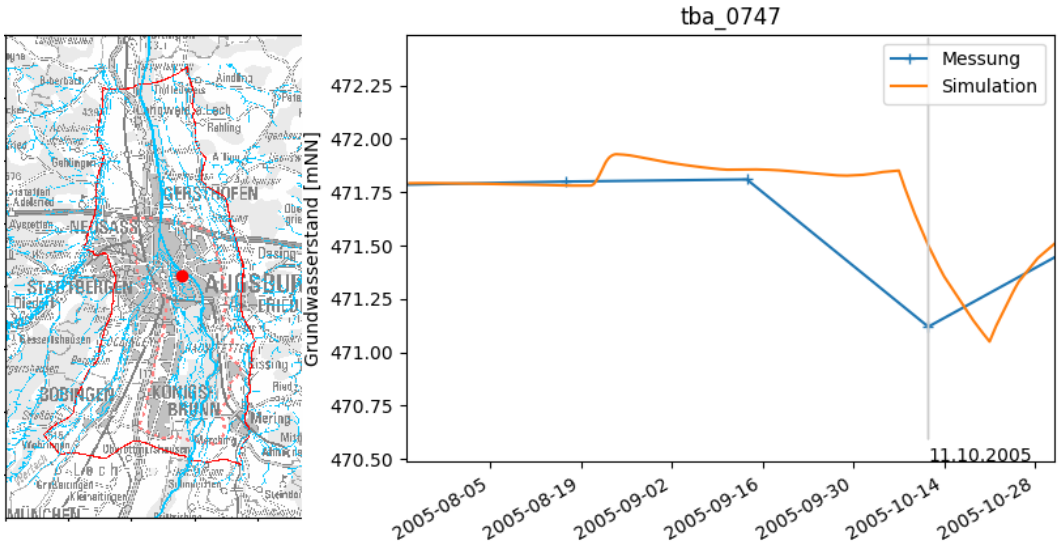

Abbildung 5.27: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0747 (Nördlicher Innenstadtbereich, Lech-nah)

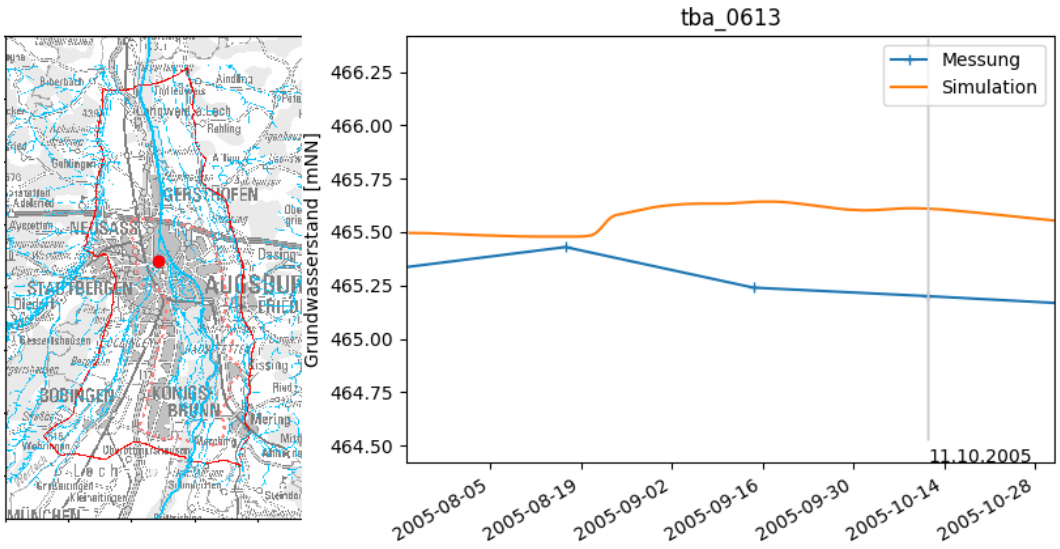

Abbildung 5.28: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0613 (Bereich Wertachmündung, Wertach-nah)

5.5.1.5 Bereich von Augsburg östlich des Lechs

Der Bereich im Augsburger Osten (östlich des Lechs) wird durch Grundwassermessdaten abgedeckt, die eine sehr geringe zeitliche Auflösung aufweisen (s. Abbildung 5.29 bis Abbildung 5.33). Zeitgleiche Grundwasserstände zur Hochwasserspitze liegen nicht vor. Generelle Trends werden vom Grundwassermodell gut abgebildet.

Am östlichen Rand des Aussagegebiets ist die Dynamik im Grundwassermodell schwächer ausgeprägt (s. Abbildung 5.31, vgl. Kapitel 4.5.1.5).

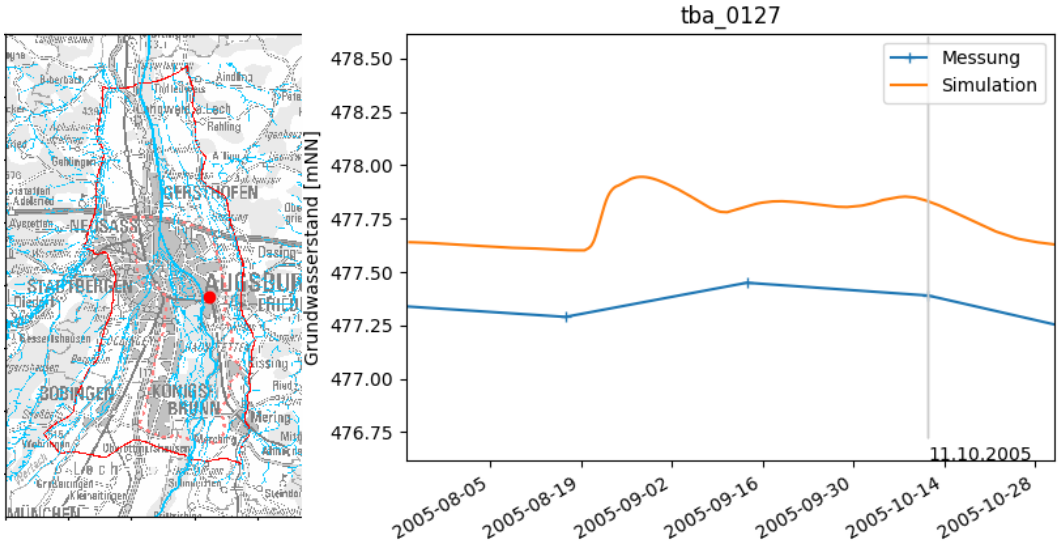

Abbildung 5.29: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0127 (Augsburg Ost, nahe Kuhsee)

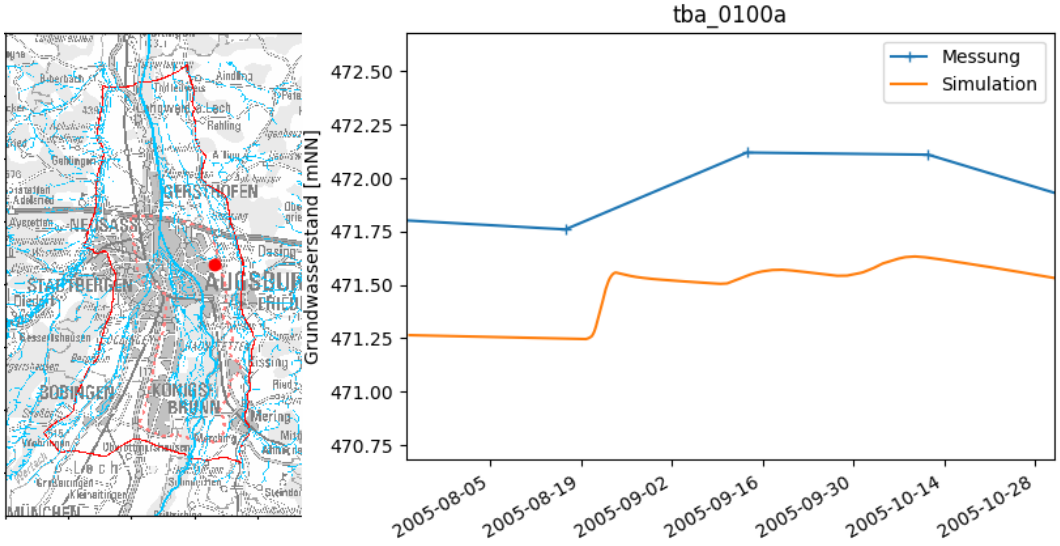

Abbildung 5.30: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0100a (Augsburg Ost, nahe östlicher Grenze des Aussagegebiets, eher Lech-fern)

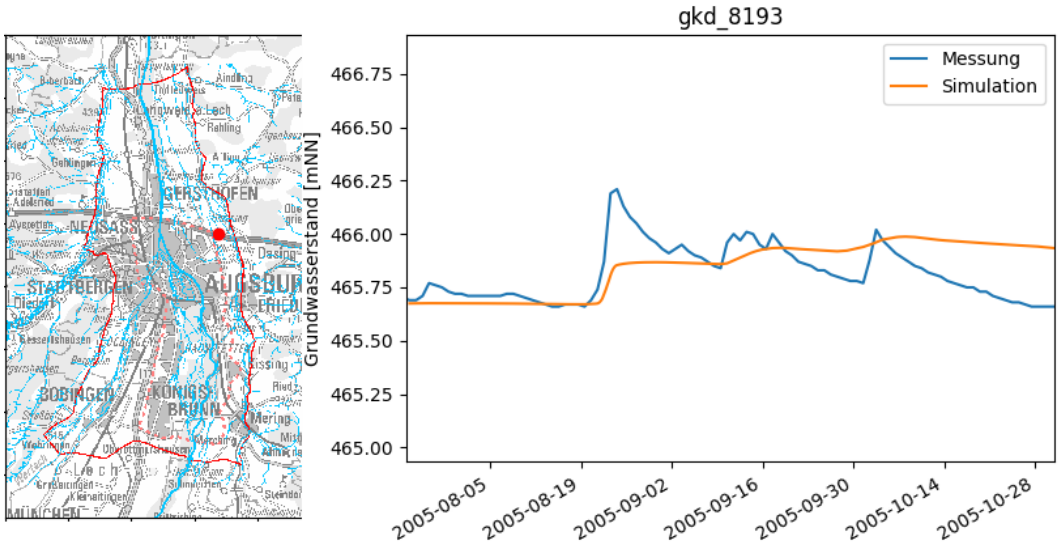

Abbildung 5.31: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle gkd_8193 (Augsburg Ost, außerhalb östlicher Grenze des Aussagegebiets, nahe Autobahn, Lech-fern)

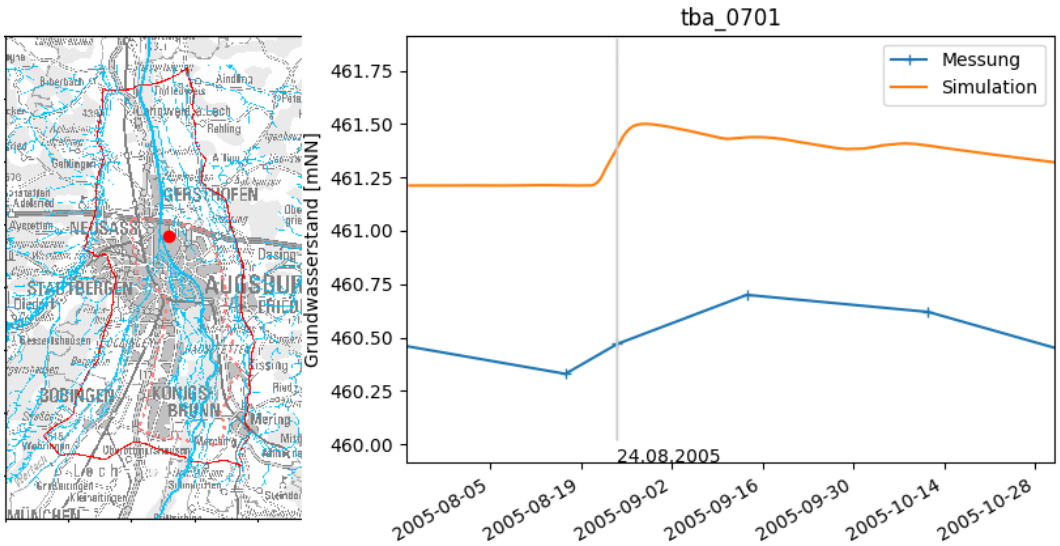

Abbildung 5.32: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0127 (Augsburg Ost, nahe Wertachmündung, Lech-nah)

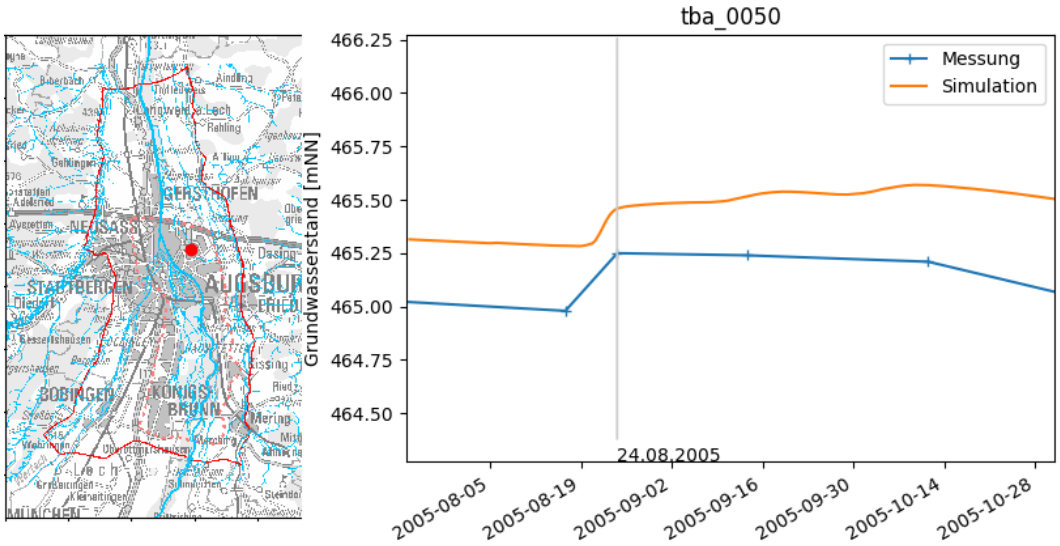

Abbildung 5.33: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0049 (Augsburg Ost, nahe nördlicher Grenze des Aussagegebiets)

5.5.1.6 Bereich Augsburg Nord

Dieser Bereich umfasst das Aussagegebiet westlich der Wertach bzw. das Aussagegebiet nördlich der Wertachmündung westlich des Lechs.

Auf Höhe des Gersthofener Wehrs befindet sich eine Messstelle der BEW (s. Abbildung 5.34), der Hochwasser-Peak wird sehr gut nachgebildet. Weitere Messstellen des TBA lösen das Hochwasser-Ereignis überwiegend schlecht auf (s. Abbildung 5.35 und Abbildung 5.36). Die am südlichen Rand des Aussagegebiets liegende Messstelle tba_0132a löst den Hochwasser-Peak besser auf, hier unterschätzt das Grundwassermodell die Höhe des Ausschlags (s. Abbildung 5.37). Auch an weiteren Messstellen in der Nähe des Fkm 4,5 kommt es zu einer Unterschätzung der Dynamik, Gründe für die Abweichung in diesem Bereich sind:

- Im Jahr 1999 liegen am Fkm 4,5 keine Wertach-nahen Messstellen vor, sodass das Modell an diesem Fkm nicht feinkalibriert werden konnte. Im Jahr 2005 ist die Abdeckung durch Messdaten deutlich besser.
- Im Jahr 2005 wurde das Goggeleswehr stark beschädigt und musste in der Folge abgerissen werden. In den folgenden Jahren wurde stattdessen eine raue Rampe errichtet, die auch im Wasserspiegelmodell der Wertach umgesetzt ist. Das heißt der im Grundwassermodell hinterlegte Wasserspiegel der Wertach weicht vor dem Bau der rauen Rampe lokal ab.

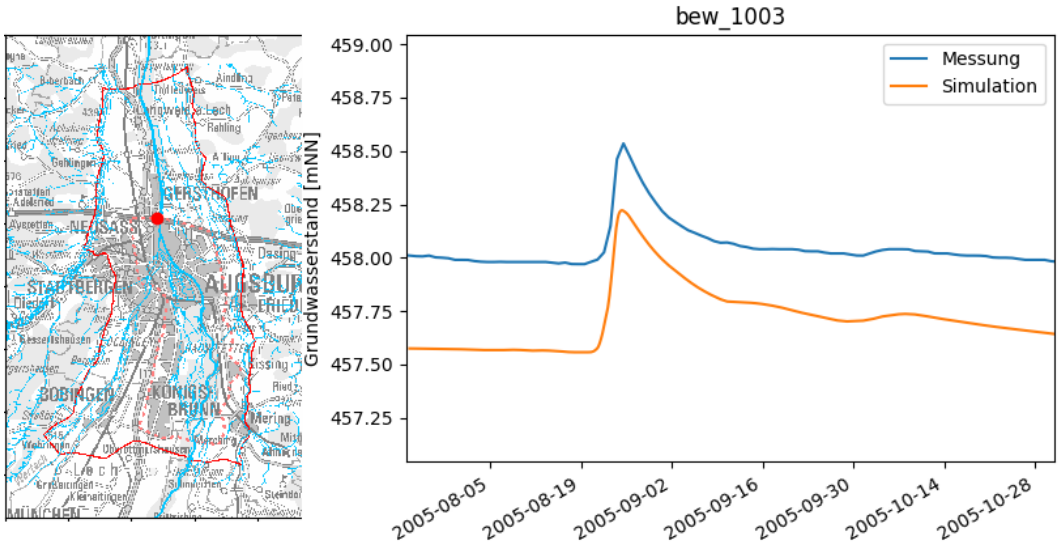

Abbildung 5.34: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle bew_1003 (Augsburg Nord, nahe nördlicher Grenze des Aussagegebiets)

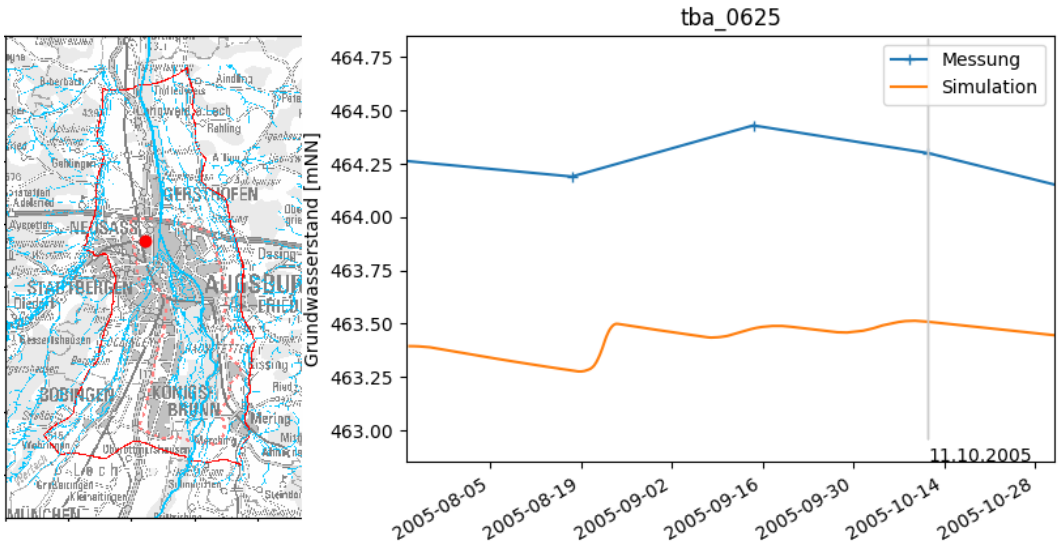

Abbildung 5.35: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0625 (Augsburg Nord, nördlich Wertachmündung)

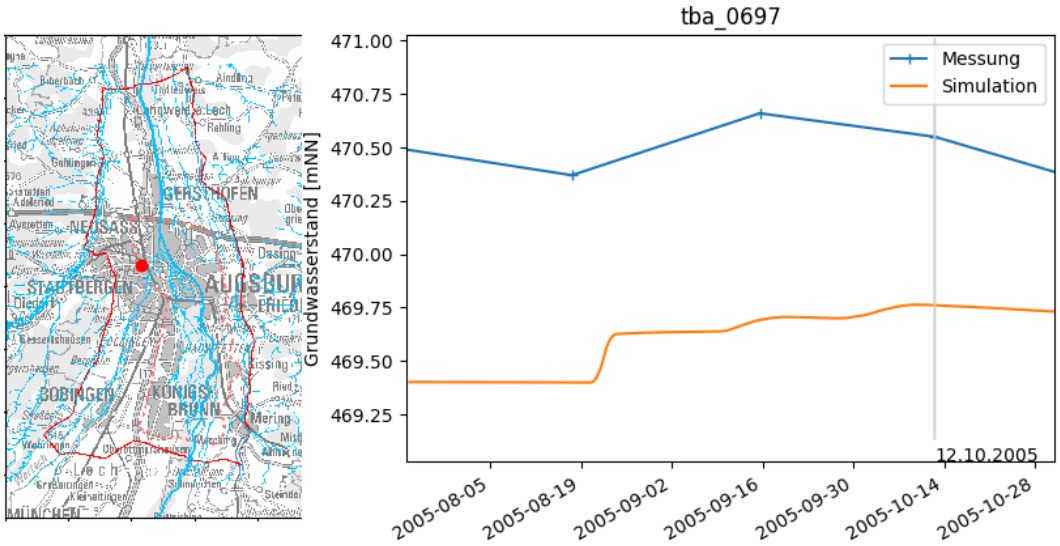

Abbildung 5.36: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0697 (Augsburg Nord, südlich Wertachmündung, Wertach-fern)

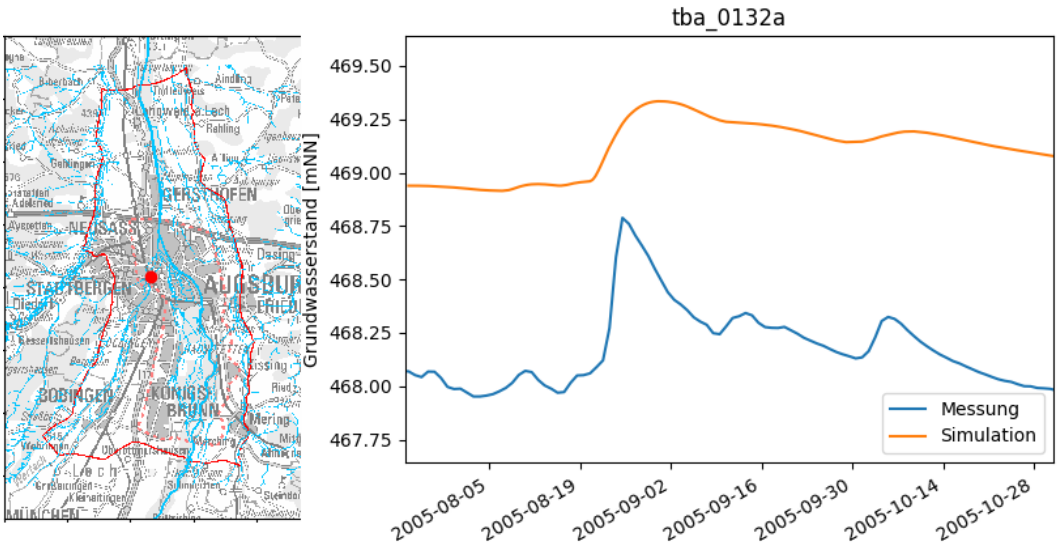

Abbildung 5.37: Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen an der Messstelle tba_0132a (Augsburg Nord, südlich Grenze Aussagegebiet, Wertach-nah)

5.5.2 Berechnete Grundwassergleichen

Die berechneten maximalen Grundwasserstände im Zeitraum um das Hochwasserereignis 2005 sind in Anlage 6.2.15 und Anlage 6.2.16 dargestellt. Die Grundwasserstände während des Hochwassers 2005 ähneln im Verlauf dem HW1999, liegen aber etwas tiefer. Im Innenstadtbereich führen die Grundwassersammler im Vergleich zum HW1999 an Prinz- und Schleifenstraße zu geringeren Grundwasserständen, d.h. diese begrenzen die Hochwasserinduzierten Grundwasseranstiege.

5.5.3 Wasserbilanz

5.5.3.1 Lech im Planungsraum

Die Wasserbilanz des Lechs im Planungsraum ist in Abbildung 5.38 (südlicher Planungsraum zwischen Staustufe 23 und Hochablass) und Abbildung 5.39 (nördlicher Planungsraum zwischen Hochablass und Gersthofener Wehr) dargestellt. Bei der im Diagramm dargestellten Bilanz handelt es sich um den Netto-Austausch mit dem Gewässerabschnitt, das heißt der Summe aus Infiltration (Vorzeichen +) und

Exfiltration (Vorzeichen -). In einem Gewässerabschnitt mit negativer Bilanz überwiegt die Exfiltration, es kann aber auch lokal zu einer Infiltration kommen.

Im südlichen Planungsraum kommt es während des Hochwassers zu einer starken Erhöhung der Infiltration. Im südlichsten Abschnitt 1 erhöht sich die Infiltration kurzzeitig auf bis über 3 m³/s, dies entspricht in etwa der Größenordnung während des HW1999. Die starken Änderungen im Austausch klingen nach HW2005 deutlich schneller ab als nach dem HW1999. Im Abschnitt Süd 7-2 nimmt der Austausch aufgrund der veränderten Wasserspiegellage am Hochablass um etwa 200 l/s ab.

Im nördlichen Planungsraum ist der Austausch mit dem Lech wie beim HW1999 ruhiger. Die Bachablässe ab dem September 2005 machen sich in der Bilanz des Lechs nicht bemerkbar (s. Abbildung 5.39).

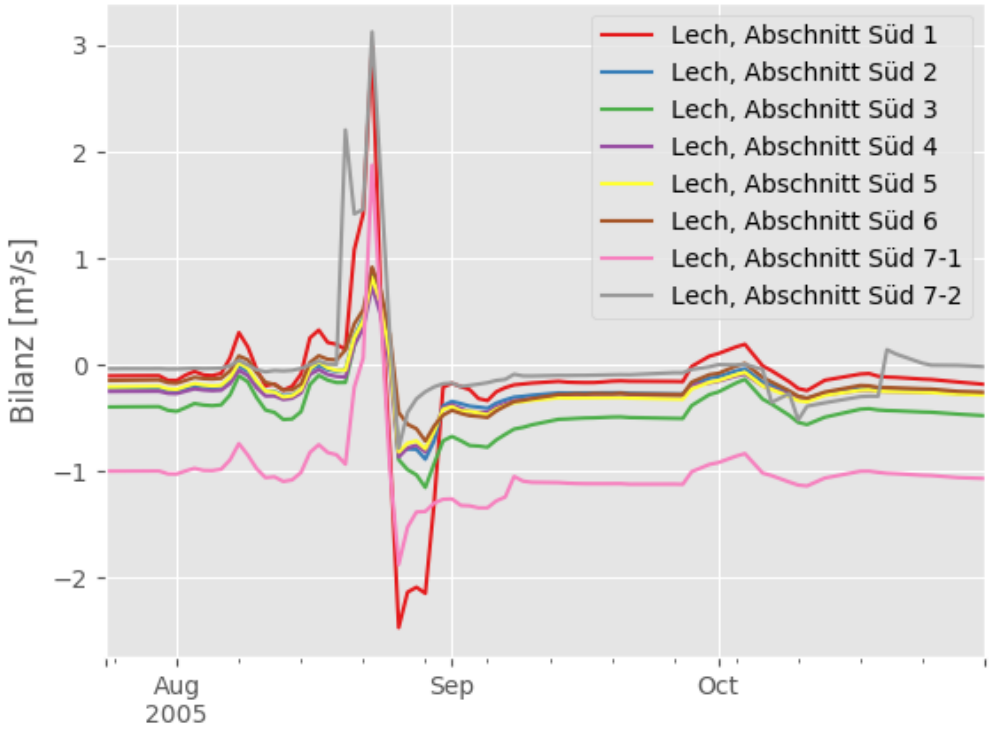

Abbildung 5.38: Wasserbilanz des Lech im südlichen Planungsraum (Lage der Bilanzbereiche siehe Kapitel 3.1.2.2)

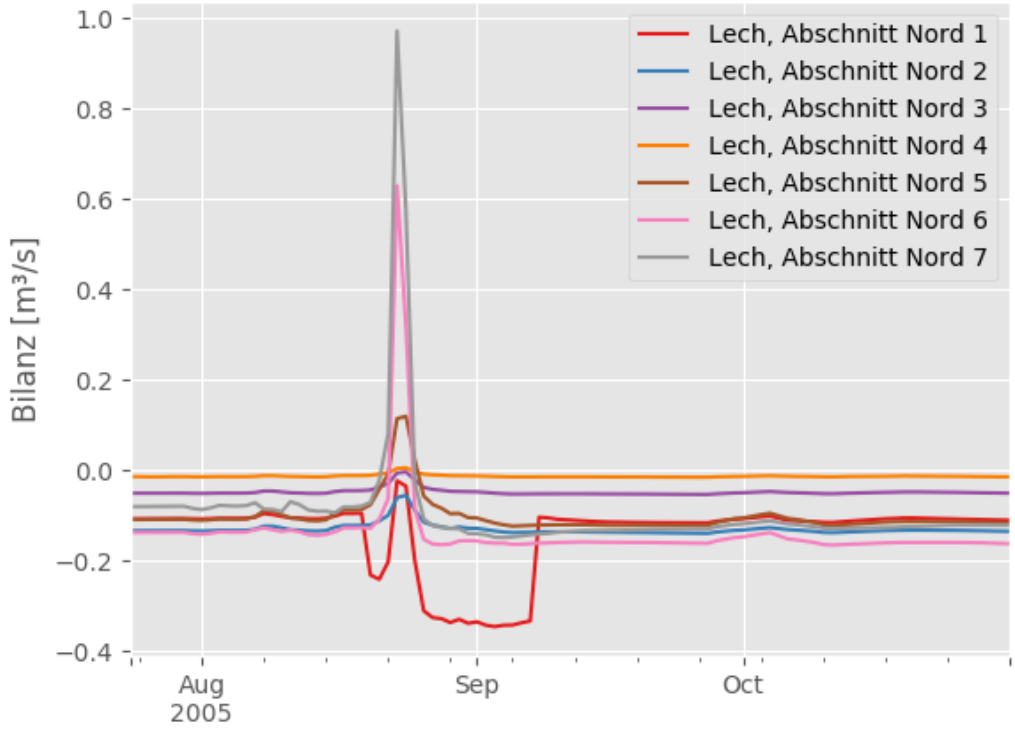

Abbildung 5.39: Wasserbilanz des Lech im nördlichen Planungsraum (Lage der Bilanzbereiche siehe Kapitel 3.1.2.4)

5.5.3.2 Nebengewässer

Im Folgenden wird die Wasserbilanz der wichtigsten Nebengewässer erläutert.

Im Bereich Königsbrunn/Stadtwald infiltriert der Lochbach bei Mittelwasser große Mengen Wasser ins Grundwasser. Abbildung 5.40 zeigt die instationäre Bilanz des Lochbachs. Während des Hochwassers nimmt die Infiltration am Lochbach verglichen mit dem Austausch während des HW1999 weniger ab. Während der Lochbach-Absenkung fällt die Infiltration in den Lochbach-Abschnitten 2 bis 5 auf 0 m³/s.

Abbildung 5.41 zeigt die Bilanz der Gewässer im Stadtwald. Das Hochwasser führt zu einer deutlichen Reduktion der Infiltration im südlichen Bereich des Stadtwalds (Abschnitt 1). Während des Lochbach-Ablass reduziert sich der Austausch am Mittelbach aufgrund des verringerten Grundwasserstands. Im Abschnitt 1 werden westliche Gewässer während des Ablass deaktiviert, weil diese aus dem Lochbach

ausgeleitet werden. Entsprechend nimmt die Infiltration an diesen Gewässern etwas ab.

In den Stadtbächen (s. Abbildung 5.42) führt das Hochwasser erwartungsgemäß nur zu geringen Änderungen im Austausch. Die Infiltration fällt während der Bachablässe weit ab.

Der maximale Wasserstand an Kuh- und Weitmannsee wird während der Hochwassers erreicht, sodass im Grundwassermodell die Abläufe anspringen. Abbildung 5.43 zeigt den Wasserumsatz der beiden Seen. Es wird deutlich, dass aus beiden Gewässern im Vergleich zum HW1999 deutlich weniger Wasser abgeführt wird.

Die Bilanz der Paar ist in Abbildung 5.44 dargestellt. Außerhalb der Hochwasserphasen beträgt die gesamte Infiltration etwa 100 l/s. Auch während des Hochwassers findet kein Wechsel zu Netto-Infiltration statt. Während des Hochwassers kommt es zu keiner Ausuferung der Paar.

Der Austausch des Grundwasserleiters mit der Wertach ist in Abbildung 5.45 dargestellt. Die beiden Phasen mit etwas erhöhten Wasserspiegeln an der Wertach vor dem Hochwasser am 23/24.8.2005 führen bereits zu einer deutlichen Minderung der Exfiltration an der Wertach. Im Nachgang des Hochwassers schließen sich durch die hohen Grundwasserstände Phasen mit größerer Exfiltration an.

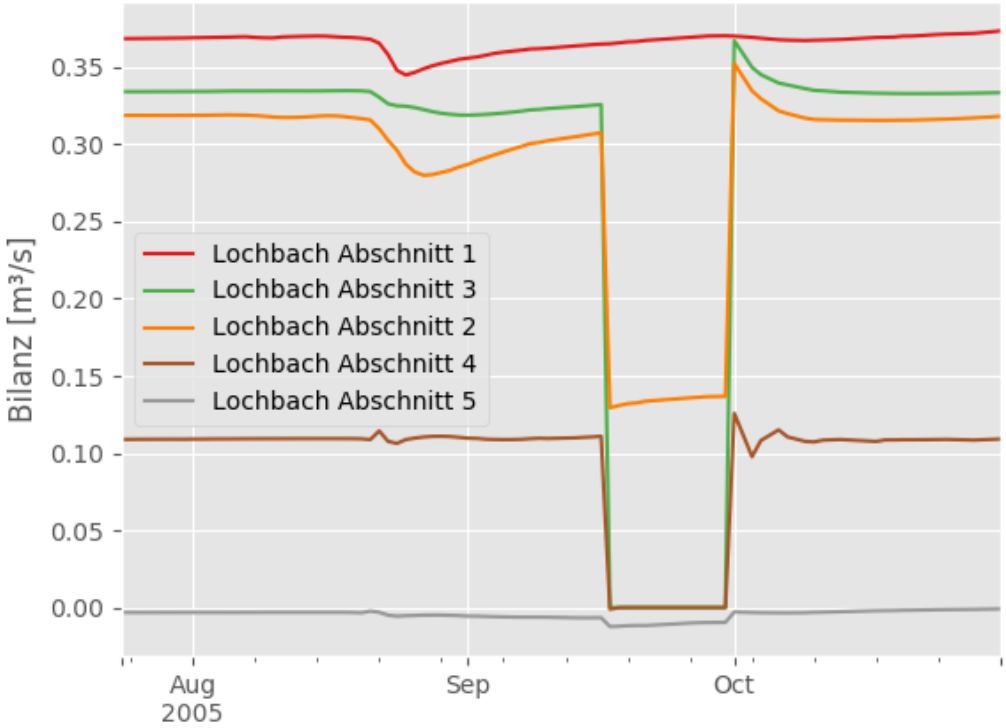

Abbildung 5.40: Bilanz des Lochbachs je Abschnitt

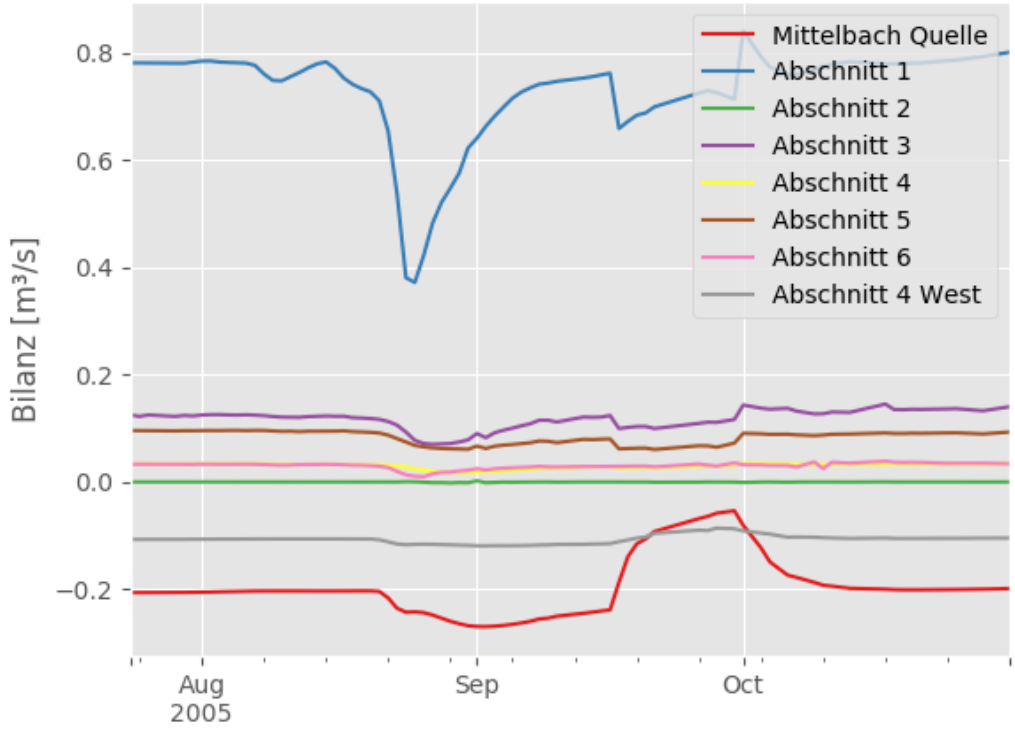

Abbildung 5.41: Bilanz der Gewässer im Stadtwald

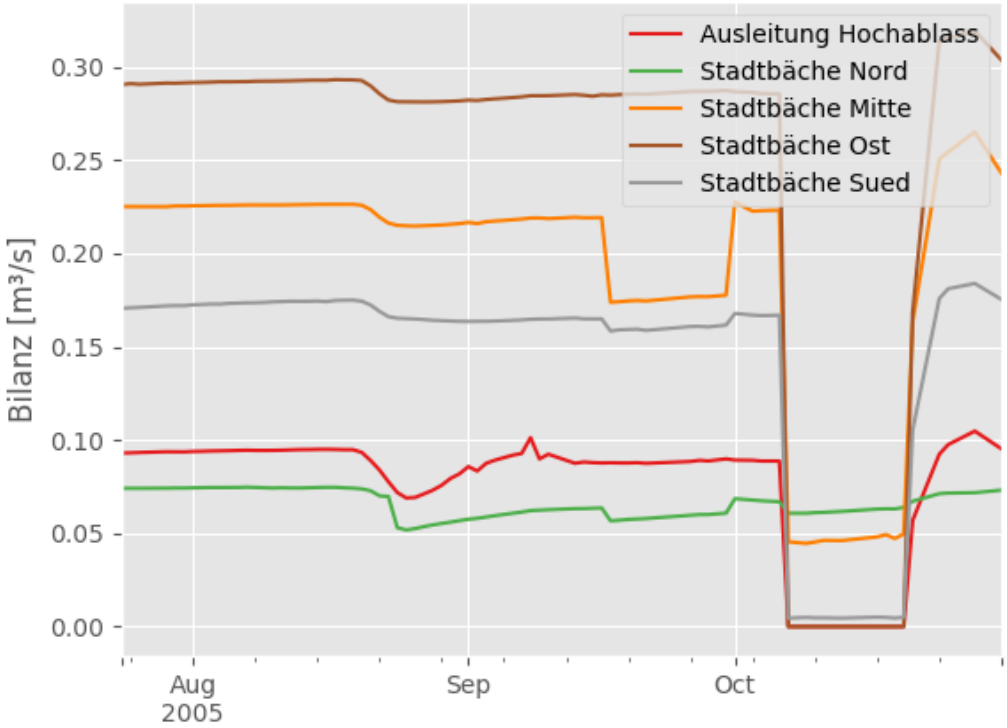

Abbildung 5.42: Bilanz der Stadtbäche

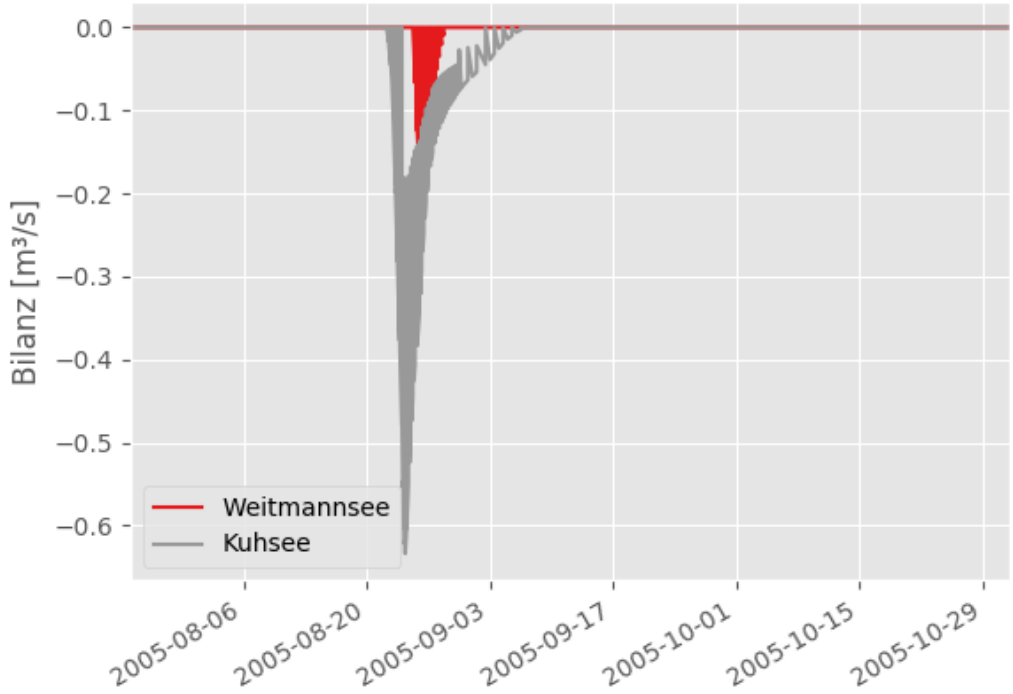

Abbildung 5.43: Bilanz des Kuh- und Weitmannsees (beide Seen sind mit einem Abfluss/Überfall versehen)

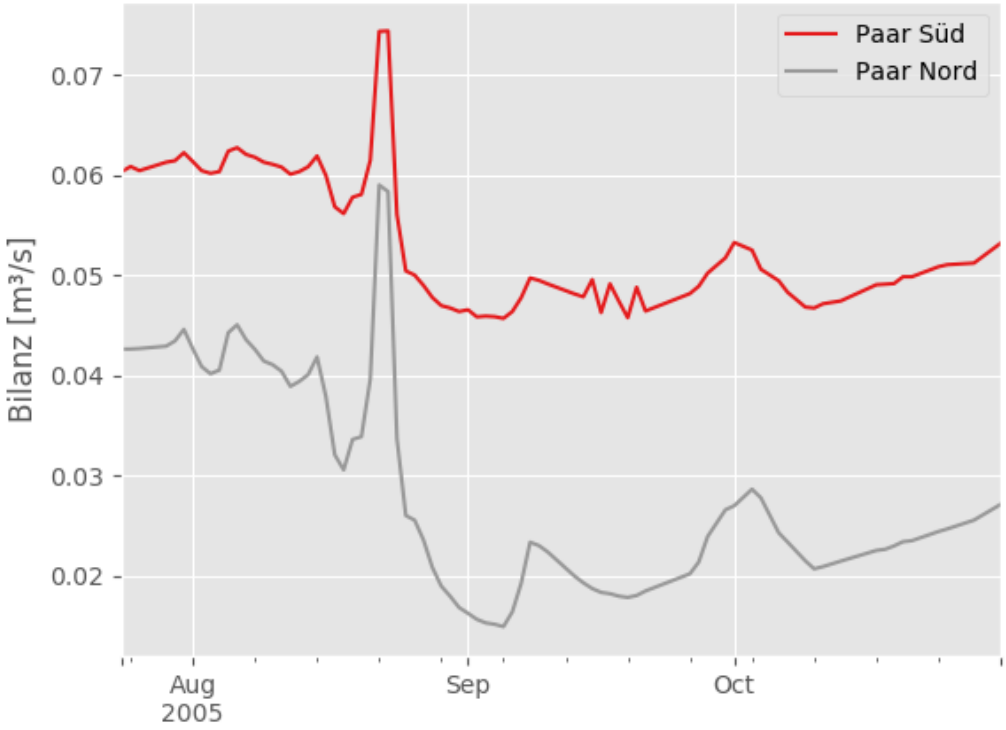

Abbildung 5.44: Bilanz der Paar (im Flussschlauch, Ausuferung wird gesondert betrachtet)

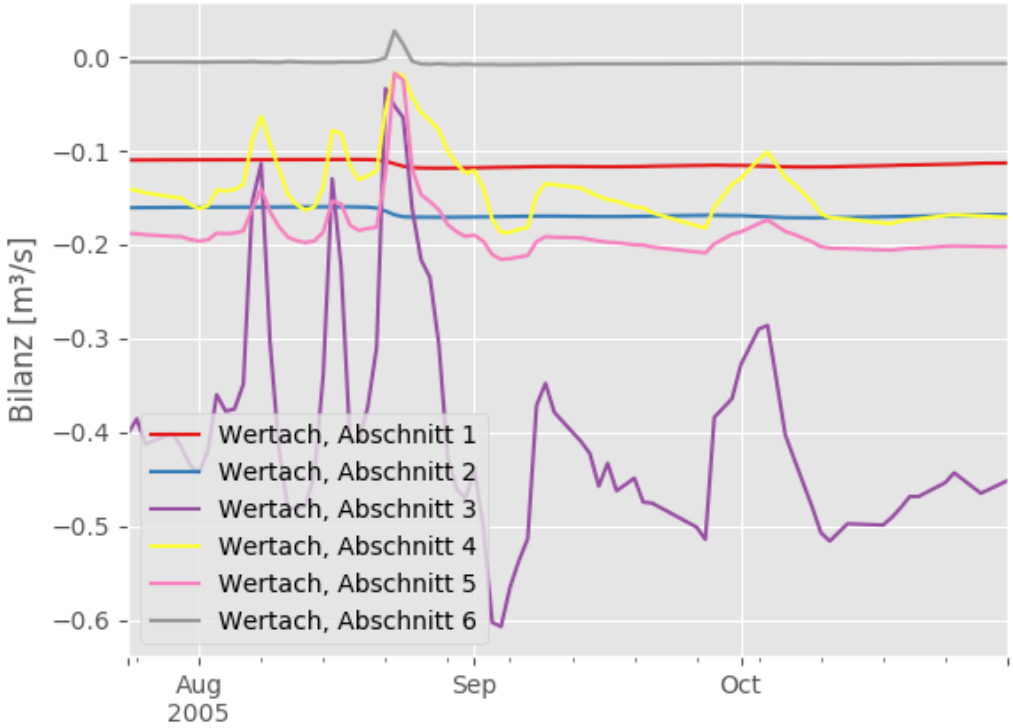

Abbildung 5.45: Bilanz der Wertach je Abschnitt (vgl. Kapitel 3.1.2.6).

5.5.3.3 Kanalisation

Aufgrund der Umsetzung der Kanalisation als Leakage-Randbedingung ist der Fremdwasserandrang in der Kanalisation abhängig vom Grundwasserstand. Abbildung 5.46 zeigt den durch das TBA abgeschätzten sowie den simulierten Fremdwasserandrang der Kanalisation. Wie schon beim HW1999 wird der Fremdwasserandrang gut abgebildet, weist aber eine geringere Dynamik auf.

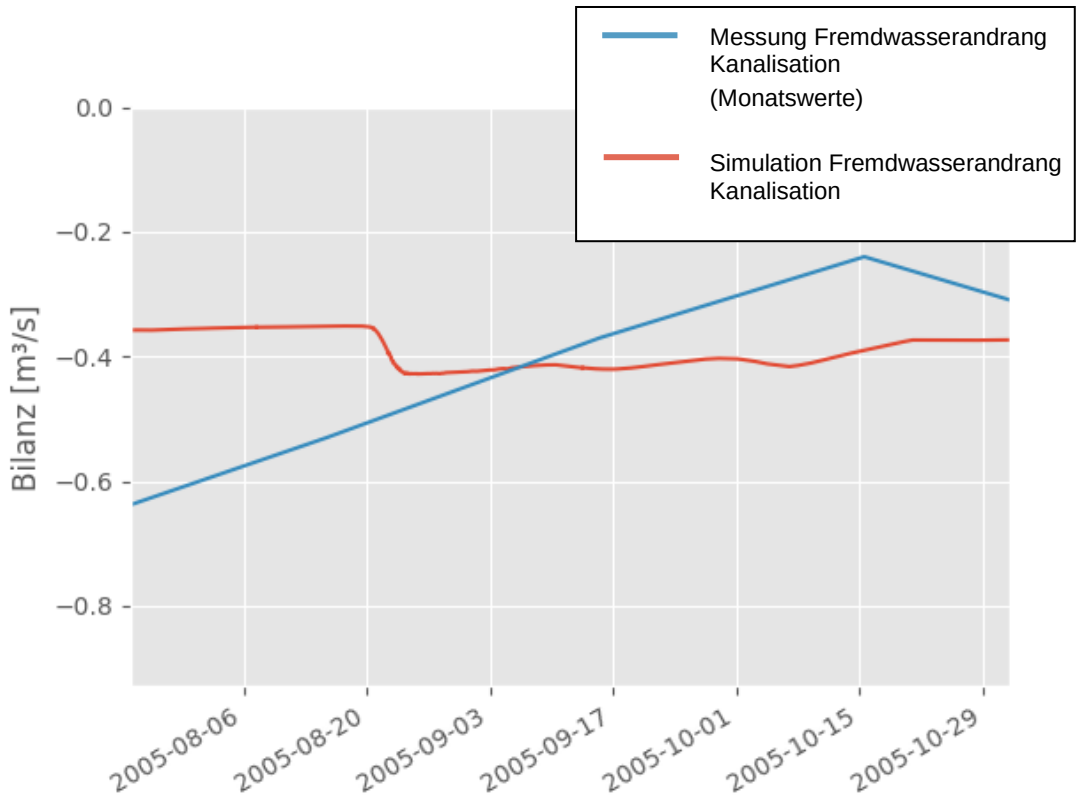

Abbildung 5.46: Bilanz der Kanalisation (Fremdwasserandrang)

5.6 Anpassungsgüte

5.6.1 Auswertung der zeitlichen Dynamik

Anlage 6.2.15 und Anlage 6.2.16 zeigen die räumliche Verteilung des NSME‘ an den Messstellen im Zeitraum 1.8.2005 bis 31.10.2005 (Die Herleitung des NSME‘ ist in Kapitel 5.6.1 beschrieben). Die Verteilung zeigt eine überwiegend gute Anpassung. Im Bereich zwischen Lech und Paar sowie in Königsbrunn ist die Anpassung überall sehr gut, im südlichen und mittleren Stadtwald ist die Anpassung überwiegend sehr gut, einzelne Messstellen weisen im Modell eine geringere Dynamik auf. Im nördlichen Stadtwald liegen einige gut angepasste Messstellen vor, in direkter Nähe des Hochablasses und an der Ausleitung des Hochablasses ist die Anpassungsgüte geringer. Dies folgt u.a. daraus, dass der Ablass der Stadtbäche und die reduzierte Wasserspiegellage im Oktober aufgrund fehlender Angaben im Grundwassermodell nur näherungsweise umgesetzt werden konnte. Im Innenstadtbereich ist der NSME‘ an

einigen Messstellen geringer. Dies folgt u.a. aus o.g. Unsicherheiten und weil hier generell die geringe Dynamik der Messung zu einer Minderung der Aussagekraft des NSME‘-Koeffizienten führt (vgl. Kapitel 4.6). Im Bereich des Goggeleswehr an der Wertach ist die Anpassungsgüte aus den bereits im Kapitel 5.5.1.6 erläuterten Gründen geringer.

5.6.2 Auswertung der absoluten Abweichung

Definitionen und Erklärungen zu den folgenden Auswertungen sind in Kapitel 4.6.2 zu finden. Die Auswertung der Modellgüte erfolgt nur für Zeitschritte und Bereiche die eine Mindestzahl an Messdaten (mindestens 10 je Zeitschritt) aufweisen. Generell liegen im Jahr 2005 mehr Messstellen in höherer zeitlicher Auflösung als im Jahr 1999 vor.

Abbildung 5.47 zeigt die mittlere absolute Abweichung der Messstellen im Bereich Königsbrunn/Haunstetten. Das 0,65 m - Kriterium wird weitgehend eingehalten. An Stichtagen mit Messdaten in der westlichen Niederterrasse Haunstettens (16.08.2005,15.09.2005 und 11.10.2005) wird das Kalibrierziel kurzzeitig gering überschritten.

Die mittlere absolute Abweichung für Messstellen im Stadtwald und im Bereich zwischen Lech und Paar ist in Abbildung 5.48 dargestellt. Das 0,65 m - Kriterium wird eingehalten. Während des Hochwassers verringert sich die Anpassung im östlichen Lechtal gering (um etwa 5 cm), im Stadtwald ist die Anpassung etwas besser. Auch der Ablass des Lochbachs ist gut abgebildet, d.h. führt zu keiner Verschlechterung der Anpassung.

Auch in den Bereichen Innenstadt, und Augsburg Ost wird das 0,65 m - Kriterium eingehalten (vgl. Abbildung 5.49). Im nördlichen Lechtal (außerhalb des Aussagegebiets) ist die Anpassung „nur“ gut.

Die Abweichungen im Wertachtal werden in Abbildung 5.50 dargestellt. Im nördlichen Bereich (Messstellen des TBA) wird das 0,65 m - Kriterium eingehalten, an Messstellen der BEW ist die Anpassung gut. Die hier vorliegende („nur“ gute) Abweichung ist aufgrund der Entfernung zum Aussagegebiet nicht relevant.

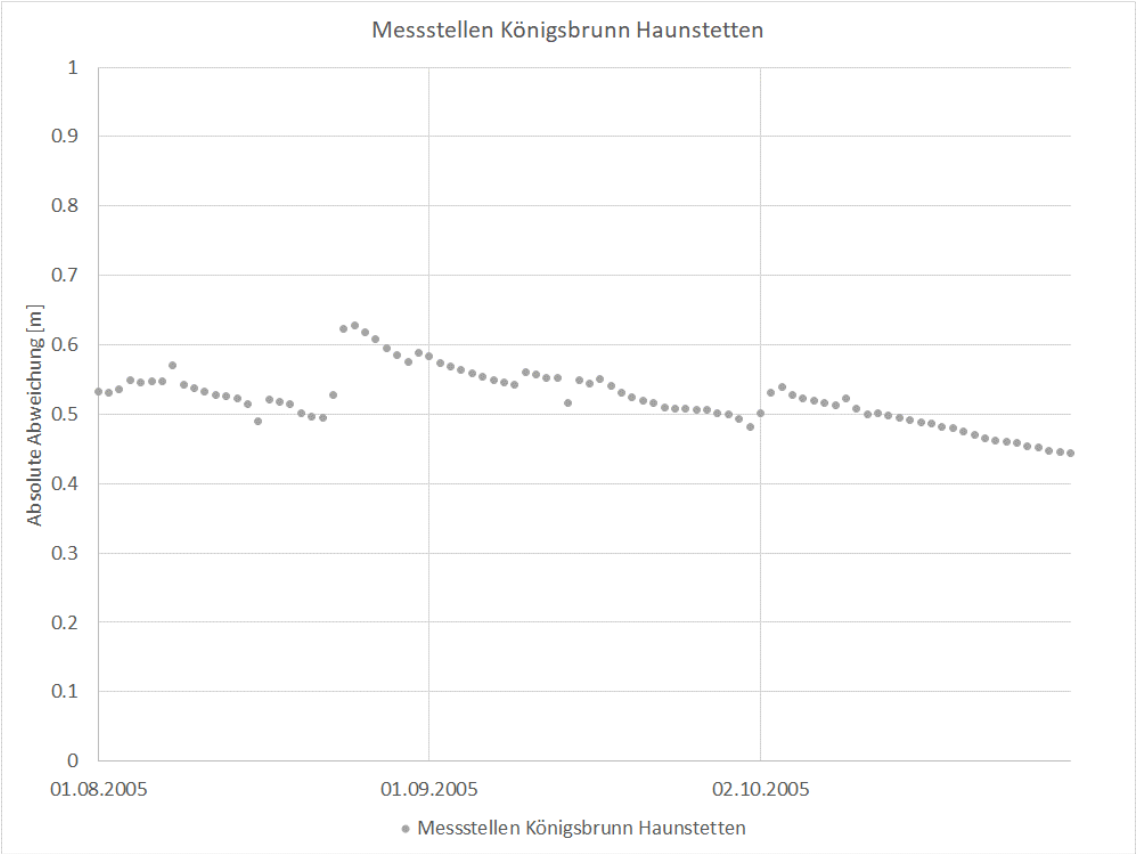
Messstellen Königsbrunn Haunstetten
Absolute Abweichung [m]
1
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
01.08.2005
01.09.2005
02.10.2005
Messstellen Königsbrunn Haunstetten

Abbildung 5.47: Absolute Abweichung an Messstellen in Königsbrunn/Haunstetten

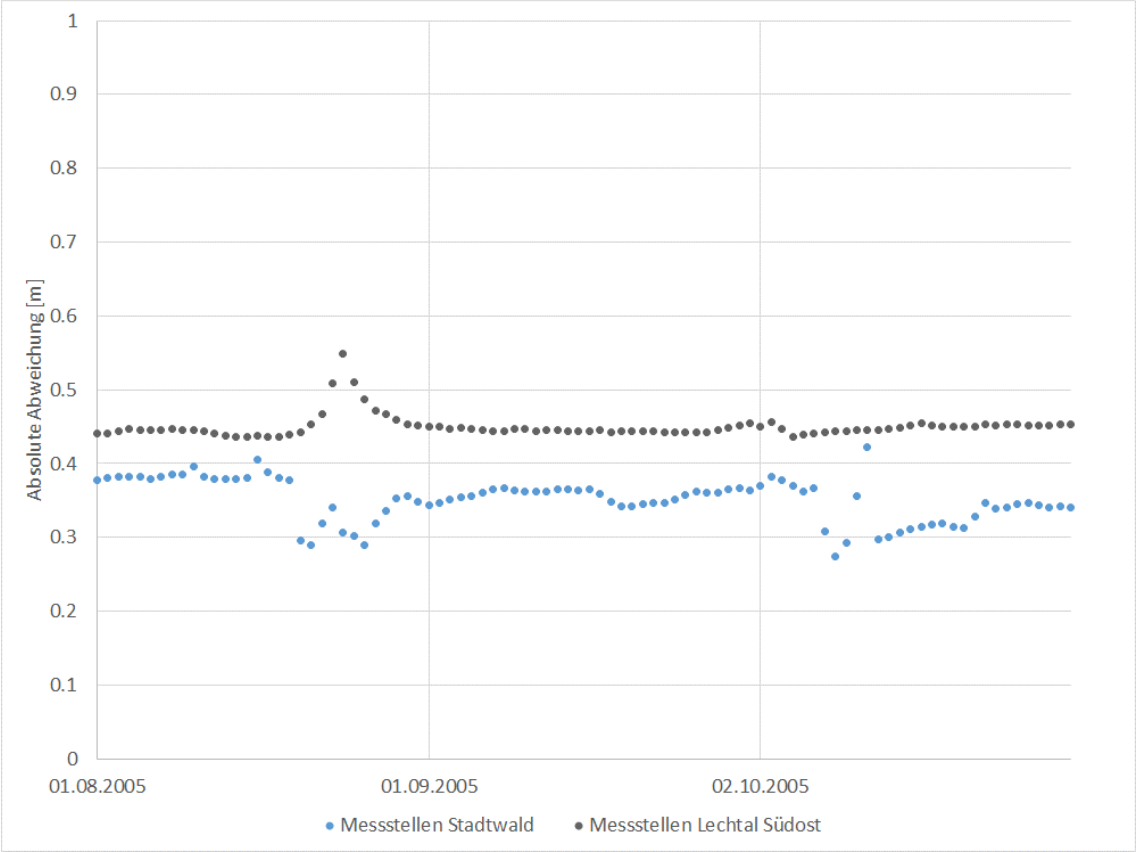

Abbildung 5.48: Absolute Abweichung an Messstellen in Stadtwald und im Bereich zwischen Lech und Paar

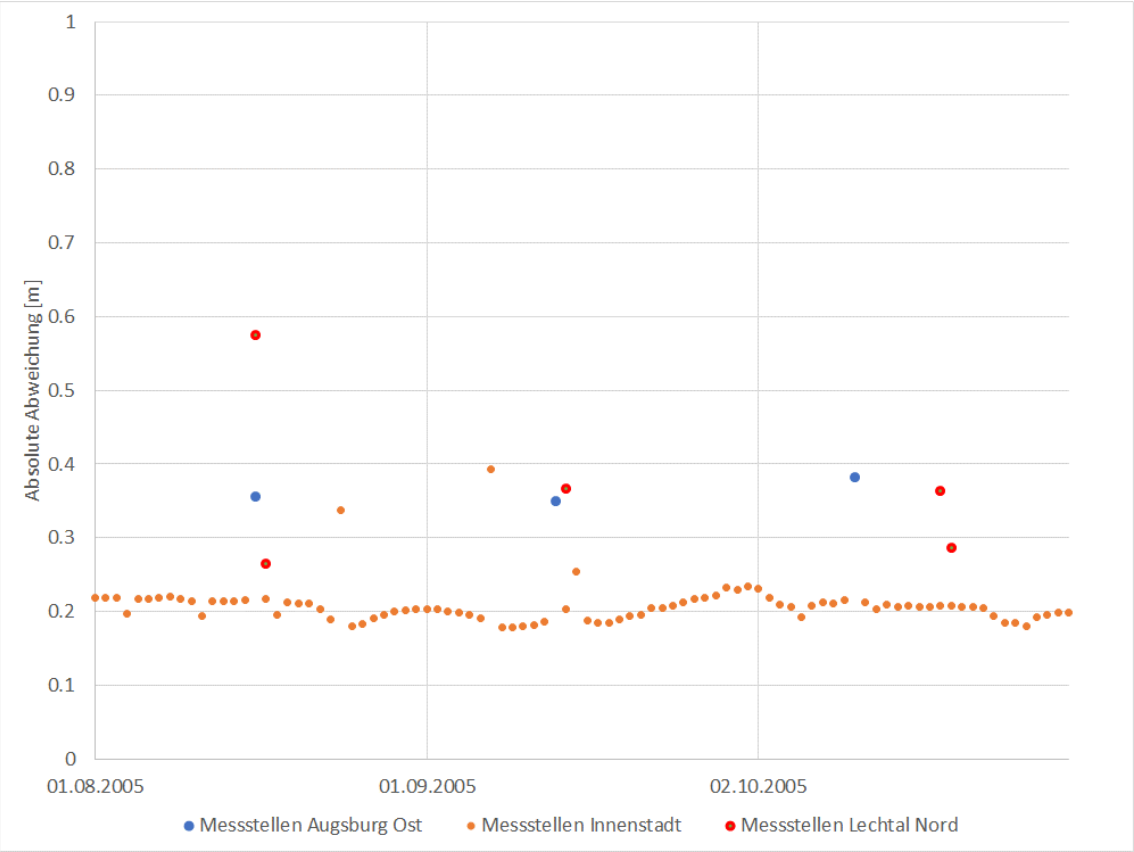

Abbildung 5.49: Absolute Abweichung an Messstellen im Innenstadtbereich, im Augsburger Osten sowie im nördlichen Lechtal

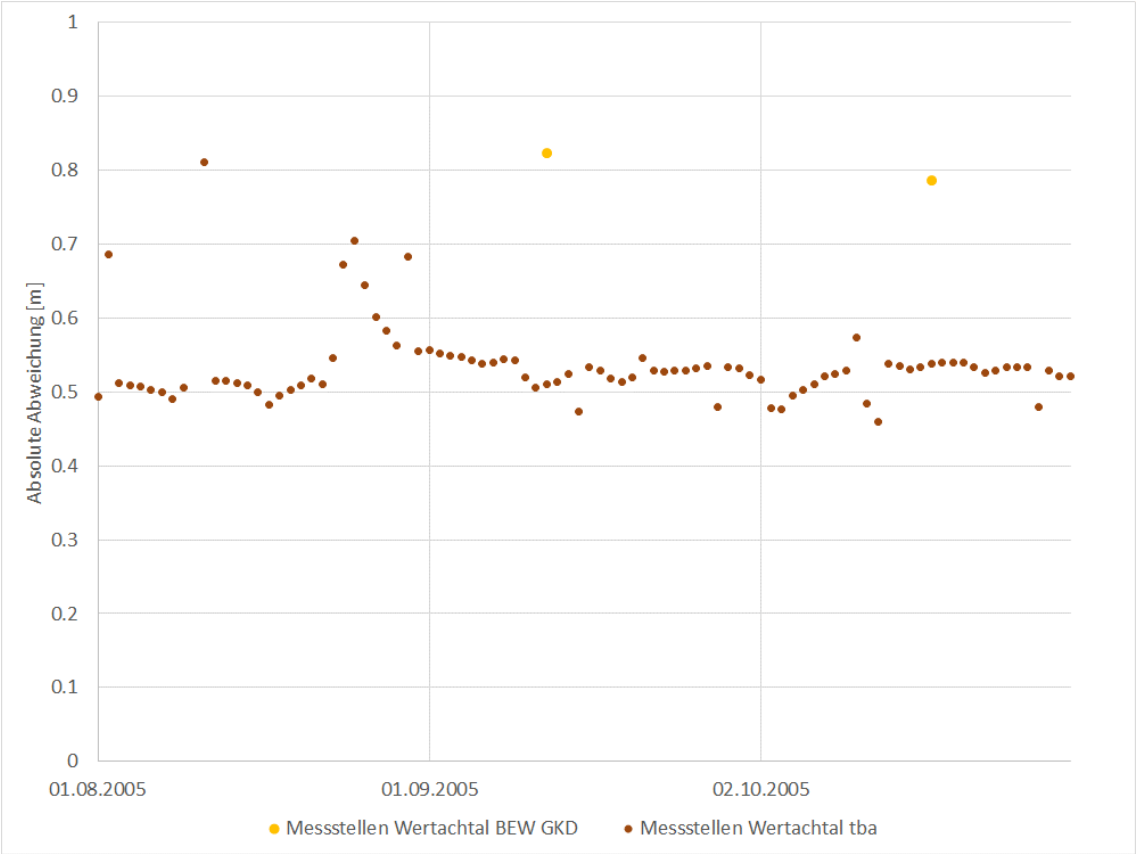

Abbildung 5.50: Absolute Abweichung an Messstellen im Wertachtal

Insgesamt belegt der Modelltest, dass das Modell die vorherrschenden Dynamiken und insbesondere die im Modellgebiet auftretenden Unterschiede nachbildet. Auch die Abweichungen in den Absoluthöhen zwischen Messung und Rechnung bewegen sich in den Grenzen die beim Jahr 1999 zu beobachten sind.

6 Ermittlung eines Referenzzustands für Prognosen mit niedrigen Grundwasserständen

6.1 Übersicht

Im Anschluss an das Hochwasser 2005 und den darauffolgenden Bachablässen stellen sich am Lech mittlere Niedrigwasserabflüsse (MNQ-Verhältnisse) ein. Der MNQ-Zustand wird am Pegel Haunstetten nach dem 20.12.2005 unterschritten, während am Pegel Augsburg unterhalb der Wertachmündung der Wasserspiegel um MNQ schwankt.

In der Hydrologie wird ein am MNQ vorliegender Wasserspiegel MNW genannt, das heißt der Mittelwert aller an einer Messstelle gemessenen Niedrigwasserstände in einer festgelegten Periode). Diese Definition wird im Folgenden für das Grundwasser übernommen.

Der Zeitraum um den 20.12.2005 wurde in einen stationären Modelllauf umgewandelt und wird als Grundlage für den Aufbau eines stationären Modells zur Betrachtung niedriger Grundwasserstände verwendet (MNW-Zustand). Einige Randbedingungen müssen modifiziert werden, damit sich im Modell MNW-Verhältnisse einstellen können (z.B. Reduzierung der Grundwasserneubildung, die lokal über der für stationäre Verhältnisse bei MW verwendeten Grundwasserneubildung liegt).

Die MNW-Simulation wird im Rahmen des Modelleinsatzes als Referenz für die Simulation von Auswirkungen auf Trinkwasserbrunnen und deren Schutzgebiete verwendet.

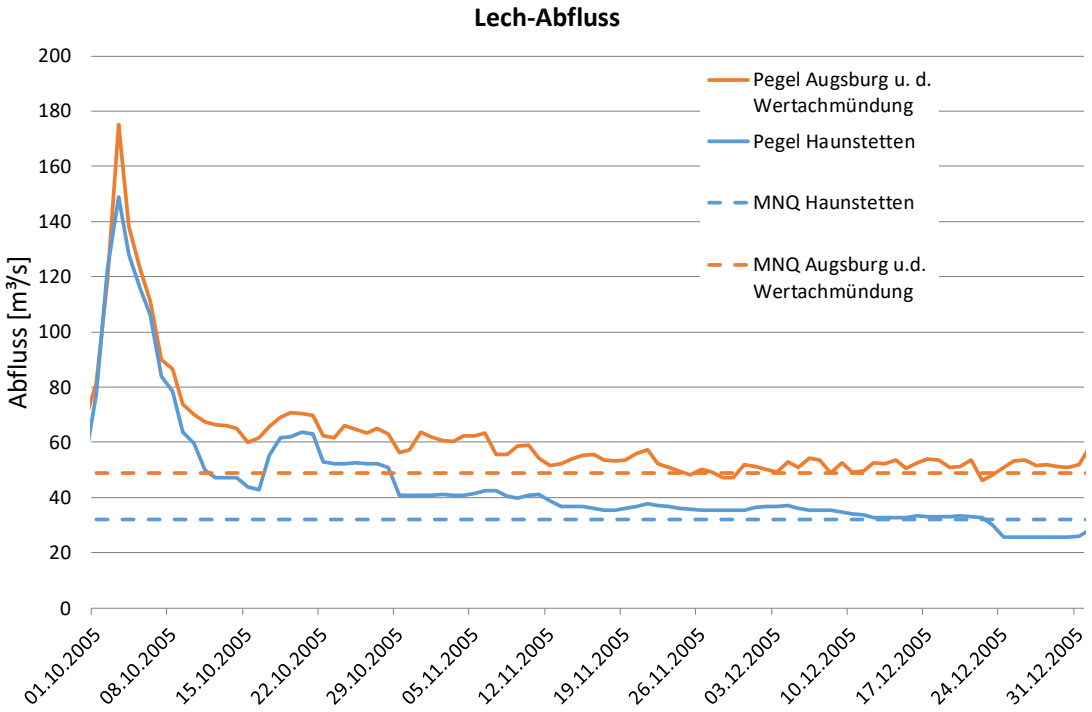

Abbildung 6.1: Abfluss des Lech am Pegel Haunstetten und am Pegel u.d. Wertachmündung sowie zugehörige MNQ Abflüsse

6.2 Vergleichsgrößen

Im Folgenden wird für einige Teilbereiche die Variabilität der Grundwasserstände in Bezug auf MNW und MW ausgewertet. Die Lage der betrachteten Grundwassermessstellen ist Anlage 6.2.1 zu entnehmen.

Im Bereich Königsbrunn liegt eine große Schwankungsbreite auch ohne Berücksichtigung der Hochwasserpeaks vor. Hier ist von einer deutlichen Differenz zwischen MNW und MW auszugehen (Größenordnung 40 cm), s. Abbildung 6.2.
In Abbildung 6.3 ist eine Ganglinie des Grundwasserstands im Stadtwald dargestellt. Die Schwankungsbreite außerhalb der Hochwasserphasen ist deutlich geringer. Die Differenz zwischen MNW und MW-Phasen beträgt etwa 10-20cm, zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass im Stadtwald eine große Beeinflussung durch Grundwasserentnahmen besteht. Eine ähnliche Größenordnung ergibt sich im Bereich zwischen Lech und Paar (s. Abbildung 6.4).

Das Innenstadtgebiet weist kaum Grundwasserstandsschwankungen auf. Im Innenstadtgebiet ist davon auszugehen, dass MW und MNW-Phasen kaum zu unterscheiden sind.
Der Bereich Augsburg Ost weist auch eine geringe Schwankungsbreite auf. Die Differenz zwischen MW- und MNW-Phasen beträgt etwa 10 cm.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Differenz zwischen MW und MNW-Phasen von Süden nach Norden abnimmt. Diese beträgt in Königsbrunn über 40 cm, während im Augsburger Osten etwa 10 cm zu erwarten sind.

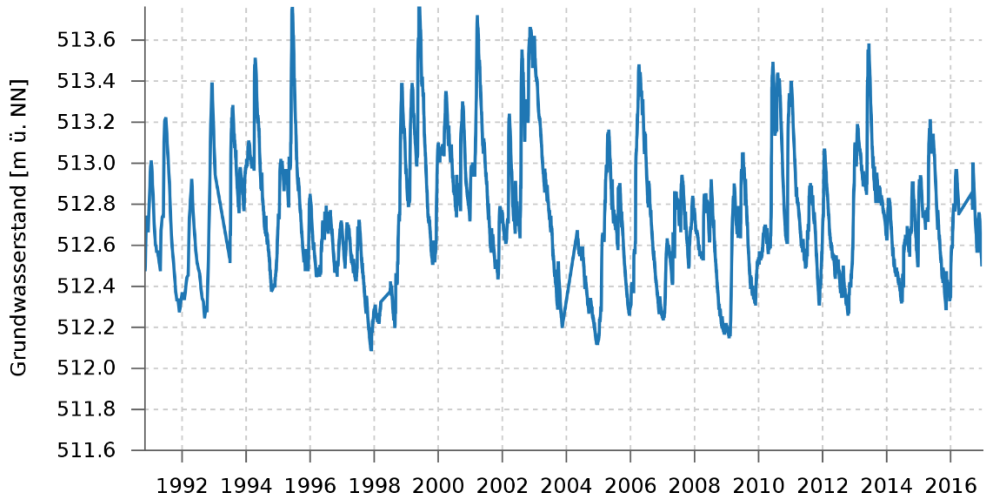

Abbildung 6.2: Ganglinie des Grundwasserstands an der Messstelle SWA_9069 (Bereich Königsbrunn)

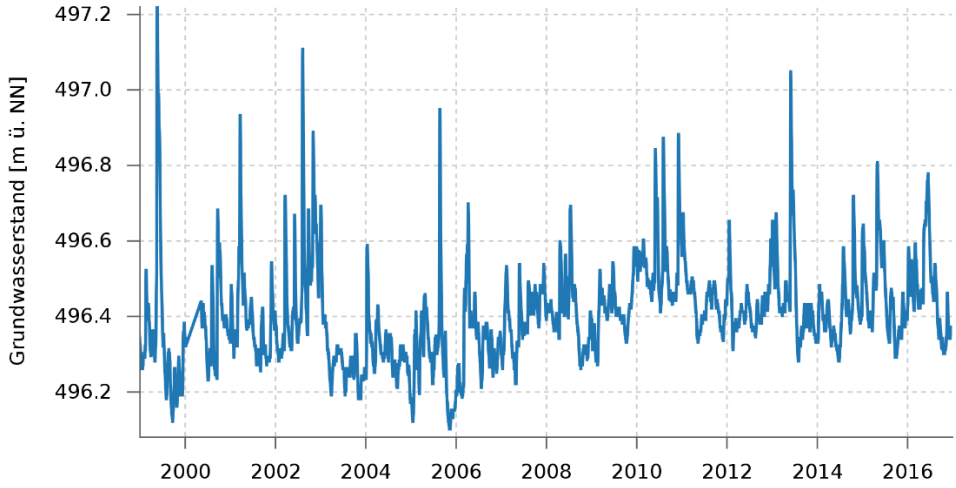

Abbildung 6.3:Ganglinie des Grundwasserstands an der Messstelle SWA_2028 (Bereich Stadtwald)

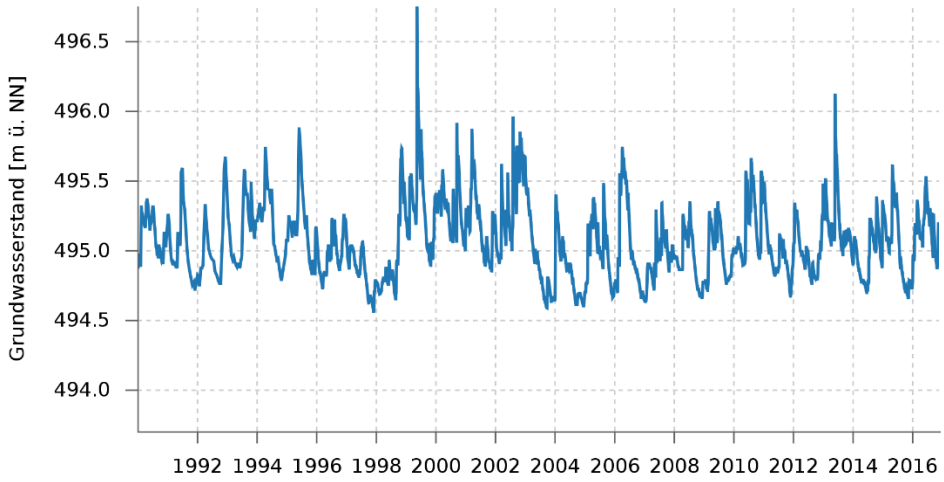

Abbildung 6.4:Ganglinie des Grundwasserstands an der Messstelle UNIPER_24420 (Bereich zwischen Lech und Paar)

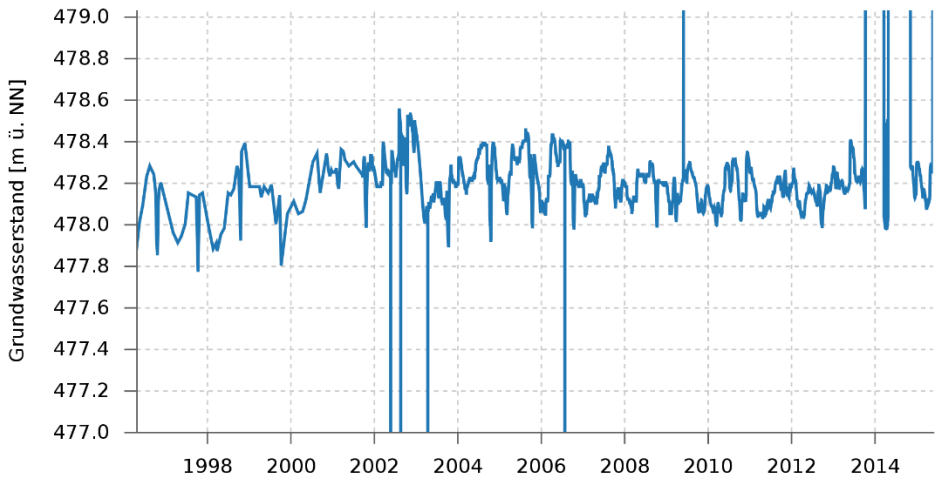

Abbildung 6.5: Ganglinie des Grundwasserstands an der Messstelle tba_0809 (Bereich Innenstadt)

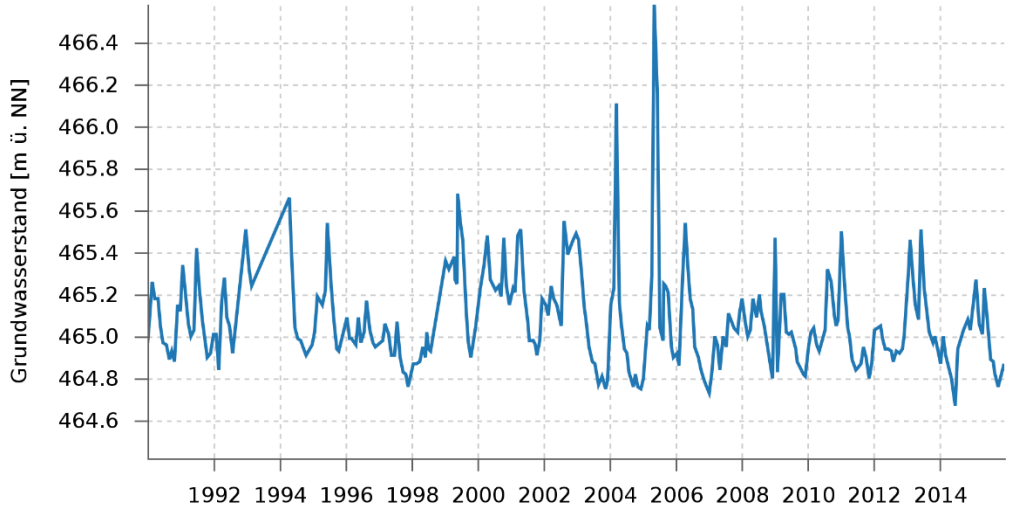

Abbildung 6.6: Ganglinie des Grundwasserstands an der Messstelle tba_0050 (Bereich Augsburg Ost)

6.3 Randbedingungen

6.3.1 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung im Modellgebiet weist einen ausgeprägten Jahresgang auf. Üblicherweise treten die geringsten Grundwasserneubildungsraten im Sommer auf. In Abbildung 6.7 ist die monatliche Grundwasserneubildung für das Jahresende

2005 sowie die mittlere monatliche Grundwasserneubildung der Jahre 1993 bis 2005 dargestellt. Besonders im November weicht die monatliche Grundwasserneubildung stark vom langjährigen Monatsmittel ab. Da niedrige Grundwasserstände für MNQ-Verhältnisse im Modell untersucht werden sollen und der Dezember auch im langjährigen Mittel relativ feucht ist, wird für den stationären MNQ-Referenzlauf die mittlere, langjährige GWN der Monate September bis November zur Hälfte angesetzt (Mittelwert außerhalb der Hochterrasse: 7,3 mm/mon). Innerhalb der Hochterrassen wurde die GWN nicht angepasst.

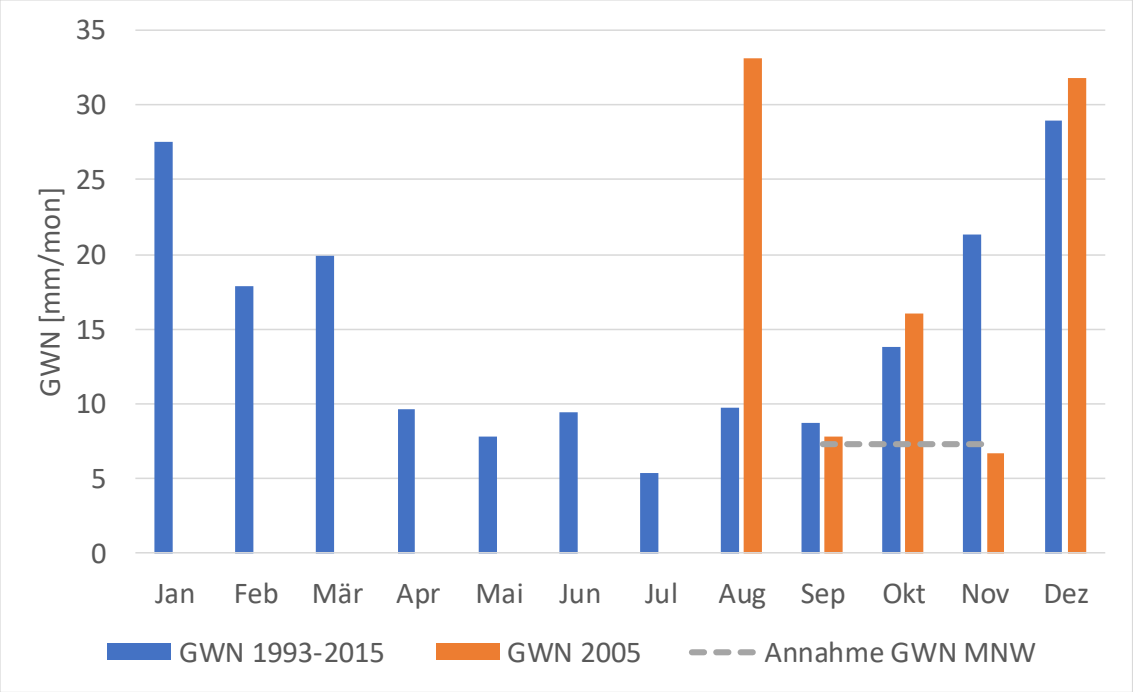

Abbildung 6.7:Monatliche Grundwasserneubildung im Modellgebiet für den Gesamtzeitraum sowie gegen Ende des Jahrs 2005

6.3.2 Lech

Am Lech im Planungsraum wird die stationäre Wasserspiegelsimulation für MNQ Verhältnisse am Lech angesetzt (ARGE SKI KUP UIBK, 2017). Dieser Zustand weicht nur gering von den Zuständen am 20.12.2005 ab und kann auch auf für spätere Planungsvarianten stationär berechnet werden.

6.3.3 Paar

An der Paar liegt eine MNW Messung aus dem Jahr 1992 vor. Diese wurde ins Grundwassermodell als Randbedingung übernommen.

6.3.4 Wertach

An der Wertach wurde ein Wasserspiegel für MQ angesetzt, da keine niedrigeren Wasserspiegelmessungen oder -simulationen vorliegen.

6.3.5 Entnahmen

An den Brunnen wurden die mittleren Entnahmen der Monate September, Oktober und November 2005 angesetzt, soweit Entnahmen auf Tages- bzw. Monatsbasis vorhanden sind. An den übrigen Brunnen wurden die Entnahmen des Jahres 2005 angesetzt.

6.3.6 GW-Sammler

Im Jahr 2005 existiert der GW-Sammler Reichenbergerstraße noch nicht. Für die MNQ-Betrachtung wurde dieser ergänzt, um einen möglichst aktuellen Referenzzustand der Grundwasserstände im Stadtgebiet abzubilden.

6.4 Ergebnisse

6.4.1 Berechnete Piezometerhöhen

Die Grundwassergleichen bei niedrigen Grundwasserständen (MNW) sind in Anlage 6.2.17 und Anlage 6.2.18 dargestellt. Abbildung 6.8 zeigt die Differenz zwischen den berechneten Grundwasserständen des MW und MNW. Positive Werte bedeuten, dass der MNW-Grundwasserspiegel unter dem MW-Grundwasserspiegel liegt. Im Bereich Königsbrunn ist die größte Differenz zwischen MW und MNW-Grundwasserständen gegeben. Die Differenz nimmt nach Norden hin deutlich ab. Die Abbildung zeigt, dass in weiten Bereichen die Ausführungen aus Kapitel 6.2 zu den im Modell errechneten Differenzen passen. So beträgt die Differenz zwischen MW und MNW im Bereich Königsbrunn über 40 cm, während im Stadtwald nur 10 – 20 cm vorliegen. Des Weiteren sind im Stadtwald in Form von lokalen Aufhöhungen oder Absenkungen deutliche Einflüsse durch die Entnahmen der SWA zu erkennen (bis hin zum Bereich um den Zoo Augsburg, wo das MNW gering über dem MW liegt).

Insgesamt liegt erwartungs- und definitionsgemäß die MNW-Berechnung unterhalb der MW-Berechnung. An einigen Stellen zeigt sich hingegen ein starker Einfluss der im Modell berücksichtigten Entnahmen, sodass es lokal zu einer Abschwächung bis hin zur Umkehr der Differenz zwischen MNW- und MW-Berechnung kommt.

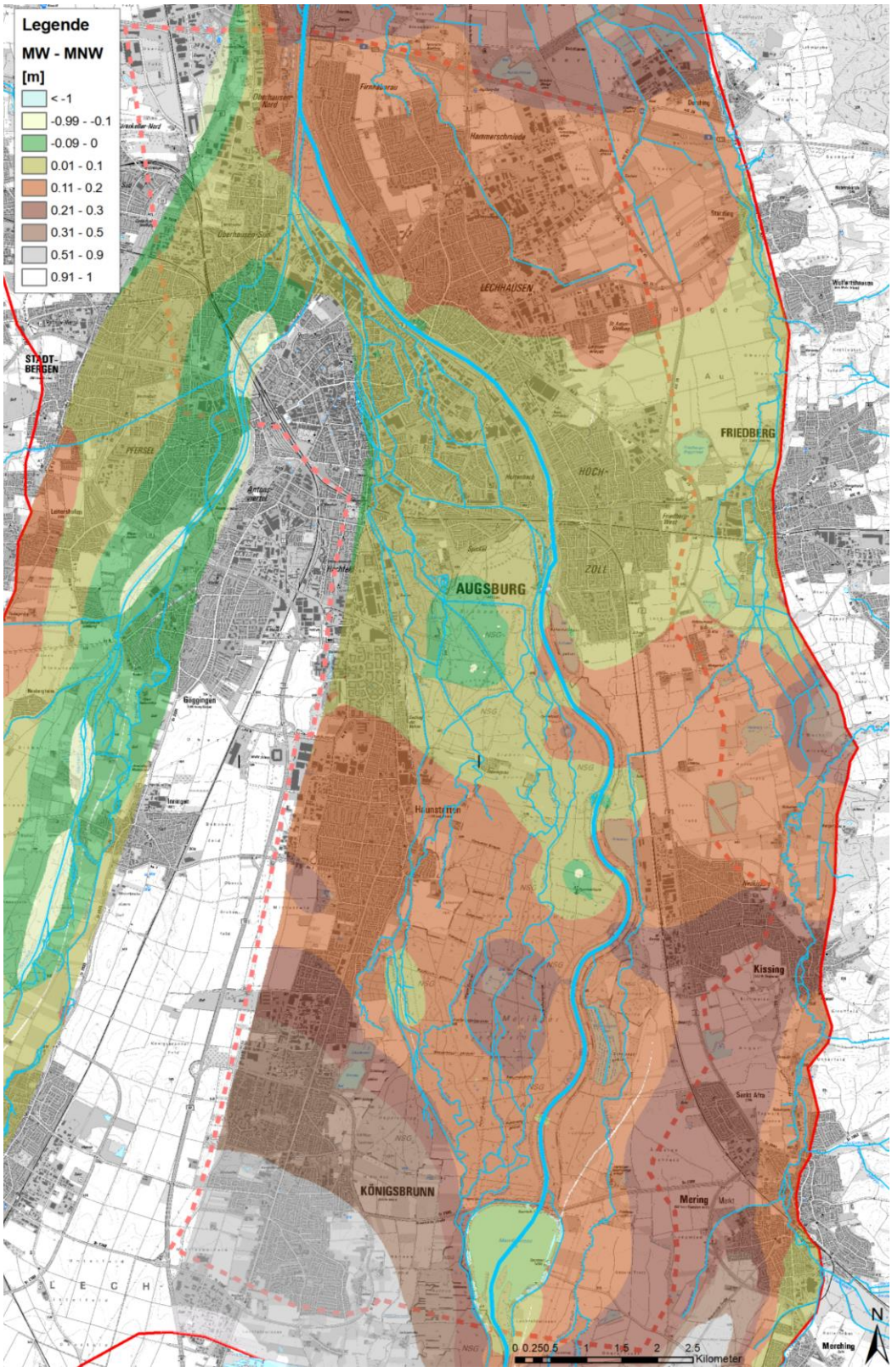

Abbildung 6.8: Differenz zwischen MNW und MW-Berechnung

6.4.2 Wasserbilanzen

Die folgenden Tabellen (Tabelle 6.1 bis Tabelle 6.7) zeigen den Austausch des Grundwassermodells über Gewässer und über weitere Randbedingungen. Bei niedrigen Grundwasserständen erhöht sich die Infiltration an den Gewässern leicht, dies kann als Erklärung dafür gewertet werden, weshalb der Grundwasserspiegel im Stadtwald nur moderat abfällt. Im Bereich zwischen Paar und Lech steigt die Infiltration aus den Gewässern nur gering an, dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass die Infiltrationsraten an Paar und dem Verlorenen Bach nur gering ansteigen. Im Innenstadtgebiet verändert sich der Austausch kaum.

Tabelle 6.1: Gemessene und simulierte Wasserbilanz im Bereich südlich des Hochablasses für den MNQ-Referenzlauf

Abschnitt	**Infiltration (+) / Exfiltration (-) [m³/s]**		
	Messung	**Simulation MW2010**	**Simulation MNW**
Lochbach Abschnitt 1	0.34	0.34	0.39
Lochbach Abschnitt 2	0.30	0.30	0.33
Lochbach Abschnitt 3	0.32	0.32	0.34
Lochbach Abschnitt 4	0.12	0.11	0.11
Lochbach Abschnitt 5	0.00	-0.01	0.00
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 1	0.77	0.77	0.84
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 2	-0.09	0.00	0.00
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 3	0.13	0.12	0.15
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 4	0.04	0.03	0.04
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 4 West	-0.12	-0.11	-0.10
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 5	0.10	0.09	0.10
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 6	0.03	0.03	0.04
Mittelbach Quelle	-0.30	-0.25	-0.18
Ölbachsystem	-0.16	0.00	0.00
Verlorener Bach, Abschnitt 1	0.18	0.19	0.20
Verlorener Bach, Abschnitt 2	0.28	0.28	0.29
Paar, gesamt	0.10	0.10	0.11

Tabelle 6.2: Simulierte Wasserbilanz im Bereich südlich des Hochablasses für den MNQ-Referenzlauf *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)*

Abschnitt	**Infiltration (+) / Exfiltration (-) [m³/s]**	
	Simulation MW2010	**Simulation MNW**
Lech, Planungsabschnitt Süd 1	-0.20	-0.14
Lech, Planungsabschnitt Süd 2	-0.24	-0.27
Lech, Planungsabschnitt Süd 3	-0.46	-0.45
Lech, Planungsabschnitt Süd 4	-0.26	-0.25
Lech, Planungsabschnitt Süd 5	-0.23	-0.25
Lech, Planungsabschnitt Süd 6	-0.10	-0.18
Lech, Planungsabschnitt Süd 7	-1.07	-1.03
Lech, Planungsabschnitt Süd, gesamt	-2.56	-2.57

Tabelle 6.3: Gemessene und simulierte Wasserbilanz im Bereich Innenstadt für den MNQ-Referenzlauf

Abschnitt	**Infiltration (+) / Exfiltration (-) [m³/s]**		
	Messung	**Simulation MW2010**	**Simulation MNW**
GW-Sammler			
Schleifenstraße	-0.33	-0.34	-0.33
Prinzstraße	-0.20	-0.24	-0.24

Tabelle 6.4: Simulierte Wasserbilanz im Bereich Innenstadt für den MNQ-Referenzlauf *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)*

Abschnitt	**Infiltration (+) / Exfiltration (-) [m³/s]**	
	Simulation MW2010	**Simulation MNW**
Lech, Planungsabschnitt Nord 1	-0.13	-0.14
Lech, Planungsabschnitt Nord 2	-0.16	-0.16
Lech, Planungsabschnitt Nord 3	-0.06	-0.06
Lech, Planungsabschnitt Nord 4	-0.02	-0.02
Lech, Planungsabschnitt Nord 5	-0.13	-0.13
Lech, Planungsabschnitt Nord 6	-0.16	-0.16
Lech, Planungsabschnitt Nord 7	-0.11	-0.10
Austritte bei ins Tertiär eingeschnittenem Lech	-0.54	-0.54
Lech, Planungsabschnitt Nord, gesamt	-1.30	-1.31
Stadtbäche Mitte	0.23	0.23
Stadtbäche Nord	0.08	0.09
Stadtbäche Ost	0.30	0.30
Stadtbäche Süd	0.18	0.18
Ausleitung Hochablass	0.10	0.10
Stadtbäche, gesamt	0.90	0.91
GW-Sammler		
Reichenbergerstraße	-0.05	-0.05

Tabelle 6.5: Wasserbilanz im Wertachtal für den MNQ-Referenzlauf *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)*

Abschnitt	**Infiltration (+) / Exfiltration (-) [m³/s]**	
	Simulation MW2010	**Simulation MNW**
Wertach, Abschnitt 1	-0.08	-0.11
Wertach, Abschnitt 2	-0.17	-0.17
Wertach, Abschnitt 3	-0.51	-0.47
Wertach, Abschnitt 4	-0.18	-0.16
Wertach, Abschnitt 5	-0.20	-0.19
Wertach, Abschnitt 6	-0.01	-0.01
Wertach, gesamt	-1.15	-1.10

Tabelle 6.6: Simulierte Wasserbilanz weiterer Randbedingungen für den MNQ-Referenzlauf *(in den aufgeführten Abschnitten liegen keine gemessenen Vergleichsgrößen vor)*

Abschnitt	**Infiltration (+) / Exfiltration (-) [m³/s]**	
	Simulation MW2010	**Simulation MNW**
Festpotentialrand Südrand	1.76	1.42
Festpotentialrand Nordrand	-0.75	-0.70
Festpotentialrand HGW2	-0.07	-0.05
Zuflussrand Ost	0.28	0.28
Zuflussrand Nordwest	0.18	0.18
Zuflussrand West	0.06	0.06
Zuflussrand Südwest	0.12	0.12

Tabelle 6.7: Wasserumsatz des Modells für den MNQ-Referenzlauf (Lage der Randbedingungen, s. Anlage 6.2.2)

Art Randbedingung	**Umsatz [m³/s]**		
	Zufluss	**Abfluss**	**Netto**
Festpotentialränder	5.088	4.403	0.686
Zuflussränder	0.636	0.001	0.635
Gewässer, GW-Sammler, Abwasserkanäle	7.933	9.121	-1.199
Brunnen, Austritte bei ins Tertiär eingeschnittenem Lech (RB 4. Art)	0.000	1.409	-1.409
Grundwasserneubildung	1.272	0.000	1.272
Summe	14.928	14.934	-0.016

7 Sensitivitätsanalyse

7.1 Übersicht

Nach DVGW (2016) ist das Ziel einer Sensitivitätsanalyse die Identifikation der kalibrierungsrelevanten Parameter. Hierzu werden in mehreren Simulationsläufen relevante Parameter variiert und deren Auswirkung auf die Kalibrierungsgenauigkeit aufgezeigt. In dieser Sensitivitätsanalyse werden die Durchlässigkeiten, die Leakage-Koeffizienten der Fließgewässer, die Grundwasserneubildung sowie der speichernutzbare Hohlraumanteil innerhalb der Grenzen der plausiblen parameterspezifischen Wertebereiche variiert.
Unterschiedliche Parameter können sich in ähnlicher Weise auf das Ergebnis einer Simulation auswirken. Unter Umständen können beliebige Parameterkombinationen zum selben Ergebnis führen. Bei der Kalibrierung sollten die Parameter möglichst so gewählt werden, dass Mehrdeutigkeiten minimiert werden können. Eine Methode zum Erkennen solcher Mehrdeutigkeiten in den gewählten Parametern ist die sogenannte Kovarianzanalyse. Diese wird hier als Erweiterung der Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei wird von der Durchführung der „klassischen“ Kovarianzanalyse, siehe z.B. Hill & Tiedeman (2007) etwas abgewichen. Die Methodik der hier durchgeführten Kovarianzanalyse wird unten erläutert.

7.2 Sensitivität der Modellparameter

Bei der Sensitivitätsanalyse werden die Auswirkungen der Variation von Modellparametern auf die Kalibrierungsgüte untersucht. Für die Sensitivität von Durchlässigkeiten, Leakage-Koeffizienten und Grundwasserneubildung dient die stationäre Kalibrierung aus Kapitel 2.8 als Referenzzustand. Für die Sensitivität des speichernutzbaren Hohlraumanteils dient die instationäre Kalibrierung aus Kapitel 4 als Referenzzustand.
Zur Bewertung der Kalibrierungsgüte werden Grundwasserstände an den Grundwassermessstellen und die aus Abflussmessungen abgeleiteten Ex- und Infiltrationsraten herangezogen. Zum Vergleich zwischen Messung und Rechnung werden dieselben Kriterien wie in Kapitel 3.3 herangezogen. Für jeden Parameter werden vier Simulationen durchgeführt (2 x stufenweise Erhöhung + 2 x stufenweise Verringerung des Parameters). Die Grenzen des Wertebereichs stellen jeweils physikalisch plausible Ober- und Untergrenzen für den Parameter dar. Eine Übersicht über die durchgeführten Sensitivitätsläufe ist in Tabelle 7.1 gegeben.

Tabelle 7.1: Übersicht über durchgeführte Sensitivitätsläufe.

Parameter	Referenzzustand	Wertebereich
Durchlässigkeit (kf-Wert)	Stationär: Mittelwasser April/Mai2010	Faktoren angewendet auf Referenzwerte: 0,5, 0,67, 1,5, 2,0
Leakage-Koeffizient	Stationär: Mittelwasser April/Mai2010	Faktoren angewendet auf Referenzwerte: 0,1, 0,2, 5, 10
Grundwasserneubildung	Stationär: Mittelwasser April/Mai2010	Faktoren angewendet auf Referenzwerte: 0,5, 0,75, 1,25, 1,5
Speichernutzbarer Hohlraumanteil	Instationär: HW 1999	Addition/Subtraktion von Referenzwerten: -0,10, -0,05, +0,05, + 0,10

7.2.1 Durchlässigkeiten

Für die Variation der Durchlässigkeiten (kf-Werte) wurden die Faktoren aus Tabelle 7.1 auf den Quartär und die Deckschichten global angewandt. Ausgenommen wurden die Hochterrassen, da hier kein Austausch mit den Fließgewässern stattfindet und sie somit bezogen auf den Modellumsatz von untergeordneter Bedeutung sind. Des Weiteren wurden die kf-Werte der Modellschichten des Tertiärs nicht variiert, da diese eine separate Einheit bilden und aufgrund der geringen Auf- und Abstiegsraten ins Quartär als gering sensitiv einzustufen sind (siehe Tabelle 3.9).
Tabelle 7.2 zeigt die mittlere absolute Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Ergebnissen im Vergleich zum stationären Referenzzustand (Mittelwasser April/Mai 2010) für die Grundwassermessstellen. Die Ergebnisse sind für verschiedene Messstellengruppen dargestellt. Die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation stellt sich in der Mehrzahl der Messstellengruppen für den Referenzzustand ein. Das 0,65 m-Kriterium wird für alle dargestellten Messstellengruppen im variierten Wertebereich eingehalten (siehe Erläuterung in Kapitel 3.3 zu 1%-Kriterium). Die Güte der Anpassung für die kf-Wert-Reduzierung um den Faktor 0,67 ist nur geringfügig schlechter als der Referenzzustand.
In Abbildung 7.1 sind die Abweichungen (Messung-Simulation) für die Messstellen im Gesamtgebiet grafisch dargestellt für die Faktoren 0,67 und 1,5 sowie für den kalibrierten Referenzzustand. Betrachtet man die jeweiligen Trendlinien so wird deutlich, dass die globale Erhöhung bzw. Verringerung des kf-Werts im Vergleich zum Referenzzustand zu einer geringen systematischen Abweichung führt. Im

Referenzzustand ist eine solche systematische Abweichung nicht auszumachen (horizontale Trendlinie).
In Tabelle 7.3 sind die Abweichungen zwischen den gemessenen und den simulierten Ex- und Infiltrationsraten dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erhöhung des

Tabelle 7.2: Mittlere absolute Abweichung verschiedener Messstellengruppen für verschiedene kf-Wert Faktoren für Mittelwasser April/Mai 2010.

kf-Wert Faktoren	**0,5**	**0,67**	**1,0**	**1,5**	**2,0**
Messstellen	**Mittlere Absolute Abweichung [m]**				
Stadtwald	0.26	0.25	0.26	0.30	0.34
Königsbrunn/Haunstetten	0.37	0.33	0.31	0.39	0.46
davon Messstellen Stadt Königsbrunn	0.33	0.32	0.33	0.39	0.44
Bereich zw. Lech u. Paar	0.45	0.42	0.43	0.43	0.44
Innenstadt	0.43	0.34	0.32	0.40	0.50
Stadtgebiet Ost	0.35	0.34	0.38	0.42	0.46
Wertachtal	0.49	0.46	0.43	0.43	0.46
Lechtal Nord	0.62	0.53	0.40	0.40	0.46
Aussagegebiet	**0.38**	**0.34**	**0.34**	**0.39**	**0.44**
Gesamtgebiet	**0.43**	**0.39**	**0.37**	**0.40**	**0.44**

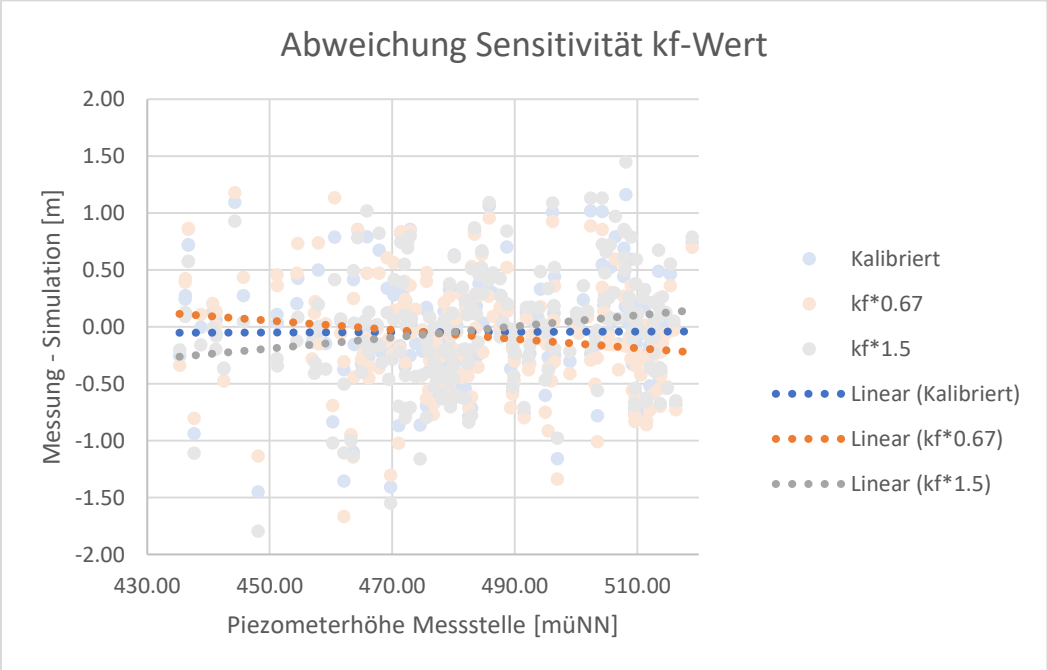

Abbildung 7.1: Abweichung der Grundwasserstände zwischen Messung und Simulation im Gesamtgebiet für verschiedene kf-Wert Faktoren für Mittelwasser April/Mai 2010.

kf-Werts zu einer Vergrößerung der Ex- und Infiltrationsraten führt, so dass der Umsatz im Modell erhöht wird. Eine Verringerung der kf-Werte führt zum gegenteiligen Effekt. Die Übereinstimmung mit den gemessenen Werten ist für fast alle Gewässerabschnitte für den kalibrierten Referenzzustand am besten. Im stark infiltrierenden und deswegen für den Modellumsatz sehr relevanten „Gewässer Stadtwald Abschnitt 1“ trifft der Referenzzustand den gemessenen Wert mit Abstand am besten.
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass:

- die Abweichung zwischen gemessenen und simulierten Grundwasserständen am geringsten im Referenzzustand ist
- die Piezometerhöhen aber nur gering sensitiv auf Änderungen im kf-Wert reagieren
- die Übereinstimmung der Simulation mit Ex- und Infiltrationsraten am besten im kalibrierten Referenzzustand ist
- die Ex- und Infiltrationsraten sensitiv auf die Erhöhung/Verringerung des kf-Werts reagieren

Tabelle 7.3: Vergleich In- und Exfiltrationsraten für Gewässerabschnitte mit Messung für verschiedene kf-Wert Faktoren.

Gewässerabschnitte	kf-Wert Faktoren					
	0.5	**0.67**	**1.0**	**1.5**	**2.0**	**Messung**
	In-/Exfiltration in [m³/s]					
Lochbach Abschnitt 1	0.28	0.31	**0.34**	0.37	0.39	**0.34**
Lochbach Abschnitt 2	0.21	0.24	**0.30**	0.35	0.38	**0.3**
Lochbach Abschnitt 3	0.27	0.29	**0.32**	0.35	0.36	**0.32**
Lochbach Abschnitt 4	0.09	0.10	**0.11**	0.13	0.11	**0.12**
Lochbach Abschnitt 5	-0.01	-0.01	**-0.01**	0.00	0.00	**0.00**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 1	0.55	0.64	**0.77**	0.91	1.00	**0.77**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 2	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**-0.09**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 3	0.11	0.12	**0.12**	0.13	0.14	**0.13**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 4	0.03	0.03	**0.03**	0.04	0.04	**0.04**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 4	0.03	0.03	**0.03**	0.04	0.04	**0.04**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 5	0.09	0.09	**0.10**	0.10	0.10	**0.10**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 6	0.04	0.03	**0.03**	0.03	0.03	**0.03**
Mittelbach Quelle	-0.24	-0.25	**-0.25**	-0.23	-0.20	**-0.30**
Ölbachsystem	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**-0.16**
Verlorener Bach, Abschnitt 1	0.16	0.17	**0.19**	0.20	0.21	**0.18**
Verlorener Bach, Abschnitt 2	0.25	0.26	**0.28**	0.28	0.29	**0.28**
Paar, gesamt	0.05	0.07	**0.10**	0.14	0.16	**0.10**

7.2.2 Leakage-Koeffizienten der Fließgewässer

Die Leakage-Koeffizienten der Fließgewässer für Infiltration und Exfiltration wurden global gemäß den in Tabelle 7.1 gegebenen Faktoren variiert. Nicht angepasst wurden die Infiltrationskoeffizienten der Grundwassersammler (Schleifenstraße, Prinzstraße und Reichenbergstraße) und der Kanalisation, da diese nur Grundwasser exfiltrieren. In Tabelle 7.4 sind wiederum die mittleren absoluten Abweichungen zwischen Grundwasserstandsmessungen und Simulation für verschiedene Messstellengruppen dargestellt. Die Güte der Anpassung ist in allen Messstellengruppen für den kalibrierten Referenzzustand am besten. Die simulierten Grundwasserstände an den Messstellen reagieren deutlich auf die Erhöhung/Verringerung der Leakage-Koeffizienten.

Tabelle 7.4: Mittlere absolute Abweichung verschiedener Messstellengruppen für verschiedene Leakage-Koeffizienten Faktoren für Mittelwasser April/Mai 2010.

	Leakage-Koeffizienten Faktoren				
	0.1	**0.2**	**1.0**	**5.0**	**10.0**
Messstellen	**Mittlere Absolute Abweichung [m]**				
Stadtwald	0.50	0.44	0.26	0.51	0.67
Königsbrunn/Haunstetten	0.67	0.59	0.31	0.50	0.64
davon Messstellen Stadt Königsbrunn	0.62	0.55	0.33	0.42	0.58
Bereich zw. Lech u. Paar	0.50	0.47	0.43	0.49	0.65
Innenstadt	0.49	0.39	0.32	0.54	0.65
Stadtgebiet Ost	0.55	0.46	0.38	0.37	0.44
Wertachtal	1.16	0.72	0.43	0.54	0.58
Lechtal Nord	1.74	1.20	0.40	0.84	0.95
Aussagegebiet	**0.62**	**0.51**	**0.34**	**0.49**	**0.62**
Gesamtgebiet	**0.83**	**0.62**	**0.37**	**0.54**	**0.65**

Aus den Trendlinien der Abweichung zwischen Messung und Simulation in Abbildung 7.2 sind systematische Abweichungen deutlich erkennbar. Eine Verringerung der Leakage-Koeffizienten (Faktor 0,2) führt im Süden des Modellgebiets tendenziell zu einer Verringerung der Piezometerhöhen, da weniger Wasser aus den Fließgewässern ins Grundwasser infiltriert. Im Norden des Modellgebiets ist der Trend dagegen umgekehrt. Hier führt ein verringerter Leakage-Koeffizient tendenziell zu höheren simulierten Grundwasserständen, da der Wiederstand gegenüber der Exfiltration von Grundwasser in die Fließgewässer sowie

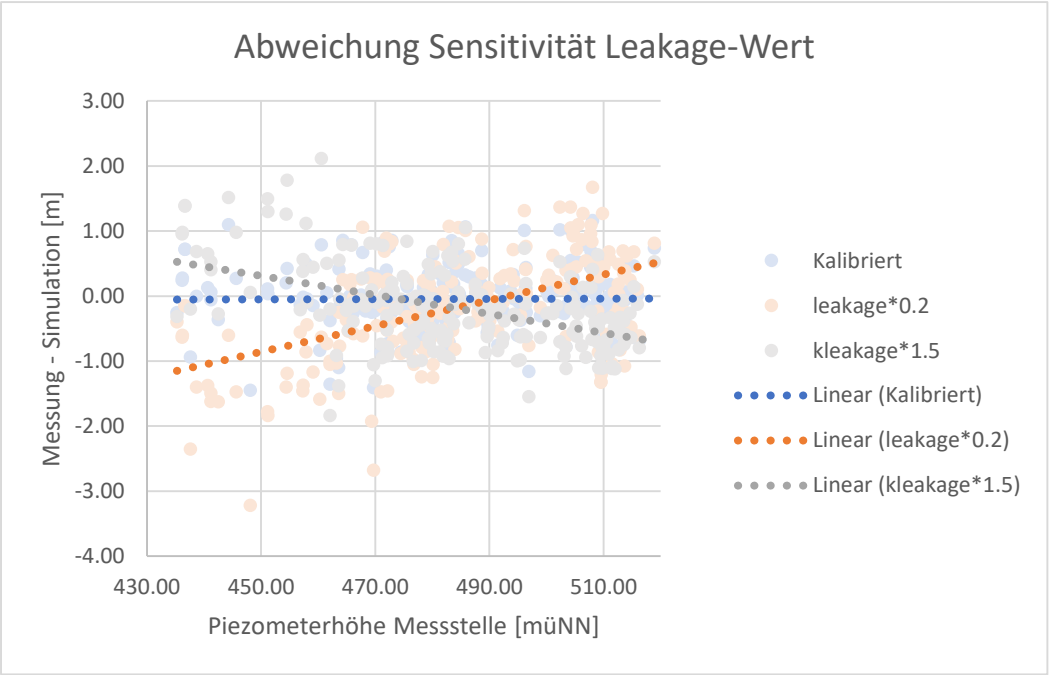

Abbildung 7.2: Abweichung der Grundwasserstände zwischen Messung und Simulation im Gesamtgebiet für verschiedene Leakagekoeffizienten für Mittelwasser April/Mai 2010.

die Kanalisation erhöht wird. Der gegenläufige Trend lässt sich für eine Erhöhung der Leakage-Koeffizienten beobachten.
Vergleicht man die für den Modellumsatz relevanten gemessenen Ex- und Infiltrationsraten mit den simulierten Raten in Tabelle 7.5, so erkennt man eine sehr deutliche Reaktion des Systems auf eine Erhöhung/Verringerung der Leakage-Koeffizienten. Die Ex- und Infiltrationsraten sinken erwartungsgemäß bei Verringerung der Leakage-Koeffizienten und steigen bei Erhöhung des Leakage-Koeffizienten. Im „Gewässer Stadtwald Abschnitt 1“ führt eine Reduzierung um den Faktor 0,2 zu einer Abnahme der Infiltration um den Faktor 0,3. Der umgekehrte Fall (Faktor 5) führt zu einer Verdoppelung der Infiltrationsrate.
Zusammenfassend zur Variation der Leakage-Koeffizienten lässt sich feststellen, dass:

- die Piezometerhöhen sensitiv auf die Variation der Leakage-Koeffizienten reagieren
- die Ex- und Infiltrationsraten stark sensitiv auf die Variation der Leakage-Koeffizienten reagieren

Tabelle 7.5: Vergleich In- und Exfiltrationsraten für Gewässerabschnitte mit Messung für verschiedene Leakage-Koeffizienten Faktoren.

Gewässerabschnitte	Faktoren Leakage-Koeffizienten					
	0.1	**0.2**	**1.0**	**5.0**	**10.0**	**Messung**
	In-/Exfiltration in [m³/s]					
Lochbach Abschnitt 1	0.04	0.09	**0.34**	1.02	1.47	**0.34**
Lochbach Abschnitt 2	0.05	0.09	**0.30**	0.64	0.85	**0.30**
Lochbach Abschnitt 3	0.04	0.08	**0.32**	1.01	1.41	**0.32**
Lochbach Abschnitt 4	0.01	0.02	**0.11**	0.39	0.70	**0.12**
Lochbach Abschnitt 5	0.00	0.00	**-0.01**	-0.02	-0.02	**0.00**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 1	0.13	0.24	**0.77**	1.58	1.89	**0.77**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 2	0.00	0.00	**0.00**	0.00	-0.01	**-0.09**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 3	0.02	0.03	**0.12**	0.37	0.53	**0.13**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 4	0.00	0.01	**0.03**	0.10	0.14	**0.04**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 4	0.00	0.01	**0.03**	0.10	0.14	**0.04**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 5	0.01	0.02	**0.10**	0.35	0.57	**0.10**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 6	0.00	0.01	**0.03**	0.14	0.23	**0.03**
Mittelbach Quelle	0.00	-0.02	**-0.25**	-0.87	-1.26	**-0.30**
Ölbachsystem	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**-0.16**
Verlorener Bach, Abschnitt 1	0.02	0.04	**0.19**	0.58	1.00	**0.18**
Verlorener Bach, Abschnitt 2	0.03	0.06	**0.28**	1.03	1.68	**0.28**
Paar, gesamt	0.02	0.04	**0.10**	0.13	0.09	**0.10**

7.2.3 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung wurde global (im gesamten Modellgebiet) gemäß den Faktoren in Tabelle 7.1 variiert. Tabelle 7.6 zeigt die mittlere absolute Abweichung für die durchgeführten Variationen für verschiedene Messstellengruppen. Aus der Tabelle ist deutlich erkennbar, dass die Änderungen in der Güte der Kalibrierung bei erhöhter und verringerter Grundwasserneubildungsrate gering sind.

Tabelle 7.6: Mittlere absolute Abweichung verschiedener Messstellengruppen für verschiedene Faktoren für die Grundwasserneubildungsrate für Mittelwasser April/Mai 2010.

	Faktoren Grundwasserneubildungsrate				
	0.5	**0.75**	**1.0**	**1.25**	**1.5**
Messstellen	**Mittlere Absolute Abweichung [m]**				
Stadtwald	0.25	0.25	0.26	0.26	0.27
Königsbrunn/Haunstetten	0.33	0.32	0.31	0.31	0.31
davon Messstellen Stadt Königsbrunn	0.35	0.34	0.33	0.33	0.34
Bereich zw. Lech u. Paar	0.43	0.43	0.43	0.43	0.42
Innenstadt	0.29	0.30	0.32	0.33	0.35
Stadtgebiet Ost	0.36	0.37	0.38	0.40	0.43
Wertachtal	0.46	0.44	0.43	0.43	0.45
Lechtal Nord	0.44	0.42	0.40	0.41	0.43
Aussagegebiet	**0.36**	**0.35**	**0.34**	**0.35**	**0.36**
Gesamtgebiet	**0.40**	**0.39**	**0.37**	**0.38**	**0.41**

Abbildung 7.3 zeigt die Abweichungen zwischen Messung und Simulation. Bei den erhöhten und verringerten Grundwasserneubildungswerten lassen sich geringe systematische Abweichungen aus den Trendlinien erkennen. Eine erhöhte Neubildung führt zu leicht erhöhten Grundwasserständen im südlichen Teil des Modellgebiets, aufgrund des vergrößerten Umsatzes. Für eine verringerte Grundwasserneubildung ist der Trend erwartungsgemäß umgekehrt.
Auch der Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Ex- und Infiltrationsraten in Tabelle 7.7 zeigt nur eine sehr geringe Sensitivität des Parameters Grundwasserneubildung. Die Grundwasserneubildung ist demnach von untergeordneter Bedeutung für die Kalibrierungsgüte.

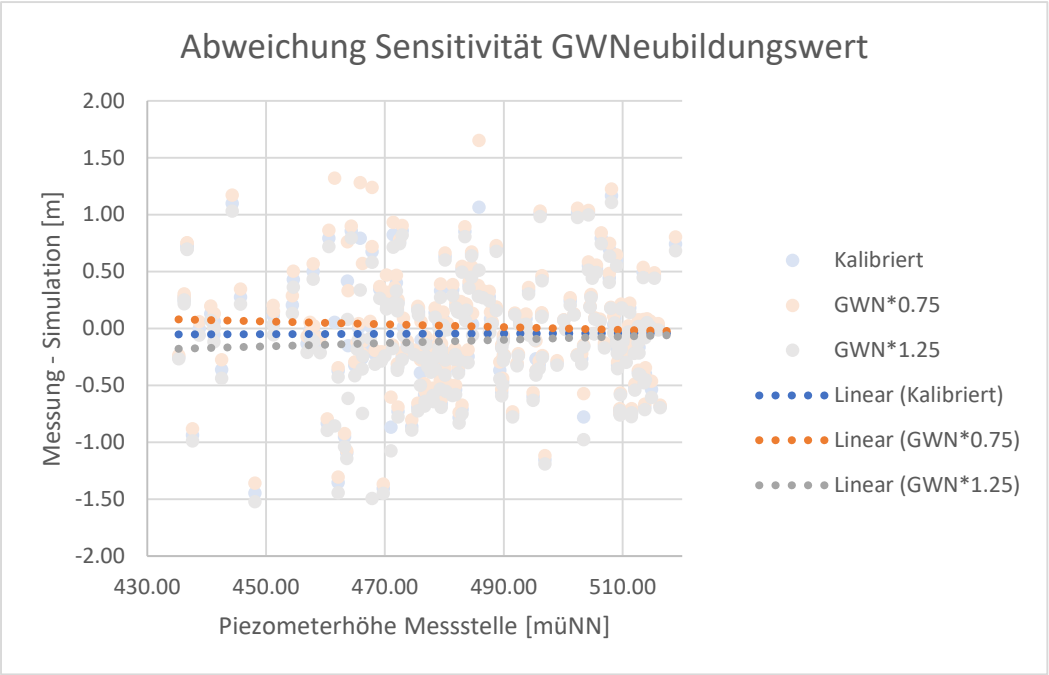

Abbildung 7.3: Abweichung der Grundwasserstände zwischen Messung und Simulation im Gesamtgebiet für verschiedene Grundwasserneubildungsraten für Mittelwasser April/Mai 2010.

Tabelle 7.7: Vergleich In- und Exfiltrationsraten für Gewässerabschnitte mit Messung für verschiedene Grundwasserneubildungsraten.

Gewässerabschnitte	Faktoren Grundwasserneubildungsrate					
	0.5	**0.75**	**1.0**	**1.25**	**1.5**	**Messung**
	In-/Exfiltration in [m³/s]					
Lochbach Abschnitt 1	0.34	0.34	**0.34**	0.34	0.34	**0.34**
Lochbach Abschnitt 2	0.30	0.30	**0.30**	0.29	0.29	**0.30**
Lochbach Abschnitt 3	0.32	0.32	**0.32**	0.32	0.32	**0.32**
Lochbach Abschnitt 4	0.12	0.12	**0.11**	0.11	0.11	**0.12**
Lochbach Abschnitt 5	0.00	0.00	**-0.01**	0.00	0.00	**0.00**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 1	0.78	0.78	**0.77**	0.77	0.77	**0.77**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 2	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**-0.09**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 3	0.13	0.13	**0.12**	0.12	0.12	**0.13**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 4	0.03	0.03	**0.03**	0.03	0.03	**0.04**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 4	0.03	0.03	**0.03**	0.03	0.03	**0.04**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 5	0.10	0.10	**0.10**	0.09	0.09	**0.10**
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 6	0.04	0.04	**0.03**	0.03	0.03	**0.03**
Mittelbach Quelle	-0.24	-0.24	**-0.25**	-0.26	-0.26	**-0.30**
Ölbachsystem	0.00	0.00	**0.00**	0.00	0.00	**-0.16**
Verlorener Bach, Abschnitt 1	0.19	0.19	**0.19**	0.19	0.18	**0.18**
Verlorener Bach, Abschnitt 2	0.28	0.28	**0.28**	0.27	0.27	**0.28**
Paar, gesamt	0.12	0.11	**0.10**	0.10	0.09	**0.10**

7.2.4 Speichernutzbarer Hohlraumanteil

7.2.4.1 Variation des Parameters

Der speichernutzbare Hohlraumanteil (Porosität) wird, wie zuvor die Durchlässigkeiten, global auf den Quartärkies angewandt. Ausgelassen werden wiederum die Hochterrassen und das Tertiär. Die Tabelle 7.1 gegebenen Werte werden von den jeweiligen im Modell hinterlegten Porositäten addiert oder subtrahiert. Als instationär kalibrierte Referenzlösung dient das Jahr 1999 mit dem darin enthaltenen Hochwasserereignis, siehe Kapitel 4.

Abbildung 7.4 bis Abbildung 7.6 zeigen die Ganglinien einiger Messstellen während des Hochwasserereignisses, die durch einen verminderten speichernutzbaren Hohlraumanteil eine bessere Anpassung an die Messung erzielen. Vor allem das Ansteigen während des Pfingsthochwasser wird besser nachgebildet. Zusätzlich wurde der im Kapitel 4.6.1 beschriebene NSME‘-Koeffizient für jede Messstelle und jeden Simulationslauf berechnet. Hieraus ergibt sich je Messstelle ein speichernutzbarer Hohlraumanteil, der am besten die Messung nachbildet (höchster NSME‘-Koeffizient). Die räumliche Lage der Messstellen sowie der am besten angepasste Simulationslauf ist Abbildung 7.7 zu entnehmen. Es ergibt sich westlich des Lechs (eher Lech-fern) ein relativ homogener Bereich, in dem ein speichernutzbarer Hohlraumanteil von 0,1 zu einer besseren Anpassung führen würde. Östlich des Lechs kann auch ein solcher Bereich angenommen werden, allerdings besteht hier eine größere Unsicherheit außerhalb des Aussagegebiets (fehlende Dynamik an einigen Messstellen, vgl. Kapitel 4.5). Im Folgenden Kapitel wird daher ein Modelllauf mit global reduzierten speichernutzbarem Hohlraumanteil vorgestellt.

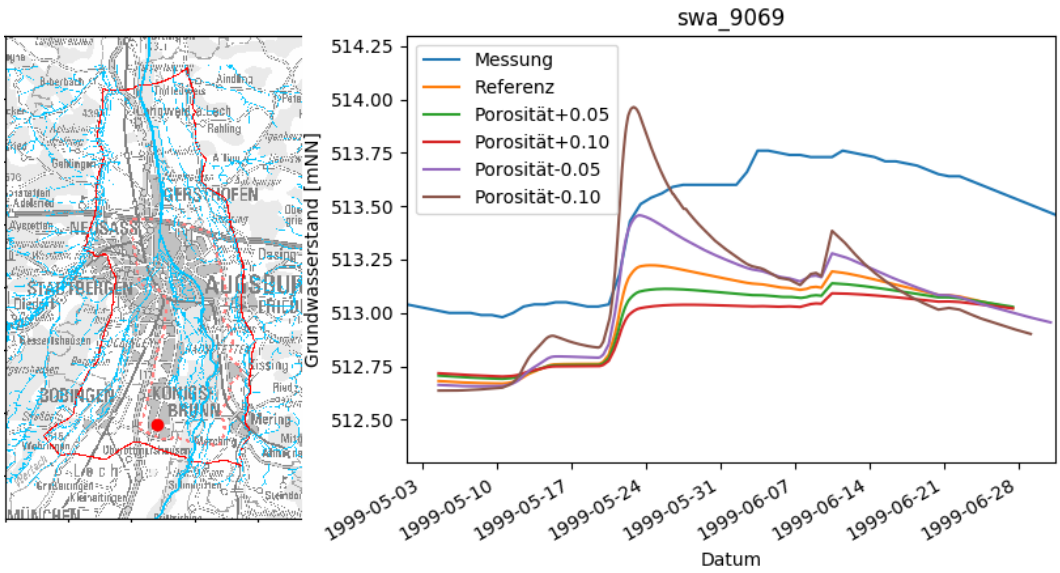

Abbildung 7.4:Vergleich der Ganglinien an der Messstelle swa_9069 (Königsbrunn) für verschiedene Sensitivitätsläufe zum speichernutzbaren Hohlraumanteil

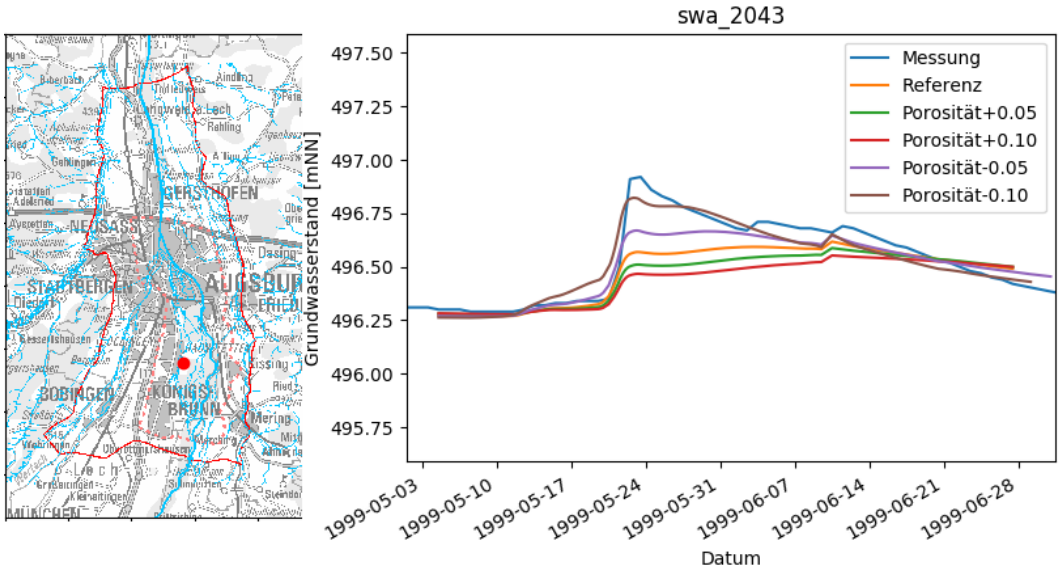

Abbildung 7.5:Vergleich der Ganglinien an der Messstelle swa_2043 (Stadtwald) für verschiedene Sensitivitätsläufe zum speichernutzbaren Hohlraumanteil

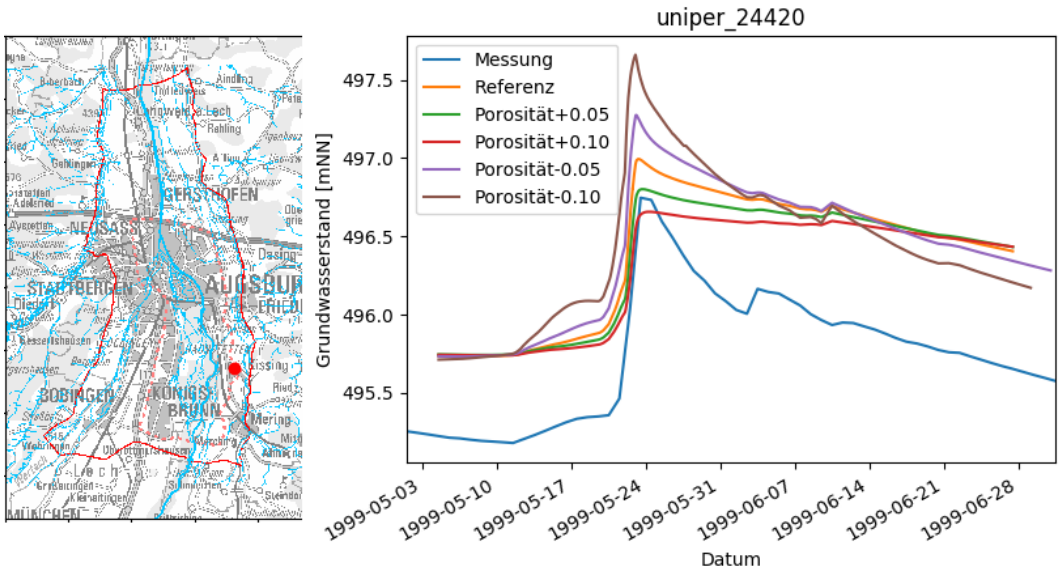

Abbildung 7.6:Vergleich der Ganglinien an der Messstelle uniper_24420 (Bereich zw. Lech und Paar) für verschiedene Sensitivitätsläufe zum speichernutzbaren Hohlraumanteil

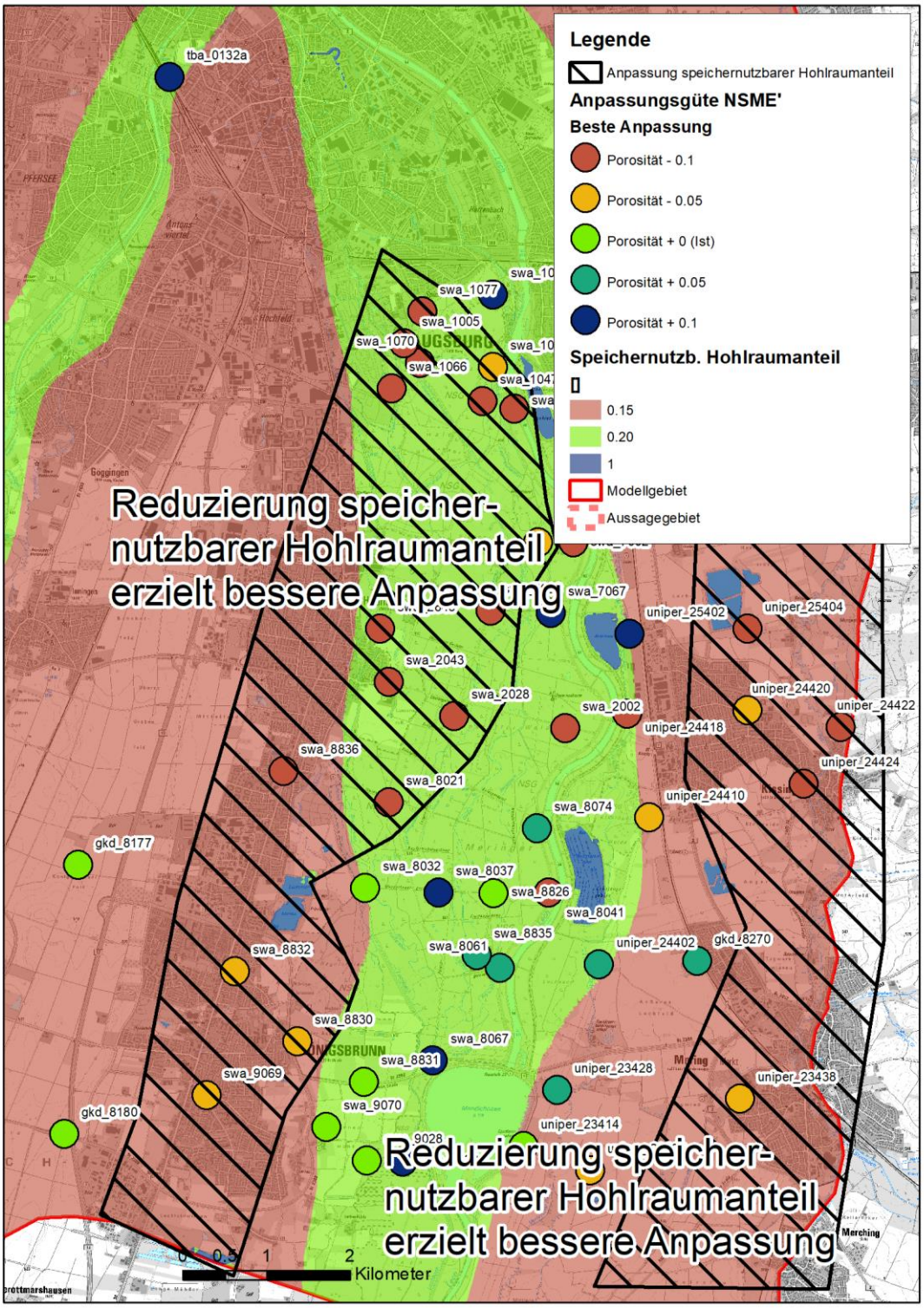

Abbildung 7.7: Bereiche in denen während des HW1999-Kalibrierungszeitraum eine Reduzierung des speichernutzbaren Hohlraumanteils zu einer verbesserten Anpassung führt.

7.2.4.2 Simulationslauf mit global reduzierten speichernutzbarem Hohlraumanteil

Die Sensitivitätsanalyse des vorangegangenen Kapitels hat gezeigt, dass ein bereichsweise reduzierter speichernutzbarer Hohlraumanteil von 0,1 zu einer besseren Anpassung führt. Dies wird vor allem im Übergangsbereich zwischen Auenstufe, Postglazial und Niederterrasse im Bereich Königsbrunn/Haunstetten deutlich. Es wird daher vorgeschlagen, bei Prognosen mit dem Grundwassermodell einen Modelllauf mit diesem reduzierten speichernutzbaren Hohlraumanteil mitzuführen, um so einen maximalen Wirkraum aus dem Referenzzustand und dem Modelllauf mit reduziertem speichernutzbarem Hohlraumanteil ermitteln zu können. Abbildung 7.8 bis Abbildung 7.10 zeigen einen exemplarischen Vergleich zwischen den Modellläufen an mehreren Messstellen. Abbildung 7.11 zeigt in der Übersicht welcher Modellauf den besten NSME‘-Koeffizienten erzielt. Die Abbildung belegt, dass in einigen Bereichen ein geringerer speichernutzbarer Hohlraumanteil zu einer verbesserten Anpassung führt. Dies ist im Rahmen des Modelleinsatz zu berücksichtigen.

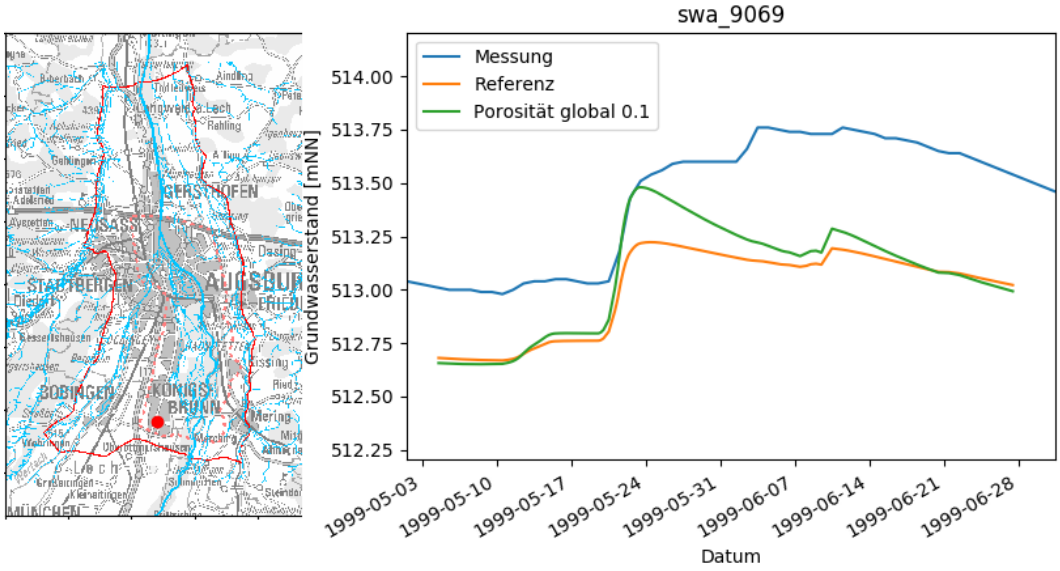

Abbildung 7.8:Vergleich der Ganglinien an der Messstelle swa_9069 (Königsbrunn) für den Referenzzustand und eine global reduzierte Porosität von 0,1

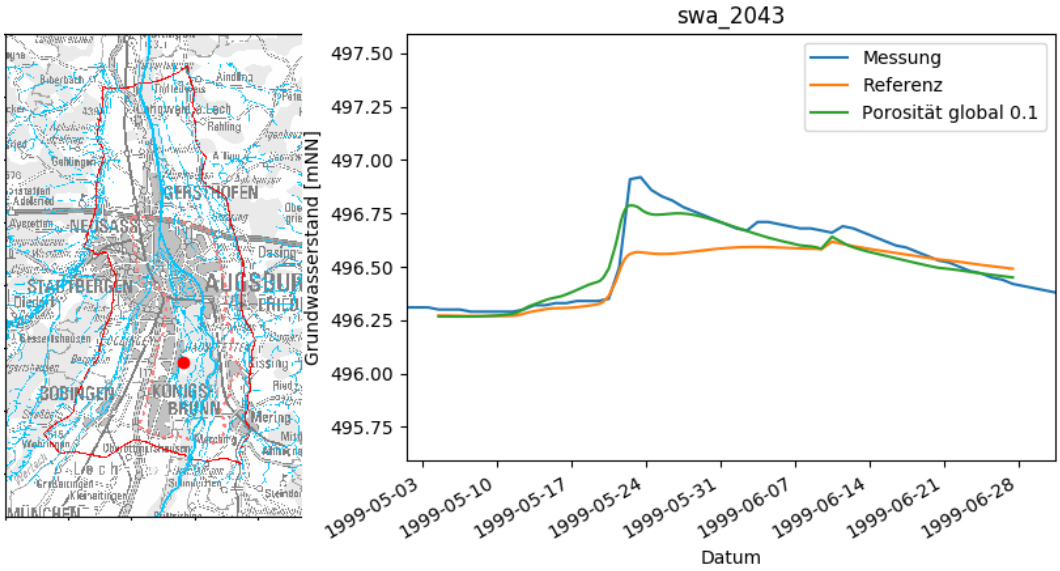

Abbildung 7.9:Vergleich der Ganglinien an der Messstelle swa_2043 (Stadtwald) für den Referenzzustand und eine global reduzierte Porosität von 0,1

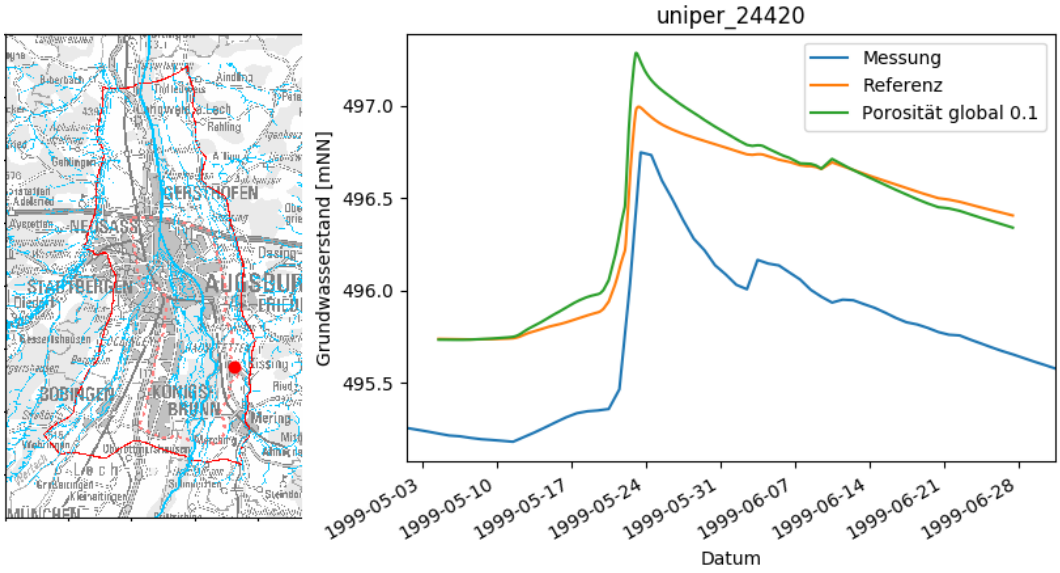

Abbildung 7.10: Vergleich der Ganglinien an der Messstelle uniper_24420 (Bereich zw. Lech und Paar) für den Referenzzustand und eine global reduzierte Porosität von 0,1

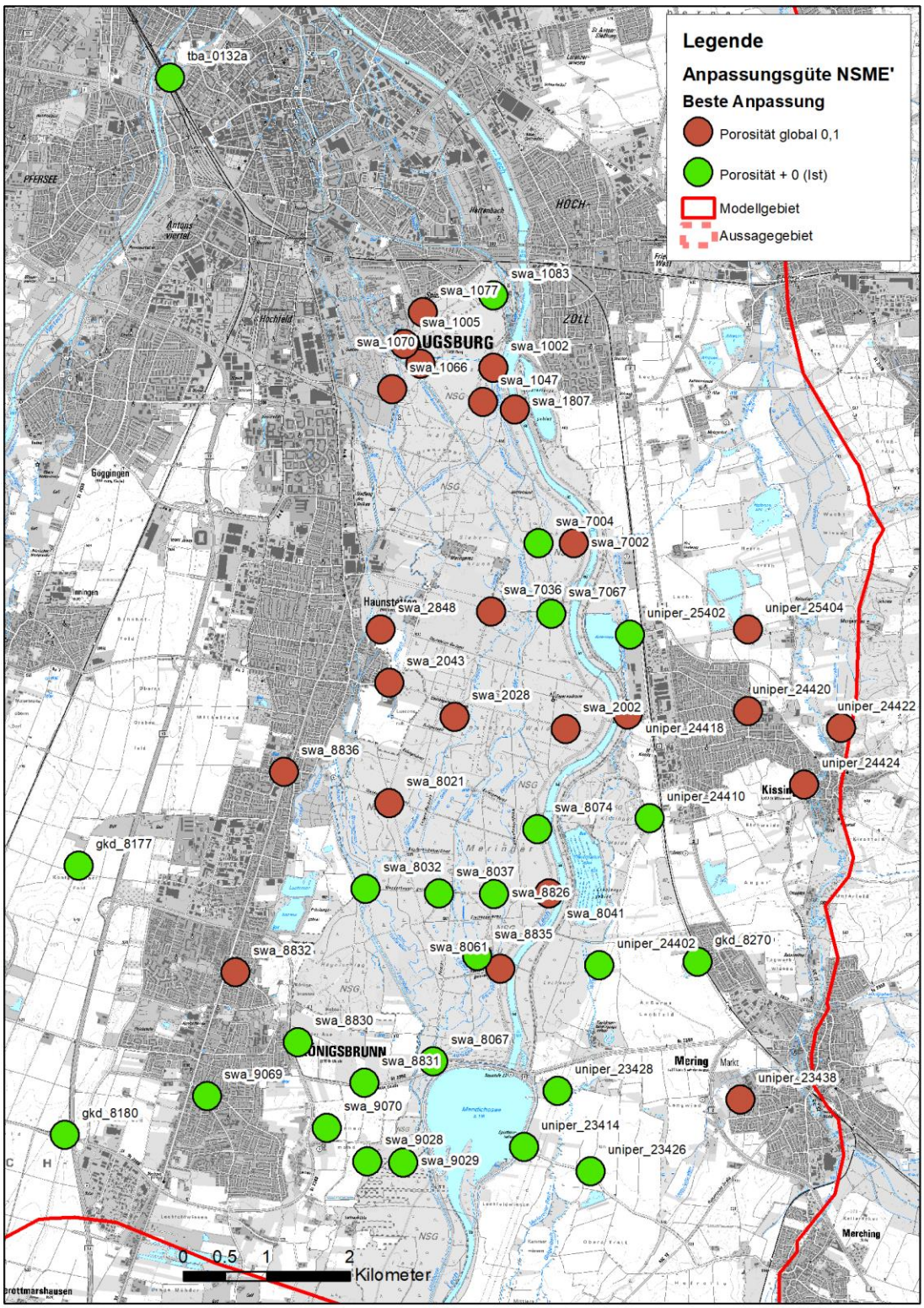

Abbildung 7.11: Übersicht über den jeweils am besten angepassten Modelllauf

7.3 Kovarianzanalyse

7.3.1 Methodik

Zur Identifikation von potentiellen Mehrdeutigkeiten in den gewählten Parametern wurde, ergänzend zur Sensitivitätsanalyse, eine Kovarianzanalyse durchgeführt. Hierbei wurden die Parameter Durchlässigkeit (kf-Wert) und Leakage-Koeffizient genauer untersucht.
Die Kovarianz beschreibt die Richtung eines Zusammenhangs:

$$Cov(a,b) = \frac{\sum_i^N (a_i - \overline{a})(b_i - \overline{b})}{N}$$

Hierbei ist *N* die Anzahl an betrachteten Messstellen, a_i und b_i sind Abweichungen zwischen dem Ergebnis einer Simulation in der z.B. die Durchlässigkeit variiert wurde und einem Referenzzustand an einer Messstelle *i*. Soll z.B. die Korrelation zwischen den Parametern Durchlässigkeit und Leakage-Koeffizient untersucht werden, so könnte der Vektor *a* die Abweichungen von *N* Piezometerhöhen bezüglich eines variierten Durchlässigkeitswerts beinhalten und der Vektor *b* die Abweichungen der Piezometerhöhen in Bezug auf einen variierten Leakage-Koeffizient. Beide Abweichungen bezögen sich dann auf denselben Referenzzustand:

$$a_i = h_{i,kf} - h_{i,ref} \; und \; b_i = h_{i,leak} - h_{i,ref}$$

Ein positiver Wert der Kovarianz entspricht einer positiven Korrelation zwischen den variierten Parametern, ein negativer Wert entspricht einer umgekehrten Korrelation. Aus der Korrelation lassen sich noch keine Rückschlüsse auf die Stärke eines Zusammenhangs schließen. Durch eine Normierung der Kovarianz mittels der Varianz von *a* und *b* erhält man die Korrelation:

$$\varphi_{a,b} = \frac{Cov(a,b)}{\sqrt{Var(a)Var(b)}}$$

Die Korrelation nimmt Werte zwischen -1 und 1 an. Eine Korrelation von 0 bedeutet, dass die untersuchten Parameter völlig unabhängig voneinander sind. Ein Wert gegen 1 oder -1 hingegen, stellt sich ein, wenn die Parameter völlig abhängig voneinander sind. Somit lässt sich durch die Korrelation, neben der Richtung auch die Stärke eines Zusammenhangs darstellen. Werte > 0,5 oder kleiner < -0,5 sind hierbei genauer zu analysieren.
Die Korrelationen für den Vergleich verschiedener Parameter bzw. verschiedener Parameterbandbreiten lassen sich in einer sog. Korrelationsmatrix darstellen. Für die hier durchgeführte Kovarianzanalyse war die Vorgabe die bereits für die Sensitivitätsanalyse durchgeführten Simulationen für den stationären Mittelwasserfall (MW 2010) für Variationen der kf-Werte und Leakage-Koeffizienten in einer Korrelationsmatrix gegenüberzustellen. Eine beispielhafte Korrelationsmatrix ist in Tabelle 2.1 gegeben. Wie aus der oben beschriebenen Vorgehensweise deutlich wird, gehen in die Kovarianzanalyse keine gemessenen Werte (Grundwasserstände, Ex-

oder Infiltrationsmessungen) ein, es gehen somit nur simulierte Werte in die Auswertung ein. Die Auswertung der Simulation wiederum erfolgt an den Orten, an denen auch Messwerte vorhanden sind, dies sind Grundwassermessstellen sowie die Gewässer an denen Ex- und Infiltrationsmessungen vorliegen.

Tabelle 7.8: Beispielhafte Korrelationsmatrix für die Gegenüberstellung von kf-Wert und Leakage-Koeffizient.

Korrelation $\varphi_{a,b}$ [-]		**kf-Wert Faktor**			
		x 0.5	x 0.67	x 1.5	x 2
Leakage-koeffizient Faktor	x 0.1	0...	0...	-0...	-0...
	x 0.2	0...	0...	-0...	-0...
	x 5	-0...	-0...	0...	0...
	x 10	-0...	-0...	0...	0...

7.3.2 Ergebnisse der Kovarianzanalyse

Die Kovarianzanalyse wurde für Grundwasserstände verschiedener Messstellengruppen (Gesamtgebiet, Aussagebiet und Stadtwald) sowie Ex- und Infiltrationsraten an den Fließgewässern südlich des Hochablasses, welche auch in der Sensitivitätsanalyse berücksichtigt wurden, durchgeführt. In Tabelle 7.9 bis Tabelle 7.11 sind die Korrelationsmatrizen für die Grundwasserstände für das Gesamtgebiet, das Aussagegebiet und den Stadtwald aufgeführt. In allen dargestellten Korrelationsmatrizen für die Grundwasserstände sind starke negative Korrelationen für den Leakage-Koeffizienten und den kf-Wert erkennbar. Dies ist aus den negativen Werten im oberen linken Viertel und im unteren rechten Viertel der Korrelationsmatrizen ableitbar. Im oberen linken Viertel z.B. wird eine Verringerung der kf-Werte einer Verringerung der Leakage-Koeffizienten gegenübergestellt. An Stellen im Modell, an denen z.B. eine Verringerung der kf-Werte eine Erhöhung der Grundwasserstände hervorruft (höherer Widerstand), führt eine Verringerung der Leakage-Koeffizienten zu

Tabelle 7.9: Korrelation zwischen kf-Wert und Leakage-Koeffizient für Grundwassermessstellen im Gesamtgebiet.

Korrelation $\varphi_{a.b}$ [-]		**kf-Wert Faktor**			
		x 0.5	x 0.67	x 1.5	x 2
Leakage-koeffizient Faktor	x 0.1	-0.41	-0.46	0.56	0.59
	x 0.2	-0.42	-0.47	0.57	0.60
	x 5	0.63	0.66	-0.70	-0.70
	x 10	0.66	0.68	-0.70	-0.69

Tabelle 7.10: Korrelation zwischen kf-Wert und Leakage-Koeffizient für Grundwassermessstellen im Aussagegebiet.

Korrelation $\varphi_{a.b}$ [-]		**kf-Wert Faktor**			
		x 0.5	x 0.67	x 1.5	x 2
Leakage-koeffizient Faktor	x 0.1	-0.37	-0.42	0.57	0.60
	x 0.2	-0.36	-0.41	0.55	0.58
	x 5	0.61	0.64	-0.66	-0.65
	x 10	0.65	0.67	-0.68	-0.65

Tabelle 7.11: Korrelation zwischen kf-Wert und Leakage-Koeffizient für Grundwassermessstellen im Stadtwald.

Korrelation $\varphi_{a.b}$ [-]		**kf-Wert Faktor**			
		x 0.5	x 0.67	x 1.5	x 2
Leakage-koeffizient Faktor	x 0.1	-0.54	-0.60	0.66	0.67
	x 0.2	-0.44	-0.50	0.55	0.56
	x 5	0.39	0.44	-0.46	-0.44
	x 10	0.37	0.42	-0.44	-0.41

verringerten Grundwasserständen (weniger Infiltration). Die Stärke der negativen Korrelation der beiden Parameter variiert je nach betrachteter Messstellengruppe. Die Richtung der Korrelation (negative Korrelation) bleibt jedoch in allen Fällen gleich.

Betrachtet man demgegenüber die Korrelationsmatrix für die Fließgewässer südlich des Hochablasses in Tabelle 7.12, so erkennt man eine strake positive Korrelation zwischen Leakage-Koeffizient und kf-Werten. Erwartungsgemäß erhöhen sich In- und Exfiltrationsraten und damit der Umsatz, wenn kf-Werte oder Leakage-Koeffizienten erhöht werden, da beides zu einer Verringerung des Systemwiderstands führt. Der gegenteilige Effekt tritt bei der Erniedrigung von Leakage-Koeffizienten und kf-Werten auf.
Somit gibt es eine negative Korrelation zwischen kf-Wert und Leakage-Koeffizient in Bezug auf die Grundwasserstände und eine positive Korrelation in Bezug auf die gemessenen Ex- und Infiltrationsraten.
Für die Eindeutigkeit der gewählten Parameter bedeutet dies, dass es von großer Bedeutung ist, sowohl gemessene Ex- und Infiltrationsraten als auch Grundwassermessstellen zur Kalibrierung heranzuziehen. Wäre nur Messungen eines Typs vorhanden, wäre die Unsicherheit bei der Wahl der Parameter kf-Wert und Leakage-Koeffizient wesentlich höher.

Tabelle 7.12: Korrelation zwischen kf-Wert und Leakage-Koeffizient für In- und Exfiltrationsraten für die Gewässerabschnitte südlich des Hochablasses.

Korrelation $\varphi_{a.b}$ [-]		**kf-Wert Faktor**			
		x 0.5	x 0.67	x 1.5	x 2
Leakage-koeffizient Faktor	x 0.1	0.84	0.82	-0.73	-0.69
	x 0.2	0.82	0.80	-0.70	-0.66
	x 5	-0.51	-0.49	0.41	0.38
	x 10	-0.42	-0.41	0.34	0.32

7.4 Ergebnis der Sensitivitätsanalyse

Die wichtigsten Erkenntnisse der Sensitivitäts- und Kovarianzanalyse sind hier nochmal zusammenfassend dargestellt:

- Die Grundwasserstände reagieren wenig sensitiv und die Ex- und Infiltrationsraten sensitiv auf Änderungen der Durchlässigkeiten
- Die Güte der Anpassung bei der Variation der Durchlässigkeiten ist am höchsten für den kalibrierten Referenzzustand
- Die Grundwasserstände reagieren sensitiv und die Ex- und Infiltrationsraten stark sensitiv auf Änderungen des Leakage-Koeffizienten
- Die Güte der Anpassung bei der Variation der Leakage-Koeffizienten ist am höchsten für den kalibrierten Referenzzustand
- Die Sensitivität der Grundwasserstände und der Ex- und Infiltrationsraten auf den Parameter Grundwasserneubildung ist gering
- An einigen Messstellen ergibt sich westlich und östlich des Lechs durch einen reduzierten speichernutzbaren Hohlraumanteil eine bessere Anpassung an Messdaten. Diese Bereiche werden im Rahmen des Modelleinsatz als zusätzlicher Modelllauf berücksichtigt (Betrachtung eines Modelllaufs mit global reduziertem speichernutzbarem Hohlraumanteil).
- Die Kovarianzanalyse zeigt eine mittlere bis hohe negative Korrelation zwischen Durchlässigkeit und Leakage-Koeffizient in Bezug auf die Grundwasserstände

- In Bezug auf die Ex- und Infiltrationsraten gibt es eine mittlere bis hohe positive Korrelation zwischen Durchlässigkeit und Leakage-Koeffizient
- Um die Unsicherheit bei der Wahl der Kalibrierparameter Leakage-Koeffizient und Durchlässigkeit möglichst gering zu halten, ist es wichtig sowohl Grundwasserstandsmessungen als auch Ex- und Infiltrationsmessungen im Kalibrierungsprozess zu berücksichtigen

8 Zusammenfassung

Modellgebiet und -aufbau
Für das Gebiet zwischen Lech-FKM 60,5 (Staustufe 22) im Süden und Lech-FKM 26,5 (nördlich Langweid) im Norden wurde für die Quartärkiese (nach Westen und Osten laufen diese Quartärkiese aus) ein 3D-Grundwasserströmungsmodell erstellt. Tertiär und Hochterrassen werden vereinfachend abgebildet, um den Austausch dieser Grundwasserleiter mit dem Quartärkiesen berücksichtigen zu können. Das Grundwassermodell besteht aus 12 Schichten zu je 340180 Elementen (Gesamtzahl etwa 4 Mio. Elemente). Als Programmcode wird das Finite-Elemente Programm Feflow verwendet.

Kalibrierung stationär
Das stationäre Strömungsfeld wurde für Mittelwasser-Verhältnisse (Zeitraum April/Mai 2010, MW2010) kalibriert. Als Vergleichsgrößen wurden für das MW2010 Messungen an über 200 Grundwassermessstellen herangezogen. Ferner gingen in die Kalibrierung Abflussmessungen an kleineren Gewässern (Paar, Lochbach u.v.m.) ein. Hieraus wurden etwa 20 Bilanzbereiche abgeleitet, deren Austausch mit dem Grundwasser im Grundwassermodell berücksichtigt sind. Weitere Prozesse wie z.B. der Austausch mit der Abwasserkanalisation und den Grundwassersammlern in Augsburg werden ebenfalls berücksichtigt. Die errechnete mittlere Abweichung für das MW2010 beträgt im Gesamtgebiet 0.37 (0.44% der Potentialhöhendifferenz im Gesamtgebiet) und 0.34 m im Aussagegebiet (0.53% der Potentialhöhendifferenz im Aussagegebiet). Die nach dem Regelwerk DVGW W107 (DVGW, 2016) gängigen Gütekriterien werden eingehalten.

Kalibrierung instationär
Zusätzlich zur stationären Kalibrierung wurde das Grundwassermodell instationär anhand des Zeitraums um das Pfingsthochwasser 1999 kalibriert. Hier zeigte sich, dass sich durch die Berücksichtigung der instationären Randbedingungen (u.a. Lech, Paar, Wertach, Grundwasserneubildung, Festpotentialränder) bereits eine hinreichende Anpassung ergibt. Zur Bewertung wurden u.a. zeitlich fein aufgelöste Messungen an über 50 Grundwassermessstellen herangezogen. Eine zusätzliche Verbesserung der Anpassung ließ sich durch eine temporäre Erhöhung der Leakage-Koeffizienten während des Hochwasserereignis erzielen. Dies ist insofern gerechtfertigt, als dass es während des Pfingsthochwassers zu großen Sohlumlagerungen kam und damit die den Leakage-Koeffizient beeinflussende Kolmationsschicht temporär aufgelöst wurde. Insgesamt zeigt die instationäre Kalibrierung, dass das Modell die vorherrschenden Dynamiken und insbesondere die

im Modellgebiet auftretenden Unterschiede nachbildet. Auch die Abweichungen in den Absoluthöhen zwischen Messung und Rechnung bewegen sich in üblichen Grenzen.

Modelltest
Ein Modelltest anhand des Zeitraums um das Hochwasser im Sommer 2005 belegt die gute Anpassung des Modells zusätzlich. In diesem Zeitraum liegen zeitlich hochaufgelöste Messungen an rund 100 Messstellen vor. Auch das Hochwasser 2005 deutet auf eine temporäre, lokale Auflösung der Kolmationsschicht des Lechs hin. Die Nachbildung der Ablässe von Lochbach (17.09 bis 2.10.2005) und der Stadtbäche (7.10.2005 – 22.10.2005) werden ebenfalls gut abgebildet. Insgesamt belegt der Modelltest, dass das Modell die vorherrschenden Dynamiken und insbesondere die im Modellgebiet auftretenden Unterschiede nachbildet. Auch die Abweichungen in den Absoluthöhen zwischen Messung und Rechnung bewegen sich in den Grenzen die beim Jahr 1999 zu beobachten sind.

Sensitivitätsanalyse
Die Sensitivitätsanalyse verdeutlicht, dass der Grundwasserhaushalt stark vom Austausch mit den Oberflächengewässern bestimmt wird. Entsprechend sensitiv reagieren die Simulationsergebnisse auf Änderungen des Leakage-Koeffizienten. Weiterhin zeigt die Sensitivitätsanalyse, dass die vorliegende Anpassung des Grundwassermodells durch eine Parameteranpassung nicht mehr wesentlich verbessert werden kann. Eine Ausnahme stellt der speichernutzbare Hohlraumanteil dar: Hier kann durch eine Reduzierung des Hohlraumanteils in Lech-fernen Bereichen die Modellanpassung merklich verbessert werden. Diese Erkenntnis wird im Rahmen des Modelleinsatzes in Form eines global reduziertem speichernutzbarem Hohlraumanteil berücksichtigt.

Die Ausführungen der vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass das Grundwassermodell die Verhältnisse im Grundwasser nach derzeitigem Kenntnisstand sehr gut abbildet. Damit ist die Bereitstellung des Grundwassermodells abgeschlossen. Das Modell kann für die Prognosen zu den Auswirkungen des Projektes Licca Liber eingesetzt werden.

9 Referenzen

ARGE SKI KUP UIBK. (2017). *Licca Liber - Weiterführende Untersuchungen - Anlage 4.1 Hydraulik – Modellaufbau und -anpassung.*

ARGE SKI KUP UIBK. (2018). *Licca Liber - Weiterführende Untersuchungen - Bericht zum Hydrogeologischen Modell.*

BCE. (2015). *Hochwasserschutz und Gewässerentwicklung an der Wertach - 4. Realisierungsabschnitt - Anlage 9.2 Teil 2: Aufbau und Anpassung Grundwassermodell.*

Büro für Hydrogeologie, angewandte Geologie und Wasserwirtschaft. (2001). *Neubemessung des Wasserschutzgebietes für den Brunnen Kissing und Neuregelung der dortigen Nutzungsauflagen und -verbote.*

DHI Wasy GmbH. (2017). FEFLOW 7.0.

DVGW. (2016). *Technische Regel - Arbeitsblatt DVGW W 107 (A) - Aufbau und Anwendung numerischer Grundwassermodelle in Wassergewinnungsgebieten.*

E.ON Wasserkraft GmbH, Werkgruppe Lech. (28. 10 2002). Vermessung von Wasserspiegel- und Sohlhöhen im Bereich Siebentisch- und Haunstetter Wald.

Geotechnisches Büro Prof. Dr. Schuler, Dr.-Ing. Gödecke. (1999). *Untersuchungsbericht zu den Pumpversuchen vom August 1999 im Stadtgebiet von Königsbrunn; Augsburg, 20.09.1999.*

Hill, M. C., & Tiedeman, C. R. (2007). Effective Groundwater Model Calibration. Wiley.

HydroConsult. (2003). *Instationäres Grundwasserströmungsmodell Königsbrunn BAND 1: Modelldokumentation .*

HydroConsult. (2005). *Naturversuch „Absenkung Ilsesee“ 2005, Versuchsauswertung; Augsburg, 30.08.2005.*

HydroConsult. (2005-2). *Maßnahmen zur naturnahen Entwicklung und Gestaltung des Lochbachs im Rahmen von Unterhaltsmaßnahmen während der Herbstablässe 2OO5 - Grundwasserhydrologische Auswertung -.*

HydroConsult. (2012). *Grundwassermodell „Augsburg-Mitte“: Hydrogeologisches Modell und Statusbericht zum mathematischen Grundwasserströmungsmodell.*

HydroConsult. (2014). *Stadtwerke Augsburg Wasser GmbH - Numerisches 3D-Grundwasserströmungsmodell „Augsburg-Süd“ - Schlussbericht Modellkalibrierung.*

HydroConsult. (2016). *Hydrogeologische Studie zum Tertiärgrundwasser in Bayerisch-Schwaben.*

KUP. (2015). *Grundwasserabsenkung Königsbrunn - Anlage 1.1 - Wasserwirtschaftliches Konzept und Grundwassermodellrechnungen.*

LfU. (18. 08 2016). Hydrogeologische Karte 1:500000.

LfU. (15. Dezember 2017). *Daten zum Lochbach-Pegel Unterbergen.* Von Gewässerkundlicher Dienst Bayern:

http://www.gkd.bayern.de/fluesse/abfluss/stationen/diagramm/index.php?thema=gkd&rubrik=fluesse&produkt=wasserstand&gknr=0&msnr=12393201&zr=jahr abgerufen

Peschke, L. (2009). *Der Stadtwald Augsburg – hydrogeologische Verhältnisse und Abschätzung von Aussickerungen an Bächen durch Modellrechnung.*

Stadtentwässerung Augsburg. (02. 03 2017-1). Telefonat.

Stadtentwässerung Augsburg. (29. 03 2017-2). Telefonat.

TBA. (29. 03 2017). Monatliche Fremdwasserraten im Zustrom zur Kläranlage Augsburg ab 1999.

TBA Augsburg. (2005). Vermessung von Wasserspiegel- und Sohlhöhen im Stadtgebiet.

WWA Donauwörth. (29/30. November 2016). Abflussmessungen an Gewässern im Stadtwald, am Verlorenen Bach/Hagenbach und an der Paar.

WWA Donauwörth. (2017). *Ergebnisse des hydraulischen 2D-Modells der Paar.*

WWA Donauwörth und TBA Augsburg. (31. Mai 2016). Abflussmessungen am Lochbach.

Anhang 1: Quer- und Längsschnitte

Im Folgenden werden einige Quer- und Längsschnitte durch das Modellgebiet dokumentiert. Die Lage der Schnitte ist

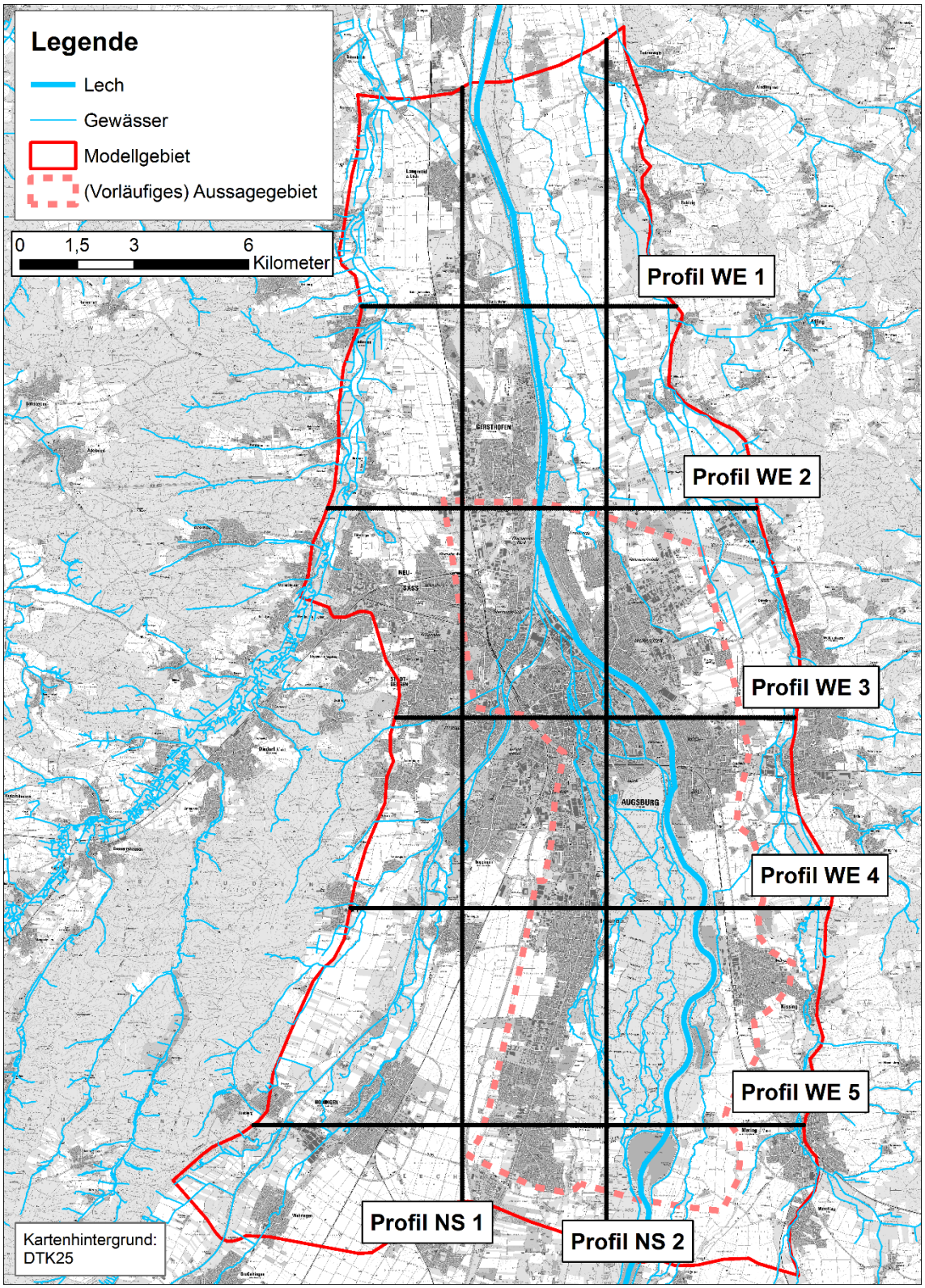

Abbildung A1: Lage der Quer- und Längsschnitte

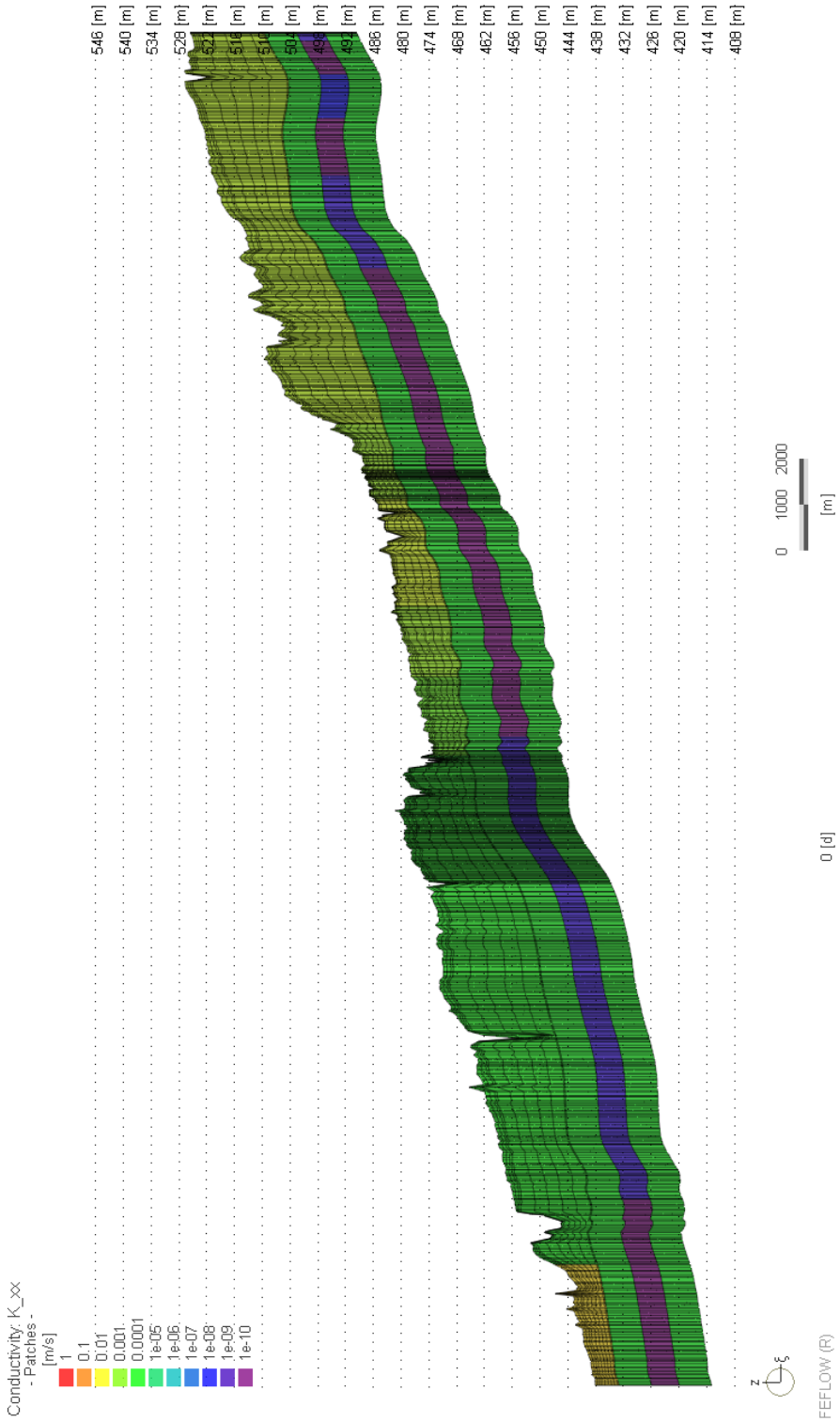

Abbildung A2: Längsschnitt NS 1 - Kalibrierte Durchlässigkeiten

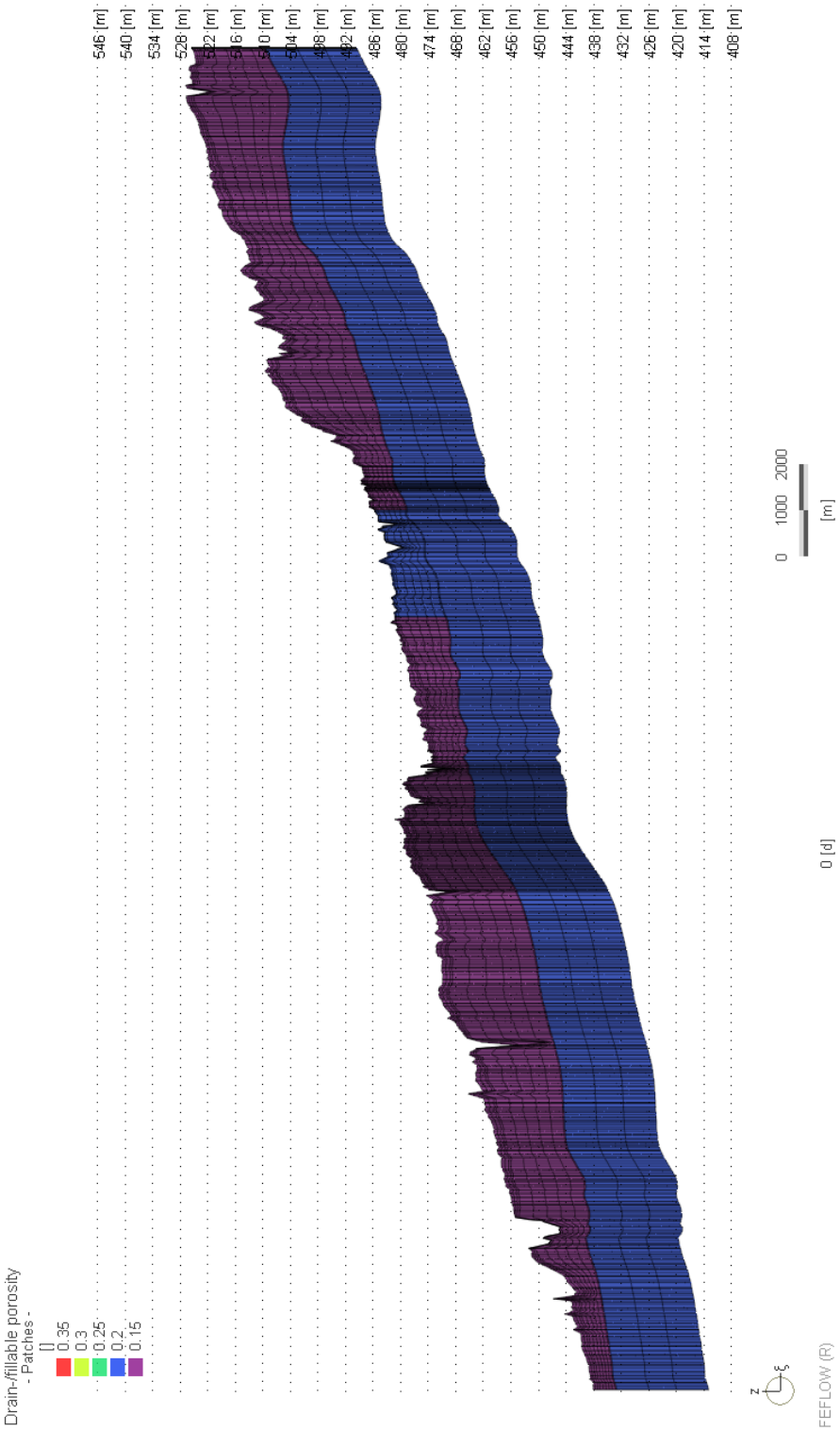

Abbildung A3: Längsschnitt NS 1 - Kalibrierte Speichernutzbarer Hohlraumanteil

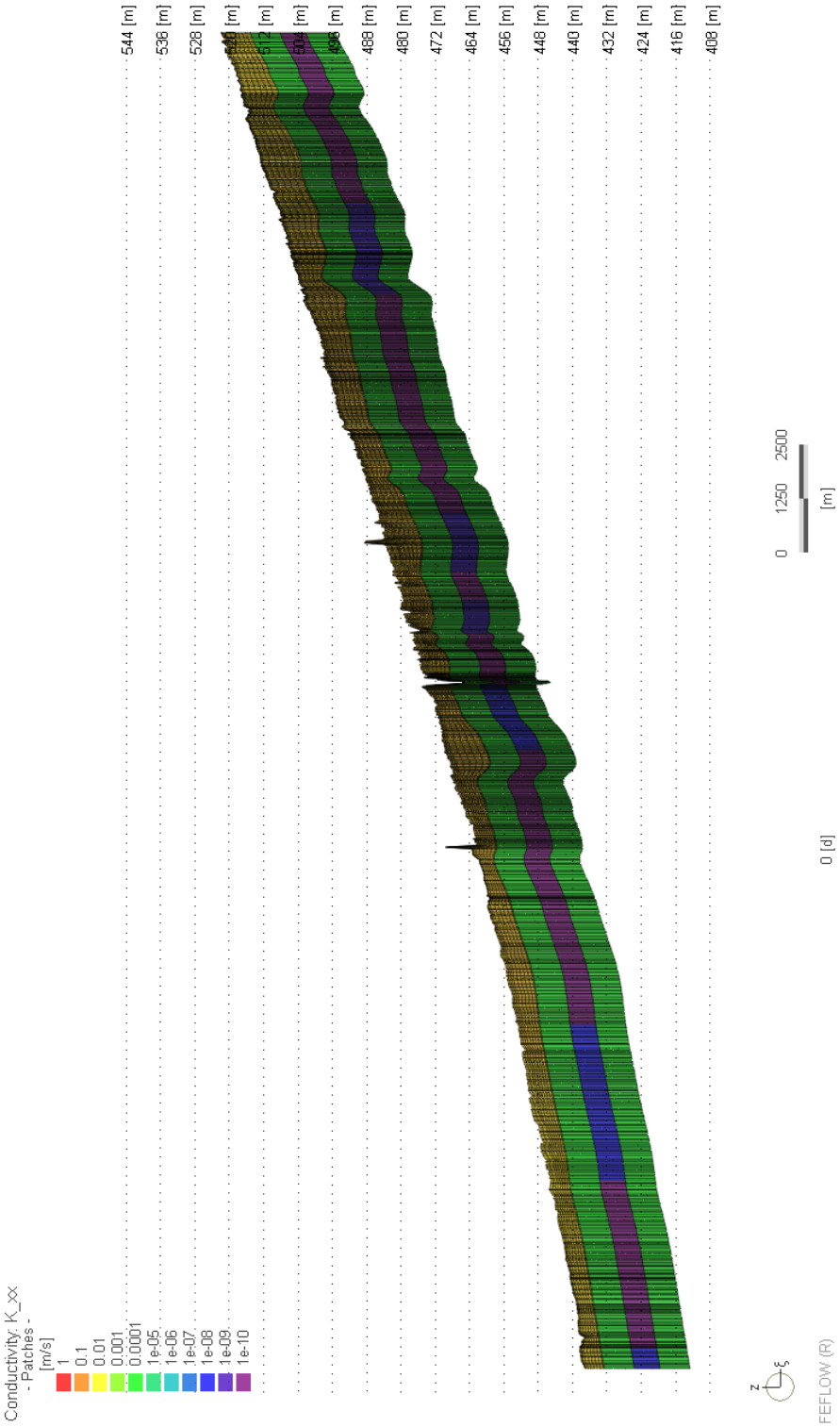

Abbildung A4: Längsschnitt NS 2 - Kalibrierte Durchlässigkeiten

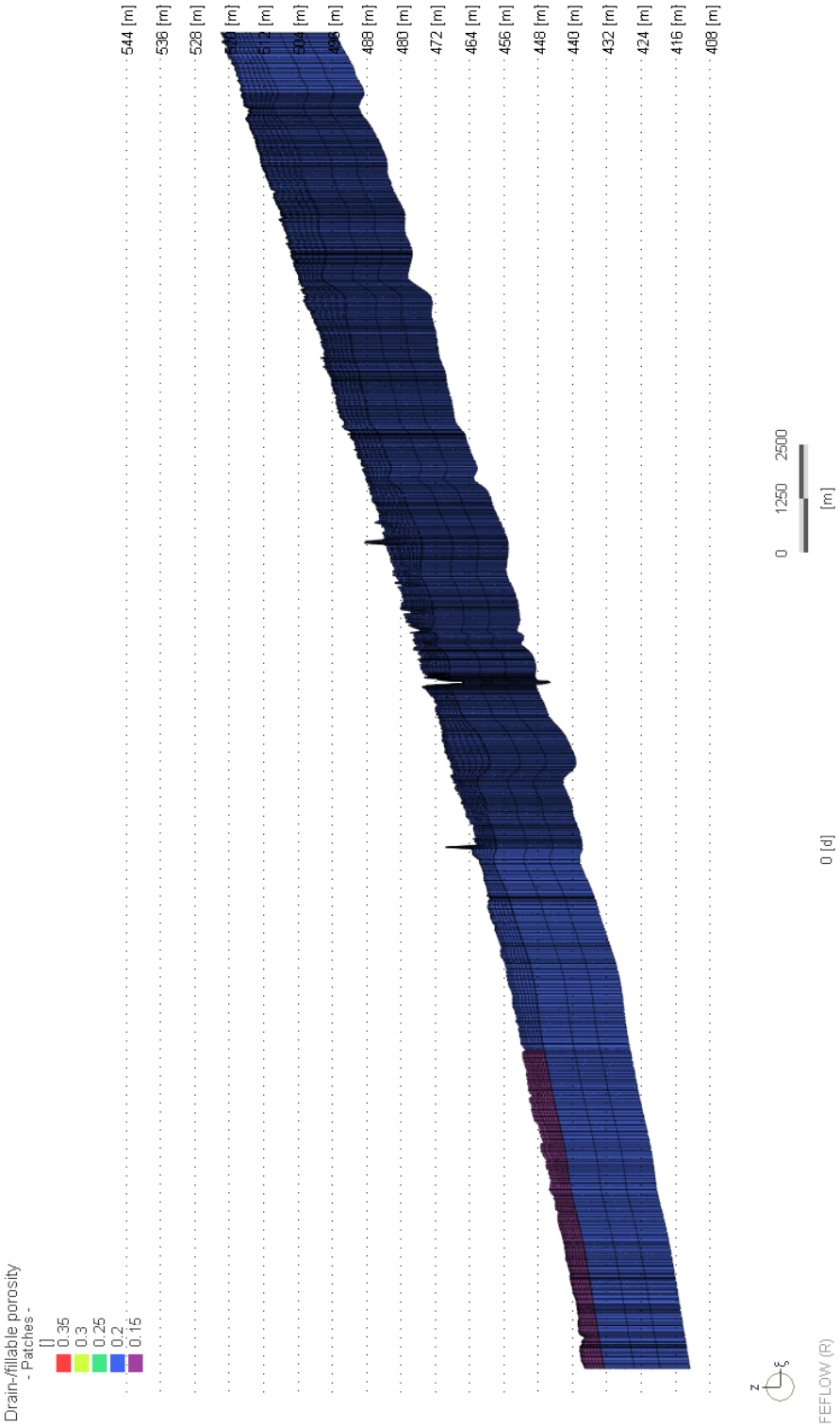

Abbildung A5: Längsschnitt NS 2– Kalibrierter Speichernutzbarer Hohlraumanteil

Abbildung A6: Querschnitt WE 1 - Kalibrierte Durchlässigkeiten

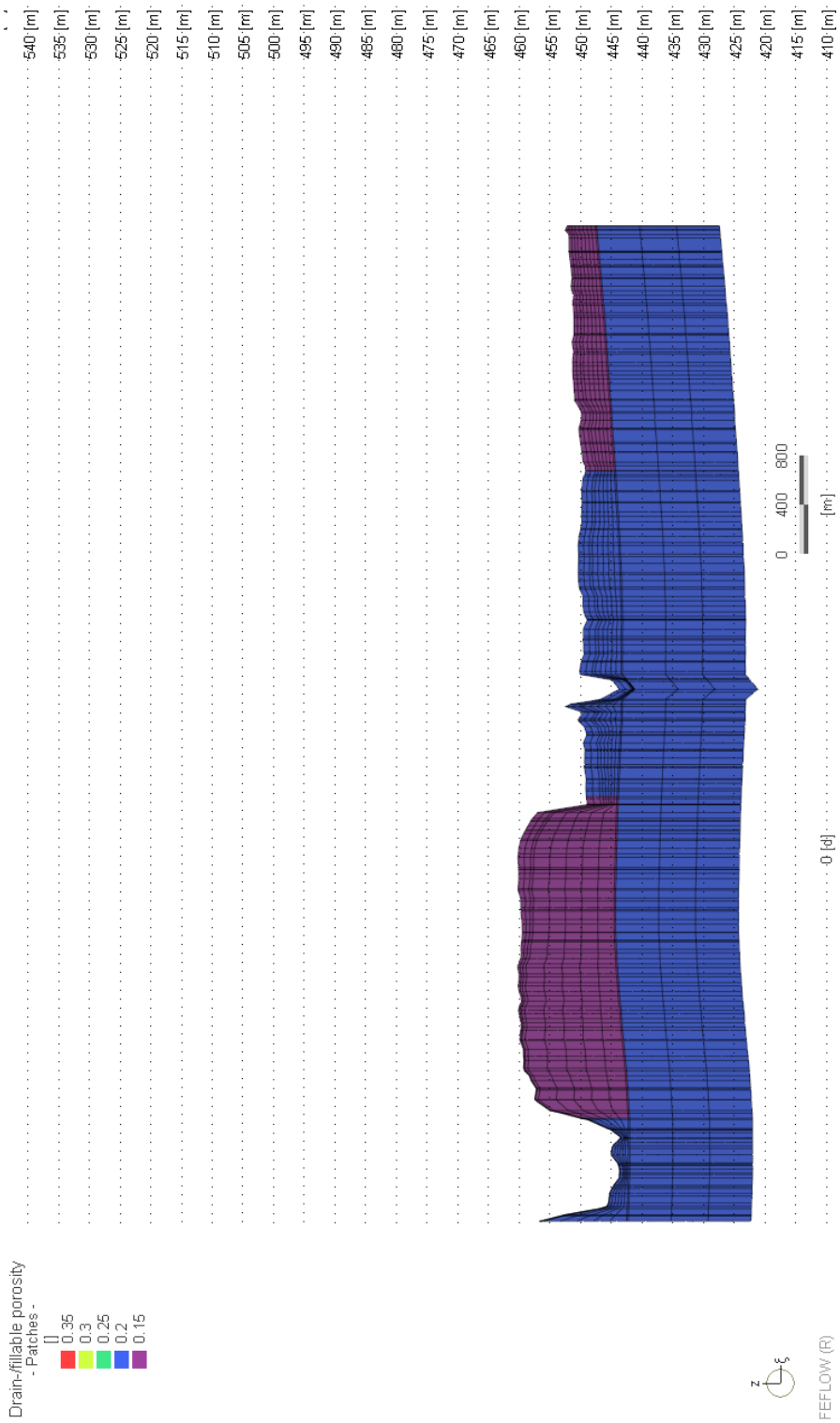

Abbildung A7: Querschnitt WE 1 – Kalibrierter Speichernutzbarer Hohlraumanteil

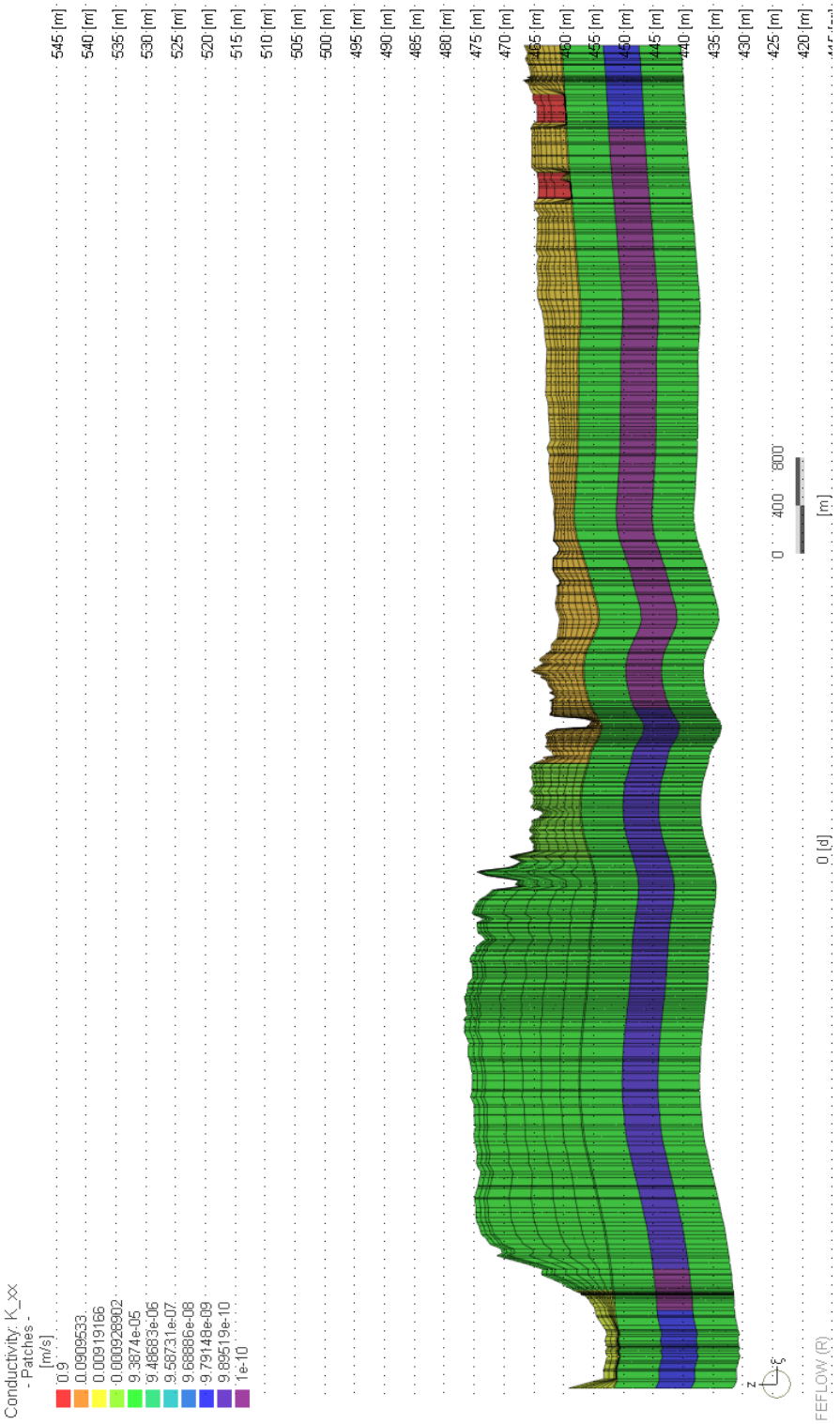

Abbildung A8: Querschnitt WE 2 - Kalibrierte Durchlässigkeiten

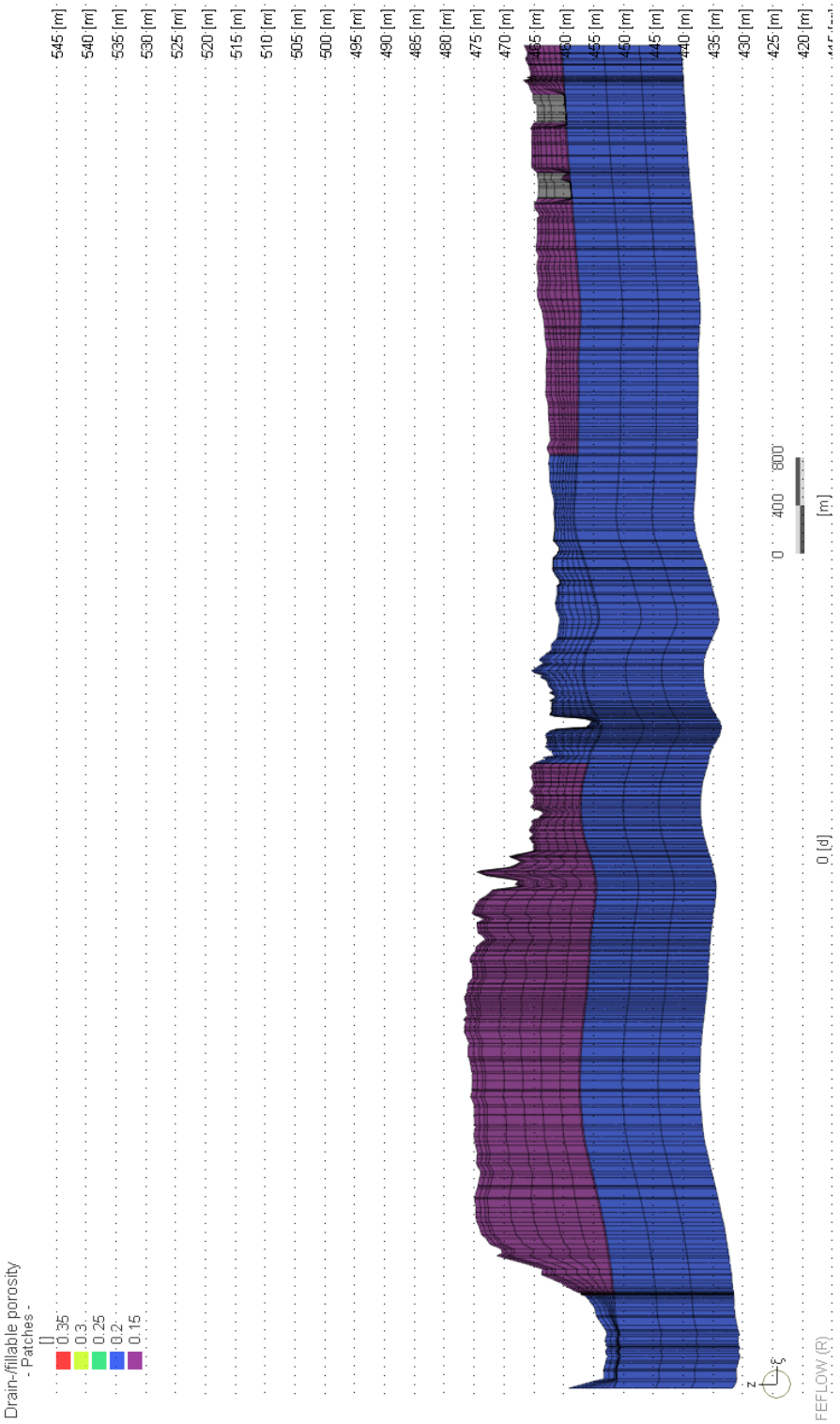

Abbildung A9: Querschnitt WE 2 - Kalibrierter Speichernutzbarer Hohlraumanteil

Abbildung A10: Querschnitt WE 3 - Kalibrierte Durchlässigkeiten

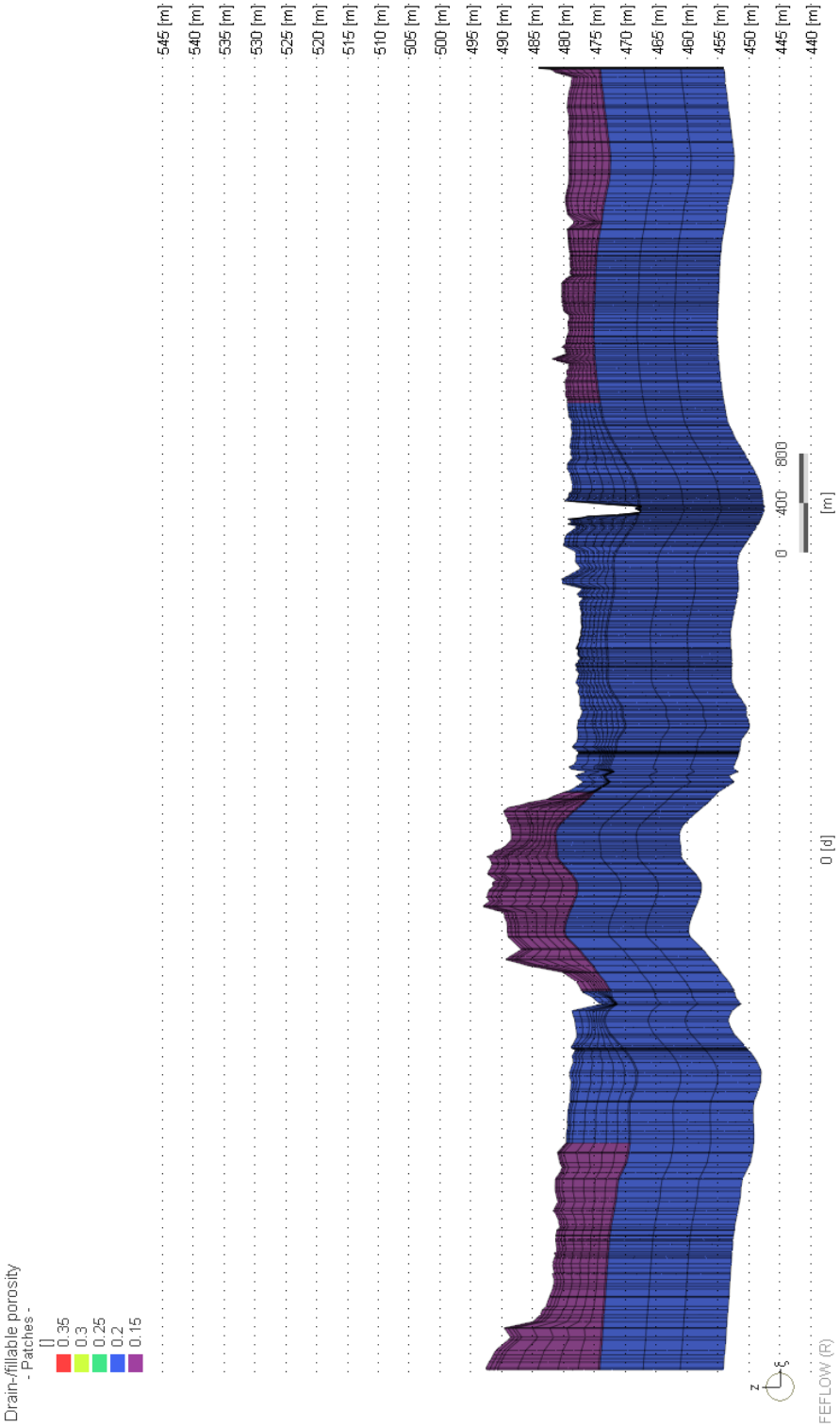

Abbildung A11: Querschnitt WE 3 - Kalibrierter Speichernutzbarer Hohlraumanteil

Abbildung A12: Querschnitt WE 4 - Kalibrierte Durchlässigkeiten

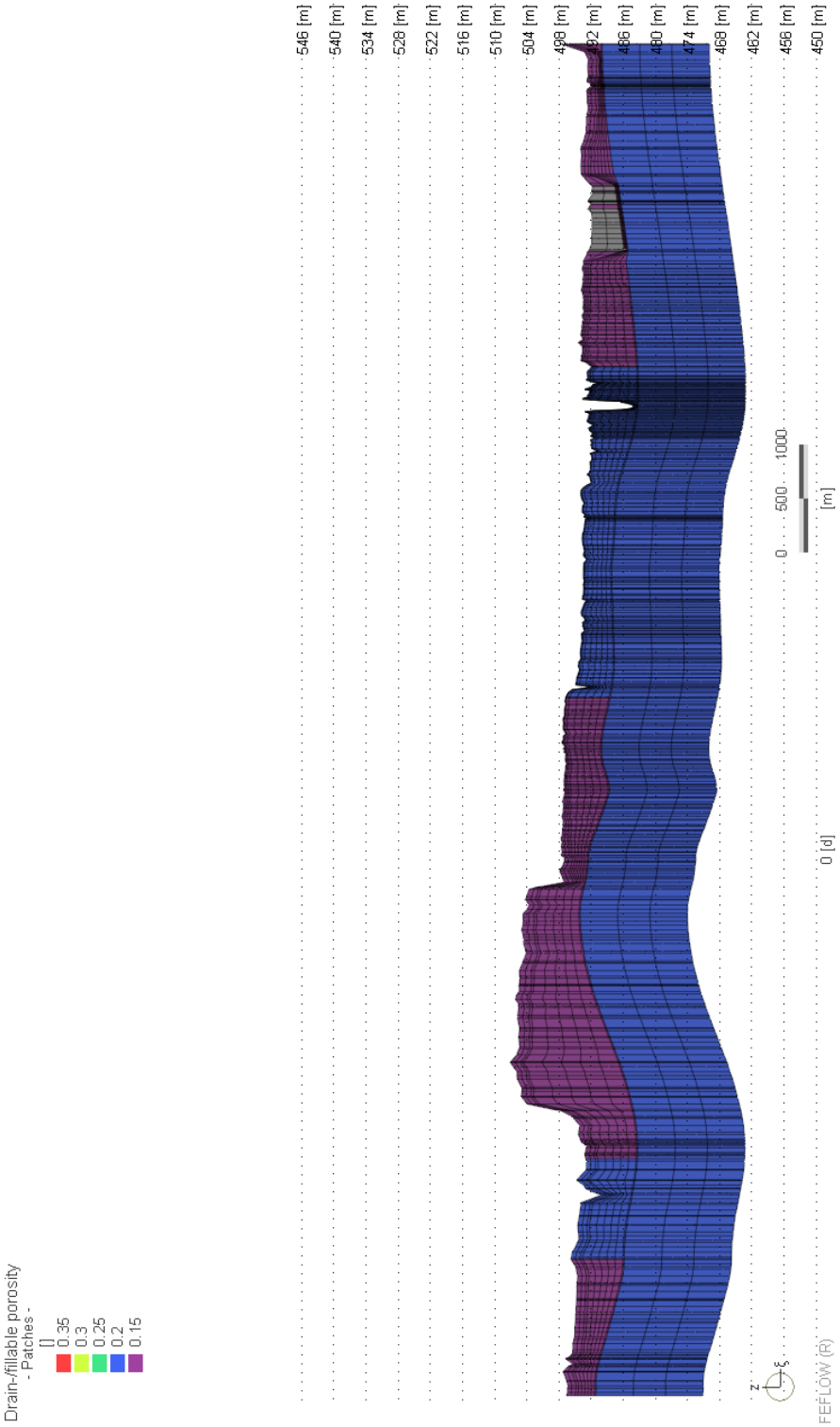

Abbildung A13: Querschnitt WE 4 - Kalibrierter Speichernutzbarer Hohlraumanteil

Abbildung A14: Querschnitt WE 5- Kalibrierte Durchlässigkeiten

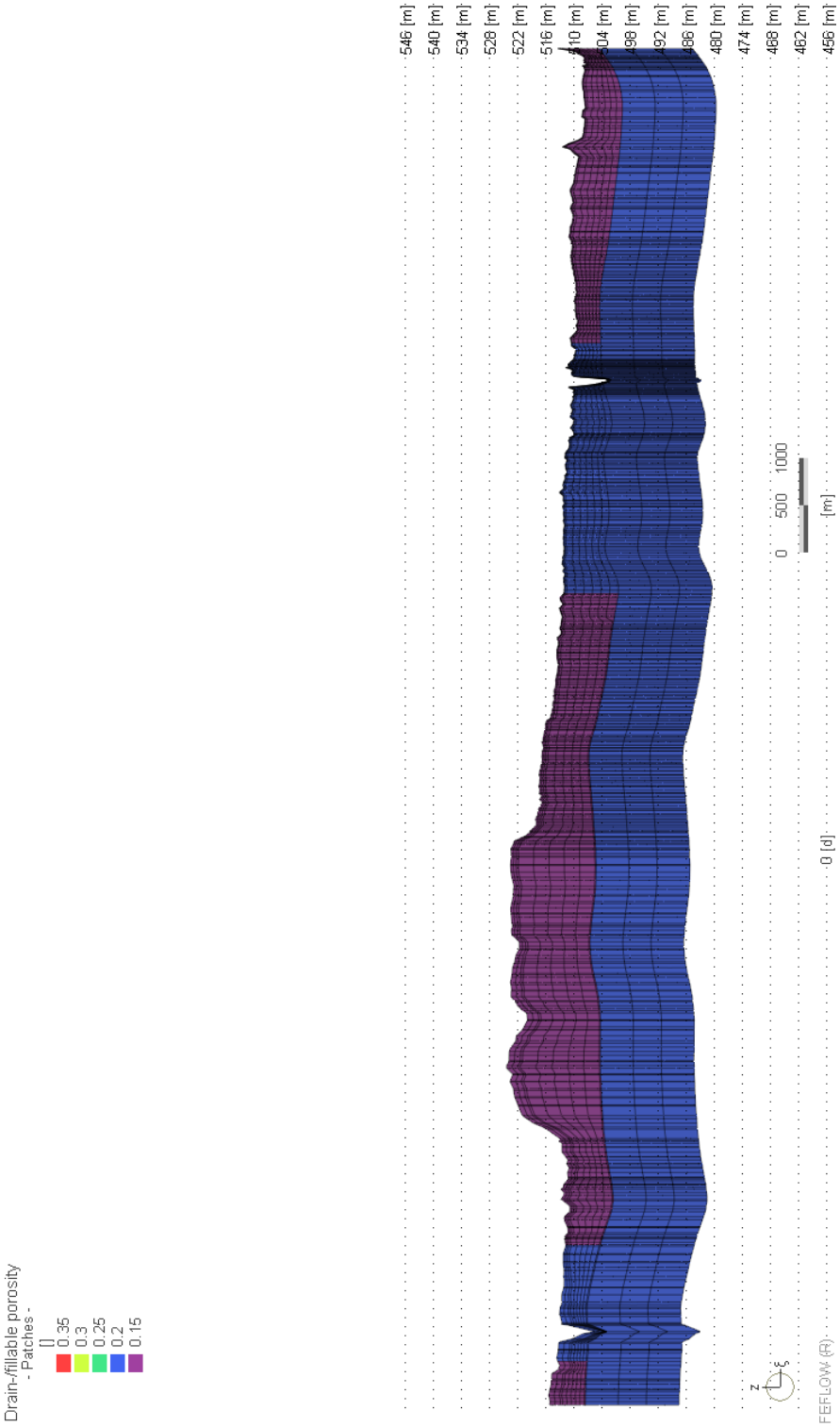

Abbildung A15: Querschnitt WE 5 - Kalibrierter Speichernutzbarer Hohlraumanteil

Anhang 2: Dokumentation einer Auswahl von Kalibrierschritten (stationär)

Für die stationäre Kalibrierung wurde eine Vielzahl von Simulationsläufen durchgeführt. Im Folgenden werden lediglich wenige Zwischenschritte der Kalibrierung erläutert. Für folgende Kalibrierschritte werden Güteparameter in Tabelle A4 und ausgewählte Gewässerbilanzen in Tabelle A5 dokumentiert:

1) Initiale Parametrisierung: Modelllauf mit den in Kapitel 2.7 dokumentierten Parametern
2) Global angepasster Leakage (In und Out): Mit PEST angepasster einheitlicher Leakage-Koeffizient, sodass Abweichungen an Messstellen im Mittel möglichst gering
   Vergleichsparameter: Messwerte Grundwassermessstellen
   Kalibrierparameter: Einheitlicher Leakage-Koeffizient Out, Einheitlicher Leakage-Koeffizient In
3) Anpassung südlich Hochablass: Anpassung im Bereich „Austausch mit dem Lochbach, Bächen im Stadtwald, Verlorenen Bach/Hagenbach, Paar und Lech im Planungsraum zwischen Hochablass und Staustufe 23“ (vgl. Kapitel 3.1.2.2).
4) Anpassung von Innenstadt und Wertachtal
5) Modelllauf nach Abschluss der instationären Kalibrierung
6) Stadtwald kf-Wert 2E-2 m/s: Sensitivitätslauf mit reduziertem k_f-Wert im Stadtwald sowie rekalibrierten Leakage-Koeffizienten an Gewässern mit Vergleichsmessungen
7) Stadtwald kf-Wert 4E-2 m/s: Sensitivitätslauf mit erhöhtem k_f-Wert im Stadtwald sowie rekalibrierten Leakage-Koeffizienten an Gewässern mit Vergleichsmessungen
8) Überarbeiteter Modelllauf nach Modelltest: Das instationäre Grundwassermodell zum HW2005 betrachtet auch Lochbach- und Stadtbachablässe. Im Bereich Innenstadt reagierten die Grundwasserstände im Modelllauf 5) zu wenig auf die Bachablässe. Da im instationären Grundwassermodell zum HW1999 keine Bachablässe betrachtet werden, war eine Rekalibrierung mit erhöhten Infiltrationen an den Stadtbächen notwendig. Die Parametrisierung dieses Modelllaufs ist Grundlage der Kapitel zum stationären und instationären Modell (finaler Lauf).

Tabelle A4: Güteparameter einer Auswahl von Zwischenschritten der stationären Kalibrierung

	Initiale Parametrisierung	Global angepasster Leakage (In und Out)	Anpassung südlich Hochablass	Anpassung Innenstadt und Wertachtal	Modelllauf nach Abschluss instationärer Kalibrierung	Stadtwald kf-Wert 2E-2 m/s	Stadtwald kf-Wert 4E-2 m/s	Überarbeiteter Modelllauf nach Modelltest
Gesamtgebiet								
RMS	6.20	2.21	1.75	0.52	0.48	0.50	0.56	0.48
Mittlere absolute Abweichung	5.44	1.48	1.19	0.39	0.37	0.40	0.44	0.37
Mittlere Abweichung	-5.43	-1.23	-1.04	-0.09	-0.03	-0.12	-0.04	-0.05
Anzahl Messwerte	217	217	217	217	217	217	217	217
Aussagegebiet								
RMS	5.96	1.20	1.37	0.52	0.44	0.48	0.58	0.44
Mittlere absolute Abweichung	5.16	0.87	0.85	0.37	0.34	0.39	0.46	0.34
Mittlere Abweichung	-5.15	-0.71	-0.74	-0.14	-0.01	-0.15	-0.02	-0.03
Anzahl Messwerte	137	137	137	137	137	137	137	137
Stadtwald								
RMS	4.86	0.82	0.47	0.40	0.35	0.33	0.56	0.35
Mittlere absolute Abweichung	4.54	0.69	0.35	0.27	0.26	0.26	0.41	0.26
Mittlere Abweichung	-4.54	-0.66	-0.30	-0.25	-0.07	-0.22	-0.14	-0.08
Anzahl Messwerte	33	33	33	33	33	33	33	33
Königsbrunn/Haunstetten								
RMS	2.07	0.61	0.40	0.40	0.42	0.46	0.65	0.42
Mittlere absolute Abweichung	1.62	0.48	0.30	0.30	0.31	0.40	0.51	0.31
Mittlere Abweichung	-1.61	-0.35	0.01	0.04	0.10	-0.30	0.38	0.10
Anzahl Messwerte	36	36	36	36	36	36	36	36
davon Messstellen Stadt Königsbrunn								
RMS	1.41	0.51	0.40	0.41	0.41	0.41	0.64	0.41
Mittlere absolute Abweichung	1.22	0.41	0.32	0.33	0.33	0.35	0.50	0.33
Mittlere Abweichung	-1.21	-0.34	0.06	0.08	0.09	-0.29	0.35	0.09
Anzahl Messwerte	20	20	20	20	20	20	20	20
Bereich zw. Lech u. Paar								
RMS	3.40	0.76	0.47	0.46	0.54	0.53	0.54	0.54
Mittlere absolute Abweichung	2.84	0.57	0.38	0.35	0.43	0.42	0.42	0.43
Mittlere Abweichung	-2.77	0.00	-0.06	0.05	0.02	0.02	0.00	0.02
Anzahl Messwerte	20	20	20	20	20	20	20	20
Innenstadt								
RMS	8.06	1.36	1.68	0.46	0.40	0.50	0.55	0.40
Mittlere absolute Abweichung	7.99	1.22	1.36	0.34	0.32	0.41	0.47	0.32
Mittlere Abweichung	-7.99	-0.91	-1.36	-0.13	-0.03	0.17	-0.33	-0.18
Anzahl Messwerte	21	21	21	21	21	21	21	21
Stadtgebiet Ost								
RMS	8.12	0.86	1.37	0.56	0.45	0.55	0.52	0.45
Mittlere absolute Abweichung	7.99	0.74	1.15	0.47	0.38	0.48	0.44	0.38
Mittlere Abweichung	-7.99	-0.52	-1.15	-0.31	-0.18	-0.31	-0.28	-0.17
Anzahl Messwerte	23	23	23	23	23	23	23	23
Wertachtal								
RMS	7.37	4.27	3.15	0.67	0.51	0.51	0.51	0.51
Mittlere absolute Abweichung	7.17	3.93	2.85	0.51	0.43	0.43	0.42	0.43
Mittlere Abweichung	-7.17	-3.92	-2.85	-0.04	-0.07	-0.08	-0.07	-0.07
Anzahl Messwerte	47	47	47	47	47	47	47	47
Lechtal Nord								
RMS	7.38	0.77	1.23	0.59	0.59	0.60	0.59	0.59
Mittlere absolute Abweichung	6.59	0.66	0.95	0.41	0.40	0.42	0.40	0.40
Mittlere Abweichung	-6.59	0.32	-0.66	-0.06	-0.01	-0.02	-0.02	-0.01
Anzahl Messwerte	23	23	23	23	23	23	23	23

Tabelle A5: Bilanz der Gewässer im Bereich südlich des Hochablasses für Messung und Simulation

Abschnitt NW	Infiltration (+)/ Exfiltration (-) [m³/s] Messung	Initiale Parametrisierung Simulation	Global angepasster Leakage (In und Out) Simulation	Anpassung südlich Hochablass Simulation	Anpassung Innenstadt und Wertachtal Simulation	Modelllauf nach Abschluss instationärer Kalibrierung Simulation	Stadtwald kf-Wert 2E-2 m/s Simulation	Stadtwald kf-Wert 4E-2 m/s Simulation	Überarbeiteter Modelllauf nach Modelltest Simulation
Lochbach Abschnitt 1	0.34	0.11	0.03	0.34	0.35	0.34	0.34	0.34	0.34
Lochbach Abschnitt 2	0.30	0.07	0.02	0.29	0.30	0.30	0.29	0.30	0.30
Lochbach Abschnitt 3	0.32	0.01	0.01	0.32	0.33	0.32	0.32	0.32	0.32
Lochbach Abschnitt 4	0.12	0.00	0.00	0.13	0.12	0.11	0.12	0.12	0.11
Lochbach Abschnitt 5	0.00	0.00	0.01	-0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.00	-0.01
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 1	0.77	0.06	0.05	0.72	0.73	0.77	0.76	0.78	0.77
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 2	-0.09	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	-0.06	0.00	0.00
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 3	0.13	0.00	0.00	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.12
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 4	0.04	0.00	0.00	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 4 West	-0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.12	-0.15	-0.08	-0.11
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 5	0.10	0.00	0.01	0.12	0.10	0.09	0.08	0.08	0.09
Gewässer Stadtwald, Abschnitt 6	0.03	0.00	0.00	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
Mittelbach Quelle	-0.30	0.00	0.00	-0.30	-0.30	-0.25	-0.50	-0.08	-0.25
Ölbachsystem	-0.16	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Verlorener Bach, Abschnitt 1	0.18	0.01	0.01	0.21	0.19	0.19	0.19	0.18	0.19
Verlorener Bach, Abschnitt 2	0.28	0.00	0.01	0.30	0.28	0.28	0.26	0.27	0.28
Paar, gesamt	0.10	0.00	0.02	0.13	0.14	0.10	0.11	0.10	0.10

Anhang 3: Generierung von instationären Wasserspiegeln aus stationären Wasserspiegelberechnungen

An einigen Gewässern im Modellgebiet liegen stationäre Wasserspiegelberechnungen vor (Lech, Paar, Wertach). Für eine Übernahme ins instationäre Grundwassermodell müssen diese stationären, flächigen Berechnungen in Ganglinien auf die Netzknoten des Grundwassermodells überführt werden. Im Folgenden wird das Vorgehen zur Generierung von instationären Gewässerrandbedingungen allgemein beschrieben.

1. Angenommen es liegen folgende Wasserspiegelberechnungen für ein Gewässer vor:
    a. $WSP_{Simulation}(MQ)$
    b. $WSP_{Simulation}(HQ5)$
    c. $WSP_{Simulation}(HQ100)$
2. Zunächst werden diese auf die Modellknoten des Grundwassermodells interpoliert (z.B. über das Inverse Distanzverfahren), es liegen folgende Werte am Modellknoten X, Y vor
    a. $WSP_{x,y}(MQ)$
    b. $WSP_{x,y}(HQ5)$
    c. $WSP_{x,y}(HQ100)$
3. An der nächstgelegenen Abflussmessstelle liegen folgende Werte vor:
    a. $WSP_{Messstelle}(MQ)$: Wasserspiegel MQ
    b. $WSP_{Messstelle}(1.1.2000)$: Wasserspiegel am 1.1.2000
    c. $WSP_{Messstelle}(HQ5)$: Wasserspiegel HQ5
4. Anschließend soll für den 1.1.2000 ein flächiger Wasserspiegel für das Gewässer berechnet werden. An der nächstgelegenen Abflussmessstelle lag an diesem Tag ein mittlerer Abfluss von 7 m³/s vor.
   Der Wasserspiegel am 1.1.2000 muss zwischen $MQ_{(X,Y)}$ und $HQ5_{(X,Y)}$ interpoliert werden.

$$WSP_{x,y}(1.1.2000) = \frac{1}{\left(WSP_{Messstelle}(1.1.2000) - WSP_{Messstelle}(MQ)\right)} * WSP_{x,y}(MQ) + \frac{1}{\left(WSP_{Messstelle}(HQ5) - WSP_{Messstelle}(1.1.2000)\right)} * WSP_{x,y}(HQ5)$$

Wenn an den Gewässern Wasserstands-Abfluss-Beziehungen vorliegen, wird in einem Zwischenschritt der Wasserstand aus der Abflussganglinie errechnet um die generierten Wasserspiegel etwas zu glätten.