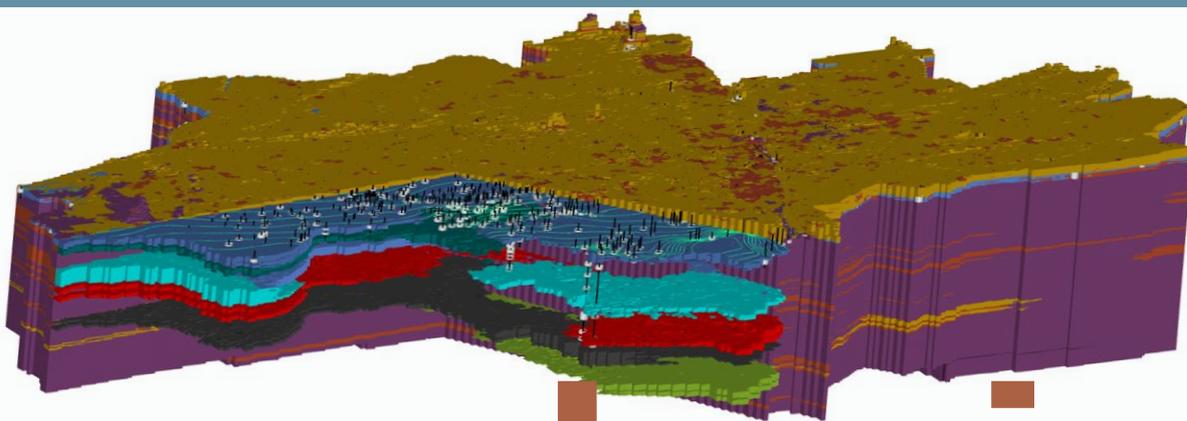




## Die hydraulischen Grundwasserverhältnisse des quartären und des oberflächennahen tertiären Grundwasserleiters im Großraum München



geologie





# Die hydraulischen Grundwasserverhältnisse des quartären und des oberflächennahen tertiären Grundwasserleiters im Großraum München

Bearbeiter:

Dr. Kai Zosseder, M.Sc. Marco Kerl, Dipl.-Ing. Alberto Albarrán-Ordás,  
Dr. Manuel Gossler, Dr. Aleksandra Kiecak, Dr. Lilian Chavez-Kus

199 Seiten, 98 Abbildungen, 28 Tabellen, Augsburg 2022



**Umwelt Spezial**  
**Geologica Bavarica 122**

## Impressum

Die hydraulischen Grundwasserverhältnisse des quartären und des oberflächennahen tertiären Grundwasserleiters im Großraum München

### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

Fax: 0821 9071-5556

E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)

Internet: [www.lfu.bayern.de/](http://www.lfu.bayern.de/)

### Konzept/Text:

Technische Universität München, Lehrstuhl für Hydrogeologie, Arcisstr. 21, 80333 München

Dr. Kai Zosseder, M.Sc. Marco Kerl, Dipl.-Ing. Alberto Albarrán-Ordás, Dr. Manuel Gossler, Dr. Aleksandra Kiecak, Dr. Lilian Chavez-Kus

### Stand:

November 2021

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 12 22 20 oder per E-Mail unter [direkt@bayern.de](mailto:direkt@bayern.de) erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>Arbeitsgebiet, Geografie und klimatische Bedingungen</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>Grundwasserverhältnisse des quartären Hauptgrundwasserleiters im Stadtgebiet München und der Münchner Schotterebene</b>	<b>22</b>
3.1	Geologische und hydrogeologische Beschreibung des Quartärs	22
3.2	Basis des quartären Grundwasserleiters	25
3.2.1	Überblick und bisheriger Kenntnisstand	25
3.2.2	Stand der Technik und Methodik der Flächeninterpolation	27
3.2.3	Ergebnisse und Interpretation der Basis des quartären Grundwasserleiters	28
3.2.3.1	Zusammenfassende Beschreibung und Interpretation der Basis des quartären Grundwasserleiters	32
3.2.3.2	Detaillierte Einzelbeschreibung der Reliefelemente der Basis des quartären Grundwasserleiters	33
3.3	Grundwassergleichen des quartären Hauptgrundwasserleiters	46
3.3.1	Überblick	46
3.3.2	Datengrundlage der Stichtagsmessung und Interpolation der Messdaten	47
3.3.2.1	Datengrundlage	47
3.3.2.2	Methodik	48
3.3.3	Beschreibung und Interpretation der Grundwassergleichen im quartären Hauptgrundwasserleiter	53
3.3.3.1	Allgemeines	53
3.3.3.2	Gespannte und artesische Grundwasserverhältnisse	56
3.3.3.3	Auftragende und deckende Mergel im Stadtgebiet	57
3.3.3.4	Hangbereiche, Terrassenkanten und Quellen	58
3.3.3.5	Oberflächengewässer, Baggerseen und Kiesgruben	59
3.3.3.6	Lokale Sonderfälle	59
3.3.3.7	Würmtal: Hydrogeologische Situation und Interaktion mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter	60
3.3.3.8	Hydrogeologische Situation im Bereich des Moränengürtels	62
3.4	Grundwassererfüllte Mächtigkeit des quartären Hauptgrundwasserleiters	64
3.4.1	Überblick	64
3.4.2	Konstruktion der grundwassererfüllten Mächtigkeit	64

3.4.3	Beschreibung und Interpretation der grundwassererfüllten Mächtigkeit im quartären Hauptgrundwasserleiter	65
3.5	Grundwasserflurabstände im quartären Hauptgrundwasserleiter	68
3.5.1	Überblick	68
3.5.2	Datengrundlage und Berechnung der Grundwasserflurabstände	69
3.5.3	Beschreibung und Interpretation der Grundwasserflurabstände im quartären Hauptgrundwasserleiter	69
3.6	Grundwasserfließgeschwindigkeit und Grundwasserfließrichtung im quartären Hauptgrundwasserleiter	72
3.6.1	Überblick	72
3.6.2	Datengrundlage und Berechnung von Grundwasserfließgeschwindigkeit und Grundwasserfließrichtung	73
3.6.3	Beschreibung und Interpretation der Grundwasserfließgeschwindigkeit und Grundwasserfließrichtung im quartären Grundwasserleiter	75
3.6.3.1	Grundwasserfließgeschwindigkeiten (Quartär)	75
3.6.3.2	Grundwasserfließrichtungen (Quartär)	76
3.7	Hydraulische Durchlässigkeit des quartären Hauptgrundwasserleiters	78
3.7.1	Überblick und bisheriger Kenntnisstand	78
3.7.2	Datengrundlage und Berechnung der hydraulischen Durchlässigkeit	80
3.7.3	Beschreibung und Interpretation der hydraulischen Durchlässigkeit im quartären Hauptgrundwasserleiter	83
3.7.3.1	Allgemeines	83
3.7.3.2	Regionale Verteilung der ermittelten hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) im quartären Hauptgrundwasserleiter	85
3.7.3.3	Ermittelte hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) im quartären Hauptgrundwasserleiter nach hydrogeologischen Großeinheiten	86
3.7.3.4	Ermittelte hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) im quartären Hauptgrundwasserleiter nach Landkreisen	88
<b>4</b>	<b>Grundwasserverhältnisse der Oberen Süßwassermolasse (OSM)</b>	<b>90</b>
4.1	Geologische und hydrogeologische Beschreibung der Oberen Süßwassermolasse (T1 bis T4) und 3D Lithofaziesmodell München	90
4.2	Geologisches 3D-Lithofaziesmodell München und hydrofazielle Untergliederung	94
4.2.1	Einführung und geographische Lage	94
4.2.2	Datengrundlage, Aussageweite und Methodik zum Aufbau des 3D-Lithofaziesmodells	95
4.2.3	Beschreibung und Interpretation des 3D-Lithofaziesmodells München	98

---

4.2.4	Beschreibung und Interpretation der hydraulischen Interaktionsbereiche zwischen Quartär und Tertiär	123
4.2.4.1	Auswertung der Grundwasserganglinien: Phase 1	124
4.2.4.2	Auswertung der Grundwasserganglinien: Phase 2	127
4.3	Grundwassergleichen und Grundwasserflurabstände in den Grundwasserstockwerken der OSM (T1 bis T4)	133
4.3.1	Überblick und bisheriger Kenntnisstand	133
4.3.2	Datengrundlage und Methodik (Stichtagsmessung 2018)	136
4.3.2.1	Datenerhebung: Stichtagsmessung 2018 (OSM)	136
4.3.2.2	Auswertung der Messungen und Filterstreckenzuordnung	139
4.3.2.3	Verteilung der Messpunkte	140
4.3.2.4	Darstellung und Interpolation der Grundwassergleichen	140
4.3.3	Beschreibung und Interpretation der Grundwassergleichen und Flurabstände der oberflächennahen Oberen Süßwassermolasse	142
4.3.3.1	Grundwassergleichen des oberen tertiären Grundwasserleiters T1	142
4.3.3.2	Flurabstände im oberen tertiären Grundwasserleiter T1	148
4.3.3.3	Grundwassergleichen des mittleren tertiären Grundwasserleiters T2	150
4.3.3.4	Grundwassergleichen des unteren tertiären Grundwasserleiters T3	152
4.3.3.5	Grundwassergleichen des tiefen tertiären Grundwasserleiters T4	153
4.4	Angebundene Oberflächengewässer, artesische Bereiche und Grundwasser-Potentialdifferenzen	154
4.4.1	Anbindung und Interaktion von Oberflächengewässern an die tertiären Grundwasserleiter	155
4.4.2	Artesische Bereiche in Bezug auf die Grundwasserverhältnisse der OSM	156
4.4.3	Grundwasser-Potentialdifferenzen zwischen dem quartärem und den tertiären Grundwasserleitern (T1 bis T4)	160
4.4.3.1	Allgemeines: Potentialdifferenzen zwischen dem quartärem und den tertiären Grundwasserleitern (T1 bis T4) in Stadtgebiet und Umland	160
4.4.3.2	Stadtgebiet: Potentialdifferenzen des quartären Grundwasserspiegels und der Grundwasserdruckoberfläche T1A (jeweils 2018):	161
4.4.3.3	Stadtgebiet: Potentialdifferenzen des quartären Grundwasserspiegels und der Grundwasserdruckoberfläche T1B und T1BC (jeweils 2018):	161
4.4.3.4	Stadtgebiet: Potentialdifferenzen des quartären Grundwasserspiegels und der Grundwasserdruckoberfläche T1C und T1CD (jeweils 2018):	162

---

4.4.3.5	Stadtgebiet: Potentialdifferenzen des quartären Grundwasserspiegels und der Grundwasserdruckoberfläche T1D und T1CD (jeweils 2018):	162
4.4.3.6	Umland: Potentialdifferenzen des quartären Grundwasserspiegels (2014) und der Grundwasserdruckoberfläche T1 (2018):	164
4.4.3.7	Umland: Potentialdifferenzen des quartären Grundwasserspiegels (2014) und der Grundwasserdruckoberfläche T2 bis T4 (2018):	164
4.4.4	Grundwasser-Potentialdifferenzen innerhalb der OSM (T1 bis T4 von 2018)	167
4.4.4.1	Allgemeines: Potentialdifferenzen der tertiären Grundwasserdruckoberflächen im Stadtgebiet und Umland	167
4.4.4.2	Stadtgebiet: Potentialdifferenzen der Grundwasserdruckoberflächen von T1A/T1B, T1A/T1C und T1A/T1D	167
4.4.4.3	Stadtgebiet: Potentialdifferenzen der Grundwasserdruckoberflächen von T1B/T1C und T1B/T1D	168
4.4.4.4	Stadtgebiet: Potentialdifferenzen der Grundwasserdruckoberflächen von T1BC/T1D und T1C/T1D	169
4.4.4.5	Umland: Potentialdifferenzen der Grundwasserdruckoberflächen von T1/T2, T1/T3 und T1/T4	169
4.4.4.6	Umland: Potentialdifferenzen der Grundwasserdruckoberflächen von T2/T3 und T2/T4	170
4.4.4.7	Umland: Potentialdifferenzen der Grundwasserdruckoberflächen von T3/T4	171
4.5	Hydraulische Durchlässigkeit der Grundwasserleiter der Oberen Süßwassermolasse	173
4.5.1	Überblick und bisheriger Kenntnisstand	173
4.5.2	Datengrundlage und Berechnung der Durchlässigkeitsbeiwerte	174
4.5.3	Beschreibung und Interpretation der hydraulischen Durchlässigkeit in der OSM	175
4.5.3.1	Pumpversuchsauswertungen in der Oberen Süßwassermolasse	175
4.5.3.2	Regionale Verteilung der ermittelten hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) in der OSM	176
4.5.3.3	Ermittelte hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) der OSM nach Landkreisen	177
4.5.3.4	Ausblick	177
<b>5</b>	<b>Betrachtung der dynamischen Grundwasserverhältnisse des quartären und oberflächennahen, tertiären Hauptgrundwasserleiters (OSM)</b>	<b>179</b>
5.1	Überblick	179
5.2	Datengrundlage und Auswertung der Grundwasserganglinien	179
5.2.1	Datengrundlage	179
5.2.2	Methodik der Clusteranalyse	182

---

5.2.3	Methodik der Trendanalyse	182
5.2.4	Methodik zur Analyse der Grundwasserspiegelschwankungen	183
5.3	Beschreibung und Interpretation der Grundwasserganglinien	184
5.3.1	Ergebnisse der Clusteranalyse	184
5.3.2	Ergebnisse Trendanalyse	187
5.3.3	Ergebnisse der Analyse der Grundwasserspiegelschwankungen	189
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick</b>	<b>192</b>
<b>7</b>	<b>Kontakt, Datenbezug und Danksagung</b>	<b>193</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>195</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Arbeitsgebiet der Projekte GEPO und GeoPot mit den enthaltenen Landkreisen und dem Stadtgebiet München (Zosseder 2019)	20
Abb. 2:	Übersicht über die Münchner Schotterebene (MSE) (Albarrán-Ordás A., Zosseder, K. 2020)	23
Abb. 3:	Schematisches Blockbild der Ablagerungsverhältnisse im Stadtgebiet München (verändert nach Münichsdorfer 1922)	24
Abb. 4:	Methodik der Reliefmodellierung und -analyse durch geostatistische Verfahren (BIS-BY = Bodeninformationssystem Bayern; Natural Neighbour = Interpolationsmethode) (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020)	28
Abb. 5:	Höhenlinienkarte (MSE und Stadtgebiet München) (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020)	29
Abb. 6:	Reliefkarte (MSE und Stadtgebiet München) (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020)	30
Abb. 7:	Karte der Unsicherheiten im inneren und äußeren Interpolationsgebiet der Münchner Schotterebene (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020)	31
Abb. 8:	Zusammenfassung der Methodik zur Erstellung des Grundwassergleichenplans	49
Abb. 9:	Variogramm der Daten des westlichen Arbeitsgebietes	51
Abb. 10:	Variogramm der Daten des östlichen Arbeitsgebietes	51
Abb. 11:	Übersichtsplan der Isolinien (mit Attributierung) des quartären Hauptgrundwasserleiters der Münchner Schotterebene (MSE). Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind als „fraglich“ oder „frei“ gekennzeichnet.	54
Abb. 12:	Übersicht über den Verlauf der Grundwassergleichen des quartären Hauptgrundwasserleiters im Bereich des Stadtgebietes München. Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind als „fraglich“ oder „frei“ gekennzeichnet.	55
Abb. 13:	Darstellung der Situationen 1 bis 5 (Hinweise auf gespannte / artesische Verhältnisse) im Bereich der Münchner Schotterebene	57
Abb. 14:	Aufragende Mergel (entspricht „Situation Grundwasser: frei – grau“) und deckende Mergel (entspricht „Situation: (5) Gesp. RGU – schwarz schraffiert“) im Stadtgebiet München	58
Abb. 15:	Legende zu den nachfolgenden Profilschnitten (Zosseder, 2015)	61
Abb. 16:	Situation der Würm auf Höhe des Stadtgebietes (mit Anbindung an den quartären Hauptgrundwasserleiter) (Zosseder, 2015)	61
Abb. 17:	Profilschnitt durch den südlichen Teil des Arbeitsgebietes zwischen Oberpfaffenhofen und Höllriegelskreuth (Blasy, 1974: 18)	62
Abb. 18:	Schematischer Profilschnitt durch die Tertiäraufragungen und Moränenablagerungen im südlichen Arbeitsgebiet (Zosseder, 2015)	63
Abb. 19:	Schematischer Profilschnitt zwischen Fluss Dorfen und Stadt Erding durch den nördlichen Ausläufer der Moräne (mit Lössüberdeckung), mit „angebundenen“ Grundwasserverhältnissen im quartären Grundwasserleiter (Zosseder, 2015)	63

Abb. 20:	Schematischer Profilschnitt im Großraum Markt Schwaben, in dem die nicht vorhandene Korrespondenz zwischen quartärem Grundwasserleiter und den lokalen Grundwasserkörpern innerhalb der Moräne dargestellt wird (Zosseder, 2015)	64
Abb. 21:	Grundwassermächtigkeiten im quartären Hauptgrundwasserleiter der Münchner Schotterebene (MSE). Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind als „fraglich“ oder „frei“ gekennzeichnet.	66
Abb. 22:	Grundwassermächtigkeiten im quartären Hauptgrundwasserleiter im Stadtgebiet München. Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind gekennzeichnet.	67
Abb. 23:	Überblick über die Flurabstände im quartären Hauptgrundwasserleiter der Münchner Schotterebene (MSE). Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind als „fraglich“ oder „frei“ gekennzeichnet.	70
Abb. 24:	Überblick über die Flurabstände im quartären Hauptgrundwasserleiter im Stadt München. Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind gekennzeichnet.	71
Abb. 25:	Übersicht über die, durch die regionalisierte hydraulische Durchlässigkeit und die grundwassererfüllte Mächtigkeit berechnete, Verteilung der Transmissivität im Bereich der Münchner Schotterebene (MSE) (Abbildung überarbeitet nach Zosseder 2015).	74
Abb. 26:	Grundwasserfließgeschwindigkeiten im quartären Hauptgrundwasserleiter der Münchner Schotterebene (MSE) (Stand 2014). Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, sind ausgespart.	75
Abb. 27:	Grundwasserfließgeschwindigkeiten im quartären Hauptgrundwasserleiter im Stadtgebiet München (Stand 2014). Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind laut Legende gekennzeichnet.	76
Abb. 28:	Grundwasserfließrichtungen im quartären Hauptgrundwasserleiter der Münchner Schotterebene (MSE) (Stand 2014). Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, sind ausgespart.	77
Abb. 29:	Grundwasserfließrichtungen im quartären Hauptgrundwasserleiter im Stadtgebiet München (Stand 2014). Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind gekennzeichnet.	78
Abb. 30:	Entscheidungsbaum nach der Ampelmethode zur Beurteilung der Güte eines ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerts auf Basis der vorhandenen Gutachten (links) und die Kombination der einzelnen begutachteten fünf Kriterien um die drei Güteklassen abzuleiten (rechts) (Abbildung überarbeitet nach Zosseder 2015).	82
Abb. 31:	Kumulative Häufigkeiten der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im quartären Grundwasserleiter der Münchner Schotterebene	84
Abb. 32:	Die regionalisierte Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte in der Münchner Schotterebene (MSE) auf Basis der erarbeiteten Werte und ihrer Gütebeurteilung (Stand 2015). An den einzelnen Lokalitäten wurden die vorliegenden Durchlässigkeitsbeiwerte über ihre Güte gewichtet gemittelt (Abbildung überarbeitet nach Zosseder 2015).	85
Abb. 33:	Exemplarische regionale Unterschiede in den ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerten im quartären Grundwasserleiter der Münchner Schotterebene	86

Abb. 34:	Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte in den quartären bzw. holozänen Einheiten	87
Abb. 35:	Verteilung der spezifischen Ergiebigkeiten in den quartären bzw. holozänen Einheiten	87
Abb. 36:	Lage der verwendeten Bohrungen im Modellgebiet	95
Abb. 37:	Schematischer Workflow der 3D-Lithofaziesmodellierung	97
Abb. 38:	Finale Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lithofaziestypen im 3D-Lithofaziesmodell des Arbeitsgebiets	97
Abb. 39:	Schematische Darstellung der finalen Horizontunterteilung des 3D-Lithofaziesmodells	98
Abb. 40:	Finale Horizontunterteilung des 3D-Lithofaziesmodell (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2019)	99
Abb. 41:	Schematische Darstellung der Horizontunterteilung des 3D-Lithofaziesmodells mit Einbeziehung der Kontaktzonen (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2019)	101
Abb. 42:	Horizontunterteilung des 3D-Lithofaziesmodell mit Einbeziehung der Kontaktzonen	102
Abb. 43:	Verbreitung und modellierte Untergrenze und Obergrenze des T1A-Horizontes (Angaben in m ü. NN)	107
Abb. 44:	Verbreitung und modellierte Untergrenze und Obergrenze des T1B-Horizontes (Angaben in m ü. NN)	109
Abb. 45:	Verbreitung und modellierte Untergrenze und Obergrenze des T1C-Horizontes (Angaben in m ü. NN)	111
Abb. 46:	Verbreitung und modellierte Untergrenze und Obergrenze des T1D-Horizontes (Angaben in m ü. NN)	113
Abb. 47:	Verbreitung und modellierte Untergrenze und Obergrenze des T2-Horizontes (Angaben in m ü. NN)	115
Abb. 48:	Verbreitung und modellierte Untergrenze und Obergrenze des T3-Horizontes (Angaben in m ü. NN)	117
Abb. 49:	Verbreitung und modellierte Unter- und Obergrenze des T4-Horizontes (Angaben in m ü. NN)	119
Abb. 50:	Interaktionsbereiche zwischen Quartär und Horizont T1A bis T1D	120
Abb. 51:	Interaktionsbereiche T1A Horizont	120
Abb. 52:	Interaktionsbereiche T1B Horizont	121
Abb. 53:	Interaktionsbereiche T1C Horizont	121
Abb. 54:	Interaktionsbereiche T1D Horizont	122
Abb. 55:	Übersicht der Bereiche mit vermutetem hydraulischem Kontakt zwischen dem quartären und tertiären Grundwasserstockwerk. Die lithofazielle Verteilung der Interaktionsbereiche im Liegenden der quartären Ablagerungen, nach dem finalem 3D-Lithofaziesmodell im Münchner Stadtgebiet, sind farbig hinterlegt.	123
Abb. 56:	Grundwasserganglinien der quartären und tertiären Messstellen in der Ebenböckstraße (links), am Bahnhof Pasing (Mitte) und in der Radolfzeller Straße (rechts)	124
Abb. 57:	Profil im Raum Pasing	124
Abb. 58:	Grundwasserganglinien der quartären und tertiären Messstellen am Heimeranplatz (links) und in der Fußgängerzone (rechts)	125

Abb. 59:	Profil aus dem 3D-Modell im Raum München Innenstadt (Heimeranplatz bis Rindermarkt)	126
Abb. 60:	Grundwasserganglinien der im Quartär und Tertiär verfilterten Messstellen in München-Freimann	127
Abb. 61:	Ausgewählte Messstellen und die Lage des Profilschnitts 1 zur Untersuchung der Reichweite der Auswirkungen der Interaktionsbereiche auf die Ganglinien im T1B-Horizont	128
Abb. 62:	Profilschnitt im Untersuchungsbereich. Im SSE ist noch eine mächtige Trennschicht (lila) zwischen T1B-Horizont (grün) und dem quartären Grundwasserleiter (gelb) vorhanden. In NNW Richtung wird diese Trennschicht zunehmend geringermächtig und ist im Bereich der Gruppe 4 nicht mehr vorhanden. Dargestellt sind auch die lithologischen Profile (falls vorhanden) der Messstellen für die die Grundwasserganglinien verglichen werden.	129
Abb. 63:	Grundwasserganglinien des T1B-Horizonts (blau) in Abhängigkeit der Entfernung zur hydraulischen Kontaktzone und dazu als Vergleich Ganglinien von Messstellen, die in der näheren Umgebung im Quartär oder ohne Trennschicht zum Quartär verfiltert sind. Mit zunehmender Nähe zu den Kontaktzonen gleichen sich die Ganglinien immer weiter an.	130
Abb. 64:	Verbreitung der Horizonte T1B und T1C im Untersuchungsgebiet. Im südlichen Bereich des Profils ist der T1B-Horizont nur schwach ausgebildet.	131
Abb. 65:	Profilschnitt durch den Untersuchungsbereich zur Ermittlung der Auswirkungen der hydraulischen Kontaktzonen. Im Süden ist der T1B-Horizont nur schwach ausgebildet und durch eine Trennschicht vom quartären Grundwasserleiter getrennt. Der T1A-Horizont ist in hydraulischem Kontakt mit dem quartären Grundwasserleiter.	132
Abb. 66:	Grundwasserganglinien des T1B- (blau) und T1C-Horizonts (orange) in Abhängigkeit der Entfernung zur hydraulischen Kontaktzone. Dazu als Vergleich Ganglinien von Messstellen, die in der näheren Umgebung im Quartär oder ohne Trennschicht zum Quartär verfiltert sind. Mit zunehmender Nähe zu den Kontaktzonen gleichen sich die Ganglinien generell mehr an.	133
Abb. 67:	Bearbeitete Messpunkte der Stichtagsmessung 2018 (Stand Nov. 2018)	139
Abb. 68:	Übersicht über den oberflächennahen tertiären Grundwasserleiter (T1) im Stadtgebiet. Es konnte durch das 3D-Modell eine Unterteilung in 4 Unterhorizonte (T1A-T1D) vorgenommen werden (Ausbreitung: T1A hellblau, T1B hellgrün, T1C gelb, T1D lila). Gesicherte Bereiche sind durchgängig, unsichere und interpretierte Bereiche gestrichelt dargestellt. Auf eine Beschriftung der Isolinien wurde aufgrund der Übersichtlichkeit in dieser Darstellung verzichtet.	143
Abb. 69:	Übersicht über die einzelnen Unterhorizonte des oberflächennahen tertiären Grundwasserleiters (T1 – in grau hinterlegt) für das Stadtgebiet München. Von Süden nach Norden sortieren sich die Unterhorizonte wie folgt mit der Tiefe. T1A (blau hinterlegt), T1B (grün hinterlegt), T1C (gelb hinterlegt) und T1D (lila hinterlegt). Außerdem sind die Interaktionsbereiche T1BC und T1CD in die Pläne eingearbeitet. Im Anschluss an das Stadtgebiet nach Norden vereinigen sich die auslaufenden Horizonte T1C und T1D zu einem gemeinsamen T1-Horizont, bis dieser in Höhe Dietersheim ausläuft bzw. in den darunterliegenden T2-Horizont übergeht. Interaktionsbereiche zwischen den Horizonten sind vertikal bzw. horizontal schraffiert oder gepunktet gekennzeichnet.	144

- Abb. 70: Übersicht der Isolinien des oberflächennahen tertiären Grundwasserleiters T1. Bereiche, in denen der Grundwasserleiter nicht ausgebildet (nördliche MSE) oder eine zu geringe Stützpunktdichte vorherrscht (südliches und südöstliches Projektgebiet), wurden ausgespart. Der Bereich des Stadtgebietes wurde generalisiert gestrichelt dargestellt, da hierzu gesonderte Pläne der Unterhorizonte vorhanden sind. Lokal kann der Grundwasserleiter von Kleinhorizonten überlagert werden. Die ausstreichende OSM ist gelb hinterlegt. 146
- Abb. 71: Übersicht über die ermittelten Flurabstände, im Bereich zwischen 0 m und 84 m, des oberen tertiären Grundwasserleiters (T1) im Tertiären Hügelland. Bereiche mit quartärer Überlagerung, in denen eine Berechnung der Flurabstände laut Definition nicht sinnvoll ist, wurden schraffiert dargestellt (quartäre Überdeckung). Auf die Darstellung von Flurabständen im Bereich kleinräumiger, tertiärer Aufragungen wurde verzichtet. 149
- Abb. 72: Übersicht der Isolinien des mittleren, tertiären Grundwasserleiters T2. Bereiche, in denen eine zu geringe Stützpunktdichte vorherrscht, wurden ausgespart. Der Grundwasserleiter ist nicht durchgehend ausgeprägt und kann lokal mit den darüber oder darunter verlaufenden quartären und tertiären Aquiferen interagieren. Die ausstreichende OSM ist gelb hinterlegt. Aufgrund der Stützpunktdichte muss dieser Plan als Übersichtsplan angesehen werden, der für Detailbetrachtungen nicht geeignet ist. 151
- Abb. 73: Übersicht der Isolinien des lokalen „Grundwasserleiters Tx“ im südlichen Stadtgebiet. Bereiche, in denen der Grundwasserleiter nicht ausgebildet oder eine zu geringe Stützpunktdichte vorherrscht, wurden ausgespart. Der Grundwasserleiter ist nicht durchgehend ausgeprägt. Der betreffende Horizont liegt auf ähnlichem Niveau wie der T2-Aquifer, verhält sich aber unabhängig von diesem. Dies zeigt sich sowohl im Verlauf der Isolinien als auch bei den Druckspiegeln. 152
- Abb. 74: Übersicht der Isolinien des unteren, tertiären Grundwasserleiters T3. Bereiche, eine zu geringe Stützpunktdichte vorherrscht, wurden nicht dargestellt. Der Grundwasserleiter ist nicht durchgehend ausgeprägt und kann lokal mit den darüber oder darunter verlaufenden Aquiferen interagieren. Die ausstreichende OSM ist gelb hinterlegt. Aufgrund der Stützpunktdichte muss dieser Plan als Übersichtsplan angesehen werden, der für Detailbetrachtungen nicht geeignet ist. 153
- Abb. 75: Übersicht der Isolinien des tiefen, tertiären Grundwasserleiters T4. Bereiche, in denen eine zu geringe Stützpunktdichte vorherrscht, wurden nicht dargestellt. Der Grundwasserleiter ist nicht durchgehend ausgeprägt und kann lokal mit den darüber oder darunter verlaufenden Horizonten interagieren. Die ausstreichende OSM ist gelb hinterlegt. Aufgrund der Stützpunktdichte muss dieser Plan als Übersichtsplan angesehen werden, der für Detailbetrachtungen nicht geeignet ist. 154
- Abb. 76: Darstellung der möglichen artesischen Bereiche des oberflächennahen, tertiären Hauptgrundwasserleiters (T1). Diese wurden durch den Verschnitt der Isolinien (T1) mit dem DGM (1 m) erstellt. Im Bereich der nördlichen Schotterebene ist der T1-Aquifer nicht ausgeprägt und im südlichen Projektgebiet liegen kaum Informationen zur Grundwassersituation vor. Das Stadtgebiet München wurde separat bearbeitet. 157
- Abb. 77: Mögliche artesischen Bereiche des mittleren, tertiären Hauptgrundwasserleiters (T2). Diese wurden durch den Verschnitt der Isolinien mit dem DGM (1 m) erstellt. Mögliche artesischen Bereiche sind gelb, orange und rot koloriert. 158
- Abb. 78: Mögliche artesischen Bereiche des unteren, tertiären Hauptgrundwasserleiters (T3). Diese wurden durch den Verschnitt der Isolinien mit dem DGM (1 m) erstellt. Mögliche artesischen Bereiche sind gelb, orange und rot koloriert. 159

Abb. 79:	Mögliche artesische Bereiche des tiefen, tertiären Hauptgrundwasserleiters (T4). Diese wurden durch den Verschnitt der Isolinien mit dem DGM (1 m) erstellt. Mögliche artesische Bereiche sind gelb, orange und rot koloriert.	159
Abb. 80:	Verschnitte des freien, quartären Grundwasserspiegels (2018) mit dem Grundwasserdruckspiegel des T1A bis T1D-Horizonts (2018). Positive Potentialdifferenzen sind dunkelblau, ähnliche Grundwasserverhältnisse hellblau und negative Potentialdifferenzen gelb dargestellt. Das Verbreitungsgebiet der Horizonte ist schwarz umrandet, der Interaktionsbereich zwischen den Horizonten und dem Quartär schraffiert dargestellt.	163
Abb. 81:	Verschnitt des freien Grundwasserspiegels des Quartärs (STM 2014) mit dem Grundwasserdruckspiegel des oberflächennahen, tertiären T1-Aquifers bis zum tiefen tertiären Aquifer T4 (STM 2018). Bereiche, in denen die Grundwasserleiter nicht ausgeprägt sind oder nicht konstruiert werden konnten, sind ausgespart. Das Stadtgebiet München wurde beim T1-Aquifer separat bearbeitet.	166
Abb. 82:	Lokaler Verschnitt der Grundwasserdruckspiegel des T1A- mit dem T1B / T1C / T1D - Horizont und die sich daraus ergebenden Potentialdifferenzen	168
Abb. 83:	Lokaler Verschnitt der Grundwasserdruckspiegel des T1B- mit dem T1C- und T1D-Horizont (oben links und rechts). Verschnitt des T1BC -Mischhorizonts mit dem T1D-Horizont (unten rechts) und dem T1C- mit dem T1D-Horizont (unten links). Positive Potentialdifferenzen sind dunkelblau, ähnliche Grundwasserverhältnisse hellblau und negative Potentialdifferenzen gelb dargestellt.	169
Abb. 84:	Verschnitt der Grundwasserdruckspiegel des T1-- mit dem T2- bis T4-Aquifer und die sich daraus ergebenden Potentialdifferenzen ( <b>a, b, c</b> ). Verschnitt der Grundwasserdruckspiegel des T2-- mit dem T3- und T4-Aquifer und die sich daraus ergebenden Potentialdifferenzen ( <b>d, e</b> ). Verschnitt der Grundwasserdruckspiegel des T3-- mit dem T4-Aquifer und die sich daraus ergebenden Potentialdifferenzen ( <b>f</b> ). Bereiche, in denen die Grundwasserleiter nicht ausgeprägt sind oder nicht konstruiert werden konnten, sind ausgespart.	172
Abb. 85:	Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte und der spezifischen Ergiebigkeit der Oberen Süßwassermolasse nach Landkreisen. Zur besseren Übersicht wurden im Boxplot zur spezifischen Ergiebigkeit die Werte über 100 l/(s*m) nicht dargestellt.	176
Abb. 86:	Darstellung der $k_f$ -Werte in der OSM gegen den Rechtswert geplottet. Ein leicht westwärts gerichteter Trend zu niedrigeren $k_f$ -Werten ist erkennbar.	176
Abb. 87:	Gegenüberstellung der aus den Schichtdaten berechnete mittlere $k_f$ -Wert ( $k_f\_mean(berechnet)$ ) und den aus dem Pumpversuchen gewonnenen $k_f$ -Werten ( $PV(GEOM\_GK1\_2)$ ) der Güteklasse 1 und 2 aus 73 tiefen Brunnen der OSM.	178
Abb. 88:	Übersicht der Grundwasserganglinien an im Tertiär (OSM) verfilterten Messstellen mit weniger als 10 % Fehlwerten bei 14-Tagesmittelwerten	180
Abb. 89:	Übersicht der Grundwasserganglinien an im Tertiär (OSM) und Quartär verfilterten Messstellen, mit weniger als 10 % Fehlwerten bei 14-Tagesmittelwerten	181
Abb. 90:	Beispiel für eine Ergänzung von Datenlücken basierend auf einem strukturellen Zeitreihenmodell mit Kalman Filter	181
Abb. 91:	Beispiel für die angewendete Methodik zur Bestimmung der mittleren Grundwasserschwankungen	183

- Abb. 92: Übersicht über die Zuordnung der Ganglinien zu den einzelnen Clustern. Die Graphik oben links zeigt die tatsächlichen Ganglinien, die Farben zeigen die Zuordnung mittels 3D-Modell zu den Horizonten der OSM. Die Graphik oben rechts zeigt die Autokorrelation und die untere Graphik die spektrale Leistungsdichte der Ganglinien, beides kann zur Charakterisierung einer Zeitreihe herangezogen werden. 185
- Abb. 93: Räumliche Verteilung der Cluster und Interaktionsbereiche der tertiären Horizonte. Es gibt eine deutliche räumliche Konzentration der Cluster. Q\_Q und Q\_T Messstellen in Interaktionsbereichen sind meist dem gleichen Cluster zugeordnet. Einzelne Horizonte der OSM zeigen keine signifikante Dynamik, die zu einer Clusterzuordnung unabhängig von der räumlichen Verortung führen würde. 186
- Abb. 94: Ganglinien gemäß der Horizontzuordnung durch das 3D-Modell geordnet und klassifiziert nach negativem (fallendem), positiven (steigendem) und ohne signifikantem Trend. Der Trend wurde mit dem „prewhitened“ Mann Kendall Test nach Yue et al. (2002) durchgeführt. Wurden in einer Ganglinie signifikante „change points“ (schwarze Balken) ermittelt wurde die Ganglinie geteilt und die Trendanalyse für beide Teile durchgeführt. 188
- Abb. 95: Ganglinien gemäß der Horizontzuordnung durch das 3D-Modell geordnet und klassifiziert nach negativem (fallendem), positiven (steigendem) und ohne signifikantem Trend und entsprechende Kombinationen, falls die Ganglinie aufgrund des Vorhandenseins eines „change points“ geteilt wurde. 188
- Abb. 96: Übersicht über die mittlere Schwankung des Grundwasserstandes für die ausgewiesenen Horizonte des 3D-Modells 190
- Abb. 97: Kategorisierte, mittlere Schwankungshöhen der Grundwasserstände für die verschiedenen Horizonte des 3D-Modells. Im Hintergrund sind die hydraulischen Interaktionsbereiche dargestellt. 190
- Abb. 98: Kategorisierte, mittlere Schwankungshöhen der Grundwasserstände für die verschiedenen Horizonte des 3D-Modells. Im Hintergrund ist die grundwassererfüllte Aquifermächtigkeit dargestellt. 191

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Chronologische Zusammenfassung der bisherigen Arbeiten über die quartäre Grundwasserbasis der MSE	26
Tab. 2:	Zusammenfassung recherchierter Grundwassergleichenpläne Quartär (Stand 2018)	46
Tab. 3:	Auswahl vorhandener, großflächiger Grundwassergleichenpläne (Quartär) (Stand 2018)	47
Tab. 4:	Eigenschaften der Variogramme	51
Tab. 5:	Klassifizierung der Grundwasserfließrichtung im Bereich der Schotterebene	74
Tab. 6:	Statistische Lagemaße der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im quartären Grundwasserleiter der Münchner Schotterebene	84
Tab. 7:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Pumpversuchsauswertung nach Landkreis und hydrogeologische Großeinheit. „kf_all“ beschreibt den geometrische gemittelten $k_f$ -Wert aller Güteklassen, „kf_GK_1_2“ den geometrisch gemittelten $k_f$ -Werte der Güteklasse 1 und 2 und „spezErg“ gibt den arithmetisch gemittelten $k_f$ -Wert der spezifischen Ergiebigkeit an.	88
Tab. 8:	Lithofaziestypen des Modells	96
Tab. 9:	Übersicht der modellierten geologischen Horizonte (verändert nach Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2019)	99
Tab. 10:	Übersicht der Modellbereiche nach der Einbeziehung der Kontaktzonen	102
Tab. 11:	Auswertung der Modellergebnisse für den tertiären Horizont T1A	106
Tab. 12:	Auswertung der Modellergebnisse für den tertiären Horizont T1B	108
Tab. 13:	Auswertung der Modellergebnisse für den tertiären Grundwasserhorizont T1C	110
Tab. 14:	Auswertung der Modellergebnisse für den tertiären Horizont T1D	112
Tab. 15:	Auswertung der Modellergebnisse für den tertiären Horizont T2	114
Tab. 16:	Auswertung des Modellergebnisses für den tertiären Horizont T3	116
Tab. 17:	Auswertung der Modellergebnisse für den tertiären Horizont T4	118
Tab. 18:	Zusammenfassung recherchierter Grundwassergleichenpläne der OSM (Stand 2018)	134
Tab. 19:	Auswahl vorhandener, großflächiger Grundwassergleichenpläne (Tertiär) (Stand 2018)	134
Tab. 20:	Übersicht über die definierten Tiefebereiche der Unterhorizonte des T1-Aquifers im Stadtgebiet München	142
Tab. 21:	Ausbreitung und Interaktionen der Unterhorizonte des T1-Aquifers (T1A-T1D) im Stadtgebiet	145
Tab. 22:	Verwendete Auswerteverfahren zur Berechnung der Transmissivität	174
Tab. 23:	Zusammenfassung der Ergebnisse der Pumpversuchsauswertung nach Landkreis für die hydrogeologische Großeinheit OSM. „kf_all“ beschreibt den geometrische gemittelten $k_f$ -Wert aller Güteklassen, „kf_GK_1_2“ den geometrisch gemittelten $k_f$ -Werte der Güteklasse 1 und 2 und „spezErg“ gibt den arithmetisch gemittelten $k_f$ -Wert der spezifischen Ergiebigkeit an.	177
Tab. 24:	Entscheidungskriterien für die Berechnung des $k_f$ -Wertes aus den erzeugten Kornsummen. Spalte 2 und 3 stellen die Kriterien da, welche zur Auswahl des jeweiligen Verfahrens führen.	178

Tab. 25:	Grundwassermessstellen (zum Teil nicht mehr existent) mit verfügbaren Grundwasserganglinien (in Klammer)	179
Tab. 26:	Anzahl an Ganglinien, für die eine Trendanalyse durchgeführt wurde. Aufteilung in die jeweiligen Grundwasser-Horizonte für den Zeitraum Mai 2008 bis April 2018. „Q_Q“ steht dabei für Messstellen, deren Filterstrecke ausschließlich in quartären Sedimenten liegt. Q_T bezeichnet Messstellen, bei denen mindestens ein Teil einer Filterstrecke in tertiären, als auch in quartären Sedimenten liegt. T1A bis Tx (unklare Zuordnung) bezeichnen die tertiären Unterhorizonte (siehe Kapitel 4.2 (3D-Modell)).	182
Tab. 27:	Anzahl an Ganglinien, die einen positiven, negativen oder keinen signifikanten Trend zeigen, sowie die Anzahl an Ganglinien mit und ohne „change point“. Wenn die „change point“ Analyse einen signifikanten Umkehrpunkt detektiert hat, wurde die Ganglinie in zwei Zeitreihen geteilt und für jeden Teil ein eigener Trend bestimmt. Dadurch ergibt sich die insgesamt höhere Gesamtzahl an Ganglinien in dieser Tabelle.	187
Tab. 28:	Mittlere Schwankungen des Grundwasserspiegels für die einzelnen Horizonte des 3D-Modells	189

**Autor\*Innen:**

Dr. Kai Zosseder

M.Sc. Marco Kerl

Dr. Lilian Chavez-Kus

Dipl.-Ing. Alberto Albarrán-Ordás

Dr. Manuel Gossler

Dr. Aleksandra Kiecak

**Schlagwörter:**

Grundwasser, oberflächennahe Geothermie, Quartär, Tertiär, Obere Süßwassermolasse, München, Münchner Schotterebene, Grundwassergleichen, Grundwasserflurabstände, Grundwassermächtigkeiten, 3D-Modellierung, hydraulische Durchlässigkeiten

**Zusammenfassung**

Diese Ausgabe der *Geologica Bavarica* widmet sich den hydraulischen Grundwasserverhältnissen des quartären und des oberflächennahen tertiären Grundwasserleiters im Großraum München, die mit Hilfe einer detaillierten 3D-Lithofaziesmodellierung erarbeitet und umfassend dargestellt werden konnten. Neben dem hydrogeologischen Aufbau liegen weitere Schwerpunkte im Bereich der Grundwassersituation des quartären und tertiären Grundwasserleiters (Grundwassergleichen, Flurabstände und Grundwassermächtigkeiten), der Dynamik und Interaktion der Grundwasserstockwerke, sowie deren zugehörige Parameter (hydraulische Durchlässigkeit, Grundwasserfließrichtung und -geschwindigkeit). Die Grundwassersituation und die Parameter wurden durch umfangreiche Auswertungen von Bestandsdaten der öffentlichen Stellen, sowie ausgiebige Feldstudien des Lehrstuhls Hydrogeologie der Technischen Universität München erfasst und interpretiert. Diese Arbeiten wurden im Rahmen der vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz finanzierten und durch den Lehrstuhl für Hydrogeologie der TU München in Kooperation mit dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) bearbeiteten Projekte GEPO (2012 – 2015) und GeoPot (2016 – 2019) durchgeführt.

**Abstract**

This edition of *Geologica Bavarica* is addressed to the hydraulic groundwater conditions of the quaternary and tertiary aquifer in the wider area of Munich. The groundwater conditions in Munich, which were visualised and analysed via a detailed 3D-facies-modelling for the very first time. Besides the hydrogeological structure, further research points were the groundwater situation of the quaternary and tertiary aquifer (water table contour lines, depth to the water table and groundwater thickness), the dynamic and interaction of the several aquifers and their parameters (hydraulic permeability, groundwater flow direction and velocity). The groundwater situation and the parameters were elevated and interpreted by extensive analysis of existing data by public agencies and field studies of the „Chair of Hydrogeology“ (Technical University of Munich). The research was financed by the „Bavarian State Ministry for Environment and Consumer Protection“ and realised by the „Chair of Hydrogeology“ (Technical University of Munich), in cooperation with the Bavarian Environmental Agency, through the research projects „GEPO“ (2012 – 2015) and „GeoPot“ (2016 – 2019).

# 1 Einleitung

Das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) hat im Fokus, den Deckungsgrad an geowissenschaftlichen Informationen in der Fläche und in geeigneten Maßstäben, als Grundlage für Planung und Genehmigungsverfahren, bayernweit zu erhöhen und Informationen zur Nutzung von Geopotenzialen für Öffentlichkeit und Verwaltung, z. B. über das Bodeninformationssystem Bayern (BIS-BY) oder den Umweltatlas Bayern, bereitzustellen.

Die vorliegende Publikation im Rahmen der Schriftenreihe „Geologica Bavarica“ soll vor allem die komplexen hydrogeologischen Verhältnisse und die Grundwasserdynamik des Großraums München im Quartär und Tertiär zusammenfassend darstellen.

Die fluvioglazial abgelagerten quartären Schotter im Großraum München bilden die Münchner Schotterebene (MSE), die sich vorwiegend aus Würm- und Riss-Schotterterrassen von einigen Metern bis Dekametern Mächtigkeit aufbaut (Bauer et al. 2005). Sie stellt mit ihren circa 2.250 km<sup>2</sup> eines der größten zusammenhängenden Grundwasservorkommen Europas dar (Freudenberger & Schwerdt 1996). Der abgelagerte Schotter weist dabei generell eine relativ starke hydraulische Durchlässigkeit auf. Zusammen mit einer Mächtigkeit bis zu 30 m im Stadtgebiet Münchens und bis zu 60 m im Süden entsteht so ein enormes Grundwasservolumen, das für eine hohe Anzahl an Nutzungen, wie Brauchwasser, Trinkwasser und thermische Grundwassersysteme verwendet wird. Dies zeigt sich beispielsweise bei der thermischen Nutzung des Grundwassers. 2015 wurden in der Landeshauptstadt München mit fast 2.000 Anlagen rund 143 Mio. m<sup>3</sup> Grundwasser genutzt.

Zusätzlich stellt der tertiäre Untergrund in der Metropolregion München (Planungsregion 14), insbesondere die oberflächennahe Obere Süßwassermolasse, wichtige natürliche Ressourcen und Speichermöglichkeiten (Geopotenziale) zur Verfügung, die zum einen als notwendige Wasserressource für verschiedene Anwendungsbereiche dienen (Trinkwasserversorgung, Brauchwassergewinnung) und zum anderen für eine nachhaltige Energiebewirtschaftung, als Quelle der oberflächennahen Geothermie nutzbar gemacht werden könnten. Die optimale Nutzung dieser Geopotenziale erfordert jedoch die Betrachtung verschiedener Aspekte. So hängen zum Beispiel die Nutzung als Trinkwasser, oder auch die Einsatzmöglichkeiten und Dimensionierung von Erdwärmesondenanlagen, dem häufigsten Anlagentyp zur Erschließung der oberflächennahen Geothermie in Deutschland, sowie die Auslegung von Grundwasser-Wärmepumpenanlagen, maßgeblich von den jeweiligen geologischen und hydrogeologischen Standortverhältnissen, der hydrogeologischen Dynamik und ihren hydraulisch und auch thermisch nutzbaren Eigenschaften, sowie den wasserrechtlichen Rahmenbedingungen ab. Die geologisch-hydrogeologischen Bedingungen bestimmen aber auch die Eigenschaft des Untergrundes als wasserdurchlässiges Speichergestein und somit die Nutzbarkeit des Untergrundes als Trink- und Brauchwasserressource.

Eine ideale Bewirtschaftung der Geopotenziale im Untergrund, sowie eine detaillierte Beurteilung der wasserrechtlich relevanten Verhältnisse erfordert daher zum einen die flächendeckende Erhebung der geowissenschaftlichen Informationsgrundlagen, also insbesondere wasserwirtschaftlich relevanten Parameter, und zum anderen die detaillierte Erfassung und Abgrenzung der Geopotenziale in der Tiefe. Mit einer vertieften und detaillierten Kenntnis über die hydrogeologischen Verhältnisse kann das nutzbare Potenzial im Untergrund abgeschätzt, gegenseitige Beeinflussung verschiedener Nutzungen und gegebenenfalls ökologische Auswirkungen besser beurteilt und die Planung und Durchführung einer Bewirtschaftung der geologischen Potenziale optimiert werden.

Im Rahmen dieser Motivation wurden in den Jahren von 2012 bis 2015 und 2015 bis 2019 zwei Projekte durch das Bayerische STMUUV gefördert, die durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) koordiniert und durch den Lehrstuhl für Hydrogeologie der Technischen Universität München bearbeitet

wurden. Das erste Forschungsvorhaben „GEPO - Erstellung einer Datengrundlage für die Abschätzung des geothermischen Potenzials im oberflächennahen Untergrund des quartären Grundwasserleiters des Großraum Münchens“ hatte das Ziel, auf Basis der aktuellen Datengrundlage, eine flächendeckende Erarbeitung von hydrogeologischen und geothermischen Grundlagendaten für den oberflächennahen Untergrund, speziell dem quartären Grundwasserleiter, in der Münchner Schotterebene und speziell im Großraum München zu erarbeiten. Die Parametererhebung beinhaltete die detaillierte Bestimmung der Flächenverteilung der dynamischen, hydraulischen und thermischen Parameter und die Abschätzung der qualitativen und quantitativen Wechselwirkung zwischen verschiedenen Systemen.

Nach dem erfolgreichen Abschluss des GEPO-Projekts erfolgte mit dem Projekt „GeoPot - Parameterbestimmung für die Abschätzung der geologischen Nutzungspotenziale in der Planungsregion 14 und im tertiären Untergrund des Großraums München“ eine fachliche Vertiefung sowie eine räumliche Erweiterung der Bearbeitung in der Fläche und der Tiefe. Nach der Bearbeitung des quartären Hauptgrundwasserleiters der Münchner Schotterebene im GEPO Projekt, rückte im Nachfolgeprojekt GeoPot die Obere Süßwassermolasse in den Fokus. Neben einer detaillierten Recherche, Parametererhebung, Verarbeitung und Auswertung, wurde in diesem Projekt vor allem eine Implementierung der gewonnen und erhobenen Daten in ein 3D-Lithofaziesmodell durchgeführt, dass die Voraussetzung für die genaue Bestimmung der Abgrenzung von vorhandenen Grundwasserhorizonten und Geopotenzialen ist.

**Anmerkung:**

Die Abschlussberichte, Anlagen und digitalen Daten der Projekte GEPO (Quartär; Zosseder 2015) und GeoPot (Obere Süßwassermolasse; Zosseder 2019) sind über die Datenstelle des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) (Kapitel 7) zu beziehen. Diese Abschlussberichte enthalten zum Teil detailliertere Informationen zu den einzelnen Themengebieten, sowie zusätzliche Kapitel und Forschungsergebnisse, die in dieser Publikation nicht angesprochen werden. Die Texte der folgenden Kapitel stellen eine aktualisierte und überarbeitete Version der entsprechenden Kapitel der Abschlussberichte des Projekts GEPO (Zosseder, 2015) und GeoPot (Zosseder, 2019) dar. Auf ein wiederkehrendes Zitieren dieser Berichte wird daher verzichtet. Externe Quellenangaben, werden analog zu den Abschlussberichten, zitiert.

## 2 Arbeitsgebiet, Geografie und klimatische Bedingungen

Das Arbeitsgebiet der durchgeführten Projekte ist in Abb. 1 dargestellt. Im Zentrum steht das Stadtgebiet München, sowie die umliegenden Landkreise (Planungsregion 14). Im GEPO Projekt beschränkte sich das Arbeitsgebiet auf den Bereich der Münchner Schotterebene (MSE), das Hauptverbreitungsgebiet des quartären Schotterkörpers und des damit verbundenen quartären Hauptgrundwasserleiters, sowie Teile der Moränengebiete im Süden. Im GeoPot Projekt wurde das Arbeitsgebiet auf die umliegenden Regionen, wie z. B. das Tertiäre Hügelland im Norden und Westen, als auch die die Gebiete mit ausstreichender Oberen Süßwassermolasse (OSM) im Osten erweitert, um einen möglichst abgeschlossenen, hydrogeologisch zusammenhängenden Teilraum bearbeiten und einen Anschluss an bereits durch das Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) bearbeitete, umliegende Planungsregionen herstellen zu können.

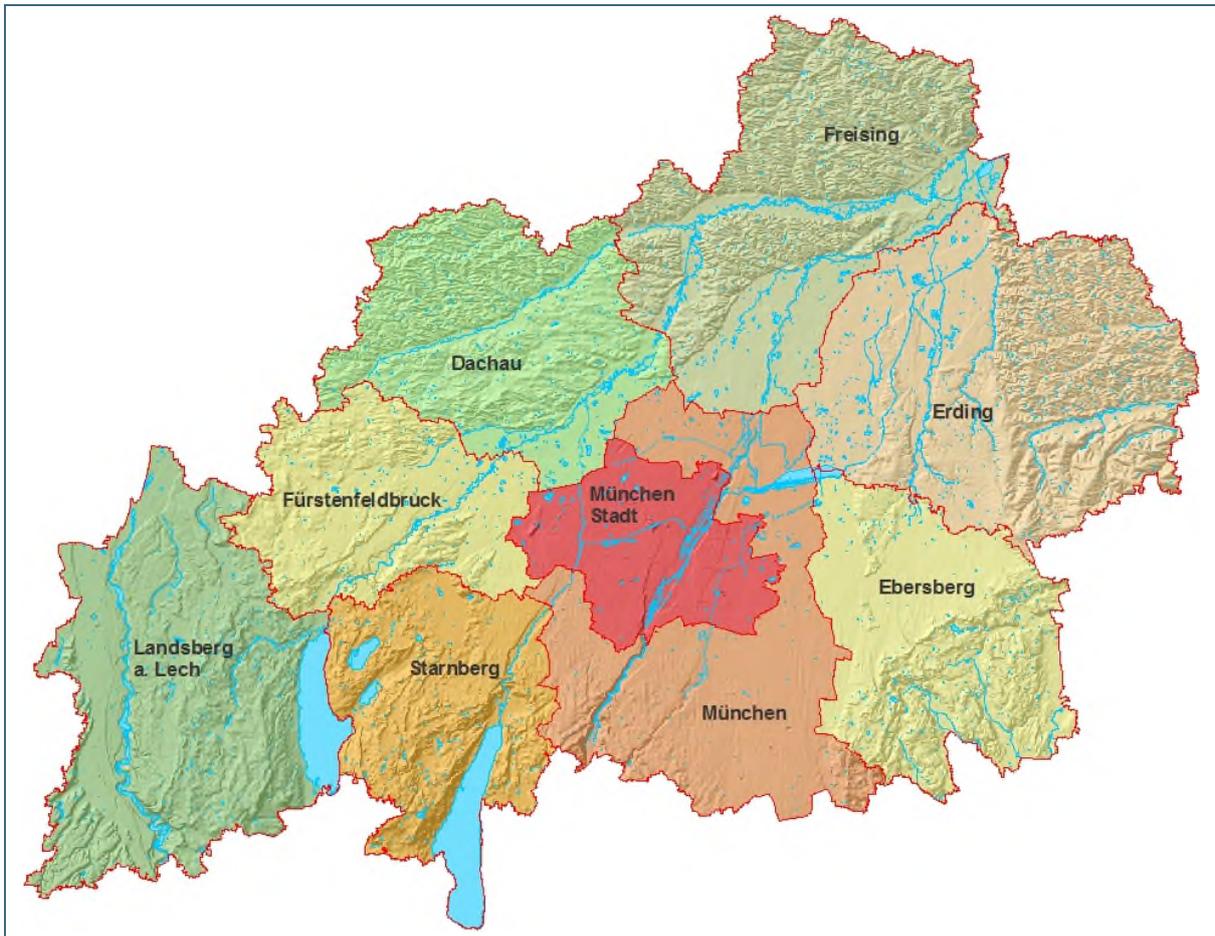


Abb. 1: Arbeitsgebiet der Projekte GEPO und GeoPot mit den enthaltenen Landkreisen und dem Stadtgebiet München (Zosseder 2019)

Die bayerische Landeshauptstadt München, sowie die umgebenden Landkreise liegen im Alpenvorland zwischen den Nördlichen Kalkalpen im Süden und der Donau im Norden. Der Großraum München liegt im Bereich des Molassebeckens, einem Senkungsbecken, dass seit Millionen von Jahren mit Ablagerungen der umliegenden Regionen, vor allem der Alpen, aufgefüllt wird. Im Tertiär bestanden die fluviatilen Ablagerungen hauptsächlich aus Sand- und Geröllmassen, die den Aufbau der projektrelevanten Oberen Süßwassermolasse bildeten. Die Eismassen der vor circa 10.000 Jahren endenden Würm-Eiszeit bildeten im Alpenbereich große Gletscher- und Schmelzwasserströme, deren Sand und Geröllfracht, die Münchner Schotterebene bildeten.

Das Arbeitsgebiet, die Münchner Schotterebene und das Tertiäre Hügelland, erstreckt sich in West – Ost – Richtung maximal auf circa 100 km, in Nord – Süd – Richtung maximal auf circa 75 km. Die Münchner Schotterebene wird im Süden durch die Endmoränenwälle, einem Relikt der letzten Eiszeit (Würm), begrenzt und bildet nach Norden hin eine schiefe, primär durch würmeiszeitlichen Schotter gebildete, Ebene aus, die sich durch einen Höhenunterschied von circa 300 m im Süden (Holzkirchen) nach Norden (Moosburg) definiert.

Die Münchner Schotterebene und das anschließende Tertiäre Hügelland wird von einer Vielzahl von kleineren und größeren Fließgewässern durchschnitten. Insbesondere die das Projektgebiet und die Stadt München von Süd nach Nord trennende Isar ist tief eingeschnitten. Im Westen des Arbeitsgebietes verläuft der Lech, nordwestlich anschließend Glonn, Amper und die Würm im Westen von München. Im Osten sind die Fließgewässer meist geringer ausgeprägt (z. B. Isen). Des Weiteren treten, vor allem in Bereichen mit einem Grundwasserspiegel nahe der Geländeoberkante (nördliche Schotterebene) ausgedehnte Niedermoore (Dachauer und Erdinger Moos) auf, wohingegen im Süden größere Waldgebiete (Perlacher Forst und Forstenrieder Park) dominieren. Neben den Fließgewässern liegen auch größere Oberflächengewässer, wie der Ammersee und Starnberger See, im Gebiet.

Die durchschnittliche Höhe des Stadtgebiet Münchens beträgt 519 m ü. NN. Die höchste Stelle liegt mit circa 580 m ü. NN südlich des Gutshofes Warnberg, der tiefste Punkt befindet sich am nördlichen Stadtrand im Stadtteil Feldmoching mit circa 480 m ü. NN.

Im Großraum München herrscht ein kühlgemäßigtes Klima, mit vergleichsweise kalten Wintern, selten jedoch mit Temperaturen unter  $-20\text{ °C}$ , und ebenfalls vergleichsweise warmen Sommern, mit Temperaturen von  $20$  bis  $35\text{ °C}$ . Wetterbestimmende Faktoren sind die Alpen und die Donau als regionale Wetterscheide. Die bislang höchste, offiziell vom Deutschen Wetterdienst gemessene Temperatur im Stadtgebiet München lag bei  $37,5\text{ °C}$  (27.07.1983). Die niedrigste Temperatur lag bei  $-31,6\text{ °C}$ , gemessen im Botanischen Garten München am 12.02.1929. Die Jahresmitteltemperaturen im Stadtgebiet nahmen von  $9,1\text{ °C}$  (Referenzzeitraum 1961–1990, Innenstadt) auf  $9,7\text{ °C}$  (Klimaperiode 1981–2010) zu (vgl. „München“ 2022).

### 3 Grundwasserverhältnisse des quartären Hauptgrundwasserleiters im Stadtgebiet München und der Münchner Schotterebene

#### 3.1 Geologische und hydrogeologische Beschreibung des Quartärs

In weiten Teilen der Münchner Schotterebene (MSE, Abb. 2) treten die in den ältesten zwei Eiszeiten abgelagerten Decken-, sowie rissesezeitliche Hochterrassenschotter auf. Würmeiszeitliche Niederterrassenschotter überdecken die älteren Ablagerungen. Zudem wurden weitere glaziale, fluvioglaziale und äolische Sedimente abgelagert (Schirm, 1968: 5). Die quartären Ablagerungen weisen Mächtigkeiten von bis zu 130 m auf (Gebhardt, 1968: 4). Die ältesten aufgeschlossenen Schichten sind Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse (OSM). Sie bilden generell die Unterlage der glazial überprägten Landschaft und bestehen zum größten Teil aus terrestrischen Mergeln. Der Einfluss von Gletschereis und Schmelzwasserströmen im Pleistozän, hatte ein stark ausgeprägtes Relief der Tertiäroberfläche zur Folge (Blasy, 1974: 3).

Der quartäre Schotter der Münchner Schotterebene nimmt von Süden nach Norden in der Mächtigkeit ab und grenzt im Norden an das Tertiäre Hügelland. Der Schotter beherbergt einen weitgehend homogenen Grundwasserkörper, den quartären Hauptgrundwasserleiter. Dieser bildet allgemein das „Obere Grundwasserstockwerk“ (Kapitel 3). Das darauffolgende „Untere Grundwasserstockwerk“ des Grundwassers in der Oberen Süßwassermolasse wird in Kapitel 4 erläutert.

Aufgebaut ist das „Obere Grundwasserstockwerk“ zumeist aus oberflächennahen, quartären Kies-schichten (Schotter) und Sanden, manchmal verzahnt mit lokal unterhalb der Schotter auftretenden tertiären Flinzsanden, ohne dass hier eine stauende Zwischenschicht auftritt. Diese werden in diesem Fall ebenfalls zum oberen Stockwerk gezählt werden. Neben den in verschiedene Terrassen und Stufen unterteilten Schotterkörper treten in den Flusstälern holozäne Ablagerungen, das Alluvium, auf (Abb. 3). Das Alluvium wurde bei der Erstellung des Grundwassergleichenplans (Kapitel 3.3) wie allgemein üblich dem quartären Hauptgrundwasserleiter zugerechnet, da stets eine hydraulische Interaktion anzunehmen ist. Das Alluvium hat je nach Ausprägung erheblichen Einfluss auf den lokalen Grundwasserspiegel. Die Wechselbeziehung zwischen Grund- und Isarwasser ist erwähnenswert, da sich die Isar nördlich der Münchner Innenstadt noch nicht in die tertiären Schichten eingetieft hat und somit Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter infiltrieren kann. Weiter südlich hingegen fungiert die Isar als Vorfluter.

Im quartären Hauptgrundwasserleiter treten vornehmlich freie Grundwasserverhältnisse auf. Lokal können diese, meist durch geologische Gegebenheiten beeinflusst werden („deckende Mergel“, Moränengebiete, bindige Deckschichten) und lokal gespannte Grundwasserverhältnisse verursachen. Artesische Verhältnisse können im quartären Grundwasserleiter nur äußerst selten nachgewiesen werden (Dohr & Gruban, 1999; Gebhardt, 1986; Blasy, 1974; Schirm, 1968).

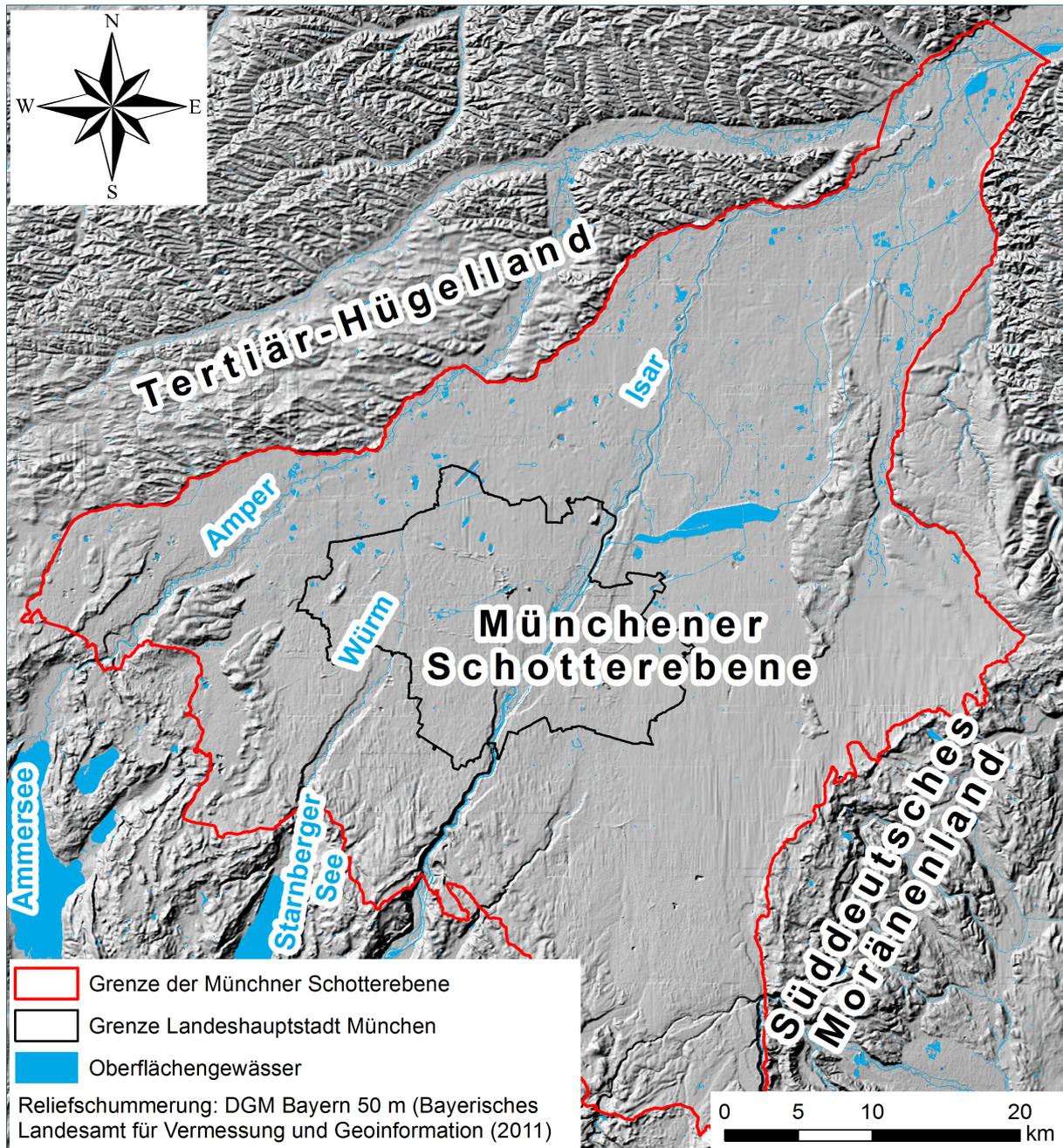


Abb. 2: Übersicht über die Münchener Schotterebene (MSE) (Albarrán-Ordás A., Zosseder, K. 2020)

Lokal existieren Zonen, in denen der obere Grundwasserhorizont, aufgrund von Grundwasseroberflächenschwankungen, trockenfällt und somit zeitweise kein Grundwasser führt. Zusätzlich gibt es lokal auftretende Tertiärhochflächen. An diesen Stellen ist kein quartärer Schotter vorhanden und damit auch kein quartärer Grundwasserleiter ausgebildet. Ebenfalls treten großflächige Bereiche auf, bei denen ein stauender Horizont an der Quartärbasis fehlt (Tone und Schluffe der „Oberen Süßwassermolasse“), die hydraulische Kurzschlüsse zwischen dem oberen und unteren Grundwasserstockwerk ermöglichen (Kapitel 3.2 Quartärbasis).

Diese Möglichkeit der natürlichen hydraulischen Wechselwirkung kann vor allem dort vorkommen, wo sich das Quartär rinnenartig in die Obere Süßwassermolassen eingetieft hat und mächtige tertiäre Sande angeschnitten wurden (Dohr & Gruban, 1999; Gebhardt, 1986; Blasy, 1974; Schirm, 1968). Auf die Interaktion der Grundwasserkörper wird in Kapitel 4.2.4 detailliert eingegangen.

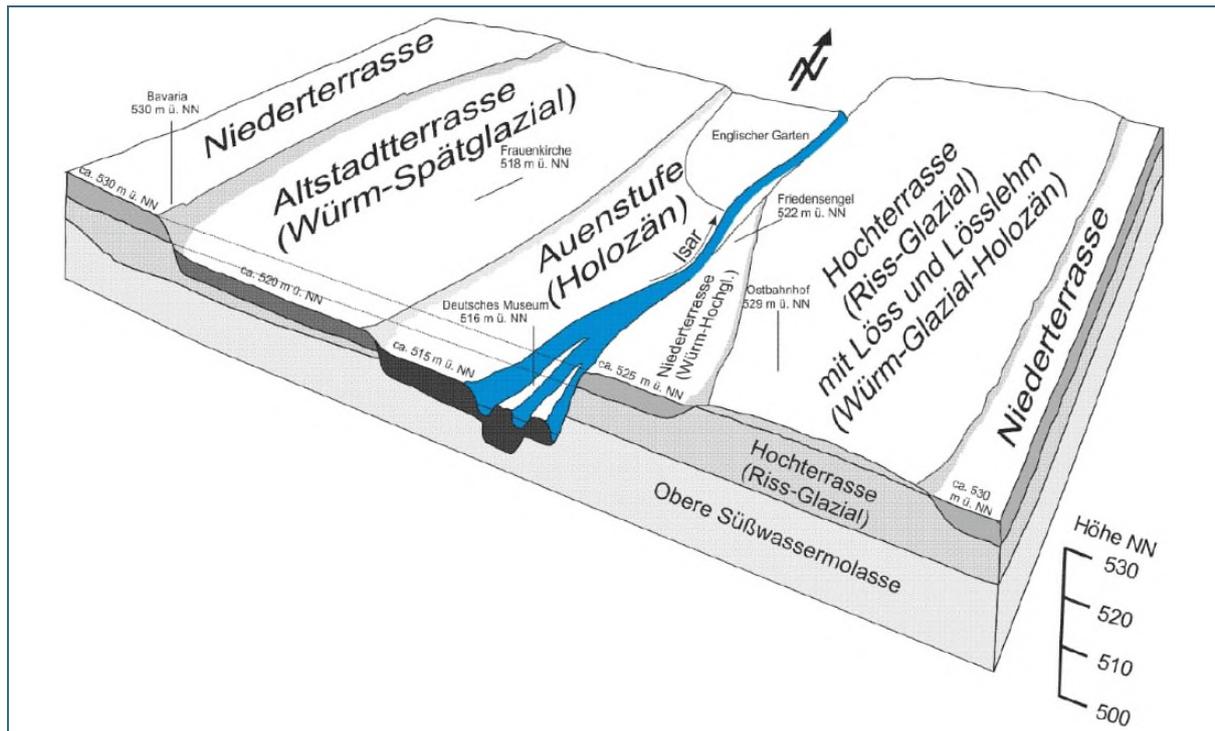


Abb. 3: Schematisches Blockbild der Ablagerungsverhältnisse im Stadtgebiet München (verändert nach Münichsdorfer 1922)

Die **Flurabstände** schwanken, je nach geologischen Gegebenheiten, von mehreren 10er Metern im südlichen, bis zum Teil nur wenigen Zentimetern im nördlichen Arbeitsgebiet. Im Stadtgebiet München fluktuieren die Flurabstände zwischen  $> 20$  m im Süden und  $< 2$  m im Norden. Die Grundwassermächtigkeit hängt ebenfalls, wie oben auch bereits angedeutet, von lokalen Gegebenheiten ab und schwankt zwischen wenigen Zentimetern und mehreren 10er Metern. Weitere Informationen zur Grundwassermächtigkeit und den Flurabständen im quartären Hauptgrundwasserleiter sind in Kapitel 3.4 und 3.5 zu finden.

Das durchschnittliche **hydraulische Gefälle** der Grundwasseroberfläche ist mit circa 2 bis 3 ‰ etwas geringer als das der Geländeoberfläche der Münchner Schotterebene (circa 5 ‰). In Hangbereichen, z. B. im Bereich der Isar, kann das Gefälle jedoch Werte von bis zu 10 ‰ erreichen. Durch den Gefälleunterschied kommt es im nördlichen Bereich der Münchner Schotterebene zu freien Grundwasseraustritten und Vernässungszonen. Moorböden und Abscheidungen von Almkalk, Seekreide und Wiesenkalk im Bereich des Erdinger und Freisinger Moores verdeutlichen dies (Dohr & Gruban, 1999; Gebhardt, 1986; Blasy, 1974; Schirm, 1968).

Die **Hauptfließrichtung** des Grundwassers im quartären Hauptgrundwasserleiter verläuft westlich der Isar generell von Südwest nach Nordost und östlich der Isar von Südost nach Nordwest. Als Hauptvorfluter fungiert die Isar. Ausgeprägte Rinnensysteme in der Oberfläche der Tertiäroberkante (Kapitel 3.2.3) stellen bevorzugte Abflussrichtungen des Grundwassers dar, weisen meist erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten auf und können den generellen Verlauf der Fließrichtung deutlich beeinflussen. Im Bereich der Hoch- und Niederterrassen liegen weitgehend gleichmäßige Strömungsverhältnisse vor. Ausnahmen bilden hier die markanten Hang- und Terrassenkanten, die die Grundwasserströmung deutlich in Richtung Isar ablenken und lokal sehr hohe hydraulische Gradienten und hohe Fließgeschwindigkeiten erzeugen. Dort treten auch Hangquellen auf. Neben der Isar gibt es im Bereich der Schotterebene weitere kleinere Vorfluter, wie die Amper und Würm im Westen und die Bäche Dorfen und Sempt im Osten. Außerdem ist vor allem der nördliche Teil der MSE, in Bereichen der (ehemali-

gen) ausgedehnten Moorgebiete, durchzogen von anthropogenen Entwässerungskanälen und Abfanggräben. Der Bereich um den Flughafen Franz-Joseph-Strauß bei Freising wird großräumig entwässert und ist kanalisiert (Dohr & Gruban, 1999; Gebhardt, 1986; Blasy, 1974; Schirm, 1968).

Die **hydraulischen Durchlässigkeiten** (Kapitel 3.7) im quartären Schotterkörper sind je nach Feinkornanteil überwiegend als sehr stark bis stark durchlässig einzustufen ( $10^{-2}$  bis  $10^{-4}$  m/s) Aufgrund des sedimentären Gefüges der Schotter sind sie in horizontaler Richtung größer als in vertikaler. Bei entsprechenden Bedingungen, beispielsweise hoher hydraulischer Durchlässigkeit und starkem hydraulischen Gefälle, können die Grundwasserfließgeschwindigkeiten bis zu 20 m pro Tag und mehr betragen. Durchschnittlich rechnet man aber mit 5 bis 10 Metern pro Tag. Als mittlere Abflussmengen für das Grundwasser werden Werte von 6 m<sup>3</sup>/s für östlich der Isar, 4,3 m<sup>3</sup>/s für westlich der Isar und 14 m<sup>3</sup>/s für die gesamte Münchner Schotterebene angegeben (Dohr & Gruban, 1999; Gebhardt, 1986; Blasy, 1974; Schirm, 1968).

Die petrographische Zusammensetzung des Lockergesteins besteht hauptsächlich aus Karbonatgeröll. Daher ist das Wasser des quartären Grundwasserleiters sehr hart und hat eine durchschnittliche elektrische Leitfähigkeit von rund 700 µS/cm.

Grundwasserentnahmen, sowie temporäre oder permanente Wasserhaltungsmaßnahmen und Versickerungen können die Grundwasserverhältnisse durch Ausbildung von Absenktrichtern und Aufstaukegeln markant beeinflussen, was in einem urbanen Gebieten lokal stets der Fall ist. Eine stetige Beeinträchtigung des Grundwasserstroms stellt lokal der Verlauf der Tunneltrassen der Münchner U-Bahn dar und sollte stets beachtet werden. In vielen Fällen, z. B. bei U-Bahntunneln oder auch Tiefgaragen etc., wird diese Beeinträchtigung durch Düker-Bauwerke ausgeglichen. Lokal zeigen sich dennoch Abweichungen von den natürlichen Grundwasserfließverhältnissen. Zudem wird auf das anthropogen beeinflusste Potential der Isar hingewiesen, dass durch zahlreiche Aufstauungen, Wehre und kanalisierte Bereiche beeinflusst ist, und sich vor allem im Stadtgebiet zum Teil nicht mit dem natürlichen Grundwasserstand im Grundwasserleiter korrelieren lässt (Dohr & Gruban, 1999; Gebhardt, 1986; Blasy, 1974; Schirm, 1968).

## 3.2 Basis des quartären Grundwasserleiters

### 3.2.1 Überblick und bisheriger Kenntnisstand

Die Quartärbasis war als Basisfläche des „Oberen Grundwasserstockwerks“ der Münchner Schotterebene im Laufe der vergangenen Jahrzehnte Gegenstand von Regionalstudien, Gutachten und Berichten (siehe Tab. 1), die sich z. B. mit der Ermittlung von Grundwasserschutzgebieten oder der Erstellung von hydrogeologischen Teilmodellen beschäftigten. Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten sind diese oftmals, leider unveröffentlichten, Referenzstudien und Gutachten recherchiert und bei der Interpretation der Basis des quartären Grundwasserleiters mitberücksichtigt. Bei diesen Studien handelt es sich zum Teil um Promotionsschriften (z. B. Schirm 1968), jedoch wurden sie meist für praktische Anwendungen erstellt, z. B. großflächige Grundwassermodelle oder die Ausweisung von Wasserschutzgebiete. Tab. 1 fasst die wichtigsten Studien zusammen. Die räumlichen Informationen über die Basis des quartären Grundwasserleiters in der Münchner Schotterebene (MSE) aus diesen Studien wurden im Rahmen der vorliegenden Bearbeitung digitalisiert und für eine Plausibilitätsprüfung oder als ergänzende Information verwendet.

Tab. 1: Chronologische Zusammenfassung der bisherigen Arbeiten über die quartäre Grundwasserbasis der MSE

<b>Autor &amp; Jahr</b>	<b>Arbeitsbereich</b>	<b>Art</b>	<b>Datengrundlage</b>	<b>Merkmale</b>
Tillmann 1953	Speichersee und Abfanggraben - München Nord	Regionalstudie	Nicht spezifiziert	- Abstand der Isolinien: 1 m - Maßstab: 1:50.000
Schirm 1968	MSE östl. der Isar	Regionalstudie	circa 400 Bohrungen für Grundwassernutzung circa 1.650 seismische Schußpunkte	- Abstand der Isolinien: 5 m und 10 m - Maßstab: 1:50.000
Blasy 1974	MSE westl. der Isar	Regionalstudie	Tertiärhöhenangaben aus Bohrprofilen	- Abstand der Isolinien: 10 m - 5 Stufen der Zuverlässigkeit der Höhenangaben
Frank 1979	Raum Bad Tölz-Holzkirchen	Regionalstudie	Nicht spezifizierte Anzahl von Geophysik-Messungen und Bohrungen	- Abstand der Isolinien: zwischen 10 und 50 m
Bader 1985	Raum Bad Tölz – Holzkirchen - Sauerlach	Regionalstudie	Ergänzung von Schirm 1968 und Frank 1979 durch circa 40 refraktionsseismische Messungen und circa 150 geoelektrische Tiefensondierungen	- Abstand der Isolinien: 5 m und 10 m
Hafen 1988	Raum Mangfall Valley-Tal	Gutachten (unveröffentlicht)	Nicht spezifiziert	- Abstand der Isolinien: 5 m
BGU - Dr. Schott & Partner 1997	Königswiesen	Gutachten (unveröffentlicht)	Nicht spezifizierte Anzahl von Aufschlussbohrungen, geophysikalische Messungen	- Abstand der Isolinien: 5 m - Maßstab: 1:25.000
Kunz 1998	Raum Türkenfeld-Fürstenfeldbruck	Regionalstudie	Circa 1.000 Bohrungen und einige Dutzend Ausbisse der Molasse	- Abstand der Isolinien: 10 m - Maßstab: 1:50.000
Dr. Blasy - Dr. Øverland 2007	Flughafen München	Gutachten (unveröffentlicht)	Die in einem weiteren Bericht im Jahr 2004 konstruierte Tertiäroberkante wurde mit 46 neuen Aufschlussbohrungen der Bohrkampagne 2006/2007 aktualisiert (davon erreichen 39 die Tertiäroberkante)	- Abstand der Isolinien: 1 m - Maßstab: 1:25.000
BGU - Dr. Schott & Partner 2007	Hanfeld, Lkr. Starnberg	Gutachten (unveröffentlicht)	Unbekannt	- Abstand der Isolinien: 5 m - Maßstab: 1:10.000
IGwU 2007	Gde. Hohenbrunn	Gutachten (unveröffentlicht)	Nach Schirm (1968) unter Berücksichtigung der neueren Bohrergebnisse	- Abstand der Isolinien: 5 m - Maßstab: 1:50.000

Autor & Jahr	Arbeitsbereich	Art	Datengrundlage	Merkmale
Dr. Blasy & Dr. Øverland 2008	Raum A99 Südumfahrung München	Gutachten (unveröffentlicht)	Nicht spezifizierte Anzahl von Bohrungen	- Abstand der Isolinien: 10 m - Maßstab: 1:25.000
BGU - Dr. Schott & Dr. Straub 2008	Gilching-Oberpfaffenhofen (München)	Gutachten (unveröffentlicht)	Unbekannt	- Keine Isolinien, Darstellung v. Hochlagen - Maßstab: 1:25.000
BfU 2009	Haidhausen – Giesing (München)	Gutachten (unveröffentlicht)	Unbekannt	- Abstand der Isolinien: < 1 m - Maßstab: 1:1.000
GHB 2011	Hirschgarten (München)	Gutachten (unveröffentlicht)	Unbekannt	- Keine Isolinien, Darstellung der Rinnenstruktur - Maßstab: 1:25.000
HydroConsult 2011	Gde. Wörth	Gutachten (unveröffentlicht)	28 Angaben zur Tertiäroberkante	- Abstand der Isolinien: 1 m - Maßstab: 1:20.000
Prösl 2011	Amtsbereich des Wasserwirtschaftsamts München	Gutachten (unveröffentlicht)	Nicht spezifizierte Anzahl von Bohrungen aus dem Bayerischen Bodeninformationssystem und der bayerischen wasserwirtschaftlichen Datenbank (INFO-Was)	- Abstand der Isolinien: 10 m - Maßstab: 1:100.000

### 3.2.2 Stand der Technik und Methodik der Flächeninterpolation

Durch eine markante Erhöhung der Digitalisierung von Bohrprofilen für das Bodeninformationssystem Bayern (BIS-BY) des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) stand eine aktualisierte und wesentlich umfangreichere Datenbasis für die Konstruktion der Basisfläche zur Verfügung. Die Datenbasis wurde durch die Projekte GEPO und GeoPot (Zosseder et al. 2015, 2019) deutlich erweitert sowie qualitätskontrolliert. Diese hohe Anzahl an Bohrdaten ermöglichten es, räumliche Korrelationslängen der Basisfläche zu ermitteln, einen höheren Detaillierungsgrad in der Modellierung des Reliefs der Quartärbasis zu erreichen und praktikable Unsicherheitskonzepte mit zu integrieren. Die Darstellung der Unsicherheiten in der Schätzung der Höhe der Quartärbasis, kann die Entscheidungen bei praktischen lokalen Fragestellungen unterstützen (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020).

Auf Grundlage der verfügbaren Massenbohrdaten im Untersuchungsgebiet wurde ein Konzept zur geostatistischen Modellierung der Quartärbasis erstellt, das die Einbeziehung aller verfügbaren Informationen zur Schichtfläche gewährleistet, eine Plausibilitätskontrolle erlaubt, räumliche Strukturanalysen in Abhängigkeit der Punktdichte integriert und Unsicherheitsanalysen beinhaltet. Ziel des Konzeptes war es, die geomorphometrische Analyse, also die Interpretation von Hochlagen und Senken des Reliefs der Quartärbasis, möglichst detailliert zu erfassen. Abb. 4 zeigt schematisch die Arbeitsabläufe für die durchgeführte geostatistische Analyse. Die detaillierte Methodik zur Modellierung des Reliefs und der Erstellung des geostatistischen Modells, der Prüfung der Plausibilität und Qualitätskontrolle sowie der Ableitung der Unsicherheitsanalyse ist in Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. (2020) ausführlich beschrieben.

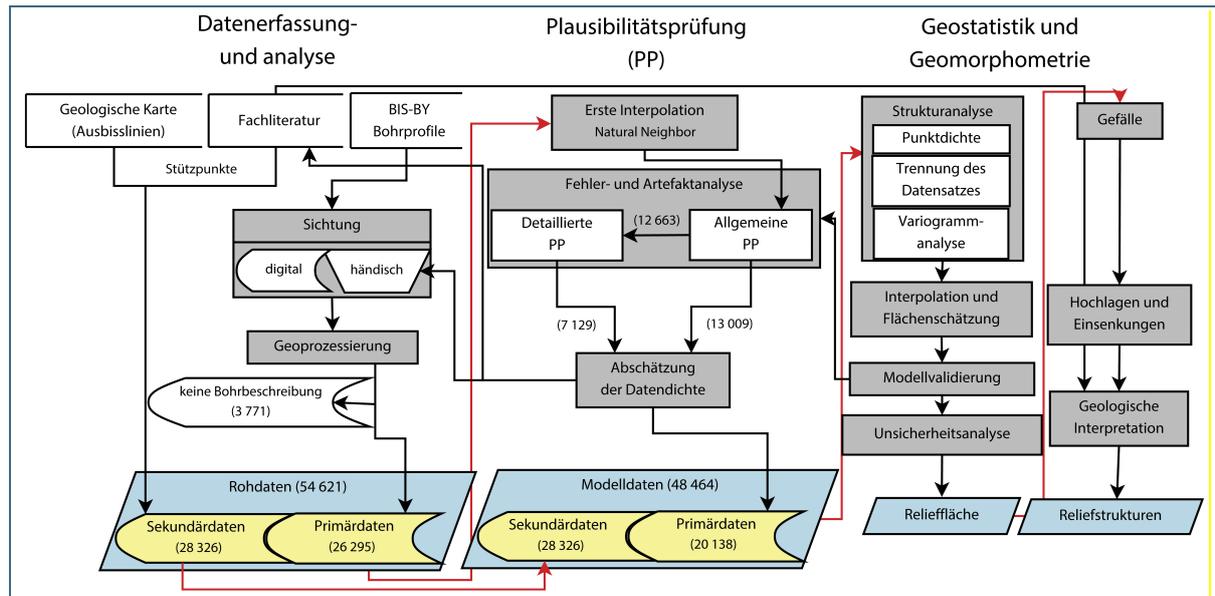


Abb. 4: Methodik der Reliefmodellierung und -analyse durch geostatistische Verfahren (BIS-BY = Bodeninformati-onssystem Bayern; Natural Neighbour = Interpolationsmethode) (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020)

### 3.2.3 Ergebnisse und Interpretation der Basis des quartären Grundwasserleiters

#### Reliefstrukturen aus dem geostatistischen Modell

Zur Darstellung und Beschreibung der aus dem geostatistischen Modell geschätzten Topographie der Quartärbasis der Münchner Schotterebene, wurde ein geomorphometrischer Ansatz umgesetzt (Pike et al. 2008). Die Basis des quartären Grundwasserleiters wurde im höchstmöglichen Detaillierungsgrad, nach derzeitiger Datenlage und Kenntnisstand, erfasst und die daraus abgeleiteten Reliefparameter (Gefälle) und Geländemerkmale (Hochlagen und Einsenkungen) diskutiert. Die Ergebnisse werden in verschiedenen Darstellungen als Höhenlinienkarte der Basis des quartären Grundwasserleiters für die gesamte Münchner Schotterebene und für die Stadt München (Abb. 5), sowie der dazugehörigen Unsicherheitskarte der Interpolation (Abb. 7), zusammenfassend dargestellt (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020).

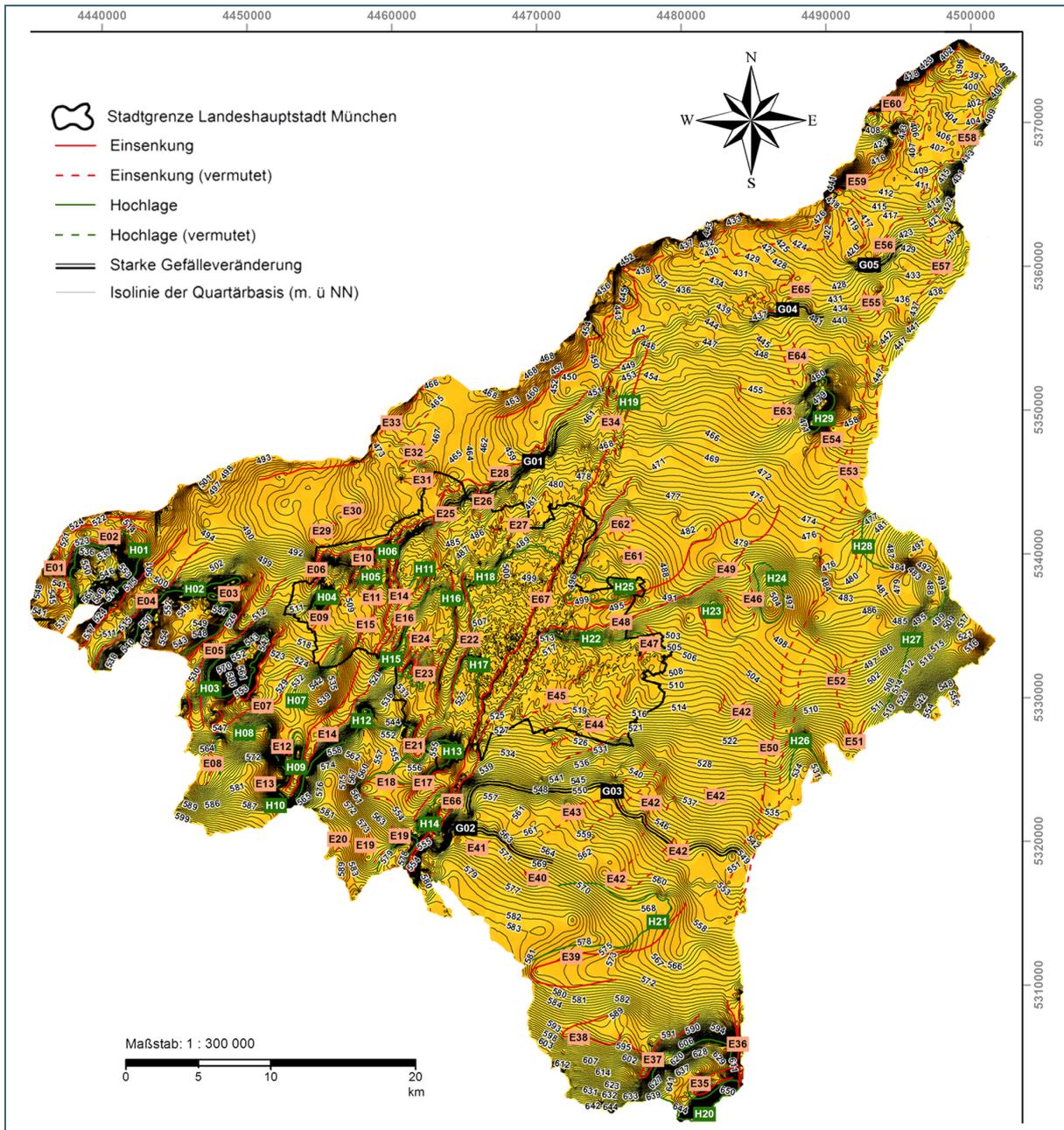


Abb. 5: Höhenlinienkarte (MSE und Stadtgebiet München) (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020)

Die verfügbare hohe Anzahl an Bohrdaten ermöglicht es, das Relief von Schichtflächen, wie beispielsweise die Basis des quartären Grundwasserleiters der Münchner Schotterebene, großflächig und detailliert zu erfassen. In Kombination mit einem erstellten Workflow konnte die Reliefoberfläche durch die Berücksichtigung einer getrennten geostatistischen Auswertung in Gebieten unterschiedlicher Datendichte detailliert modelliert und bisher noch nicht bekannte Reliefstrukturen, sowie großräumige Zusammenhänge einzelner Reliefelemente herausgearbeitet werden. Ergebnis ist ein deutlich heterogenes Relief mit Rinnenstrukturen und Hochflächen eines ehemaligen Abflussregimes (Abb. 6) (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020).

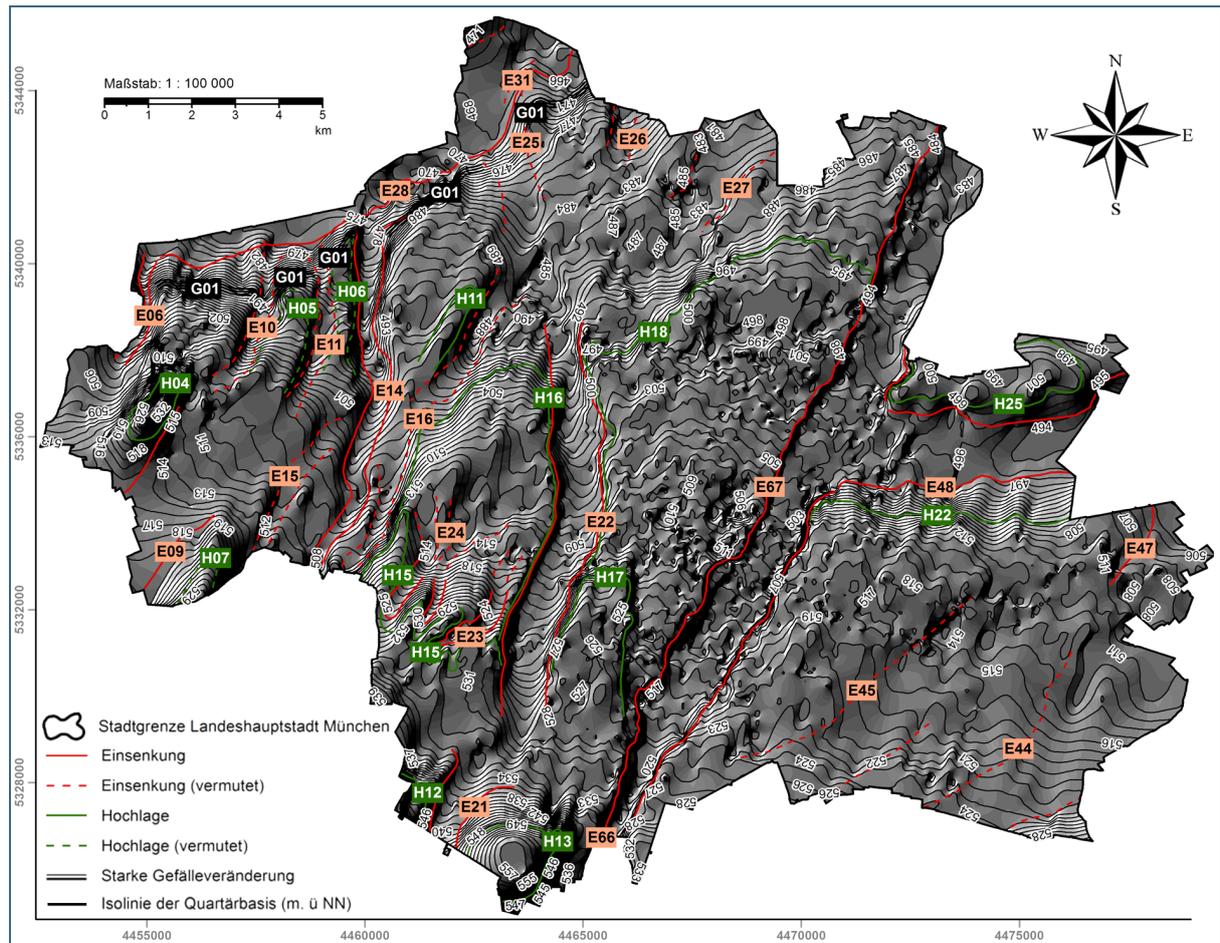


Abb. 6: Reliefkarte (MSE und Stadtgebiet München) (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020)

Durch die Darstellung der räumlichen Aussagekraft der geostatistischen Modellierung, welche durch die Bohrdatendichte und die räumlichen Korrelation der Daten bedingt ist, können Unsicherheiten in der Interpretation der Reliefstrukturen miteinbezogen werden. Diese kann bei der praxisnahen Nutzung, wie für die Abschätzung von Teufen für Bohrungen oder als Grenzfläche in numerischen Grundwassermodellen, berücksichtigt werden (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020).

Das Relief der modellierten Höhe der Quartärbasis ist im Bereich der Münchner Schotterebene (2250 km<sup>2</sup>) mit Isohypsen im ein Meter Abstand, zwischen 394 m ü. NN im Norden und 711 m ü. NN im Süden, dargestellt, was ein mittleres Gefälle von circa 4 ‰ ergibt. Es konnten im Modell 96 Reliefformen identifiziert werden, die in Hochlagen (H) und Einsenkungen (E) eingeteilt sind. Die Hochlagen untergliedern sich in kleinräumige, inselartige Erhebungen, langgestreckte Höhenrücken sowie breite Mittel- und Hochflächen. Die Einsenkungen liegen in Form von Rinnen, kleinräumigen oder kolkartigen Einsenkungen, Buchtenstrukturen, leicht ausgeprägten Eintiefungen und breiten Tiefenzonen vor. Ebenso wurden fünf Gebiete mit einer markanten Gefälleänderung auf kurzer Distanz identifiziert. Die Karte der Unsicherheit (Abb. 7) zeigt die räumliche Verteilung der Standardabweichung im ein Meter Abstand im inneren, und im zwei Meter Abstand im äußeren Interpolationsgebiet. Dieser Parameter wird als Maß für die Güte der Schätzung der Quartärbasis in Abhängigkeit der Dichte und räumlichen Varianz der Modelleingangsdaten betrachtet. Die Kombination der räumlichen Unsicherheit mit dem geschätzten Relief der Quartärbasis ermöglicht es, die verschiedenen Reliefelemente in Hinblick ihrer Aussagegüte zu beurteilen. Das Unsicherheitskonzept gilt somit als Hinweis der Gültigkeitsgrenzen der Schätzung des Reliefs (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020).

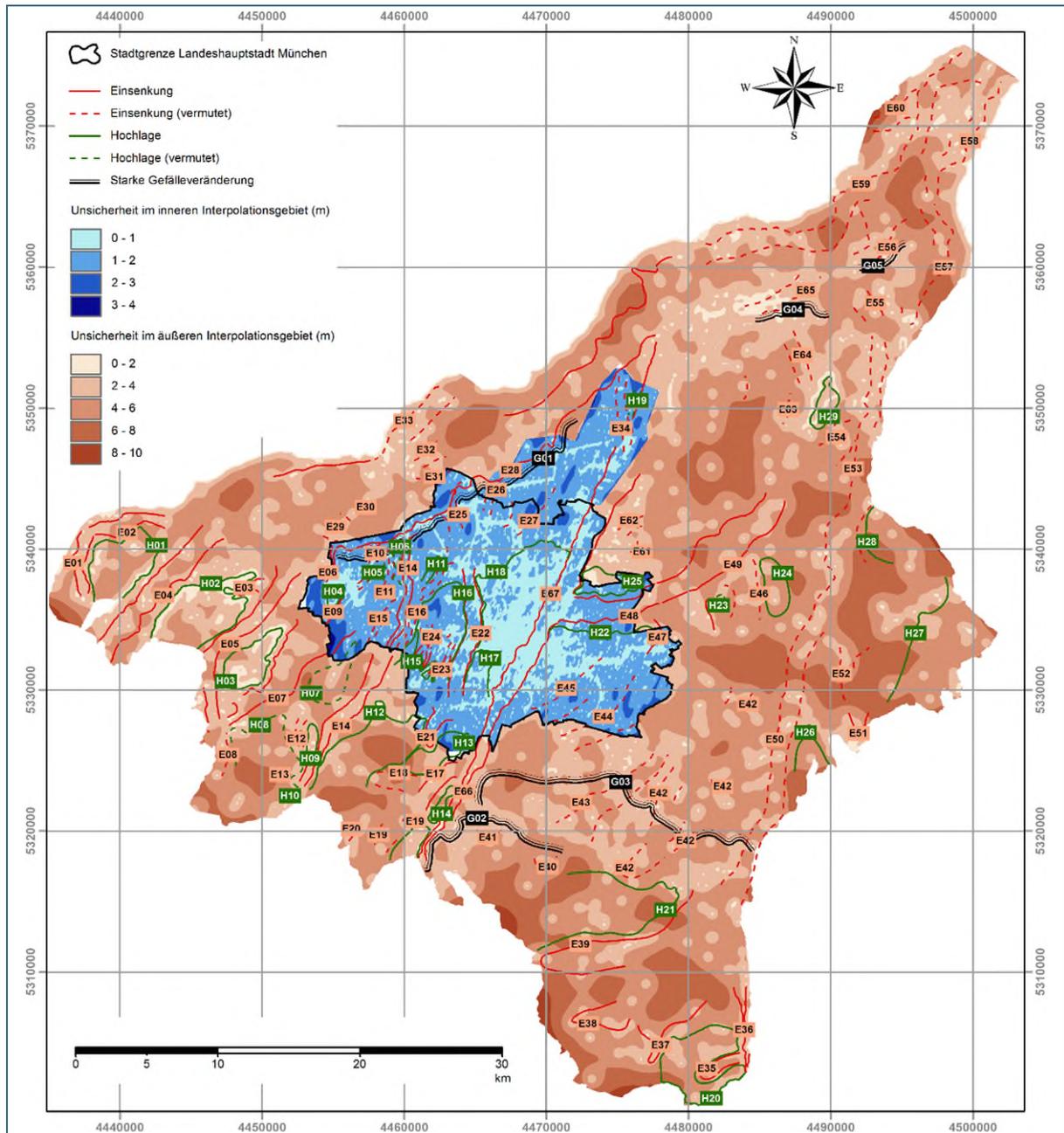


Abb. 7: Karte der Unsicherheiten im inneren und äußeren Interpolationsgebiet der Münchner Schotterebene (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020)

Wie aus Abb. 7 zu ersehen ist, schwankt im inneren Interpolationsgebiet die Standardabweichung zwischen 0 m und maximal 4 m, wobei eine Abweichung unter 2 m deutlich überwiegt. Dieses gute Ergebnis ist vor allem auf die höhere Bohrdatendichte zurückzuführen. Nur in sehr begrenzten Bereichen werden Werte bis 3 m erreicht. Werte über 3 m befinden sich lokal sehr begrenzt nur am Rande des inneren Gebiets.

Im Falle des äußeren Gebiets wird ersichtlich, dass die Unsicherheiten in manchen Bereichen wesentlich höher als im inneren Interpolationsgebiet sind. Daher wird die Standardabweichung auch in zwei Meter Schritte unterteilt, wobei die Werte zwischen 0 m und 9,5 m liegen. Wie auch im inneren, finden sich die hohen Abweichungen des äußeren Gebiets vor allem an den Randbereichen. Die Gesamtfläche weist im Mittel eine Unsicherheit kleiner 6 m auf. Die erhöhte Unsicherheit ist durch eine geringere Datendichte begründet.

### 3.2.3.1 Zusammenfassende Beschreibung und Interpretation der Basis des quartären Grundwasserleiters

Die allgemeine Interpretation und Diskussion der Ergebnisse der Grundwasserleiterbasis erfolgt getrennt für die Gebiete westlich und östlich der Isar, aufgrund der signifikanten Unterschiede der Geomorphologie. Generell ist die Morphologie im westlichen Teil der Münchner Schotterebene markanter ausgeprägt als im Ostteil. Es erfolgte für den **westlichen Teil** eine Untergliederung in **drei Bereiche mit einer Auswahl identifizierter Strukturen**:

**Altmoränenbereich:** Im Bereich der Altmoränen wechseln sich Rinnenstrukturen (E01, E04, E05, E07, E14, E66) mit markanten Hochflächen (H01, H02, H03, H07, H08, H12, H14) ab. Die rinnenförmigen Strukturen verlaufen vorwiegend in SW-NE-Richtung. Viele dieser hier modellierten Reliefelemente wurden bereits in Literaturquellen beschrieben, konnten jedoch in der großflächigen Modellierung detaillierter dargestellt werden. Als Auswahl bekannter Strukturen wären zum Beispiel die Ampertalrinne (E04; Grottenthaler 1980), die Würmtal-Rinne (E14; Blasy 1974) oder die Pullacher Rinne (E17; Blasy 1974 und Jerz 1987) zu nennen. Neben bekannten Rinnenstrukturen zeigen sich auch tertiäre Erhebungen, wie die Buchendorfer Hochfläche (H12; Blasy 1974 und Jerz 1987) oder der Höhenrücken bei Baierbrunn (H14; Blasy 1974 und Jerz 1987) (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020).

**Stadtgebiet München / Altstadtbereich:** 36 markante Reliefstrukturen wurden im Bereich der Stadt München identifiziert und auf Basis ihrer Ausrichtung, Fortsetzung im Umland und Ausprägung in Teilbereiche untergliedert. Im Bereich zwischen dem Höhenrücken der Aubinger Lohe (H04) und der Würmtal-Rinne (E14) verlaufen die Strukturen vorwiegend in NNE-SSW-Richtung zur nordwestlich gelegenen Tiefenzone. Im Bereich zwischen Würmtal-Rinne (E14) und Altstadtbereich sind die Reliefelemente meist NNE-SSW ausgerichtet, biegen jedoch zum Teil in Richtung SSO-NNW zur NW-Tiefenzone ab. Das Reliefelement der Waldfriedhof-Neuhausener Rinne (E22) kann als Fortsetzung der Neuforstenrieder Rinne (E21) im Süden interpretiert werden. Begrenzung besteht durch die tertiären Hochlagen bei Neuhadern (H15), den Baierbrunner Höhenrücken (H14), die Untersendlinger Hochfläche (H17) und die Altstadt-Mittelhochfläche (H18). Evtl. Vereinigung mit der Pasinger-Obermenzinger Rinne (E16) und, nach Verlauf durch die Eintiefung des Feldmochinger Sees (E24), Einmündung in die nordwestliche Tiefenzone. Markante Höhenunterschiede (bis zu 10 m) an den Rinnenseiten, sowie eine Gesamterstreckung von circa 10 km. Die Ausdehnung der Würmtal-Rinne (E14) stellt sich, vor allem im südwestlichen Teil, deutlich komplexer dar als angenommen. Im SW-Teil besteht eine Aufteilung in drei Arme, wobei der mittleren den tatsächlichen, aktuellen N-S Verlauf, parallel der E22, der Würm widerspiegelt (Albarrán-Ordás 2019). Die Altstadt-Mittelhochfläche (H18) erstreckt sich zwischen der Isartal-Rinne (E67) im Osten und der Waldfriedhofer-Neuhausener Rinne (E22) im Westen. An der Nordgrenze tritt ein starker Gefälleanstieg auf. Lokal im Süden können, zumindest bei Mittelwasserständen, aufragende tertiäre Mergel und Sande grundwasserfreie Bereiche verursachen und hängen wohl großräumig mit der Untersendlinger Hochfläche (H17) zusammen (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020).

**Nordwestliche Tiefenzone (E28):** Durch die aktuelle Modellierung konnte erstmalig das hydrogeologisch bedeutende Gefälle der Quartärbasis im Nordteil des Stadtgebietes (G01), welches die südöstliche Flanke einer stark ausgeprägten WSW gerichtete Tiefenzone (E28) darstellt, herausgearbeitet werden. Die nördliche Grenze dieser Tiefenzone stellt das Tertiäre Hügelland dar. Am Südrand münden u.a. die Mammendorf-Maisacher Rinne (E02) und Ampertal Rinne (E04) in die Tiefenzone, welche sich am nordöstlichen Ende vermutlich mit der Isartal-Rinne (E67) vereinigt. Durch das deutlich tieferliegende Relief markiert diese Tiefenzone hydraulisch einen Bereich mit allgemein hoher Grundwassermächtigkeit (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020).

**Östlich der Isar:** Hier ist das Relief der Quartärbasis generell weniger heterogen ausgeprägt, die Rinnenverläufe folgen meist der WSW-ENE- und NS-Richtung. Markant sind die steilen Änderungen des

tertiären Gefälles (G02 bis G05 und bei H22). Durch die großräumige Modellierung konnten bekannte Strukturen durch neue Erkenntnisse zu einem Reliefsystem verbunden werden.

Die tertiäre Hochfläche H22 (südl. Linie Altbogenhausen-Riem) und H24 wurde bereits von Schirm (1968) beschrieben, der eine Verbindung mit H29 annahm. Durch die Modellierung lässt sich eine Verbindung mit H22 und H23 herstellen, so dass ein zusammenhängender Höhenrücken, jedoch aufgrund der hohen Unsicherheit ohne gesicherte Aussage, entsteht.

Die Rinne E50 wird im NE durch das Hoch H28 (Blasy & Mader, 2007; Hydroconsult, 2011) begrenzt. Es besteht eine Fortführung nach Norden in die Sempptal-Rinne (E57, E58), so dass diese Struktur größer ist als bislang angenommen (vgl. Hydroconsult, 2011). Es ist außerdem wahrscheinlich, dass sich am Nordende der MSE die Sempptal-Rinne (E57, E58) mit der Isartal-Rinne (E67) vereinigt. Östlich der Isartal-Rinne (E67) versteilt sich das Relief der Tertiäroberoberfläche deutlich (wenige Meter bis Zehnermeter) und fällt nach N bzw. NW ab (G02-G05). Ein Beispiel dafür bietet G04 im Raum des Flughafens (vgl. Dr. Blasy - Dr. Øverland 2007). Im zentralen Bereich bestätigt sich die Abtrennung eines Ost-Arms der Isartal-Rinne (E48, E49). Diese Struktur beginnt im Stadtgebiet, läuft bis zum nördlichen Stadtrand (E48) und hat durch ihren tiefen Einschnitt einen bedeutenden hydrogeologischen Einfluss. Es besteht eine Fortsetzung (E49) nach Norden und ein vermuteter Anschluss (mit hoher Unsicherheit) an die Sempptal-Rinne (E54) im Norden (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2020).

### 3.2.3.2 Detaillierte Einzelbeschreibung der Reliefelemente der Basis des quartären Grundwasserleiters

Neben der zusammenfassenden Darstellung in Kapitel 3.2.3.1, wird nun nochmals detailliert auf die definierten Strukturen eingegangen:

#### **Westlich der Isar:**

##### **H01 - Höhenrücken westlich von Fürstenfeldbruck**

Dieser Höhenrücken befindet sich bei den Ortschaften Puch, Fuchsberg, Aich und Landsberied. In diesem Gebiet sind mehrere OSM-Tagesaufschlüsse vorhanden, wie zum Beispiel bei Fuchsberg im Westen, bei Harholz im Nordosten und entlang der Ostflanke der Struktur. Nordöstlich von Landsberied erreicht das Tertiär Höhen von über 590 m ü. NN.

##### **E01 und E02 - Mammendorfer-Jesenwanger Rinne und Mammendorfer-Maisacher Rinne**

Unmittelbar westlich des obgenannten Höhenrückens, zwischen den Ortschaften Jesenwang und Mammendorf, verläuft eine Rinne in Nord-Süd-Richtung. Das Einfallen des Tertiärs zwischen Fuchsberg (circa 554 m ü. NN) und Egg (circa 526 m ü. NN) beträgt im Mittel 2,3 %. Am nördlichen Ende findet diese Eintiefung ihre Fortsetzung in der Mammendorfer-Maisacher Rinne. Diese zweite Struktur verläuft circa 700 m südlich, parallel der Maisach und wird von dem Tertiären Hügelland im Norden und dem südgelegenen Höhenrücken westlich von Fürstenfeldbruck eingerahmt. Das Gefälle zwischen dem Betonwerk (549 m ü. NN), das südlich von Galgen liegt, und der Laich-Waldfläche (518 m ü. NN) ist etwa 1,5 %. Die Einsenkung erstreckt sich von Mammendorf über Malching bis Maisach. Das östlich davon gelegene Gebiet zwischen Maisach und Olching stellt eine im Vergleich zur vorherigen Rinne breitere Tiefenzone dar, wo sich die Mammendorfer-Maisacher Rinne mit der Ampertal-Rinne vereinigt. Diese Senke setzt sich in Richtung ENE fort, und führt an den markanten Veränderungen des Gefälles im nördlichen Stadtgebiet vorbei (**G01**).

### **H02 und E03 - Höhenrücken östlich von Fürstenfeldbruck und Eichenauer Rinne**

Diese circa 4 km breite Tertiärerhebung liegt zwischen der Amperleite im Westen, der Emmeringer Leite im Norden und den Ortschaften Hoflach und Germannsberg im Osten. Auf ihrem Nordteil, direkt nördlich von Gelbenholzen, steigt das Tertiär bis auf circa 564 m, im Süden sogar auf 581 m ü. NN (westlich von Holzhausen). Auffallend ist, dass die Nordflanke dieses Höhenrückens in der Verlängerung der weiter im Osten auftretenden, und bereits beschriebenen, Gefälleveränderung auftritt. Im nordöstlichen Teil verläuft eine kleinräumige, WSW-ENE gerichtete Rinne. Im Raum Puchheim-Bahnhof vereinigt sich diese Struktur mit der Gilchinger Rinne.

### **E04 - Ampertal-Rinne**

Die Ampertal-Rinne verläuft, wie schon von Grottenthaler (1985) erwähnt, circa 1 km westlich versetzt parallel zur Amper. Die Rinne verläuft in SW-NE-Richtung auf der Höhe den Ortschaften Schöngeising und Fürstenfeldbruck und mündet, zusammen mit der Mammendorfer-Maisacher Rinne, in eine breite Tiefenzone im Raum Gernlinden. Der Bereich Gernlinden weist eine geringe Datendichte auf, daher ist der Unsicherheitsgrad entsprechend hoch (Standardabweichung bis 6,5 m).

### **E05 - Gilchinger Rinne**

Diese sehr markante Struktur verläuft in SW-NE-Richtung zwischen dem Höhenrücken östlich von Fürstenfeldbruck und dem Höhenrücken bei Argelsried-Puchheim Ort. An beiden Flanken der Gilchinger Rinne fällt das oberflächigen Relief des Tertiärs steil ab. So wird beispielsweise zwischen den Tertiäraufschlüssen, die südlich von Wagelsried bei 561 m ü. NN liegen, und dem Gebiet unmittelbar westlich von Alling (516 m ü. NN) ein starkes Einfallen von etwa 4,5 % erreicht. Südwestlich von Alling biegt die Rinne nach Süden um und verläuft unmittelbar westlich von Gilching in Süd-Nord-Richtung bis Sankt Gilgen bei Gilching. Ungefähr 1,5 km weiter im Süden, im Raum Flughafen Oberpfaffenhofen, scheint sich diese Rinne mit der Neugermeringer Rinne zu vereinigen.

### **E06 - Gröbenzeller Rinne**

Parallel zur Stadtgebietsgrenze im Raum Gröbenzell, verläuft eine Süd-Nord gerichtete, schmale Rinne. Sie verläuft parallel zur Langwieder- und Allacher Rinne im Osten.

In ihrem Zentrum, westlich des Erlbachs auf der Höhe der Bahnstrecke, fällt das Tertiär bis auf circa 496 m ü. NN ab. Das Gefälle zwischen diesem Teil der Rinne und dem Bereich unmittelbar westlich vom Wertstoffhof Gröbenzell (503 m ü. NN) beträgt circa 1,2 %. Am nördlichen Ende mündet sie, auf der Höhe von im Norden verlaufenden Tiefenzone.

Zudem hat es den Anschein, dass sich diese Struktur weiter nach Süden erstreckt. Aufgrund der relativ großen Standardabweichung (vorwiegend größer 2,5 m) im Bereich zwischen dem Höhenrücken bei Argensried-Puchheim Ort und dem Tertiärhoch der Aubinger Lohe ist ihre Fortsetzung nach Süden schwer nachzuverfolgen.

### **H03 und H04 - Höhenrücken bei Argelsried-Puchheim Ort und der Aubinger Lohe**

Zwischen Argelsried und Puchheim Ort verläuft ein SW-NE gerichteter tertiärer Höhenrücken. Ebenso wie bei den Höhenrücken, die westlich und östlich von Fürstenfeldbruck liegen, überlappt sich diese breite Tertiärauftragung mit dem Hügelland den Altmoränen. Zudem ist eine Vielzahl von Tertiäraufschlüssen in diesem Gebiet zu verzeichnen. Das Tertiär erreicht im Süden im Raum Steinberg mit 596 m ü. NN seine höchste Erhebung.

Bemerkenswert ist zudem, dass circa 3 km nordöstlich dieser Struktur, eine gleichgerichtete Erhebung (Aubinger Lohe) mit tertiären Aufschlüssen vorhanden ist. Diese zwei Erhebungen lassen sich als Reste eines ehemaligen durchgehenden tertiären Höhenrückens interpretieren (Blasy, 1974).

### **E07 - Neugerminger Rinne**

Die Rinne erstreckt sich von Oberpfaffenhofen (Gemeinde Weßling) in Nord-Ost-Richtung über Germering bis ins Münchner Stadtgebiet. Die südliche Fortsetzung dieser Rinne hatte Blasy (1974) in Richtung Unering erwartet. Wie der Verlauf der Tertiäroberfläche südlich von Oberpfaffenhofen vermuten lässt, zieht die Rinne (siehe gestrichelte Linie der Struktur **E08**) westlich von Unterbrunn und Oberbrunn weiter nach Süden in Richtung Unering. Bezüglich ihrer nördlichen Fortsetzung im Stadtgebiet München

(**E09**), lässt sich im Stadtbezirk Aubing ein breites, leicht ausgeprägtes Tertiärbecken, zwischen dem Höhenrücken der Aubinger Lohe und der Hochfläche des Kreuzlinger Forsts, erkennen.

Eine weitere Fortsetzung dieser Rinne im Stadtgebiet gliedert sich vermutlich in zwei Arme, die Langwieder Rinne und die Allacher Rinne, die westlich, parallel zur Würmtal-Rinne verlaufen.

### **E10 - Langwieder Rinne**

Diese Rinne bildet die teilweise Fortsetzung der Neugerminger Rinne im Stadtgebiet. Die am westlichsten gelegene Rinne, die hier als Langwieder Rinne bezeichnet wird, lässt sich erst unmittelbar östlich der Aubinger Lohe in der Mündung zwischen Fischbach und Landwieder Bach erkennen. Diese Einsenkung verläuft über Langwied in Nord-Ost-Richtung bis zum Dachauer Moos und weist im Nordteil, auf Höhe des Sand- und Kieswerks Riebel einen maximalen Höhenunterschied von circa 10 m auf.

### **E11 - Allacher Rinne**

Die östliche Fortsetzung der Neugerminger Rinne im Stadtgebiet wird als Allacher Rinne bezeichnet und verläuft zwischen zwei sehr schmalen Tertiärrücken. Diese Rinne erstreckt sich von der Überführung zwischen Mühlangerstraße und Bundesautobahn 8 (A8), durch Allach bis ins Dachauer Moos.

### **H05 und H06 - Zwei schmale Höhenrücken im Raume Langwied-Allach**

Zwischen obengenannter Langwieder und Allacher Rinne verläuft ein tertiärer Höhenrücken (**H05**). Diese Nord-Süd gerichtete Tertiärerhebung erstreckt sich nördlich und südlich des Autobahnkreuzes München-West und grenzt im Norden an die bereits erwähnte markante Veränderung des tertiären Gefälles.

Parallel dazu, circa 1 km weiter im Osten, zwischen der markanten Würmtal- und relativ wenig ausgeprägten Allacher-Rinne, lässt sich ein zweiter tertiärer Rücken interpretieren. Dieser verläuft zwischen Allach und Parkfriedhof (**H06**).

Auffällig ist die ähnliche Orientierung wie der südlich gelegene Höhenrücken beim Kreuzlinger Forst und die Hochfläche im Raume Unterbrunn, Frohnloh, Pentenried und Königswiesen.

### **H07 - Hochfläche beim Kreuzlinger Forst**

Südlich des Stadtteils Freiham und nördlich des Kreuzlinger Forsts (Gemeinde Gräfelfing) erreichen fast zehn Bohrungen eine Tertiärerhebung mit Höhen von 530 m bis 548 m ü. NN. In Anbetracht der großen Ausdehnung dieser Hochfläche, wurde diese Struktur nur durch wenige Bohrungen bereichs-

weise nachgewiesen. Vor allem südlich Gräfelfing ist die Ausdehnung unklar (siehe Karte zur Unsicherheitsanalyse). Diese Struktur stellt eine morphologische Trennung zwischen Würmtal- und Neugerminger Rinne dar.

### **H08 - Hochfläche im Raume Unterbrunn, Frohnloh, Pentenried und Königswiesen**

Das Oberflächenrelief des Tertiärs weist zwischen der Neugerminger Rinne im Westen und der Würmtal-Rinne im Osten einen Anstieg auf, dessen höchster Punkt bei Unterbrunn (580 m ü. NN) liegt.

### **H09 - Höhenrücken bei Gauting**

Auf der Höhe von Gauting und unmittelbar westlich parallel zur Würmtal-Rinne, treffen mehrere Bohrungen eine schmale tertiäre Erhebung an.

Es muss erwähnt werden, dass zwischen dieser Struktur und der nördlichen Grenze der Hochfläche **H08** eine schmale, tiefer gelegene, von Süd nach Nord gerichtete Einsenkung (**E12**) verläuft. Hier liegt das Tertiär auf circa 520 m ü. NN, also circa 30 m tiefer als in der unmittelbaren Umgebung des Höhenrückens Gauting.

### **E13 - Hanfelder Rinne**

Weiter südlich, zwischen Mamhofen und Königswieser Forst, lässt sich nur mit Mühe eine Eintiefung erkennen, die nach Nordosten abfällt. Diese Eintiefung wird in der Literatur als nordöstlicher Teil der Hanfelder Rinne interpretiert (BGU - Dr.Schott & Partner, 1995). Südlich der Hanfelder Rinne steigt die Tertiäroberfläche wieder an. Dieser Höhenrücken (**H10**) trennt die Hanfelder- von der südlich gelegenen Maisinger Rinne, die außerhalb des Projektgebietes liegt, ab (BGU - Dr.Schott & Partner, 1995).

### **E14 - Würmtal-Rinne**

Während die Würmtal-Rinne im südlichen Teil des Untersuchungsgebiets dem aktuellen Würmverlauf relativ gut entspricht und scheinbar in Form einer einzigen Eintiefung verläuft, ermöglicht uns die hohe Bohrdatendichte im Stadtgebiet eine detaillierte Beschreibung.

Die Ausdehnung der Würmtal-Rinne ist im Stadtgebiet, insbesondere in ihrem südwestlichsten Teil, sehr komplex. Zwischen Krailling und Lochham scheint sich die Würmtal-Rinne in drei Armen zu teilen, die durch leichte Tertiärerhebungen getrennt werden (siehe z. B.: Pasinger Stadtpark). Zwei lateralen Armen werden als Pasinger-Obermenzinger Rinne und als Westkreuzer Rinne bezeichnet und später separat analysiert. Der mittlere Arm, der als Würmtal-Rinne bezeichnet wird, entspricht meist dem aktuellen Verlauf der Würm. Die Nord-Süd-Ausrichtung verläuft parallel der Untersendlinger-Neuhäuser Rinne und erstreckt sich bis zum Allacher Forst in Richtung Karlsfeld. Maximalwerte für den Höhenunterschied liegen zwischen 10 m im Raum Parkfriedhof und über 15 m im Allacher Forst.

### **E15 - Westkreuzer Rinne**

Im Stadtbezirksteil Aubing-Süd, zwischen den Bahnhöfen München-Leienfelsstraße und München-Westkreuz, erkennt man eine westlich und parallel zum Würmtal verlaufende, rinnenartige Struktur. Diese SSW-NNE gerichtete Einsenkung vereinigt sich auf Höhe von Schloss Blütenburg mit der Würmtal-Rinne. Ähnlich wie bei der Pasinger-Obermenzinger Rinne kann beobachtet werden, dass diese Einsenkung im Süden in die Würmtal-Rinne mündet. Die Datengrundlage in diesem Gebiet ist gering, was eine erhebliche Unsicherheit nach sich zieht.

### **E16 - Pasinger-Obermenzinger Rinne**

Westlich Lochhamer Schlag und Nymphenburg lässt sich eine von Süd nach Nord verlaufende Rinne erkennen, die als Pasinger-Obermenzinger Rinne bezeichnet und gestrichelt dargestellt wird. Im Südteil verläuft die Eintiefung parallel zur Würmtal-Rinne. Beide Einsenkungen werden durch einen leicht erhöhten Tertiärrücken unmittelbar westlich des Pasinger Stadtparks getrennt. Südlich davon scheinen beide Rinnen den gleichen Verlauf zu haben, wobei die Bohrdaten in diesem Bereich sehr spärlich sind. Auf Höhe des Bahnhofs München-Obermenzing ändert sich die Ausrichtung der Rinne in Richtung NNE. Im nördlich anschließenden Bereich verläuft die Rinne zwischen einem schmalen Tertiärrücken im Westen (H11) und dem Hang der Nymphenburger Mittelhochfläche im Osten. Es erfolgt eine Verbreiterung der Struktur in Richtung Moosach bis in die Nähe des Rangierbahnhofs München-Nord. Hier vereinigt sie sich mit der Untersendlinger-Neuhausener Rinne. Weiter in Richtung Norden bzw. Nordosten lassen sich nur wenige Strukturen erkennen, die für eine Unterbrechung des Gefälles nördlich des Stadtgebietes sorgen. Hier sind zum Beispiel Eintiefungen wie die Hasenbergler Rinne und Strukturen unterhalb des Feldmochinger Sees sowie auf Höhe des Dreiecks München-Feldmoching (siehe unten) zu nennen.

### **H12 - Buchendorfer Hochfläche**

Unmittelbar südlich des Landkreises München, zwischen dem Würmtal im Westen und der Pullacher Rinne im Osten, erkennt man einen allgemeinen Anstieg der Tertiäroberfläche, deren höchster Punkt bei Buchendorf mit 579 m ü. NN liegt. Nordwestlich der Buchendorfer Hochfläche, im Raum Planegg, finden sich im Bereich der Bayerischen Asphalt-Mischwerke tertiäre Aufschlüsse. 3 km in südöstliche Richtung steigt das Tertiär auf bis zu 556 m ü. NN ab.

### **H13 - Forstenried-Solln Hochfläche**

Zwischen dem Stadtteil Solln und dem Forstenrieder Park tritt ein in Richtung WSW-ENE verlaufender Höhenrücken mit 557 m ü. NN in Erscheinung. Diese Tertiärauftragung stellt die nordwestliche Abgrenzung der Pullacher Rinne dar.

### **E17 - Pullacher Rinne**

Diese Rinne, deren Morphologie bereits von Blasy (1974) und Jerz, K. et al. (1987) untersucht wurde, erstreckt sich zwischen Pullach und Baierbrunn parallel zum Isartal. In der Literatur gibt es keine Auskunft über den südlich anschließenden Verlauf der Rinne. Vermutlicher Weise setzt sich die Rinne in zwei getrennten Armen nach S bzw. WNW fort. Die Fortsetzungen sind auf der Karte parallel des Baierbrunner Höhenrückens in Richtung Süden (E19) und bis zum Eichelgarten im Forstenrieder Park (E18) zu verfolgen.

### **E20 - Rinne bei Wangen**

Trotz einer Standartabweichung von über 2 m, deutet sich bei Wangen eine rinnenförmige Eintiefung an, die sich nach Nordosten fortsetzt. Wahrscheinlich handelt es sich dabei um die in der Literatur (z. B. Jerz, K. et al., 1987) erwähnte Rinne, die von Buchendorf über Wangen in Richtung Oberdill verläuft und dort Anschluss an die Pullacher Rinne findet.

### **H14 - Baierbrunner Höhenrücken**

Unmittelbar südlich bzw. südöstlich der Pullacher Rinne erstreckt sich ein Höhenrücken entlang des Ostufers der Isar. Mehrere tertiäre Aufschlüsse streichen auf seiner Ostflanke aus. Diese schmale und langgestreckte Tertiärerhebung verläuft zwischen dem S-Bahnhof Höllriegelskreuth im Norden bis Höhenschäftlarn im Süden und weist eine Unterbrechung auf der Höhe von Geudergraben bei Baierbrunn auf.

### **E21 - Neuforstenrieder Rinne**

Zwischen der Nordostseite der Buchendorfer Hochfläche und des Forstenrieder-Sollner Höhenrückens, kann eine nach Norden ausgerichtete, rinnenförmige Senke ausgemacht werden. Diese verläuft buchtartig in Richtung Nordwest und vereinigt sich mit der Waldfriedhofer-Neuhausener Rinne bei Forstenried. Diese Rinne weist einen maximalen Höhenunterschied von etwa 15 m auf.

### **E22 - Waldfriedhofer-Neuhausener Rinne**

Diese markante, Süd-Nord gerichtete Rinnenstruktur erstreckt sich vom Südpark des Stadtteils „Am Waldfriedhof“ über den Westpark, den Bahnhof Hirschgarten, den Bereich des Nymphenburger Schlosskanals in Neuhausen und den Westfriedhof bis nach Moosach im Norden. Die Rinne verläuft zwischen der „Nymphenburger Mittelhochfläche“ und der „Altstadt-Mittelhochfläche“. Der Südteil dieser Einbuchtung läuft zwischen „Untersendinger Hochfläche“ und den Tertiärhochlagen bei Neuhadern aus und mündet westlich Solln, bei Forstenried in die „Neuforstenrieder Rinne“ (**E21**). Bemerkenswert sind die mit bis zu 10 m auftretenden Höhenunterschiede auf beiden Rinnenseiten, sowie die Gesamterstreckung von circa 10 km. Der Sicherheitsgrad der Prognose dieser Rinnenausdehnung ist mit Werten, die vorwiegend unter 1 m bis 2 m liegen, sehr hoch.

### **H15 - Hochflächen im Raume Pasing-Hadern**

Zwischen dem „Pasinger Feld“ im Westen und der Kurparksiedlung im Osten sind drei SSW-NNE gerichtete Tertiärrücken zu beobachten. Unmittelbar östlich davon lässt sich eine vierte breitere Erhebung erkennen. Die östliche Flanke dieser Struktur verläuft parallel zum Waldfriedhof und stellt einen Teil der westlichen Grenze der „Waldfriedhofer-Neuhausener Rinne“ dar. Diese vier Hochflächen haben drei, auf der Karte gut erkennbare Einbuchtungen zur Folge. Wegen ihrer großen Ausdehnung ist vor allem die westlichste Hochfläche von Bedeutung. Diese erstreckt sich von „Lochhamer Schlag“ bei Gräfelfing über Pasing bis ins Stadtgebiet. Im Raum des S-Bahnhofs Pasing verliert diese Erhebung an Ausprägung, wobei sich Ihre westliche Begrenzung weiter nach Norden verfolgen lässt und in Grenze der „Nymphenburger Mittelhochfläche“ übergeht. Wie bereits beispielsweise bei Blasy (1974) erwähnt, liegt die Oberfläche dieser Hochflächen bereichsweise über dem Grundwasserspiegel.

### **E23 - Einbuchtungen im Raume Hadern-Laim-Nymphenburg**

Eine erste Vertiefung verläuft in Richtung Nordost durch den Stadtteil Blumenau. Parallel dazu zieht sich eine zweite Senke in Richtung Waldwiesenstraße und der Autobahn A96 hin. Die dritte Einbuchtung erstreckt sich parallel ab der Nähe des U-Bahnhofes „Haderner Stern“ in Richtung Autobahnüberführung der „Fürstenrieder Straße“. Eine Fortsetzung der drei Rinnen nach Richtung Norden, in Richtung „Mittelhochfläche Nymphenburg“, wurde auf der Karte gestrichelt dargestellt (**E24**). Im besagten Gebiet treten maximale Höhenunterschiede von etwa 5 m bis 6 m auf.

### **H16 - Nymphenburger Mittelhochfläche**

Diese tertiäre Mittelhochfläche liegt zwischen der „Waldfriedhofer-Neuhausener Rinne“ im Osten, der „Pasinger-Obermenzinger Rinne“ im Nordwesten und den Hochflächen im Raum Pasing – Hadern im Süden. Der südliche Bereich der Hochfläche weist eine hohe Datendichte auf, was den Unsicherheitsgrad der Prognose der Einbuchtungen im Raum „Hadern-Laim-Nymphenburg“ auf unter 1 m senkt. Der nordwestliche Teil, der Raum des Nymphenburger Schlossparks, hingegen, hat eine deutlich geringere Datendichte, was den Unsicherheitsgrad auf knapp über 2 m erhöht.

### **H17 - Untersendlinger Hochfläche**

Bereits Blasy (1974) hatte schon „ausgeprägte Tertiärerhebungen über dem Grundwasserspiegel südwestlich der Theresienwiese“ erwähnt. Solche Erhebungen sind nicht nur deutlich zu identifizieren, sondern ein Teil einer markanten, großräumigen Hochfläche, der hier entsprechend als „Untersendlinger Hochfläche“ bezeichnet wird. Die östliche Flanke der Hochfläche entspricht der Terrassenkante zwischen der spätglazialen Altstadtstufe und der Niederterrasse. Nördlich bzw. nordöstlich der „Untersendlinger Hochfläche“ erstreckt sich die „Altstadt-Mittelhochfläche“.

### **H18 - Altstadt-Mittelhochfläche**

Diese Hochfläche erhebt sich zwischen der „Isartal-Rinne“ im Osten und der „Waldfriedhofer-Neuhausener Rinne“ im Westen. Im Norden, auf einer Linie zwischen dem Olympischen Dorf – U-Bahnhof „Am Hart“ und Freimann, verstärkt sich das Gefälle des Tertiärs und bildet eine Abgrenzung. So beträgt dieses, zwischen der „Zentralen Hochschulsportanlage“ im Olympiapark (501 m ü. NN) und der Kreuzung zwischen Moosacherstraße und „Bundesstraße 304“ (494 m ü. NN), im Mittel 1 %. Die südliche Abgrenzung bilden der Hangbereich der „Untersendlinger Hochfläche“ und der nördliche Teil Thalkirchens.

Bezüglich der Morphologie des Reliefs, weist diese Struktur einen leichten Abfall in S-N-Richtung auf. So wird im Westteil, zwischen Hackerbrücke und Olympiastadion, ein durchschnittliches Gefälle von circa 0,3 % erreicht. Zwischen Großmarkthalle (519 m ü. NN) und EURO-Industriepark (494 m ü. NN) liegt ein ähnlicher Wert (0,28 %) vor.

Eine Besonderheit ist das Vorhandensein von kleinräumigen Gebieten nahe der Nord- und Ostgrenze, wo tertiäre Mergel und Sande den oberen Grundwasserspiegel überragen können. Diese Bereiche sind in der Karte als hügeliges Relief erkennbar.

### **E25 - Eintiefung im Raum Feldmochinger See**

Auf Höhe des Rangierbahnhofs München-Nord, im Nordteil von Moosach, scheinen sich die „Waldfriedhofer-Neuhausener Rinne“ und die „Pasinger-Obermenzinger Rinne“ zu vereinigen. Unmittelbar nördlich davon, im Raum „Feldmoching – Hasenberg“, erkennt man eine SSE-NNW gerichtete Fortführung dieser Struktur. Diese verläuft in Richtung Feldmochinger See bis nach Norden ins Dachauer Moos. Auf Höhe der Regattaanlage bei Oberschleißheim verlagert sich die Struktur nach NE und vereinigt sich mit einer breiten Tiefenzone, die den Nordteil des Untersuchungsgebiets prägt (siehe Beschreibung **E28**). In diese Tiefenzone mündet ebenfalls die nachfolgend beschriebene Eintiefung im Raum des Autobahndreiecks „München-Feldmoching“.

### **E26 - Eintiefung im Raum Autobahndreieck München-Feldmoching**

Ungefähr 2 km westlich des Feldmochinger Sees und direkt südlich des Autobahndreiecks „München-Feldmoching“ verläuft eine weitere SSW-NE gerichtete Einsenkung. Diese Struktur lässt sich als Verlängerung der sich südlich vereinigten Rinnen interpretieren und läuft im Norden auf Höhe Oberschleißheim aus.

### **E27 - Hasenbergler Rinne**

Im NE des Stadtteils „Am Hart“ verläuft die SW-NE orientierte „Hasenbergler Rinne“, teilweise auf dem Naturschutzgebiet „Panzerwiese“ und „Hartelholz“. Die erwartete Standardabweichung liegt maximal zwischen 2 m bis 3 m. Die Rinne verläuft vermutlich in Richtung Süden bis Oberwiesenfeld, nördlich des Olympiaparks. Im Norden vereinigt sie sich möglicherweise im Raum Oberschleißheim mit den

westlich gelegenen Rinnen, wobei in diesem Bereich die Anzahl der Bohrunterlagen, und somit die Aussagekraft, relativ gering ist.

### **E28 - Tiefenzone zwischen Dachauer Moos und Freising**

Diese großräumige Struktur hat eine Gesamtausdehnung von circa 30 km und verläuft parallel der Linie der markanten Gefälleänderung im nördlichen Stadtgebiet (**G01**). Die Tiefenzone erstreckt sich vom Raum „Gerlinden-Olching“ in WSW-ENE Richtung über Karlsfeld, Oberschleißheim, Eching und Pulling bis nach Seilerbrück im SW der Stadt Freising. Hier scheint die Tiefenzone in die Isartal-Rinne zu münden. Wie auf der Karte ersichtlich, verläuft das Relief der Tertiäroberkante nicht homogen. Im Gegensatz zur nördlichen, ist die südliche Begrenzung stets klar verfolgbar. Zudem lassen sich innerhalb der Tiefenzone eine Vielzahl kleinräumiger Erhebungen, und besonders im Westteil, Einsenkungen erkennen. So fällt die Oberfläche des Tertiärs im Bereich des Autobahndreiecks „München Eschenried“ (**E29**) auf rund 480, beim Golfplatz Eschenried (**E30**) auf 479 m ü. NN ab. Weiter Richtung Osten tritt im Bereich der Regattaanlage eine ausgeprägte, SW-NE gerichtete Rinne auf (**E31**). Parallel dazu findet sich nordwestlich eine weitere Eintiefung (**E32**), welche von der vorherigen durch eine schmale Tertiärerhebung getrennt wird. Im Bereich zwischen Dachau-Ost und Unterschleißheim stehen keine Bohrdaten zur Verfügung. Infolge dessen bestehen bezüglich der Tertiäroberfläche größere Unsicherheiten (Standartabweichung bis 7 m). Nördlich dieses Bereichs, südöstlich von Hebertshausen, ist eine rinnenförmige Struktur entlang der Amper auszumachen (**E33**). Der Abfall des Reliefs zwischen Oberschleißheim und Freising verläuft relativ kontinuierlich und wird daher nicht im Detail diskutiert.

### **E34 - Eintiefung zwischen Garching und Neufahrn**

Am Ostufer der Isar, auf Höhe des Forschungsinstituts Garching, liegt die Tertiäroberkante mit 467 m ü. NN tiefer als in unmittelbare Umgebung. Dieses tieferliegende Gebiet verläuft langgestreckt in S-N Richtung und vereinigt sich bei Neufahrn mit der WSW-ENE verlaufenden Tiefenzone. Zwischen diesem Gebiet und der Isar deutet sich ein geringmächtiger Tertiärrücken (**H19**) an. Circa 3 km nördlich des Forschungszentrums, auf Höhe des Klärwerks „Gut Marienhof“, kann ebenfalls eine kleinere Zone mit tiefliegender Tertiäroberkante identifiziert werden. Weiter Richtung Norden kann die morphologische Ausprägung, mangels Bohrdaten, nicht weiter nachgewiesen werden.

### **Östlich der Isar:**

Im Gegensatz zum westlichen Bereich, verläuft das Relief der Tertiäroberfläche östlich der Isar, nach Auswertung der Bohrdaten, erheblich ruhiger. Das Untersuchungsgebiet östlich der Isar ist von schmalen, in bestimmten Abständen auftretenden Bereichen, mit abrupten Änderungen des tertiären Gefälles, gekennzeichnet (**G02**, **G03**, **H22**, **G04**, **G05**). Zudem treten viele gering ausgeprägte, S-N und WSW-ENE verlaufende Eintiefungen in Erscheinung, die sich im Nordteil des Untersuchungsgebiets mit der Isartal-Rinne (**E59**) vereinen.

### **H20 - Darchinger Höhenrücken**

Der bereits in der Literatur erwähnte „Darchinger Höhenrücken“ (Schirm, 1968, Ingenieurbüro Watec, 1988) tritt östlich Holzkirchen nahe der Straßenkreuzung B318 und St2073 in Erscheinung. Östlich davon erstreckt sich diese Struktur in Form einer SW-NE gerichteten Ausbuchtung über die Gemeinde Valley bis Oberdarching. Nach Süden verläuft sie bis Draxlham (Gemeinde Warngau) und von hier bis Unterdarching im Osten. Zudem ist eine schmale Rinnenstruktur zu beobachten (siehe „Mühltal-Rinne und Mangfalltal-Rinne“). Der Zentralbereich des Höhenrückens, mit tertiären Höchstständen, liegt im Bereich des Golfplatzes Valley und östlich Oberlaidern (circa 645 m ü. NN), sowie zwischen Draxlham und dem Süden von Mitterdarching (circa 640 m ü. NN). An den Randbereichen, z. B. dem

Mangfalltal, treten Oberflächenaufschlüssen mit Werten von circa 625 m ü. NN zu Tage. Nördlich Fichtelholz fällt die Oberfläche von circa 625 m ü. NN auf circa 580 m ü. NN im Raum Fellach ab. Dieses Gebiet stellt einen Teil des Südrandes der „Münchner Schotterebene“ dar. Südlich der Linie „Draxlahm-Oberdarching“ steigt das Oberflächenrelief in Richtung Taubenberg stark an.

#### **E35 und E36 - Mühlal-Rinne und Mangfalltal-Rinne**

Innerhalb des obengenannten „Darchinger Höhenrückens“ verläuft eine SW-NE gerichtete, schmale Tertiärrinne. Diese Struktur, auf die in der Vergangenheit schon mehrere Autoren, z. B. Schirm (1968) und Watec (1988), hingewiesen haben, hat eine maximale Höhendifferenz von circa 25 m. Sie verläuft vom Nordosten Draxlhams nach Mitterdarching und mündet in die „Mangfalltal-Rinne“ im Osten. Im Mangfalltal ist das Tertiär tief abgesenkt und scheint von Unterdarching bis zur „Weyarner Mühle“ um 40 m, von 630 m ü. NN auf 590 m ü. NN, abzufallen. Diese rinnenförmige, Süd-Nord orientierte Vertiefung setzt sich bis nach Grub fort, wo sie nach Westen abbiegt.

#### **E37 und E38 - Holzkirchner Rinne und Einsenkungen nordöstlich der Gemeinde Dietramszell**

Westlich des „Darchinger Höhenrückens“ ist eine N-S gerichtete Rinnenstruktur ausgebildet, die direkt durch das Gebiet Holzkirchens verläuft. Der südliche Verlauf ist aufgrund weniger Bohrdaten unsicher. Durch seismische Messungen wurde von Grottenhaler (1985) eine südliche Fortsetzung in Richtung Großhartpenning angenommen. Westlich, zwischen Steingau und Plankam (Gemeinde Dietramszell), liegt die Tertiäroberfläche geringfügig tiefer als in der Umgebung. Diese Einbuchtung scheint sich in Richtung NE zu öffnen und sich mit dem tieferliegenden Gebiet nördlich des „Darchinger Höhenrückens“ zu vereinigen.

#### **E39 - Einsenkung zwischen Gumpertsham und Aying**

Im Raum „Geilertshausen-Gumpertsham“, westlich von Sauerlach, befindet sich eine W-E gerichtete, rinnenförmige Struktur. Nach Osten hin nimmt die Breite und Ausprägung dieser Struktur zu. Auf Höhe des „Hofolding Forsts“ scheint sich diese Struktur mit der Fortsetzung der südlich gelegenen Einbuchtung im Raum „Holzkirchen-Dietramszell“ zu vereinigen. Diese Beobachtung beschreibt auch Schirm (1968). Bis in den Raum Aying ändert sich der Verlauf der Struktur in Richtung NE.

#### **H21 - Hofolding Flinzrücken**

Unmittelbar nördlich der Einsenkung zwischen Gumpertsham und Aying, tritt ein Höhenrücken in Erscheinung, dessen Verlauf sich von W nach E, über Altkirchen, Sauerlach und Hofolding, erstreckt. Das Tertiär erreicht bei Altkirchen und im Westen von Sauerlach eine Maximalhöhe von 583 m ü. NN.

Auf der Karte ist ersichtlich, dass das tertiäre Relief zwischen der Isartal-Rinne im Westen und Sauerlach im Osten bis auf Höhe des Stadtgebiets relativ gleichmäßig abfällt. So liegt das Tertiär bei Straßlach, Gerblinghausen und Altkirchen etwa auf 582 m ü. NN und fällt in Richtung Unterhaching und Neubiberg, mit einem relativ konstanten Gefälle zwischen 0,4 % bis 0,5 %, auf circa 535 m ü. NN ab. Punktuell gibt es kleinräumige Abweichungen, wie die Einbuchtungen südlich Deisenhofens (E40) oder westlich Laufzorns (E41). Der Raum Oberhaching liegt auf einem flachen Niveau zwischen 560 und 562 m ü. NN, vergleichbar mit dem Bereich zwischen Brunenthal und Otterloh im Osten.

#### **E42 - Einbuchtungen zwischen Brunenthal und Vaterstetten**

Unmittelbar nördlich/nordöstlich der oben genannten Bereiche, lassen sich einige weitere Eintiefungen erkennen. Im Nordteil des „Hofolding Flinzrückens“, zwischen Brunenthal und Hofolding, fällt die Tertiäroberkante ab und bildet eine SW-NE gerichtete Einsenkung aus, die bereits in der Literatur von

Schirm (1968) und Grottenhaler (1985) dokumentiert wurde. Es treten in einem Bereich von Siegersbrunn, über Harthausen, Hohenbrunn und Vaterstetten gering ausgeprägte tertiäre Senken auf, die durch Bohrungen belegt sind. Ähnlich der Einbuchtungen im Bereich zwischen Aying und Anzing, die weiter östlich parallel verlaufen, entsteht der Anschein einer Zugehörigkeit zu einer großräumigeren Tertiärstruktur. Jedoch sind die Bohrdaten in diesem Gebiet recht spärlich, was Unsicherheiten zwischen 4 m bis 6 m zur Folge hat. Nördlich Vaterstetten steigen die Unsicherheiten sogar bis auf größer 7 m. Trotzdem ist eine Vereinigung der S-N gerichteten Rinnenstruktur zwischen Vaterstetten und Anzing und den Einsenkungen im Osten anzunehmen. Zudem ist nicht auszuschließen, dass sich diese Struktur, zumindest teilweise, mit der Rinnenstruktur bei Grub, vereinigt.

### **Einbuchtungen zwischen Hohenbrunn und Berg am Laim**

In diesem Fall ist eine WSW-ENE orientierte Einbuchtung (E43) südöstlich Deisenhofens auszumachen, die sich nach Putzbrunn erstreckt. Zwischen dieser Einbuchtung und dem Isartal, treten zwei weitere in nordöstliche Richtung verlaufende Eintiefungen (E44, E45) in Erscheinung. Ein weiterer Verlauf in Richtung Feldkirchen wird angenommen, wo es wahrscheinlich zu einer Vereinigung mit der Einsenkung zwischen Aschheim und Neufinsing (E47) kommt.

### **H22 - Hochfläche südlich der Linie Altbogenhausen-Riem**

Ungefähr 750 m nördlich der A94, zwischen den Maximiliansanlagen und dem Umschlagbahnhof Riem, verläuft eine parallel zur Autobahn ausgerichtete Zone, in der das tertiäre Relief stark in Richtung Norden, von 515 m ü. NN bis auf unter 500 m ü. NN abfällt. Die Oberfläche senkt sich hier mit über 2 % im Westen und circa 1,4 % im Osten in Richtung Norden ab. Weiter Richtung Osten verringert sich der Betrag des Gefälles.

Zudem sind zwei tertiäre Hochgebiete, bei Heimstetten (H23) und im Raum „Ottersberg-Poing“ (H24), zu erkennen, zwischen denen kleinräumige Rinnenstrukturen auftreten, die vermutlich bevorzugte Fließwege für das Grundwasser darstellen. Daneben gibt es weitere Rinnensysteme im Bereich Grub (E46) und Feldkirchen (E47).

### **E48 - Bogenhausener-Aschheimer Eintiefung**

Auf Höhe der Max-Joseph-Brücke im Stadtgebiet scheint sich von der Isartal-Rinne ein Ost-Arm abzutrennen, der als „Bogenhausener-Aschheimer Eintiefung“ bezeichnet wird. Im westlichen Bereich ist dieser von Tertiärerhebungen, dem „Johanneskirchner Höhenrücken“ und einem Höhenrücken auf der Linie zwischen Altbogenhausen und Riem, begrenzt. Im Stadtgebiet verläuft die Einsenkung vom Ostufer der Isar aus in Richtung „Klinikum Bogenhausen“ und Engelschalking bis zum nördlichen Stadtrand („Dornacher Feld“), wo die Tertiäroberkante einen Minimalwert von 489 m ü. NN erreicht. Eine Verlängerung in Richtung Ortskern Aschheim und ein weiterer Verlauf in Richtung NE des Untersuchungsgebiets, werden anhand vorhandener Bohrdaten angenommen.

### **E49 - Eintiefung zwischen Aschheim und Neufinsing**

Diese SW-NE gerichtete Struktur bildet die Fortsetzung der „Bogenhausener-Aschheimer Eintiefung“. Die Tertiäroberfläche senkt sich auf einer Länge von 9 km, zwischen Aschheim und Neufinsing, von 490 m ü. NN auf 476 m ü. NN ab. Weiter nördlich und östlich von Neufinsing lässt sich diese Struktur, aufgrund großer Standartabweichungen (> 6 m), nur schwer verfolgen.

### **H25 - Johanneskirchener Hochfläche**

Vom Ostufer der Isar, auf Höhe Oberföhring, erstreckt sich in Richtung Osten ein Gebiet, in dem die Tertiäroberfläche im Vergleich zur Umgebung, erhöht ist. Die Oberfläche liegt auf circa 501 m ü. NN und die markantesten Gefälle befinden sich am Ostufer der Isar sowie nordwestlich des „Dornacher Feldes“ bei Aschheim.

### **H23 und H24 - Tertiärhoch bei Heimstetten und im Raume Ottersberg-Poing**

Bei Heimstetten tritt eine inselartige Erhöhung der tertiären Oberfläche mit 502 m ü. NN auf, die jedoch nur durch eine Bohrung belegt werden kann.

Im Raum Ottersberg wurde bereits von Schirm (1968) eine tertiäre Erhebung erwähnt. Eine mögliche Verbindung dieser Erhebung mit dem Tertiärrücken bei Kempfing (Gemeinde Moosinning) wird vermutet. Auffällig ist zudem, dass diese Strukturen eine Verlängerung der Linie „Altbogenhausen-Riem-Heimstetten“ darstellen.

### **E50 - Einbuchtungen in der Linie Aying-Anzing**

Im Bereich zwischen Aying und Anzing fällt eine Abfolge gering ausgeprägter, Süd-Nord orientierter Einbuchtungen auf. Diese wurden bereits von Schirm (1968) erwähnt und verlaufen entlang der Ortschaften Aying, Egmating, Oberpframmern, Zorneding, Pöring, Purfing und Anzing.

### **H26 - Hochfläche zwischen Zorneding und Kirchseeon**

Laut Literatur (Schirm, 1968) findet ein generelles Ansteigen der Tertiäroberfläche südlich der Straße zwischen Zorneding und Kirchseeon statt. Diese Aussage bestätigt die allgemeine Tendenz und grenzt ebenfalls eine N-S gerichtete, tertiäre Erhebung ab. Unmittelbar nördlich der Bundesstraße 304, zwischen Zorneding und Eglharting, steigt das Tertiär auf bis zu 530 m ü. NN an und bildet weiter südlich bei Buch mit 537 m ü. NN ein Hoch.

### **E51 - Kirchseeoner Rinne**

Im südlichen Teil des „Egelhartinger Forsts“, insbesondere auf Höhe Kirchseeon, verläuft eine NNW-SSE gerichtete Rinnenstruktur mit einer maximalen Höhendifferenz von circa 10 m. Diese Struktur verläuft nach Norden in Richtung „Anzinger Forst“ (**E52**), wo sie sich mit den Einbuchtungen des Bereichs „Aying-Anzing“ zu vereinigen scheint. Dies kann aufgrund einer geringen Bohrdatendichte nicht zweifelsfrei belegt werden. In der Fortsetzung der Rinne, südlich von Forstinning, wird die Struktur im Bereich des Kiesabbaus durch eine lokale tertiäre Erhöhung unterbrochen (Blasy & Mader GmbH, 2007).

### **H27 - Hochfläche im Raum Ebersberger Forst**

Östlich der Kirchseeoner Rinne, im Ebersberger Forst, liegt ein genereller Anstieg der Tertiäroberfläche in Richtung Ost und Südost vor.

### **H28 - Hohenrücken im Raume Auerhäuseln-Dürnberg**

Am Ostrand des Untersuchungsgebiets, östlich der Linie „Herdweg – Ottenhofen“, ist ein Anstieg des tertiären Reliefs zu verzeichnen. Bei Unterschwillach erreicht es eine Höhe von 479 m ü. NN, südöstlich, bei Zeilern, liegt es bei 485 m ü. NN. Auf Basis der vorliegenden Bohrdaten, scheint sich dieser Höhenrücken nach Südosten in Richtung Pastetten fortzusetzen, wo eine Höhe von circa 500 m ü. NN erreicht wird. Eine nördliche Fortsetzung wird parallel zum Fluss Schwillach im Osten, zwischen Dürnberg und Wörth, erwartet (Hydroconsult, 2011).

### **E53 - Sempttal-Rinne zwischen Markt Schwaben und Erding**

Wie bereits erwähnt, vereinigen sich die „Kirchseeoner Rinne“ und eine SSW-NNE gerichtete Eintiefung zwischen Anzing und dem „Anzinger Forst“. Diese Tiefenzone setzt sich in Richtung Markt Schwaben fort, wo eine Tertiärsenke (475 m ü. NN) angetroffen wird.

Weiter in Richtung Norden, entlang der Sempt, zwischen den Ortschaften Bergham, Ottenhofen und Herdweg, ist die tertiäre Morphologie durch eine langgezogene Einsenkung gekennzeichnet. Während die Ostflanke dieser Einsenkung gut nachverfolgt werden kann (siehe Höhenrücken im Raum „Auerhäusel – Dürnberg“), ist die Westflanke, aufgrund eines hohen Unsicherheitsgrades (bis 6,5 m), nur schwer abzugrenzen.

Bei Lupperg wurde vermutlich ein Teil einer tertiären Erhebung durch eine Bohrung angetroffen. Im Bereich des „Aufhausener Walds“, ungefähr 3 km östlich von Moosinning, liegt die Tertiäroberkante wesentlich tiefer als in der Umgebung. Hier bildet das Relief eine WSW-ENE orientierte Eintiefung (E54), die sich auf Höhe Bergham mit der Sempttalrinne vereinigt.

Bemerkenswert ist zudem eine kleine, in der Literatur (Watec, 1988) erwähnte Tertiärsenke bei Gänslohe, unmittelbar östlich Moosinning. Der weitere Rinnenverlauf erstreckt sich in Richtung Norden bis nach Erding.

### **Eintiefungen zwischen Erding und Langenpreising**

Im Nordteil der Gemeinde Erding scheint die „Sempttal-Rinne“ ihren bisherigen Verlauf entlang des Flüsschen Sempt zu verlassen und verliert sich. Nördlich, in Richtung Langenpreising, können mehrere Eintiefungen erkannt werden, die eine Fortsetzung dieser Rinne darstellen könnten.

Nahe der Ortschaft Eitting verläuft eine SE-NW gerichtete Senke (E55), die vermutlich mit einer weiteren Eintiefung westlich von Berglern (E56) in Verbindung steht. Diese ist im Südosten durch einen Anstieg (circa 0,9 %) des Tertiärs begrenzt (G05), und verläuft weiter in Richtung Nordteil der Isartal-Rinne.

Im Osten, westlich von Wartenberg, sinkt die Tertiäroberfläche ab (E57). Nordwestlich davon, beim „Mittleren-Isar-Kanal“, sinkt die Tertiäroberkante auf 421 m ü. NN, weiter nördlich, bei Langenpreising, auf bis zu 411 m ü. NN ab.

### **E58 - Sempttal-Rinne (Nordteil) zwischen Langenpreising und Echinger Stausee**

Im Gebiet zwischen Langenpreising und Echinger Stausee verläuft eine rinnenförmige Struktur, die sich zumindest teilweise wieder dem Verlauf der Sempt angleicht. Entlang deren Verlauf treten mehrere tertiäre Einsenkungen auf, wie z. B. bei Langenpreising (411 m ü. NN), nördlich Pottenau (407 m ü. NN) und südlich Aich (406 m ü. NN). Der Verlauf der Sempttal-Rinne setzt sich bis zum Stausee fort, wo sie sich mit der Isartal-Rinne vereinigt.

### **E59 - Isartal-Rinne (Nordteil)**

Zwischen Freising im Westen und Echinger Stausee am nordöstlichen Rand des Untersuchungsgebiets, wird die Isartalrinne linksseitig durch das tertiäre Hügellang begrenzt. Die rechtsseitige Begrenzung ist nicht klar auszumachen, was vor allem an den spärlichen Bohrdaten (Standartabweichung über 5 m) in den Bereichen zwischen Attaching (nördlich des Flughafens) und den Naturschutzgebieten Viehlaßmoos und den Isarauen, bzw. zwischen Hangenham und Moosburg, liegt. Auf Basis der vorhandenen Bohrdaten, wird die südlich des Isartals ausgeprägte Tertiärmorphologie wohl durch mehrere, bereits beschriebene Strukturen (E55, E57, E64) geprägt.

### **E60 - Rinne im Raum Feldkirchner Au**

Auf Höhe der Gemeinde Moosburg wird eine WSW-ENE gerichtete Rinnenstruktur von zwei tertiären Aufragungen eingerahmt. Die Eintiefung verläuft entlang der Ortschaften Weiglshaig, Martlbräuschwaig und dem Moosburger Stadtteil Neustadt und scheint sich dann mit der Isartal-Rinne zu vereinen.

### **H29 - Höhenrücken im Raum Moosinning, Kempfing und Aufkirchen**

In diesem Gebiet tritt das tertiäre Relief durch einen starken Anstieg mehrmals zu Tage. Das stark geprägte Relief erreicht Höhen von über 490 m ü. NN. Das Gefälle liegt zwischen Adelberg (487 m ü. NN) und Gänslöhe (457 m ü. NN) bei circa 2,35 %, im Raum Aufkirchen bei circa 4 %.

### **Eintiefungen zwischen dem Johanneskirchner Höhenrücken und dem Flughafen München**

Im Gebiet nördlich des „Johanneskirchner Höhenrückens“ bis zum Flughafen München, wird das tertiäre Relief durch keine auffälligen Strukturen gestört und fällt relativ schwach und konstant ab. Das Gefälle zwischen Unterföhring (493 m ü. NN) und Hallbergmoos (450 m ü. NN) beträgt im Mittel circa 0,25 % und wird nur durch kleinräumige Einsenkungen unterbrochen. Beispiele hierfür wären die SW-NE orientierten Einsenkungen im Raum Feringasee (**E61**) und Schindertaxet südlich von Ismaning (**E62**). Weiter nördlich, bei Eichenried, liegt eine weitere Einsenkung (**E63**) mit Tertiärhöhen zwischen 457 m ü. NN und 454 m ü. NN. Zudem existiert eine Senke westlich von Oberding (**E64**), mit NNW-SSE orientierter Ausrichtung.

Im Bereich des Flughafens München ist die Bohrdatendichte wesentlich höher und erlaubt eine detailliertere Darstellung der Tertiäroberkante. Die Monotonie der oben beschriebenen Fläche wird durch eine Verstärkung des Gefälles in N-S Richtung unterbrochen (**G04**). Zwischen Schwaig (445 m ü. NN) und der östlichen Grenze des Flughafens (431 m ü. NN) beträgt das Gefälle durchschnittlich 0,7 %. Im mittleren und westlichen Bereich des Flughafens und parallel zur Isartalrinne im Norden verläuft eine rinnenförmige Eintiefung (**E65**). Sie verläuft in Richtung WSW-ENE und mündet im Raum Eitting vermutlich in die Isartal-Rinne.

### **E66 und E67 - Isartal-Rinne (Süd- und Mittelteil)**

Das Isartal ist zum Teil sehr stark in den Tertiäruntergrund eingetieft. Südlich des Münchner Stadtgebietes tritt das Tertiär an zahlreichen Aufschlüssen, vor allem westlich der Isar, zu Tage. Zudem ist das Relief stark ausgeprägt. Das Tertiär fällt am Ostufer der Isar, zwischen dem Wasserkraftwerk Mühlthal und dem Norden von Straßlach, stark, von rund 575 m ü. NN auf 545 m ü. NN, ab. Im Bereich der südlichen Stadtgrenze mündet die „Pullacher Rinne“ in das Isartal. Im Bereich des Stadtgebiets bildet die Isartal-Rinne zum Teil steile Hangflanken aus, die durch eine hohe Bohrdatendichte gut interpretiert werden können. Im Südosten von Solln, fällt das Tertiär von 557 m ü. NN, um 33 m, auf 524 m ü. NN auf Höhe des „Isar-Werkkanals“ ab. Das Gefälle beträgt circa 1,5 %. Besonders steil ausgeprägt ist zudem die östliche Hangflanke zwischen Max-Joseph-Brücke und Mariahilfplatz. Wie bereits erwähnt, scheint sich, weiter nördlich, von der Isartal-Rinne ein Arm in Richtung Osten abzutrennen („Bogenhausener-Aschheimer Eintiefung“). Nördlich des Stadtgebiets, zwischen Ismaning und Freising, verliert die Isartal-Rinne ihr ausgeprägtes Relief. Vor allem ist die Ostflanke der Isartal-Rinne oft nicht mehr eindeutig auszumachen.

### 3.3 Grundwassergleichen des quartären Hauptgrundwasserleiters

Das folgende Kapitel beschreibt die Ergebnisse zu den Grundwassergleichen des quartären Hauptgrundwasserleiters, die in den Projekten GEPO und GeoPot anhand von der erarbeiteten Datengrundlage (die eine ausgiebige Datenrecherche und Qualitätskontrolle zu den Messobjekten beinhaltet), der Planung und Durchführungen einer umfassenden Stichtagsmessung in der gesamten Münchner Schotterebene und der geostatistischen Interpolation und anschließenden Plausibilitätsprüfung erzielt wurden.

#### 3.3.1 Überblick

Die Stadt München liegt im Zentrum der sogenannten Münchner Schotterebene (MSE), die im Süden, Osten und Westen durch Moränenhügel begrenzt wird. Im Norden erstreckt sich das Tertiäre Hügel-land. Die Ausmaße betragen von W nach E circa 40 km, von S nach N circa 50 km. Die Mächtigkeit des Quartärs liegt durchschnittlich zwischen 2 m und 20 m, im Süden bis zu 100 m. Die MSE fällt von circa 650 m ü. NN im Süden auf circa 430 m ü. NN im Norden ab. Das Gefälle reduziert sich von 12 ‰ im Bereich der Moränenlandschaft, über 4 ‰ bis 5 ‰ im Stadtgebiet auf circa 2 ‰ im Bereich von Freising (Dohr & Gruban, 1999: 10).

Eine allgemeine Beschreibung der hydraulischen Verhältnisse im quartären Hauptgrundwasserleiter auf Basis des bisherigen Kenntnisstandes ist in Kapitel 3.1 dargestellt.

Im Bereich der Schotterebene war vor Beginn des Projektes GEPO kein durchgehender, detaillierter Grundwassergleichenplan für das quartäre Hauptgrundwasserstockwerk vorhanden. Dieser wurde erst durch eine umfassende Stichtagsmessung im Jahr 2014 für einen mittleren Niedrigwasserstand realisiert (siehe Kapitel 3.3.2). Für das Stadtgebiet München existierten bereits Grundwassergleichenpläne (z. B. des Referates für Gesundheit und Umwelt der Stadt München von 1990). Auch für das Münchner Umland waren Grundwassergleichenpläne vorhanden, die jedoch zumeist nur lokal beschränkt waren (z. B. Flughafen München: BLASY, DR. – ØVERLAND, DR., 2007 oder Blasy, 1974) und zum einen unterschiedliche Grundwasserverhältnisse beschreiben (Mittelwasserstand, etc.), sowie zum anderen die Grundwassersituation der Münchner Schotterebene nicht in einer Gesamtschau wiedergeben. Aufgrund verschiedener Bezugs- und Recherchequellen, qualitativen Schwankungen und zum Teil fehlenden Informationen (Bezeichnung, Maßstab, Jahr, Quelle) wird nachgehend nur eine Übersicht vorhandener Pläne dargestellt (Tab. 2). Ergänzend gibt Tab. 3 eine Auswahl bekannter, großräumiger Pläne (Quartär) wieder.

Tab. 2: Zusammenfassung recherchierter Grundwassergleichenpläne Quartär (Stand 2018)

Bezeichnung	Anzahl	Bemerkung
GWGL LfU Archiv	Circa 100 (digital) + 30 (Scans)	GWGL-Pläne zum Teil großflächig und auch zum Teil außerhalb des Arbeitsgebietes (Shapefiles und / oder Raster-Dateien)
GWGL recherchiert und georeferenziert	Circa 90	Circa 95 recherchierte Pläne unterschiedlichen Ausmaßes (lokal bis überregional) und schwankender Qualität (Shapefiles und / oder Raster-Dateien).
GWGL recherchiert und digitalisiert	Circa 85	Circa 85 recherchierte Pläne unterschiedlichen Ausmaßes (lokal bis überregional) und schwankender Qualität, die auf Basis analoger Quellen digitalisiert wurden (Shapefiles).
<b>Zusammenfassung</b>	Circa 310	Insg. liegen für den quartären Grundwasserleiter circa 310 Pläne in unterschiedlicher Qualität, verschiedenen digitalem Format und Ausdehnung vor (Stand 2018).

Tab. 3: Auswahl vorhandener, großflächiger Grundwassergleichenpläne (Quartär) (Stand 2018)

Kurzbezeichnung des Plans	Jahr	Verfasser
GWGL Fachplanung Lech Süd (HW / NW)	1996	Büro Schuler & Gödecke
GWGL Fachplanung Lech Nord	1997	Büro Schuler & Gödecke
GWGL LHM HW 40	1940	Stadt München
GWGL LHM HW 84	1984	Stadt München RGU
GWGL LHM GW 88	1988	LHM U-Bahn Referat
GWGL LHM GW 90	1990	Stadt München RGU
GWGL München	1968	Gebhardt
GWGL Geol. hydrogeol. Karte	1953	GLA
GWGL Geol. hydrogeol. Karte	1958	GLA
GWGL Schotterebene E	1964 bis 1966	Schirm
GWGL Schotterebene NW	1972	Salameh
GWGL Schotterebene W	1974	Blasy
GWGL Schotterebene S	1975	Wrobel
GWGL Schotterebene	1982	Veit, Zipfel
GWGL Schotterebene SE	1986	Dr.-Ing. Björnsen
GWGL Flughafen München (diverse)	1980 bis 2007	Büro Dr. Blasy – Dr. Overland
GWGL Starnberg (Großraum)	1982	Wrobel
GWGL WV Moosrain	2004	Hlawa, Hanke
GWGL Erding / Freising	1994	Waldinger, März

### 3.3.2 Datengrundlage der Stichtagsmessung und Interpolation der Messdaten

#### 3.3.2.1 Datengrundlage

Im Zuge der Stichtagsmessung für den quartären Hauptgrundwasserleiter der Münchner Schotterebene wurde im Projekt GEPO die Datenrecherche und -erhebung nochmals intensiviert. Von 9.000 recherchierten Messpunkten, die sich potenziell für die Messung der Grundwasserverhältnisse geeignet hätten, konnten im April 2014 an 6.000 Messstellen und Brunnen relevante Daten vom Projektteam und externen Betreibern erhoben und zur Verfügung gestellt werden. Außerdem wurden 364 Wasserspiegelhöhen an Oberflächengewässern per GPS eingemessen. Alle Messdaten wurden im Anschluss bei der Aufarbeitung der Messungen z. B. durch Abgleich mit den Ausbauprofilen etc. auf Plausibilität und Qualität geprüft.

Durch die Auswertung von mehreren vorhandenen Grundwasserganglinien (siehe Kapitel 5) wurde ein Mittelwasserstand bzw. mittlerer Niedrigwasserstand zur Aufnahme und Beschreibung der hydraulischen Verhältnisse ausgewählt. Aus diesem Grund (zusammen mit organisatorischen Aspekten) wurde für die Durchführung der Stichtagsmessung im quartären Hauptgrundwasserleiter der April 2014 angesetzt. Die hydrologischen Bedingungen im Frühjahr 2014 führten dazu, dass die umfassende Stichtagsmessung im Ergebnis einen mittleren Niedrigwasserstand darstellt. Dieser bietet aber eine sehr gute Grundlage für Planungen z. B. von thermischen Nutzungen, da die Grundwasserverhältnisse für eine konservative Planung (im Sinne einer mindestens vorhandenen Grundwassermenge) beschrieben werden.

Insgesamt wurden die Messungen zeitgleich von 33 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der TU München, des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) und der WWÄ München, Rosenheim und Weilheim durchgeführt. Nach der einwöchigen Messkampagne in der gesamten Münchner Schotterebene wurden die Messwerte, teilweise bereits digital aufbereitet, an die TUM übermittelt und unbearbeitete Messprotokolle digitalisiert. Alle im Zuge der Stichtagsmessung aufgenommenen Daten wurden in diesem Arbeitsschritt tabellarisch zusammengefasst, mit dazugehörigen Stammdaten versehen und qualitätsgeprüft. Parallel dazu erfolgte eine intensive Eingabe der neu gewonnenen Daten ins Bodeninformationssystem Bayern (BIS-BY). Neben notwendigen, umfangreichen Nachrecherchen erfolgten außerdem punktuelle Nachmessungen im Gelände (z. B. fehlende Messpunkthöhen), um fehlende Informationen zu ergänzen.

Ergebnis der Aufarbeitung war eine finale Datenbank, in der alle recherchierten Objekte (circa 9.000) und die zusätzlich erfassten Messdaten für circa 6.000 Objekte, sowie zugehörige Informationen, sortiert, geprüft und erfasst sind. Im Folgenden mussten für die Erstellung des Grundwassergleichenplans die zugeordneten Grundwasserhorizonte zu jeder Messung einzeln geprüft werden, damit garantiert war, dass sich die Messungen auch ausschließlich auf die Verhältnisse des quartären Hauptgrundwasserleiters beziehen.

### 3.3.2.2 Methodik

Die Messergebnisse der Stichtagsmessung (April 2014) stellen die Hauptdatengrundlage des Grundwassergleichenplans für den quartären Hauptgrundwasserleiter da. Zur Konstruktion der Isolinien wurden logischerweise nur die Daten von Grundwassermessstellen und Brunnen verwendet, die im quartären Hauptgrundwasserleiter verfiltert sind, sowie Pegelmessungen von Oberflächengewässern, die nach bestem Kenntnisstand hydraulisch in Verbindung mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter stehen. Daneben wurde einer umfangreiche Recherche an bereits vorhandenen Grundwassergleichenplänen (Tab. 2) und Gutachten durchgeführt, die zur Plausibilitätsprüfung der konstruierten Isolinien verwendet wurden. Die Pegelhöhen von Oberflächengewässern, soweit diese mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter korrespondieren, wurden wie oben erwähnt, in die Konstruktion miteinbezogen. Sonderfälle, wie Oberflächengewässer die in den Grundwasserleiter exfiltrieren (z. B. der südliche Teil der Würm) oder trockenengefallene Messstellen, konnten nicht in die automatische Interpolation eingebunden werden und wurden gesondert im Nachgang der geostatistischen Analyse interpretiert. Die gesamte Anzahl der verwendeten Konstruktionspunkte nach Abschluss der Qualitätskontrolle betrug schließlich 5368.

Die zur Interpolation herangezogenen Messungen (Stützpunkte) wurden in Bereiche westlich und östlich des Hauptvorfluters Isar aufgeteilt, um eine möglichst plausible Interpolation, insbesondere um eine adäquaten Einbeziehung der Anisotropie bei der geostatistischen Schätzung, zu gewährleisten. Dies war erforderlich, da sich die Anisotropie großflächig westlich und östlich der Isar signifikant unterscheidet.

Abb. 8 fasst die durchgeführten Arbeitsschritte zur Erstellung des Grundwassergleichenplans schematisch zusammen.

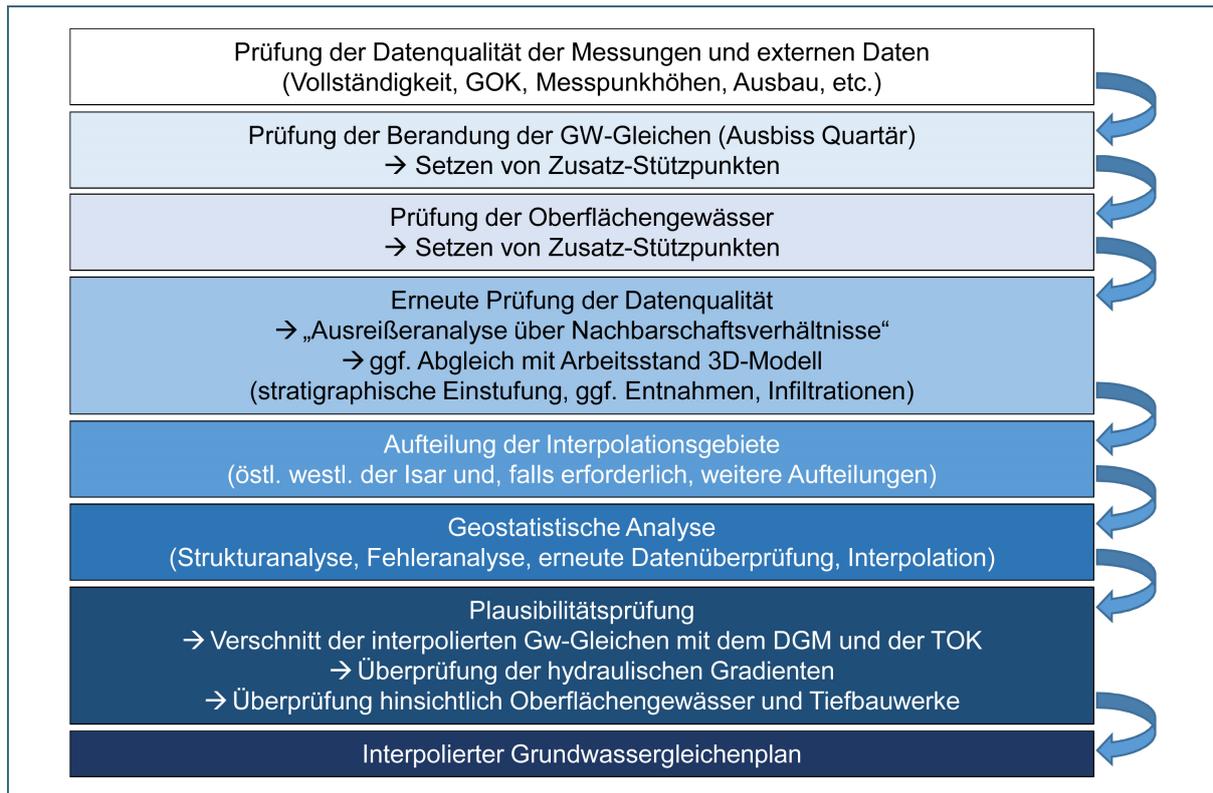


Abb. 8: Zusammenfassung der Methodik zur Erstellung des Grundwassergleichenplans

Die Datengrundlage mit den gemessenen Brunnen, Messstellen und Oberflächengewässern zeigt eine gute flächenhafte Abdeckung des Gebiets der Münchner Schotterebene. Am Rand der Schotterebene wurden gemäß der hydraulischen Begrenzungen Hilfspunkte für die Interpolation gesetzt. Ebenso wurden Hilfspunkte an z. B. hydraulisch angebundenen Oberflächengewässern gesetzt, um diese adäquat in die Interpolation einzubinden. Die hohe Anzahl der Messdaten mit Ergänzungen ermöglichte, nach intensiver Qualitätsprüfung mit integrierter Feedback-Schleife durch weitere Experten mit regionaler Fachkenntnis, eine plausible Interpolation der Grundwassergleichen mit hohem Detaillierungsgrad. Der Großteil der aufgenommenen, interagierenden Oberflächengewässer fügte sich ebenfalls gut ins Gesamtgebiet ein. Lediglich in Bereichen mit starken anthropogenen Eingriffen (z. B. Wehre entlang der Isar) kam es zu lokalen Unplausibilitäten, worauf die Uferbereiche der Isar als Grenzen des westlichen und östlichen Interpolationsgebietes festgelegt wurden. Vorgreifend ist hier beispielsweise zudem zu erwähnen, dass etwa die hydraulische Funktion von Dükeranlagen im Stadtgebiet in der Interpolation auch nicht immer berücksichtigt werden konnte und lokal im Nahbereich von der Realität abweichen kann. Zudem ist zu berücksichtigen, dass auf einer so großen Fläche, sowie auch im Stadtgebiet, der Grundwassergleichenplan kein „Ruhewasser“-Zustand darstellen kann und immer auch lokale und unter Umständen zeitlich begrenzte hydraulische Eingriffe mit beinhaltet, wie Entnahmen für die Trinkwassergewinnung oder Wasserhaltungsmaßnahmen bei Bauprojekten.

Nach der Zusammenstellung und Qualitätskontrolle der Stützpunkte erfolgte eine weitere mehrfache Prüfung der Datenqualität durch eine „Ausreißeranalyse über Nachbarschaftsverhältnisse“ („Natural Neighbor“ Verfahren), bei der fehlerhafte Angaben (wie etwa Koordinaten, Messpunkthöhen, Filterstreckenzuordnung etc.) detektieren werden konnten. Diese wurden anschließend korrigiert.

### Geostatistische Analyse

Auf Basis des qualitätsgeprüften Datensatzes erfolgte die Durchführung einer geostatistischen Analyse mit Struktur- und Fehleranalyse, erneuter Datenprüfung und finaler Interpolation. Diese Analyse

wurden im Programm Surfer 9 (Golden Software®) durchgeführt. Das generelle Ziel war die existierende, räumliche Abhängigkeit der Daten zu definieren und die Werte der Variablen (Höhe des Grundwassers) für jeden Raumpunkt des Arbeitsgebietes abzuschätzen. Die Theorie der geostatistischen Analysen nachdem die hier vorliegende räumliche Schätzung durchgeführt wurde sind z. B. in Akin & Siemes (1988), Isaak & Srivastava (1989) oder Kitanidis (1997) einsehbar.

### **Strukturanalyse:**

Die Strukturanalyse (Variogrammanalyse) wurde, wie bereits bei der Beschreibung der Datengrundlage erwähnt, getrennt nach dem westlichen und östlichen Teil des Arbeitsgebietes durchgeführt (siehe Abb. 9 und Abb. 10, sowie Tab. 4).

Wie bei Grundwasserdaten üblich beinhalteten die Datensätze einen relativ starken Trend (Kitanidis, 1997), der für die jeweiligen Strukturanalysen vorher im Datensatz bereinigt wurde (Universal-Kriging-Verfahren), um so die kleinräumige räumliche Abhängigkeit der Daten zu interpretieren. Nach der Kriging-Schätzung wurde die abgezogenen Trendfläche wieder auf die interpolierten Daten hinzugefügt (Isaaks & Srivastava, 1989). Mit den trendbereinigten Datensätzen wurden dann die Variogrammanalyse für die jeweiligen Gebiete durchgeführt. Das Variogramm für den westlichen Teil wurde mit einer Aussageweite von 7.500 bei einem Sill von 12 mit einem sphärischen Modell und einer Anisotropie von 0,6 in NNO-Richtung angepasst. Ein Nugget-Effekt musste nicht integriert werden. Der östliche Teil wurde mit einer Aussageweite von 2.700 bei einem Sill von 10 wiederum mit einem sphärischen Modell und einer Anisotropie von 0,5 in NNW-Richtung geschätzt. Anhand von diesen Strukturanalysen wurde die Flächenverteilung der Grundwasserhöhen mittels Kriging und unter Einbeziehung der linearen Trends geschätzt.

### **Fehleranalyse und Datenprüfung:**

Nach dieser Strukturanalyse erfolgt eine erneute Fehleranalyse am Datensatz. Hierzu wird eine Kreuzvalidierung (cross validation) durchgeführt. Dieses Testverfahren liefert einen verlässlichen Wert für die Güte eines statistischen Modells. Durch iteratives Entfernen eines Beobachtungspunktes aus der Menge der Messwerte und Interpolation auf diesen Punkt, erhält man eine Menge von Wertepaaren (interpolierte und gemessene Werte), deren Differenz (Residuen) man zur Bewertung der Interpolationsgüte heranziehen kann. Die hieraus gewonnene Datei lässt sich hinsichtlich hoher bzw. niedriger Residuen überprüfen und gibt Aufschluss über fehlerhafte Daten (Ausreißeranalyse).

### **Finale Interpolation:**

Nach der Interpretation des Semivariogramms und der erneuten Fehleranalyse per „cross validation“ wurde nun eine flächenhafte Datenschätzung durchgeführt, welche die zuvor ermittelten statistischen Merkmale beinhaltet. Die Interpolation wurde mittels dem geostatistischen (Universal-) „Kriging“-Verfahren durchgeführt. Dieses Verfahren ermittelt Werte an Orten, an denen keine Informationen vorliegen, durch Interpolation („Annäherung“) umliegender Messwerte. Bei der Anwendung des Kriging-Verfahrens wird die räumliche Korrelation der Daten berücksichtigt, sprich die Interpolation auf Basis des Semivariogramms durchgeführt. Der zuvor entfernte Trend der Daten wird bei der Interpolation wieder hinzugefügt. Das „Spacing“ zur Erstellung der Grid-files betrug bei der Interpolation „100“. Aus den Messwerten wurden durch die Interpolation, unter Berücksichtigung der festgelegten Wichtungsfaktoren (Scale, Range, Anisotropy), die geschätzten Variablen erzeugt. Resultat ist die Erstellung einer grid-Datei, aus welcher ein Isolinenplan (contour map) und ein ArcGIS© kompatibles shapefile (Export contours) erstellt werden kann.

Tab. 4: Eigenschaften der Variogramme

	Variogram_W	Variogram_E
<b>Experimental</b>		
Direction	40	170
Tolerance	30	30
Step Amount	10	10
Estimator Type	Variogram	Variogram
Max. Lag. Dist.	28.000	26.000
Number of Lags	186	173
Lag Width	150,53 (Auto)	150,28 (Auto)
Vertical Scale	50	42,2 (Auto)
<b>Model</b>		
Variogram Components	Spherical	Spherical
Scale	12	10
Length (A)	7.500	2.700
Anisotropy Ratio	0,6	0,5
Anisotropy Angle	160	350
<b>Statistics</b>		
X Histogram		
Active (X/Y/Z)	2.881 / 2.881 / 2.881	2.451 / 2.451 / 2.451
Original (X/Y/Z)	2.881 / 2.881 / 2.881	2.451 / 2.451 / 2.451
Excluded (X/Y/Z)	0 / 0 / 0	0 / 0 / 0

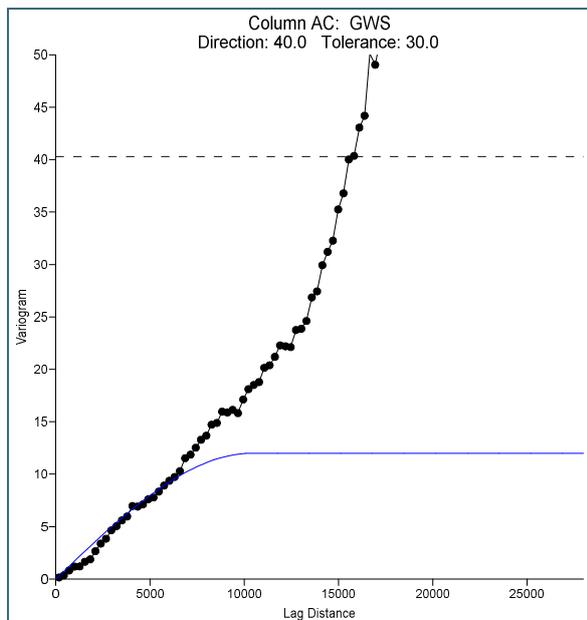


Abb. 9: Variogramm der Daten des westlichen Arbeitsgebietes

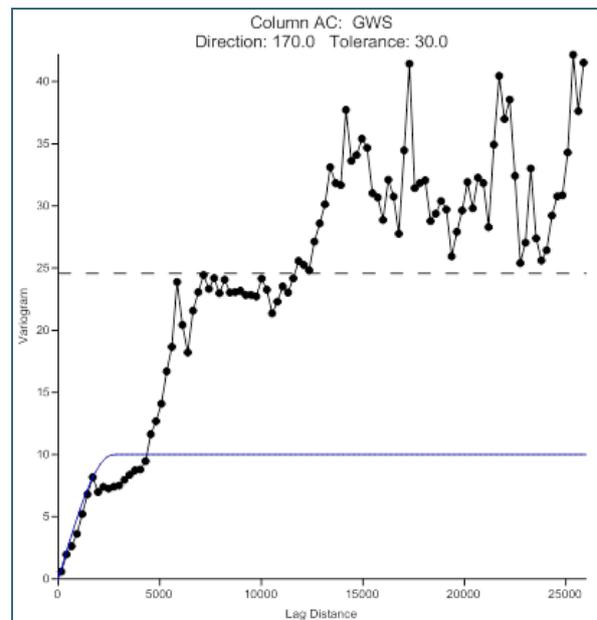


Abb. 10: Variogramm der Daten des östlichen Arbeitsgebietes

## Nacharbeitung

Die flächenhafte Interpolation erfolgte jeweils lückenlos für die gesamten Teilbereiche. Bereiche die zum Zeitpunkt der Stichtagsmessung grundwasserfrei waren, wurden im Nachgang der geostatistischen Interpolation durch den Verschnitt der geschätzten Grundwasserhöhenfläche mit der Basisfläche des quartären Grundwasserleiters detektiert und aus dem Gleichenplan herausgenommen. Zudem wurden Bereiche in denen sich nach der geostatistischen Interpolation ersichtliche hydraulisch unplausible Darstellungen ergaben (z. B. an den Rändern von Oberflächengewässern oder den Randbereichen des Grundwasserkörpers) manuell angepasst. In anschließend erfolgten Fachgesprächen mit Experten mit regionalen Detailkenntnissen, wurden ebenfalls wenige lokale, unplausible Interpretationen an die regionalen Erkenntnisse manuell korrigiert. Die finale Darstellung des Grundwassergleichenplans erfolgte mit einem Raster-Datensatz (Zellgröße 2 m), der in anderen Fachthemen weitergenutzt wurde (Flurabstände, Grundwassermächtigkeit).

## Finale Plausibilitätsprüfung

Der Verschnitt des finalen Rasters mit dem digitalen Geländemodell (DGM: 2 m horizontale Auflösung) zeigt Bereiche auf, wo das Grundwasser knapp unterhalb bzw. oberhalb der Oberfläche auftritt. Lokal konnten somit Hinweise auf mögliche gespannte (oder artesische) Verhältnisse im quartären Grundwasserleiter gewonnen werden. Dabei ist zu beachten, dass, durch räumliche Schätzung bei der Interpolation, sowie Ungenauigkeiten bzw. Artefakte im DGM, sich auch in der Interpretation der gespannten (artesischen) Verhältnisse Ungenauigkeiten ergeben können. Abschließend erfolgte eine Überprüfung des hydraulischen Gradienten, sowie die Interaktion mit Oberflächengewässern und Tiefbauwerken. Zusätzlich erfolgte ein erneuter Abgleich mit bereits vorhandenen, zum Teil hoch detaillierten und kleinräumigen Grundwassergleichenplänen. So konnten z. B. Bereiche mit geringer Datendichte optimiert werden, wie bereits oben beispielhaft erläutert.

## Attributierung

In der Darstellung des Grundwassergleichenplans sollten die verschiedenen hydraulischen Begebenheiten, sowie die Aussagesicherheit mitberücksichtigt werden. Hierfür sollten verschiedenen Signaturen der Grundwasserisolinien über eine Attributierung zugewiesen werden. Dabei stellte sich die Attributierung der Isolinien des quartären Hauptgrundwasserleiters (kurz: qHGWL) komplex dar. Es wurden insgesamt vier Kategorien und neun Szenarien (Situationen) festgelegt, die, abhängig von der jeweiligen (hydro-)geologischen Situation, zutreffen können. Diese sind in der Attributtabelle des Grundwassergleichenplans hinterlegt.

Eine Kurzübersicht über die definierten Kategorien I bis IV (bestätigt grundwassererfüllt / unbekannt bzw. fraglich / Sonderfälle / nicht grundwassererfüllt) und der Situationen 1 bis 9 ist in der Metadatenbeschreibung des Grundwassergleichenplans gegeben und nachgehend schematisch beschrieben.

### **Kategorie I (bestätigt grundwassererfüllt):**

Situation 1: Der qHGWL ist ziemlich sicher grundwassererfüllt [und/oder] eine Interaktion mit dem qHGWL ist vorhanden [und/oder] das fragliche Stockwerk ist angebunden an den qHGWL. Beispiel: Reguläre Verhältnisse des quartären HGWL-Stockwerks; zum Teil überlagernde (jüngere) Ablagerungen.

### **Kategorie II (unbekannt und fraglich):**

Situation 3: Verhältnisse sind unbekannt (keine Informationen/Messungen vorhanden) oder fraglich [und/oder] eine zumindest teilweise Interaktion mit dem qHGWL ist denkbar. Beispiel: zum Teil Talfüllungen; Hangrutschmassen; Hangbereiche Stadtgebiet.

Situation 8 (Moränengebiet): Die Grundwassersituation in Bezug auf den qHGWL ist fraglich oder unbekannt [und/oder] eine teilweise Interaktion zwischen dem Grundwasser der Moräne und des qHGWL ist denkbar.

**Kategorie III (Sonderfälle grundwassererfüllt):**

Situation 4: Der qHGWL ist, zumindest zeitweise (z. B. bei Hochwassersituation), mit Grundwasser erfüllt. Beispiel: Bereich Solln; OSM der Aubinger Lohe.

Situation 9: Der qHGWL ist mit ziemlicher Sicherheit grundwassererfüllt und es treten flächenartig „deckende“ Mergel auf, die zu gespannten Grundwasserverhältnissen führen können.

Situation 6 (Moränengebiet): Der qHGWL ist wahrscheinlich mit Grundwasser erfüllt [und/oder] eine Interaktion zwischen dem Grundwasser der Moräne und des qHGWL ist wahrscheinlich. Zudem können bereichsweise (zusätzlich) unabhängig agierende, lokale Grundwasserkörper ausgeprägt sein. Beispiel: Moränen, die direkt älteren Schotterkörpern auflagern.

**Kategorie IV (nicht grundwassererfüllt):**

Situation 2: Der qHGWL ist mit ziemlicher Sicherheit nicht grundwassererfüllt [und/oder] es besteht keine Interaktion mit dem qHGWL [und/oder] das fragliche Stockwerk ist nicht angebunden an den qHGWL. Beispiel: OSM Aufragungen, Hangbereich zwischen Würm und Buchendorfer Hochfläche, Hangkanten entlang der Isar (Quellaustritte, Grenze zwischen Quartär und Tertiär).

Situation 7 (Moränengebiet): Der qHGWL ist wahrscheinlich nicht mit Grundwasser erfüllt bzw. nicht vorhanden [und/oder] eine Interaktion zwischen dem Grundwasser der Moräne und des qHGWL ist unwahrscheinlich. Zudem können bereichsweise unabhängig agierende, lokale Grundwasserkörper ausgeprägt sein. Beispiel: Moränen, die direkt der OSM auflagern.

Situation 5: Der qHGWL ist wahrscheinlich nicht mit Grundwasser erfüllt [und/oder] höchstens zeitweise mit Grundwasser erfüllt. Beispiel: Abschnitte des qHGWL, die zumeist (abgeschlossen) oberhalb des quartären Grundwasserspiegels liegen und ggf. als lokaler, eigenständiger GWL fungierend. Nur bei hohem Grundwasserstand sind die überlagernden Schotter in diesen Bereichen grundwassererfüllt.

Anmerkung: Kategorie IV bzw. Situation 2, 5 und 7 wurden im Grundwassergleichenplan ausgespart. Die Auflistung sei nur der Vollständigkeit halber gegeben.

### **3.3.3 Beschreibung und Interpretation der Grundwassergleichen im quartären Hauptgrundwasserleiter**

#### **3.3.3.1 Allgemeines**

Der erarbeitete Grundwassergleichenplan zeigt generalisiert die Grundwasserhöhengleichen des quartären Hauptgrundwasserleiters zum Zeitpunkt der durchgeführten Stichtagsmessung im April 2014 in der Ausdehnung und auf dem Maßstab der ganzen Münchner Schotterebene. Aufgrund der relativ guten flächenhaften Abdeckung konnte gemäß der Bearbeitungsskala eine detaillierte Erfassung der Grundwasserverhältnisse dargestellt werden. In der Stadt München ist der Detaillierungsgrad generell durch die höhere Messpunktdichte höher als im Umland. Es können aber, wie oben bereits erwähnt, je nach Situation eng begrenzte lokale Abweichungen auftreten, die im Grundwassergleichenplan nicht berücksichtigt werden konnten. Daher ersetzt die Darstellung keine Detailuntersuchungen für wasserwirtschaftliche, wasserrechtliche oder baugrundtechnische Fragestellungen, sondern gibt einen guten regionalen Über-

blick für einen frühen Planungszustand. Fragliche Bereiche und Gebiete sehr geringer Datendichte, sowie Areale, in denen entweder kein quartärer Hauptgrundwasserleiter ausgebildet ist bzw. keine Interaktion mit diesem besteht, wurden in der Darstellung gemäß der Attributierung ausgespart (Abb. 11).

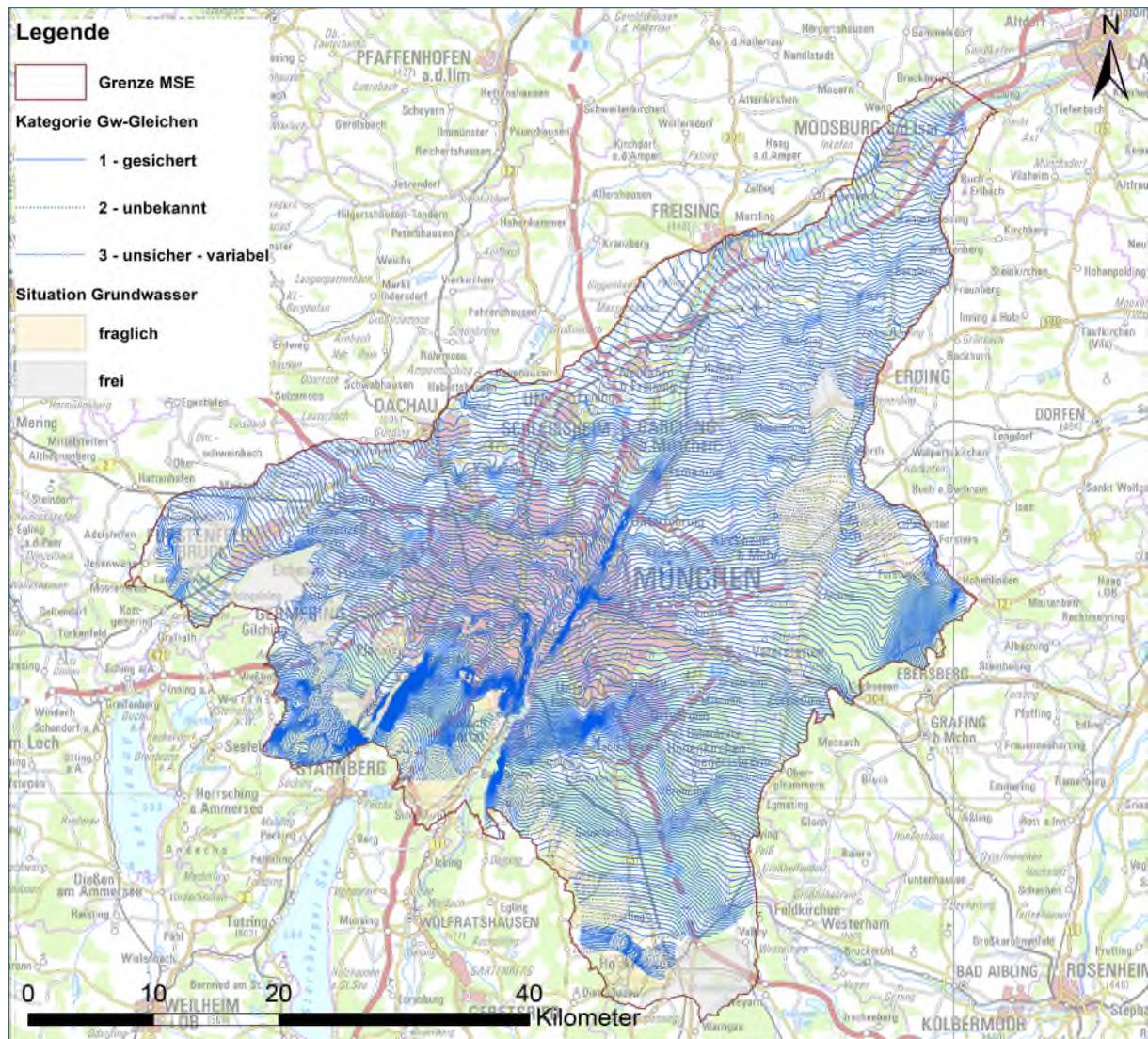


Abb. 11: Übersichtsplan der Isolinien (mit Attributierung) des quartären Hauptgrundwasserleiters der Münchner Schotterebene (MSE). Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind als „fraglich“ oder „frei“ gekennzeichnet.

Allgemein verlaufen die Grundwasserisolinien des quartären Hauptgrundwasserleiters abfallend von Süden nach Norden (Abb. 11 und Abb. 12). Die Höhen der Isolinien des quartären Grundwasserleiters der Münchner Schotterebene liegen bei maximal 620 m ü. NN im Süden bis zu 399 m ü. NN am Nordrand der Ebene. Die Grundwassergleichen sind flächendeckend über die Münchner Schotterebene interpoliert, wobei die Verteilung der 5368 Stützpunkte etwas heterogen ist. Die Messungen im Stadtgebiet München – im Vergleich zum Umland – sind deutlich erhöht. Allgemein ist die Verteilung der Messpunkte über das Arbeitsgebiet jedoch relativ gleichmäßig, so dass nur wenige Bereiche nicht durch Messungen abgedeckt sind. Die Isolinien verlaufen in gesicherten Verhältnissen (Kategorie I) größtenteils relativ parallel in Richtung Norden bzw. Nordosten. Im Bereich größerer Vorfluter, z. B. der Isar, ist ein deutliches Umbiegen der Gleichen gemäß der hydraulischen Wirkung zu beobachten. Generell zeigen die Isolinien im Bereich des Stadtgebietes, aufgrund der höheren Punktdichte und anthropogener, aber auch natürlicher hydraulischer Einflüsse, einen heterogeneren Verlauf als im Umland Münchens (Abb. 12).

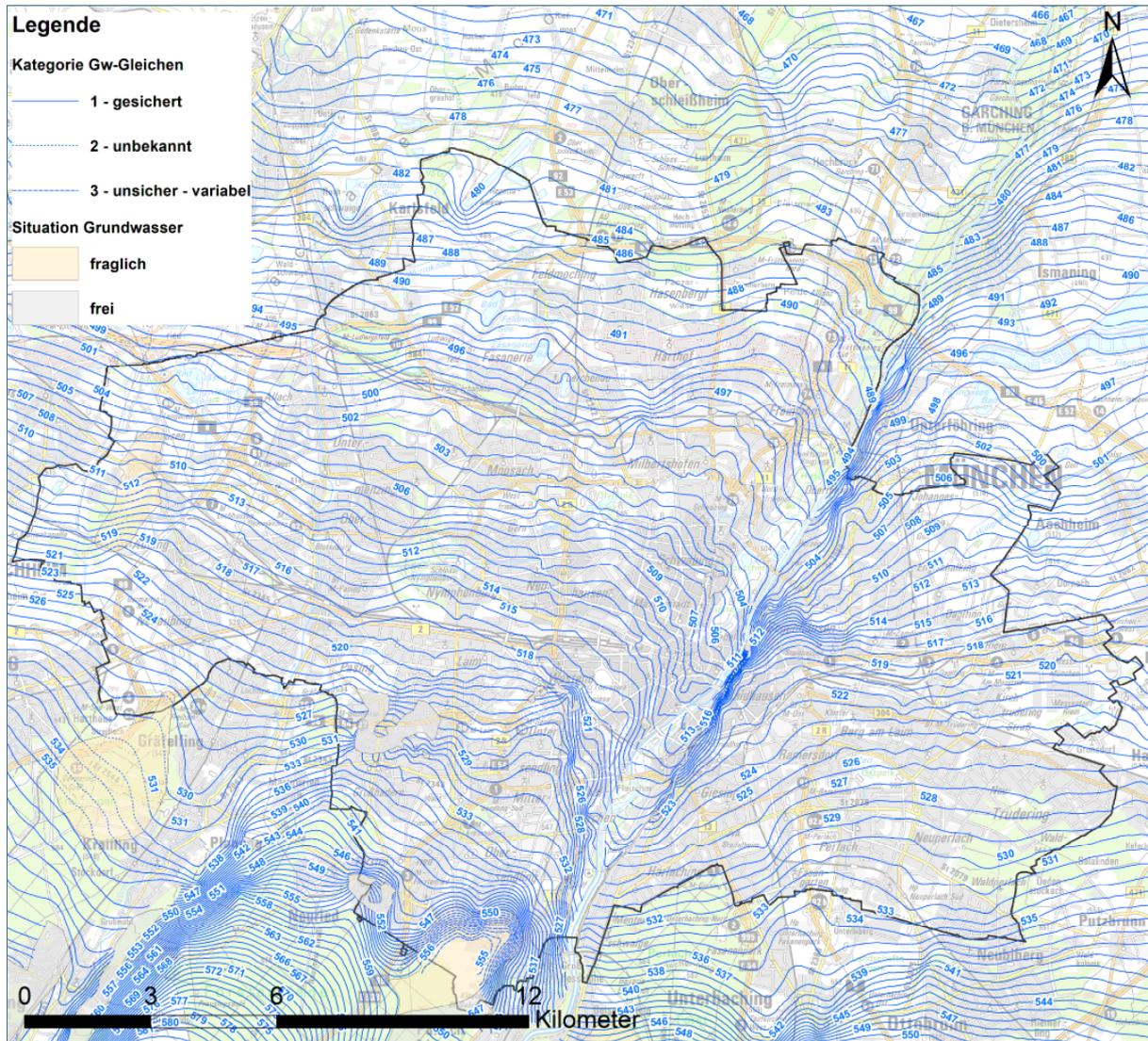


Abb. 12: Übersicht über den Verlauf der Grundwassergleichen des quartären Hauptgrundwasserleiters im Bereich des Stadtgebietes München. Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind als „fraglich“ oder „frei“ gekennzeichnet.

Es wurden außerdem Bereiche im Grundwassergleichenplan markiert, in denen die Grundwassersituation fraglich oder unsicher ist und die Isolinien keine hohe Aussagesicherheit aufweisen konnten (Kategorie II bzw. III). Bereichsweise kann auch davon ausgegangen werden, dass einerseits der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht oder nur mit einer sehr geringen Mächtigkeit ausgeprägt ist, oder andererseits die Datenlage ungenügend war um die Grundwassersituation adäquat zu beschreiben (ausgesparte Bereiche – Kategorie IV). Es ist nochmals darauf hinzuweisen, dass die dargestellten Grundwassergleichen einen mittleren Niedrigwasserstand zum Zeitpunkt der Stichtagsmessung im April 2014 abbilden. Schwankungen der Grundwasserstände im Bereich von zum Teil mehreren Dezimetern bis Metern, je nach Jahreszeit und Niederschläge, sind möglich und sollten in Planungen immer berücksichtigt werden (siehe Grundwasserdynamik Kapitel 5).

Nachfolgend werden einzelne Gebiete bzw. hydraulische Situationen und Sonderfälle im Grundwassergleichenplan erläutert:

### 3.3.3.2 Gespannte und artesische Grundwasserverhältnisse

Die Überprüfung auf mögliche gespannte oder artesische Grundwasserverhältnisse ist eine sinnvolle Ergänzung zum quartären Grundwassergleichenplan. Der Verschnitt von DGM und interpoliertem Grundwassergleichenplan liefert zwei relevante, flächenhaft darstellbare Kategorien (Situation 1 und 2), welche durch drei weitere Kategorien (Situation 3 bis 5) ergänzt wurden.

**Situation 1** zeigt Bereiche, in denen die Grundwasseroberfläche knapp unter der Geländeoberkante liegt (Flurabstand zwischen 1 m – 0 m). Flächendeckend treten diese Bereiche vor allem in der nördlichen Schotterebene auf. Hier sind die Flurabstände generell deutlich geringer ausgebildet als im südlichen Teil. Der Abstand der geringleitenden „Oberen Süßwassermolasse“ zur Geländeoberkante nimmt in Richtung Norden immer weiter ab, was zu einem Auskeilen des quartären Schotterkörpers führt. Diese Verhältnisse finden sich somit zumeist in den ausgewiesenen Mooren und Moosgebieten im Norden, sowie in Talauen der Fließgewässer. Lokal werden Gebiete mit geringen Flurabständen von bindigen Deckschichten überlagert, die möglicherweise gespannte Verhältnisse des Grundwassers nach sich ziehen und punktuell durch Bohrungen belegt sind.

**Situation 2** beschreibt Bereiche, in denen, durch den Verschnitt zwischen den Grundwassergleichen und dem digitalen Geländemodell, nur eine geringe und zum Teil auch negative Differenz besteht. Das heißt, dass in diesen Arealen die Grundwasseroberfläche auf ähnlicher Höhe wie die GOK liegt. Kleineräumig kann das Niveau der Grundwasseroberfläche das der Geländeoberkante geringfügig überragen, was aber auch durch die Ungenauigkeiten in der Interpolation, verursacht durch eine geringere Datendichte, bedingt sein kann. Auch im Bereich der ausgesparten Bereiche, z. B. Hochflächen der OSM und deren direkter Umgebung, kann es zu negativen Werten im Verschnitt kommen. Im Bereich großflächiger Vernässungszonen, wie in Mooren, Moosen und Talauen, führen die generell geringen Flurabstände in diesen Bereichen, zu negativen Differenzen im Verschnitt, wobei bereichsweise ein Austritt von Grundwasser auf Höhe der GOK angenommen werden kann und plausibel ist. Jedoch sind auch hier in Kombination mit einer geringen Datendichte Unsicherheiten in der Interpolation und des DGMs vorhanden, welche zu Ungenauigkeiten in der Bestimmung von gespannten und artesischen Bereichen führt. Generell aber ist festzustellen, dass der Verschnitt zwischen dem Grundwassergleichenplan und der GOK (aus dem DGM) wertvolle Hinweise auf gespannte und artesische Bereiche liefert, welche jedoch immer auf Plausibilität geprüft werden müssen.

Situation 3 und 4 beinhaltet analysierte Punktdaten, die Hinweise auf gespannte oder artesische Verhältnisse liefern. Ein aktueller Datensatz aus der Datenbank (BIS-BY) des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) wurde dahingehend überprüft, bei welchen der im quartären Grundwasserleiter verfilterten Objekte, Hinweise auf gespannte oder artesische Verhältnisse hinterlegt sind. Da zumeist freie Grundwasserverhältnisse zu erwarten waren, lieferte diese Analyse nur 80 Messobjekte, welche je nach lokaler Verteilung zu Arealen möglicher gespannter Verhältnisse (Situation 3) zusammengefasst wurden. Zumeist können vorhandene, überlagernde Deckschichten als Ursache dieser Verhältnisse angesehen werden. Artesische Verhältnisse konnten punktuell nur einmal nachgewiesen werden (östlich Eitting im nördlichen Arbeitsgebiet), wobei die Datenlage in diesem Fall als unsicher einzustufen ist (Situation 4).

**Situation 5** bezieht sich auf die im Stadtgebiet ausgewiesenen Bereiche der „deckenden Mergel“, welche lokal als Ursache gespannter Grundwasserverhältnisse gesehen werden. Auftragende und deckende Mergel werden nachgehend genauer erläutert.

Generell bieten **Situation 1 bis 5** Hinweise auf gespannte Verhältnisse, die punktuell durch Bohrdaten verifiziert werden können. Die Bereiche der flächenhaft vermuteten Verhältnisse ergänzen sich zu-

meist mit den punktuellen Daten, was das potentielle Auftreten von gespannten und artesischen Verhältnissen bekräftigt. Die Visualisierung der gespannten und artesischen Verhältnisse ist dem digitalen Datensatz oder Abb. 13 des Grundwassergleichenplans (Zosseder 2015) zu entnehmen.

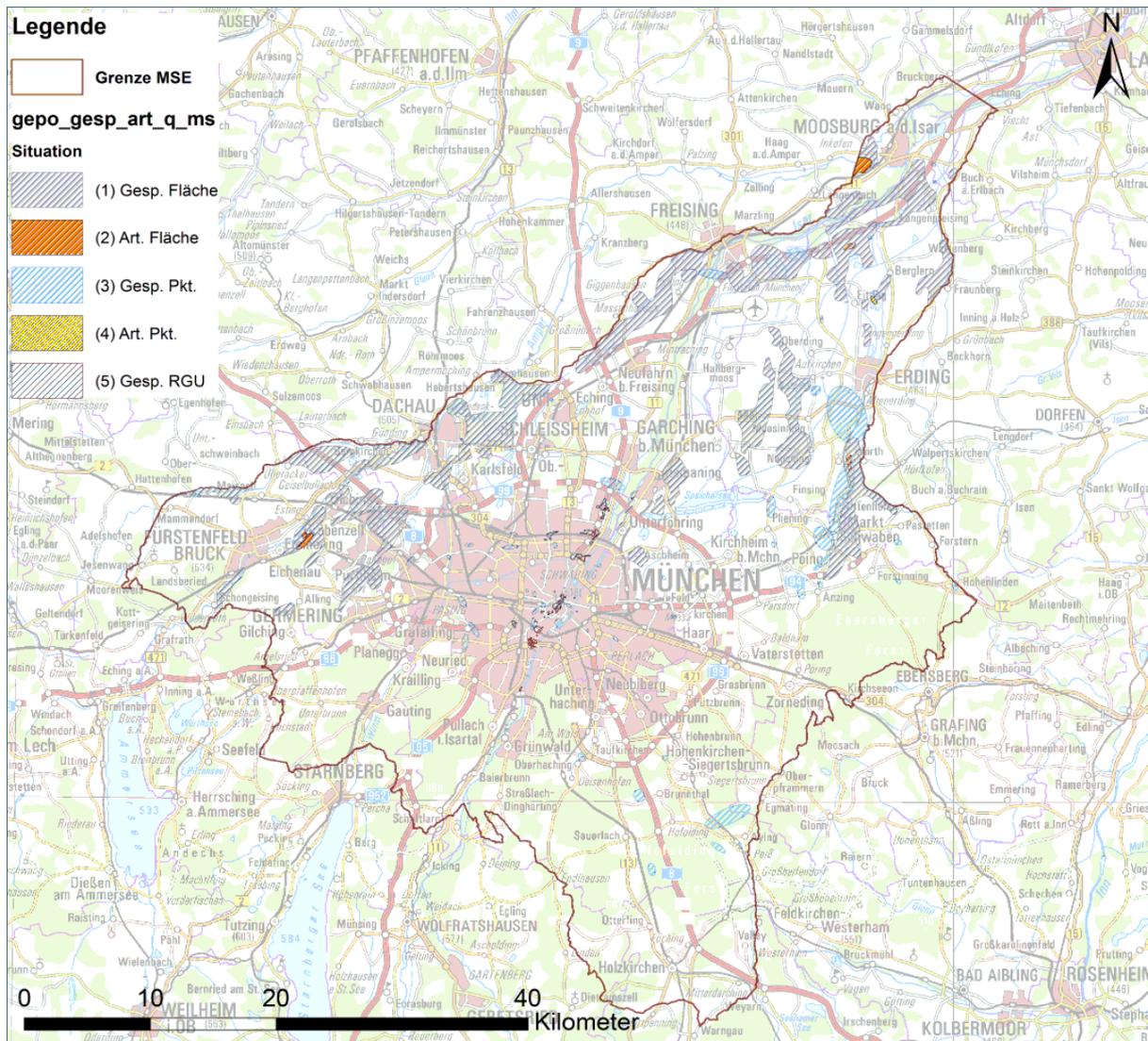


Abb. 13: Darstellung der Situationen 1 bis 5 (Hinweise auf gespannte / artesische Verhältnisse) im Bereich der Münchner Schotterebene

### 3.3.3.3 Aufragende und deckende Mergel im Stadtgebiet

Im Stadtgebiet, besonders im Bereich der Altstadtstufe westlich der Isar, der Niederterrasse und des Isaralluviums, treten lokal aufragende und deckende tertiäre Mergel auf. Die aufragenden Mergel stellen Bereiche dar, in denen die grundwasserstauend ausgebildete Oberfläche der Oberen Süßwassermolasse, im Gegensatz zu den weit verbreiteten sandig ausgeprägten hydraulischen Fenstern, weniger erodiert wurde als die umliegenden Bereiche. Diese inselartig aufragenden Erhöhungen werden in der Regel vom Grundwasser des quartären Grundwasserleiters umflossen und bilden somit Bereiche aus, die zumindest die meiste Zeit frei von oberflächennahem Grundwasser sind. Bei den sogenannten deckenden Mergeln handelt es sich um ausgeprägte stauende Lagen, unter denen das Grundwasser hindurchströmt und dieses quasi abdeckt. Lokal können sich hierbei gespannte Grundwasserverhältnisse ausbilden (Abb. 14) (Dohr & Gruban, 1999, S. 18).

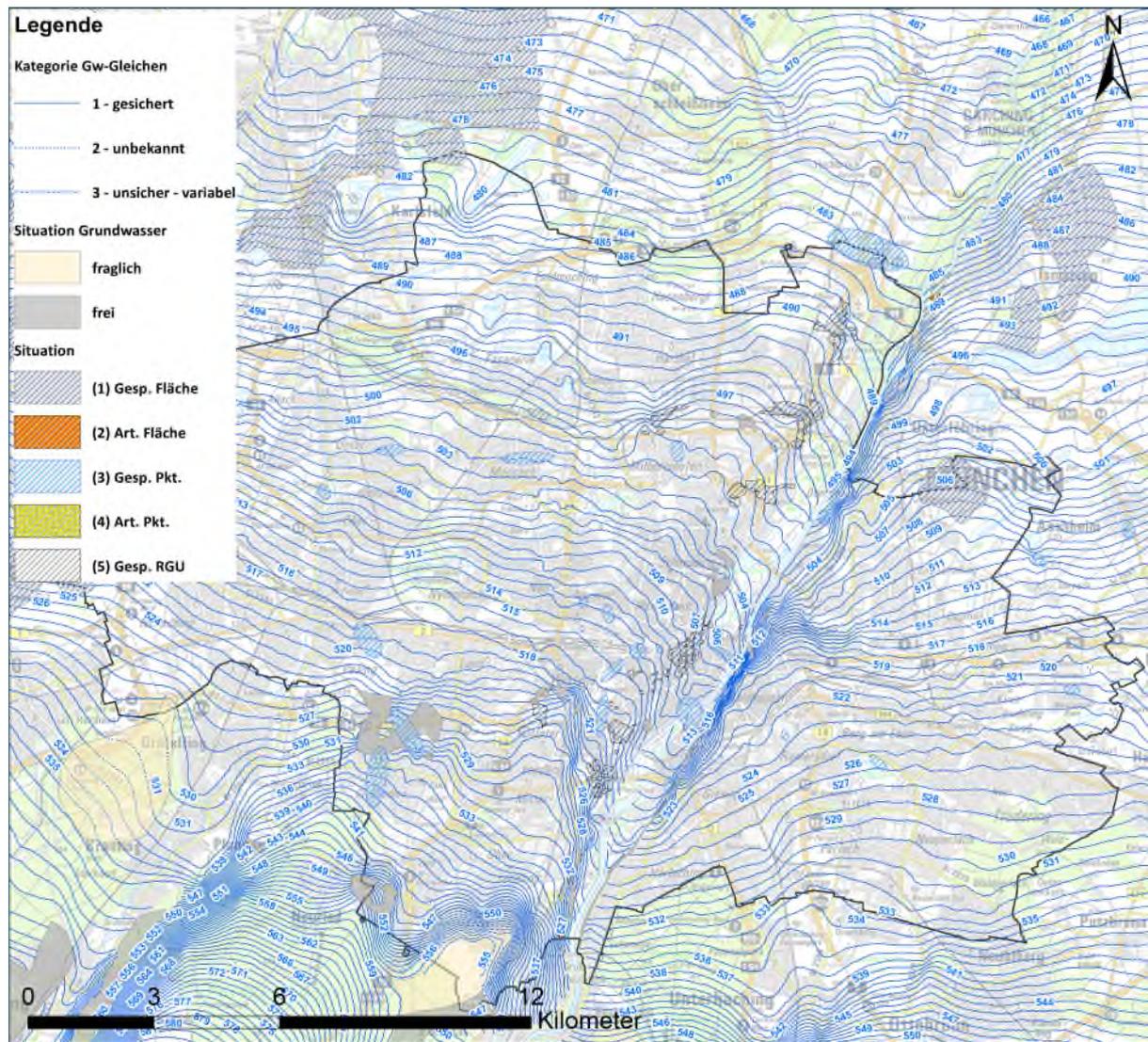


Abb. 14: Aufragende Mergel (entspricht „Situation Grundwasser: frei – grau“) und deckende Mergel (entspricht „Situation: (5) Gesp. RGU – schwarz schraffiert“) im Stadtgebiet München

### 3.3.3.4 Hangbereiche, Terrassenkanten und Quellen

Im Bereich der Schotterebene gibt es zahlreiche Hangbereiche und Terrassenkanten, die eine komplexe hydrogeologische Situation hervorrufen. Der Hangbereich östlich des Würmtals wird im betreffenden Abschnitt (siehe Würmtal) erläutert. Die Hangbereiche entlang der Isar sind, vor allem im südlichen Teil, durch sehr heterogene Ablagerungsverhältnisse gekennzeichnet. Die durch Hangbewegung umgelagerten Schotter des Quartärs mit eingelagerten Nagelfluhbänken, die lokal aufgeschlossene Grenze zur Oberen Süßwassermolasse mit zahlreichen Quellaustritten aufgrund ihrer geringleitenden Sedimente an der Oberfläche, sowie die flächig auskartierten Hangrutschungsbereiche, machen eine lokale eindeutige hydrogeologische Einordnung schwierig. Die erbohrten Grundwasseraufschlüsse in diesen Bereichen können auch lokale, hangende Grundwasserstockwerke darstellen, die vom teilweise überlagernden quartären Hauptgrundwasserleiter gespeist werden und entlang des Isartals zu Tage treten. Diese heterogenen Verhältnisse in die großflächige Interpolation mit zu integrieren ist nicht sinnvoll. In Richtung Stadtgebiet München nehmen die Hangrutschungsbereiche, aufgrund der weniger extremen Eintiefung der Isar, ab und die Terrassenkanten der quartären Schotterkörper lassen sich deutlich von den holozänen Ablagerungen der Talauen abgrenzen. Entlang der Terrassenkanten, vor allem im südlichen Stadtgebiet, tritt die ausstreichende Obere Süßwassermolasse zutage.

Aufgrund der lokal ausgebildeten, feinkörnigen und stauenden Oberfläche der OSM, kommt es zu zahlreichen Quellaustritten, also zu einer Entwässerung des quartären Grundwasserkörpers, entlang der Isarhänge. Es findet durch den Anschnitt eine Unterbrechung des quartären Grundwasserstroms zur Isar hin statt, was an markanten Grundwasserpotentialunterschieden benachbarter Messstellen zu beobachten ist. Im Bereich des holozänen Talalluviums lässt sich eine Kommunikation mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter westlich und östlich der Isar teilweise interpretieren, da eine Trennung von den höhergelegenen Terrassenschottern nicht gänzlich ausgeprägt ist. Bereiche der Terrassenkanten, mit aufgeschlossenem Übergang zwischen quartären und tertiären Ablagerungen und markanten Quellaustritten, wurde bei der Interpolation ausgespart. Ist ein fließender Übergang zwischen Terrassenschotter und Alluvium ohne Unterbrechung gegeben, konnten die Isolinien in diesen Bereichen durchgehend dargestellt werden.

### 3.3.3.5 Oberflächengewässer, Baggerseen und Kiesgruben

Generell besteht beim Großteil der fließenden und stehenden Oberflächengewässer eine Interaktion mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter. So konnten neben den großen Fließgewässern wie Isar, Amper und Würm, die meisten Wasserspiegel der stehenden Gewässer, wie Baggerseen oder Kiesgruben, in den Grundwassergleichenplan eingearbeitet werden. Neben dem Speichersee im NE von München und den Bächen im Englischen Garten, waren es vor allem kleinere Tümpel und Seen, die hydraulisch nicht an den quartären Grundwasserleiter angebunden waren, da sie beispielweise von einer grundwasserstauenden Schicht unterlagert sind. Zum Teil sind Fließgewässer auch kanalisiert, was in Abweichungen der Wasserspiegel zur Umgebung deutlich wird. Einen Sonderfall nimmt auch hier wieder die Würm ein (siehe Würmtal). Zu den stehenden Oberflächengewässern zählen auch zahlreiche Kiesgruben in der Münchner Schotterebene. Diese korrespondieren zumeist direkt mit dem quartären Grundwasserleiter und lassen sich generell gut in den Grundwassergleichenplan einbinden. Besteht noch ein aktiver Abbau, kann der Wasserspiegel jedoch lokal abgesenkt sein.

### 3.3.3.6 Lokale Sonderfälle

Im Bereich **München-Solln** im südlichen Stadtgebiet, liegt eine seit langem bekannte und bei Planern diskutierte komplexe hydrogeologische Situation vor. Eine intensive fachliche Untersuchung ist jedoch immer noch ausstehend. In diesem Bereich tritt ein zungenartiger Ausläufer der OSM (Forstenried-Solln-Hochfläche, siehe Quartärbasis Kapitel 3.2) als eine Fortsetzung der Buchendorfer Hochfläche auf. Diese Aufragung kann ein möglicher Grund sein, dass bei generell niedrigem Grundwasserstand im Bereich Solln zum Teil kein Grundwasser in den vorhandenen Messstellen angetroffen wurde. Ob die Aufragung dabei inselartig umflossen wird (vgl. aufragende Mergel), oder der gesamte Bereich trockenfällt, konnte mit der bis dato vorhandenen Datengrundlage bislang nicht eindeutig geklärt werden. Zudem treten in diesem Bereich mergelige Nagelfluhbänke auf, welche die Grundwasseroberfläche des quartären Grundwasserleiters erheblich beeinflussen können. Deren Verbreitung ist vor allem in einem breiten Streifen zwischen der Parkstadt Solln und der Isar durch Bohrdaten nachweisbar. Die Ausbildung lokaler, hangender Grundwasserstockwerke, welche möglicherweise sogar mit dem oberflächennahen tertiären Grundwasserstockwerk (sandige Ausprägung der tertiären Mergel) korrespondieren, ist realistisch.

Südlich an Solln anschließend verläuft die **Pullacher Rinne**. Diese verläuft von Südwesten in Richtung Nordosten nach Pullach und mündet dort in die Isar (siehe Quartärbasis Kapitel 3.2). Der Hauptgrundwasserzustrom in die Pullacher Rinne erfolgt im Bereich Baierbrunn aus südöstlicher Richtung. Laut Blasy (1974) gibt es entlang der Pullacher Rinne nur kleine lokale Zuströme in Richtung Isar durch die Hangrutschungsbereiche, da die Pullacher Rinne durch einen Tertiärrücken von der Isar abgetrennt ist (siehe Quartärbasis Kapitel 3.2). Dies erklärt zudem die fehlenden Quellaustritte parallel zur Pullacher Rinne. Zudem erfolgt eine Behinderung des Grundwasserflusses in Richtung Isar durch auftretende Nagelfluhbänke. Im NW-Bereich der Rinne, Richtung Buchendorfer Hochfläche, kommt es zu einer lokalen

Aufragung der Oberen Süßwassermolasse. Hier liegen Teile eines Höhenrückens oberhalb der Grundwasser Oberfläche, was einen Grundwasseranstrom aus Westen in Richtung Pullacher Rinne unterbindet. Aufgrund der tertiären Aufragung und der komplexen hydraulischen Situation, sowie einer generell geringen Datendichte in diesem Gebiet, wurde dieser Bereich im Grundwassergleichenplan ausgespart.

Der Bereich der Deponie in München-Fröttmaning ist durch das Klärwerk, den Deponieberg und die Mülldeponie stark anthropogen beeinflusst. In diesem Bereich kann es zu einer starken Heterogenität im Fließverhalten des Grundwassers im quartären Grundwasserkörper kommen. Im Bereich Landsberied – Jesenwang – Hirschthürl besteht ein Einfluss der östlich gelegenen und direkt von der Oberen Süßwassermolasse unterlagerten Altmoräne. Zusätzlich erschwert der hydraulische Einfluss einer vorhandenen Deponie die hydrogeologische Interpretation der Daten. Zwischen Germering und Krailling wurde durch Bohrdaten eine tertiäre Erhöhung nachgewiesen. Die Oberfläche der vermutlich inselartigen Aufragung überragt die Grundwasser Oberfläche und kann, zumindest bei Niedrigwasserverhältnissen, zu einem Trockenfallen dieses Bereichs führen. Der Bereich südwestlich von Gauting wurde ausgespart, da sich in diesem Bereich eine tertiäre Aufragung befindet, welche die Grundwasser Oberfläche des quartären Grundwassers überragt (Blasy 1974, S. 29). Diese Aufragung trennt ebenfalls das quartäre Grundwasserstockwerk im Westen von der Würmtalrinne im Osten. Ein Zufluss zur Würmtalrinne aus Richtung Westen ist in diesem Gebiet daher nicht zu erwarten. Ggf. können lokale Bereiche grundwassererfüllt sein, eine vollständige Interaktion scheint aufgrund der geologischen Gegebenheiten unwahrscheinlich. Im Bereich Kirchseeon gibt es ein belegtes, zweites Grundwasserstockwerk im Quartär. Das zweite Stockwerk wurde in die Erstellung des Grundwassergleichenplans nicht mit einbezogen, da es sich um einen lokal begrenzten, eigenständigen Grundwasserkörper handelt. Auch im Bereich Oberbrunn bis Unterbrunn gibt es einen lokalen, quartären Grundwasserkörper. Dieser liegt der dort abgelagerten Rissmoräne auf und wurde durch eine Messung nachgewiesen. Im Bereich Höhenkirchen – Valley befindet man sich am Randbereich der quartären Schotterebene. Es zeigt sich, dass in diesem Bereich zum Großteil kein Grundwasser mehr im quartären Hauptgrundwasserleiter angetroffen wird. Die nach Norden vorstoßend ausgeprägte Obere Süßwassermolasse bildet eine zungenartige Erhöhung, welche die Grundwasser Oberfläche überragt. Im Mangfalltal ist wiederum eine Förderung von Grundwasser aus den quartären Sedimenten möglich. Wie auch schon bei Schirm (1968) beschrieben, laufen die Grundwassergleichen an dieser Grenze aus.

### **3.3.3.7 Würmtal: Hydrogeologische Situation und Interaktion mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter**

Das Würmtal, welches im Arbeitsgebiet durch den Moränengürtel im Süden bis nach Dachau im Norden verläuft, stellt eine im südlichen Teil in die Obere Süßwassermolasse eingetieft Rinnenstruktur dar, die nach Norden immer weiter abflacht (siehe Quartärbasis Kapitel 3.2) und mit Schotter sowie holozänen Flussablagerungen gefüllt ist. Besonders drastisch ist die Eintiefung im Bereich Mühlthal und der an der Grenze zwischen Quartär und OSM austretenden Mühlthaler Quellen. Laut Blasy (1974) handelt es sich beim Würmtal bzw. bei der sog. Würmtalrinne, um einen eigenständigen Grundwasserkörper, der weder mit dem östlichen noch mit dem westlichen (quartären) Hauptgrundwasserleiter in direktem Kontakt steht. So verhindert ein Ausläufer der OSM im Bereich Gauting einen Zufluss von Grundwasser in das eingetieft Würmtal von Westen (siehe Quartärbasis Kapitel 3.2). Im Osten des Würmtals schließt ein weiteres tertiäres Hochgebiet (Buchendorfer Hoch) an. Der hier vorhandene Kamm- und Hangbereich schließt einen Zustrom von Grundwasser nach Westen, von dem nach Nordost abfallenden Buchendorfer Hoch, aus. Das Grundwasser des quartären Hauptgrundwasserleiters fließt in diesem Gebiet in nördliche bzw. nordöstliche Richtung ab. Erst im Bereich der südlichen Stadtgrenze interagiert der Grundwasserkörper des Würmtals mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter, da das Würmtal hier weniger stark eingetieft ist. Trotz dieser Sondersituation, wurde der lokale Grundwasserkörper des Würmtals in

den Grundwassergleichenplan mit aufgenommen, da er sich in Richtung Norden mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter vereinigt (vgl. Profil in Abb. 16 und Legende Abb. 15).

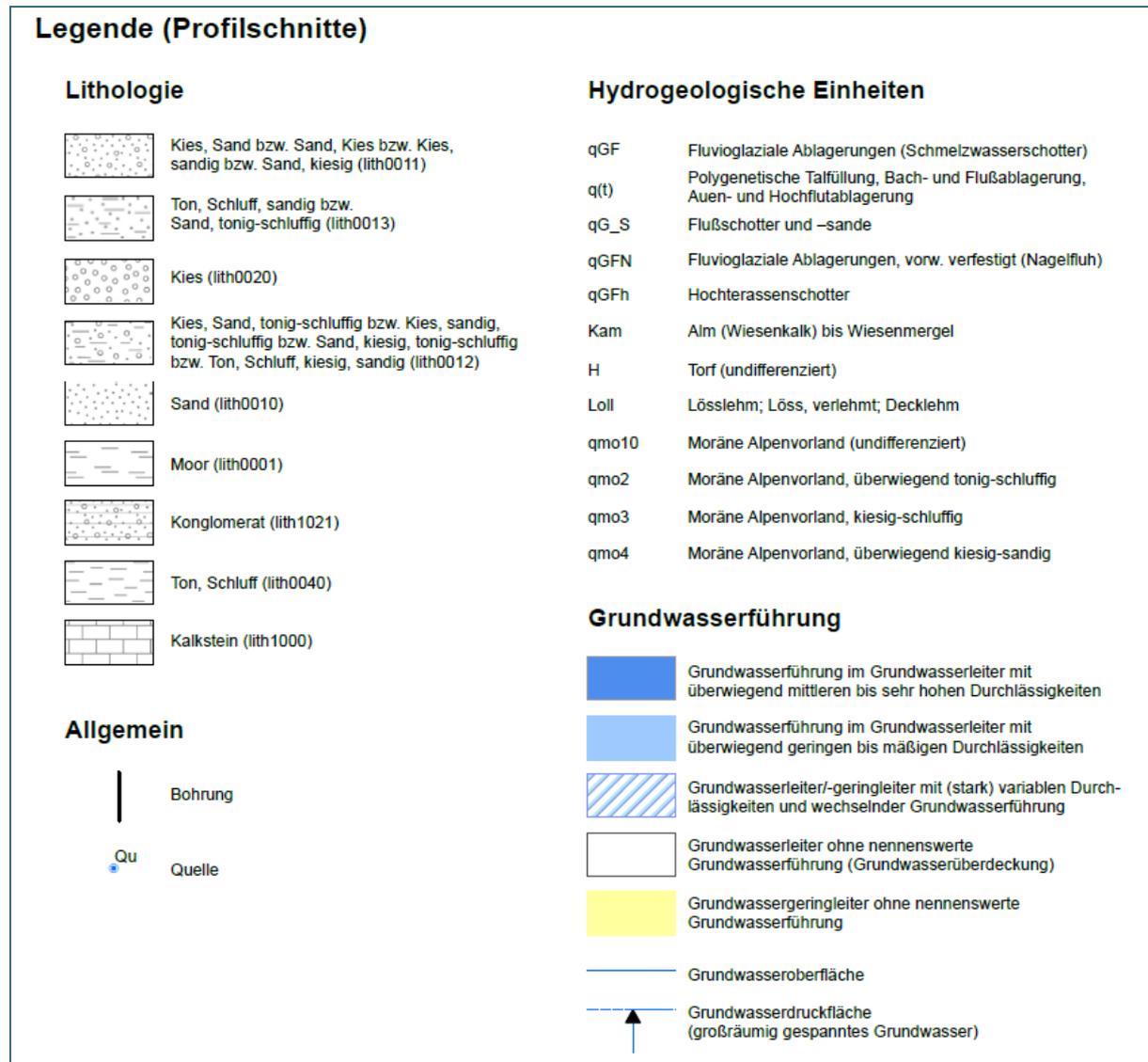


Abb. 15: Legende zu den nachfolgenden Profilschnitten (Zosseder, 2015)

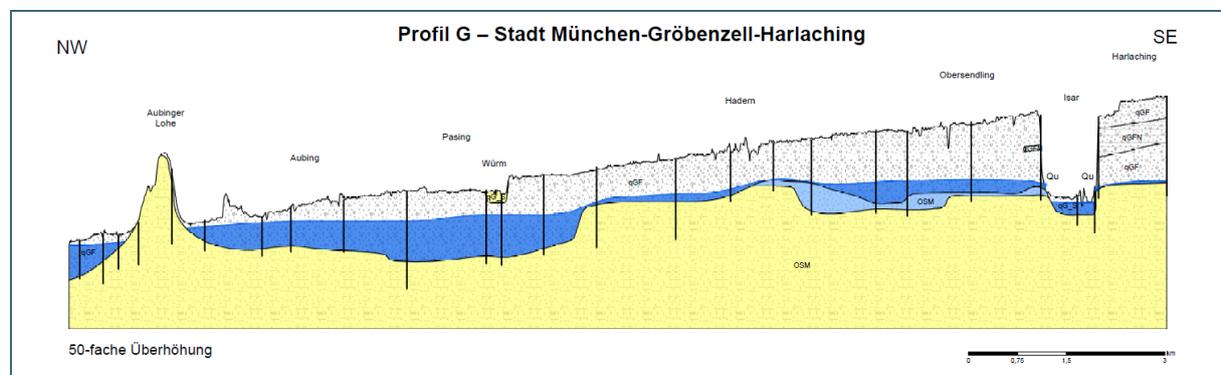


Abb. 16: Situation der Würm auf Höhe des Stadtgebietes (mit Anbindung an den quartären Hauptgrundwasserleiter) (Zosseder, 2015)

Auch die Messungen des Wasserspiegels der Würm belegen, dass dieser zumindest im Süden nicht direkt mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter korrespondiert. So liegen zwischen den Messwerten der Oberflächengewässer-Messpunkten der Würm und den benachbarten Grundwassermessstellen Differenzen von bis zu 15 m. Diese Unterschiede sind vor allem im südlichen Bereich markant, wo sich das Würmtal in die Obere Süßwassermolasse eingetieft hat (vgl. Profil in Abb. 17 und Legende Abb. 15). Nach Norden erfolgt eine Abnahme der Differenzen, bis sich auf der Höhe des Karlsfelder Sees ein vergleichbarer Grundwasserstand einstellt und zumindest von einer teilweisen Interaktion der Würm und des quartären Grundwasserleiters ausgegangen werden kann. Bis dorthin exfiltriert die Würm in den quartären Grundwasserleiter, steht aber nicht in direktem Austausch mit diesem (Blasy 1974, S. 50-52). Das Oberflächenwasser fließt hierbei wohl über mäßig undurchlässige holozäne Feinsedimente in Richtung Norden, so dass nur wenig Wasser direkt in den Untergrund versickert. Die Exfiltration im südlichen Bereich speist zudem wohl nur die Würmtalrinne, da hier, wie bereits oben beschrieben, keine direkte Interaktion zwischen lokalem Grundwasserleiter des Würmtals und umliegendem quartärem Hauptgrundwasserleiter stattfindet.

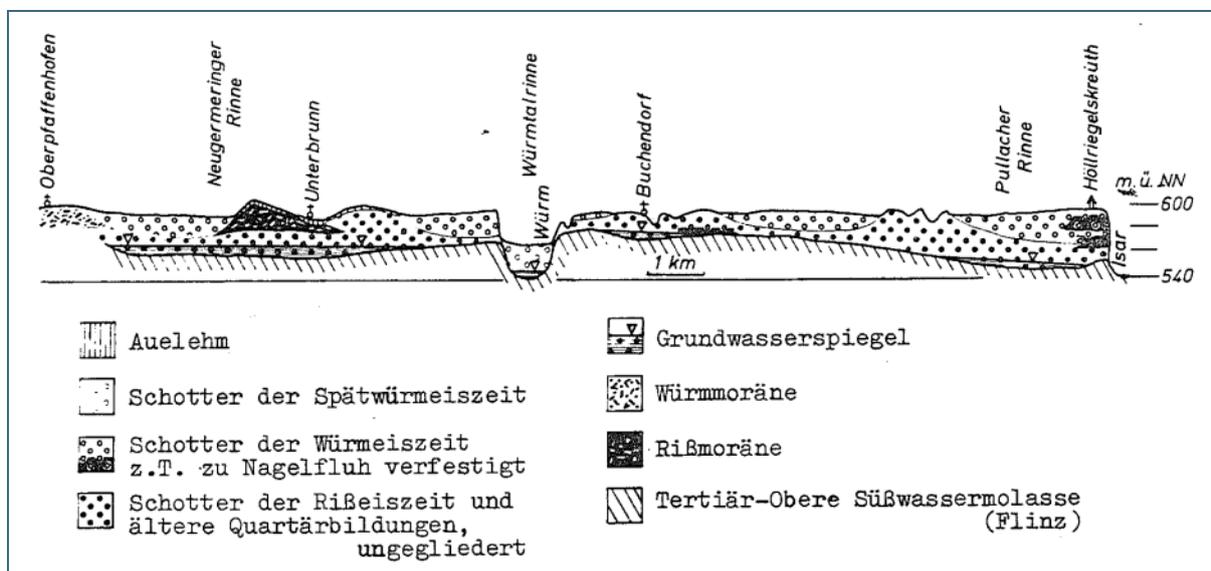


Abb. 17: Profilschnitt durch den südlichen Teil des Arbeitsgebietes zwischen Oberpfaffenhofen und Höllriegelskreuth (Blasy, 1974: 18)

### 3.3.3.8 Hydrogeologische Situation im Bereich des Moränengürtels

Generell ist die Messpunktdichte im direkten Bereich der würm-, riss- und mindeleiszeitlichen Moränen gering. Dieser Umstand deutet unter anderem auch darauf hin, dass dort meist wenig nutzbares Grundwasser vorhanden ist, eine Förderung daher nicht lohnt bzw. eine Beobachtung nicht sinnvoll ist. Das Grundwasser tritt oftmals nur kleinräumig und lokal auf. Besonders im westlichen Bereich der angrenzenden Schotterebene werden die Moränenbereiche direkt von der OSM unterlagert, bzw. liegen dieser direkt auf. Bei diesen Gegebenheiten zeigt sich zum Teil deutlich, dass die erschlossenen Grundwasserstockwerke zumeist nicht an den quartären Hauptgrundwasserleiter angebunden sind. Es handelt sich um lokale, hangende bzw. gespannte Grundwasserkörper wie z. B. nördlich Argelsried. Diese hydrogeologische Situation trifft für den Großteil der Moränen westlich Germering bis Mammendorf zu. Jedoch gibt es auch hier Bereiche, vor allem an den Randbereichen der Moränen, die mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter zu korrespondieren scheinen. Ein Beispiel hierfür ist der Bereich nordwestlich von Fürstenfeldbruck (Profil in Abb. 18 und Legende Abb. 15).

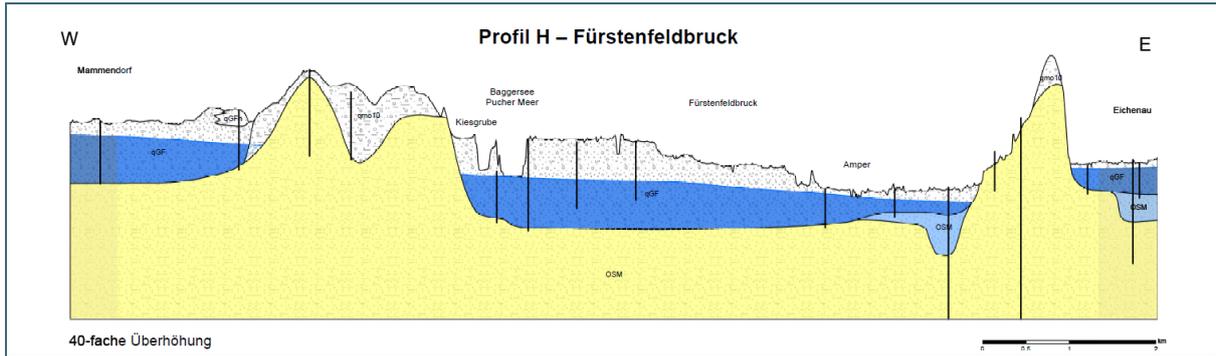


Abb. 18: Schematischer Profilschnitt durch die Tertiärauftragungen und Moränenablagerungen im südlichen Arbeitsgebiet (Zosseder, 2015)

Im Gegensatz zu den Bereichen, in denen die Moränen direkt von der Oberen Süßwassermolasse unterlagert werden, korrespondieren in manchen Bereichen die Grundwasserspiegel und -körper von Moräne und quartärem Hauptgrundwasserleiter. Die Moränen liegen in diesem Fall meist nicht der OSM, sondern älteren Schotterkörpern auf. Dies ermöglicht eine teilweisedurch- bzw. Unterströmung des Moränenkörpers, z. B. südwestlich von Germering. Diese hydrogeologische Situation trifft für den Großteil der Moränen zwischen Germering und der Isar zu (Blasy, 1974; Abb. 17). Jedoch gibt es auch lokale Bereiche, die nicht direkt mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter in Verbindung stehen, sondern, zum Teil auch zusätzlich, lokale Stockwerke ausbilden (z. B. Gut Hüll, NE Neugilching).

Östlich der Isar liegen die Rissmoränen ebenfalls nicht der OSM, sondern riss- und mindeleiszeitlichen Schottern auf. Aufgrund der Situation ist in diesen Gebieten eine Korrespondenz zwischen den Grundwasserkörpern der Moräne und dem Hauptgrundwasserleiter möglich. Jedoch können ebenfalls unabhängige Grundwasserstockwerke ausgebildet sein. Im Bereich Markt Schwaben – Erding passen die, am Rand des Moränengebiets (zwischen Anzing und Erding) ermittelten Messwerte zu denen der umliegenden Messstellen, die direkt im quartären Hauptgrundwasserleiter verfiltert sind. Das trifft ebenfalls für die Messstellen im südlichen und nördlichen Bereich der Moräne zu. Profil K in Abb. 19 (Legende Abb. 15) verdeutlicht die Situation des angebundenen Grundwasserleiters im nördlichen Ausläufer der Moräne.

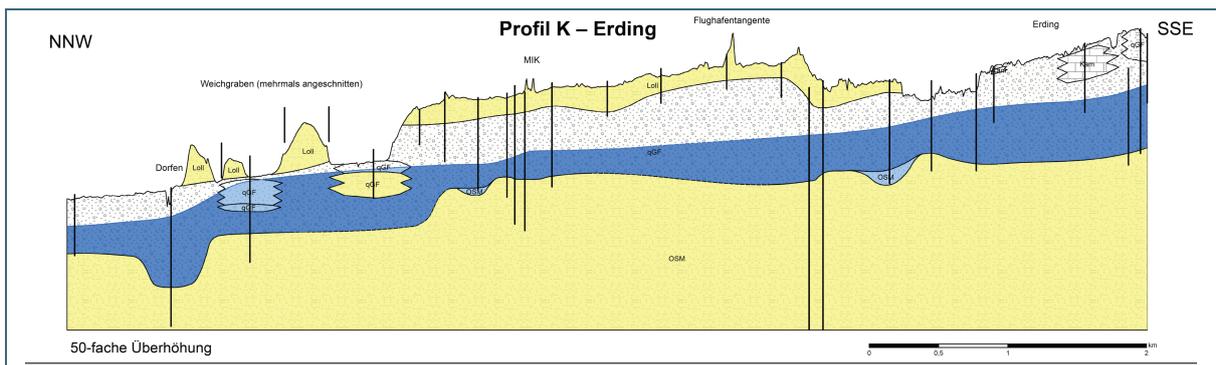


Abb. 19: Schematischer Profilschnitt zwischen Fluss Dorfen und Stadt Erding durch den nördlichen Ausläufer der Moräne (mit Lössüberdeckung), mit „angebundenen“ Grundwasserverhältnissen im quartären Grundwasserleiter (Zosseder, 2015)

Die Messwerte der Messstellen, die zentral im Bereich der Moränen liegen, unterscheiden sich jedoch zumeist markant von denen außerhalb des Moränengebietes. Vor allem der erschlossene Grundwasserkörper im Innenstadtbereich von Markt Schwaben und entlang der Bahnlinie Poing – Markt Schwaben steht wohl nicht in hydraulischem Kontakt zum quartären Hauptgrundwasserleiter (siehe Profil C

Abb. 20 und Legende Abb. 15). Die Messwerte im kleineren Moränengebiet östlich von Markt Schwaben scheinen sich recht gut ins Gesamtbild zu einzufügen. Natürlich können auch hier lokal unabhängige Grundwasserkörper vorhanden sein, die nicht erschlossen sind.

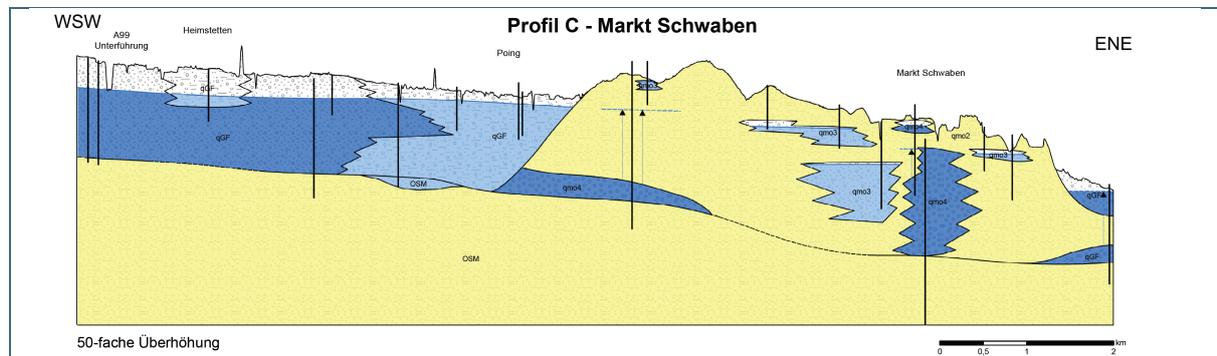


Abb. 20: Schematischer Profilschnitt im Großraum Markt Schwaben, in dem die nicht vorhandene Korrespondenz zwischen quartärem Grundwasserleiter und den lokalen Grundwasserkörpern innerhalb der Moräne dargestellt wird (Zosseder, 2015)

### 3.4 Grundwassererfüllte Mächtigkeit des quartären Hauptgrundwasserleiters

Das folgende Kapitel beschreibt die Ergebnisse zur Konstruktion der grundwassererfüllten Mächtigkeit des quartären Grundwasserleiters und basiert auf den Ergebnissen die in den Projekten GEPO und GeoPot erzielt wurden. Hierbei wurden hauptsächlich die Basis des quartären Grundwasserleiters und die interpolierten Grundwassergleichen aus den vorherigen Kapiteln verwendet.

#### 3.4.1 Überblick

Die Darstellung der grundwassererfüllten Mächtigkeit im quartären Hauptgrundwasserleiter zeigt gemäß dem Maßstab generalisiert die Differenz zwischen der interpolierten Grundwasseroberfläche des Grundwassergleichenplans (siehe Kapitel 3.3) und der Basis des quartären Grundwasserleiters (siehe Kapitel 3.2).

Bei der hier gewählten Darstellung muss beachtet werden, dass es sich um Mindestmächtigkeiten handelt, da zum einen das Grundwasser teilweise, ohne stauende Zwischenschicht der Flinzmergel, in den Flinzsanden seine Fortsetzung finden kann und zum anderen der verwendete Grundwassergleichenplan einen mittleren Niedrigwasserstand repräsentiert. Dies kann in der Darstellung generell zu geringeren grundwassererfüllten Mächtigkeitsangaben für den quartären Hauptgrundwasserleiter führen, als dies in der Realität der Fall ist. Zwischen der ermittelten Mächtigkeit des Grundwassers im quartären Aquifer und der des Grundwassers im „Oberen Grundwasserstockwerk“ ist demnach zu unterscheiden. Bei der Ermittlung der grundwassererfüllten Mächtigkeit gelten dieselben Einschränkungen für die lokale Genauigkeit wie beim Grundwassergleichenplan beschrieben (siehe Kapitel 3.3), da dieser für die Konstruktion verwendet wurde.

#### 3.4.2 Konstruktion der grundwassererfüllten Mächtigkeit

Die für die statistischen Angaben verwendeten Werte der grundwassererfüllten Mächtigkeit des quartären Hauptgrundwasserleiters, wurde über die Differenz aus den Rasterdatensätzen (horizontale Auflösung 100 m) des Grundwassergleichenplans und der Basisfläche des quartären Grundwasserleiters gewonnen. Der positive Wertebereich des daraus errechneten Rasters entspricht der Mächtigkeit des Grundwassers im quartären Aquifer. Danach wurde der Verlauf der ebenfalls errechneten Isolinien auf

Plausibilität kontrolliert. Die lokal errechneten negativen Werten traten in grundwasserfreien Bereichen (z. B. tertiären Hochflächen) auf. Diese Bereiche wurden in der Darstellung der Mächtigkeit ausgespart. Bereichsweise geben diese negativen Werte Aufschluss über das Vorhandensein tertiärer Flinzsande, die ohne stauende Zwischenschicht auf die quartären Kiese folgen. Handelt es sich bei negativen Werten (im Bereich weniger Meter) nicht um ausgesparte Bereiche, kann die interpolierte Grundwasser Oberfläche in den Flinzsanden des Tertiärs liegen.

Aufgrund unterschiedlicher hydrogeologischer Situationen musste bei der Attributierung der „Isolinien gleicher Grundwassermächtigkeit“ in „gesicherte“ grundwassererfüllte Bereiche und in „fragliche“ Bereiche mit unklaren Verhältnissen unterschieden werden. Im letzten Fall kann nur mit einer gewissen Unsicherheit von einer grundwassererfüllten Mächtigkeit im quartären Grundwasserleiter ausgegangen werden. Bereiche, die mit hoher Wahrscheinlichkeit grundwasserfrei sind oder in denen die Datengrundlage für eine sinnvolle Interpolation (der Grundwassergleichen) nicht ausreichend war, wurden auf der Darstellung der Grundwassermächtigkeiten ausgespart.

### **3.4.3 Beschreibung und Interpretation der grundwassererfüllten Mächtigkeit im quartären Hauptgrundwasserleiter**

Generell beträgt die berechnete grundwassererfüllte Mächtigkeit des Grundwassers im quartären Grundwasserleiter zum mittleren Niedrigwasserstand im Bereich der Münchner Schotterebene zwischen 0 m und 30 m. Werte größer 30 m bis zu 38 m treten nur in einem kleinen Areal im Osten bei Hohenlinden auf. Überwiegend liegen die Mächtigkeiten im Projektgebiet zwischen 0 m und 15 m. Bereichsweise gibt es rinnenartige Eintiefungen, sowie ausgedehntere Gebiete, in denen Mächtigkeiten von größer 15 m erreicht werden. Im nördlichen Teil des Projektgebietes, in etwa ab der nördlichen Stadtgrenze Münchens, verringern sich die Mächtigkeiten im Allgemeinen und es überwiegt ein Wertebereich zwischen 0 m und 10 m. Der Grund hierfür ist das Auskeilen des quartären Schotterkörpers in Richtung Norden, welcher an der Nordgrenze zum Teil nur noch wenige Meter Mächtigkeit erreicht und damit den grundwassererfüllten Bereich limitiert (Abb. 21).

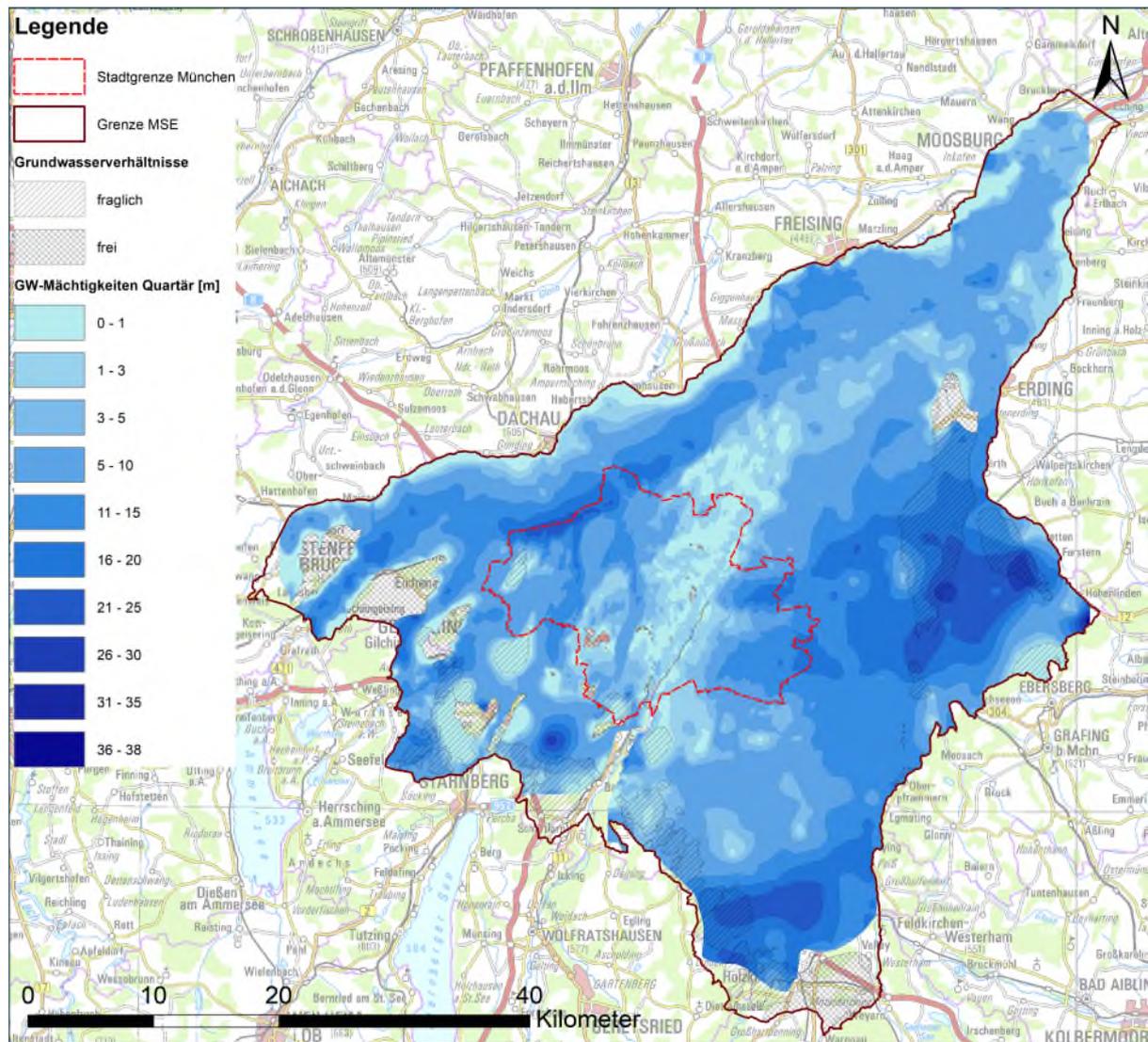


Abb. 21: Grundwassermächtigkeiten im quartären Hauptgrundwasserleiter der Münchner Schotterebene (MSE). Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind als „fraglich“ oder „frei“ gekennzeichnet.

Im zentralen, von Süd nach Nord verlaufenden Teil des Stadtgebietes München, das sich von Großhessellohe in einem breiter werdenden Bereich bis nach Freimann erstreckt, betragen die Grundwassermächtigkeiten meist nur wenige Meter (zwischen 0 m und 5 m). Im nördlichen Bereich von Solln erhöht sich, durch eine Depression in der dort abflachenden Tertiäroberkante, die Grundwassermächtigkeit auf bis zu 13 m. Im übrigen Teil dieses breiten Streifens werden Mächtigkeiten von größer 5 m höchstens punktuell erreicht. Zudem gibt es zahlreiche Tertiärauftragungen, aufgrund derer kein Grundwasser im quartären Aquifer angetroffen wird. Im östlichen Teil des Stadtgebietes nehmen die Grundwassermächtigkeiten in zwei Bereichen auf bis zu 16 m zu (Abb. 22).

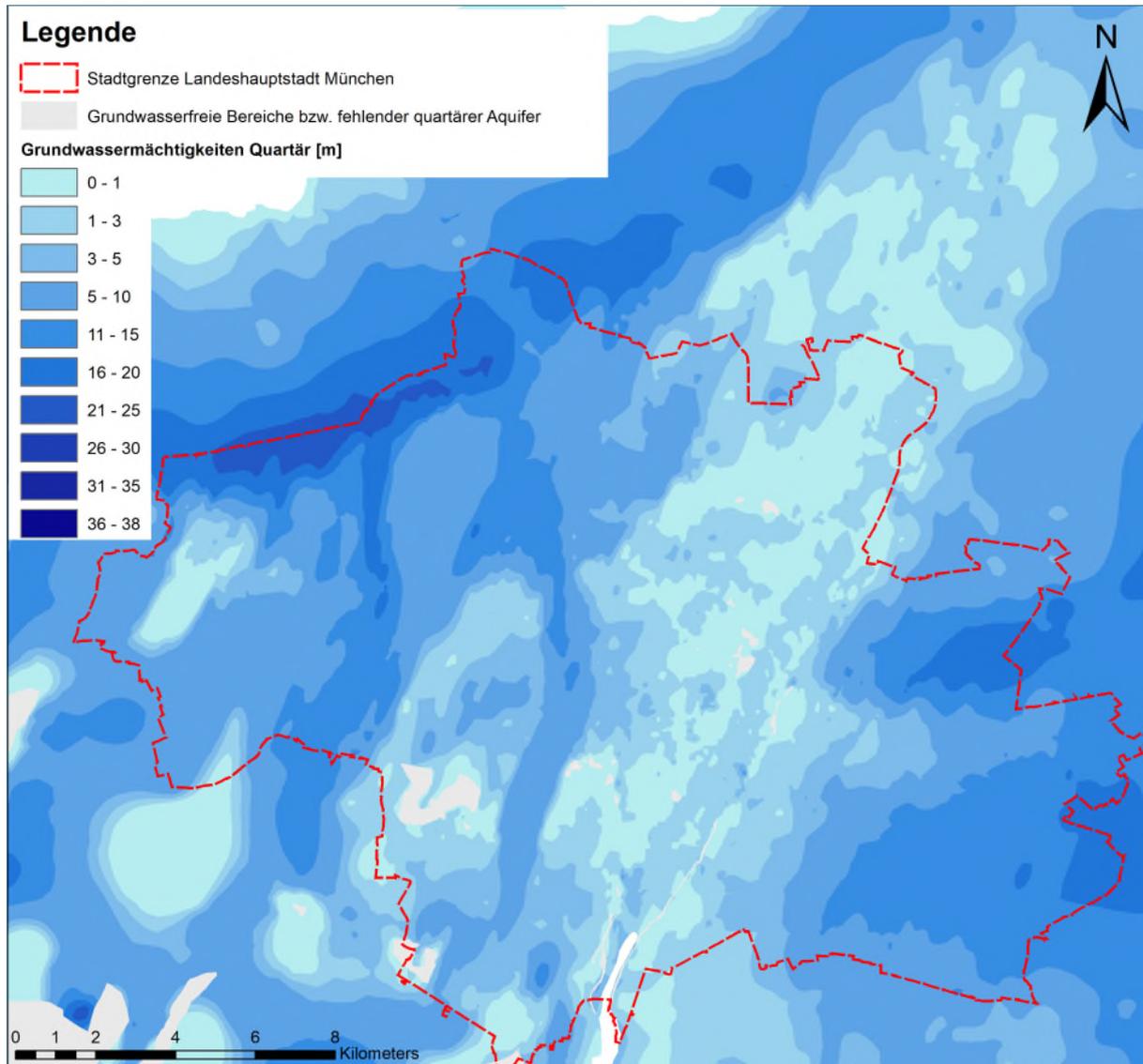


Abb. 22: Grundwassermächtigkeiten im quartären Hauptgrundwasserleiter im Stadtgebiet München. Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind gekennzeichnet.

In Richtung Nordost, außerhalb des Stadtgebietes, nehmen die Mächtigkeiten, bis auf kleinräumige Ausnahmen weiterhin zu, um im Bereich Forstinning mit 27 m ihr Maximum zu erreichen. Im westlichen Teil des Stadtgebietes zeigen sich zwei markante, Süd-Nord gerichtete Rinnenstrukturen (siehe Kapitel 3.2.3). Die westlich anschließende Würmtalrinne ist in das Tertiär eingetieft und weist mächtige, grundwassererfüllte Sande und Schotter auf, die grundwassererfüllte Mächtigkeiten von zum Teil über 20 m ermöglichen. In der nördlich angrenzenden Tiefenzone vereinigen sich diese Rinnen und die grundwassererfüllte Mächtigkeit ist nach wie vor hoch. Im weiteren Verlauf in Richtung Nordosten zeigen sich grundwassererfüllte Mächtigkeiten zwischen 10 m und 20 m. Im Bereich der Aubinger Lohe können keine Grundwassermächtigkeiten für den quartären Aquifer angegeben werden, da hier ein Unterfließen der Struktur in den tertiären Sanden angenommen wird.

Der südliche Teil des Münchner Umlandes ist geprägt durch den Moränengürtel. Dieser erstreckt sich im Bereich der Schotterebene von westlich Fürstenfeldbruck bis nach Holzkirchen im Südosten. Dabei ist anzumerken, dass die westlich gelegenen Moränen zum Großteil direkt Sedimenten der Oberen

Süßwassermolasse aufliegen, und daher kein quartärer Grundwasserleiter im eigentlichen Sinne ausgeprägt ist. Östlich des Würmtals ändert sich die Situation, da die Moränen nun zum Großteil älteren quartären Schotterkörpern aufliegen, die bereichsweise, wie auch Teile der Moränen selbst, in hydraulischer Verbindung zum quartären Hauptgrundwasserleiter stehen können. Vergleichbare Situationen treffen auch für die Moränen im nordöstlichen Teil der Schotterebene (Markt Schwaben, Erding) zu (siehe Kapitel 3.3).

Im bereits erwähnten westlichen Teil der Schotterebene liegen die grundwassererfüllten Mächtigkeiten zwischen den Moränen bei 10 m bis 20 m. Diese in Rinnenstrukturen verlaufenden Grundwasserströme vereinigen sich in der in Nordost verlaufenden Tiefenzone nordwestlich des Stadtgebietes. Östlich des Würmtals, im Bereich der Buchendorfer Hochfläche, herrschen generell eher geringe Mächtigkeiten vor, bis auf eine Ausnahme östlich Buchendorf, wo sich durch eine Depression in der Basis des quartären Grundwasserleiters eine signifikante Erhöhung einstellt.

Östlich der Isar sind die Verhältnisse wesentlich homogener. Lediglich in einem West-Ost verlaufenden Bereich nördlich Otterfing steigen die grundwassererfüllten Mächtigkeiten auf bis zu 22 m an. In südöstliche Richtung werden die Mächtigkeiten aufgrund der dort auslaufenden tertiären Hochfläche immer geringer, wogegen westlich dieses Gebietes wiederum eine Zunahme der Mächtigkeiten beobachtet werden kann.

Nördlich des Stadtgebietes setzt sich im westlichen Teil des Umlandes die bereits erwähnte Tiefenzone mit erhöhten grundwassererfüllten Mächtigkeiten (> 10 m) in Richtung Nordosten fort und vereinigt sich schließlich mit dem Isartal. Östlich der Isar schwankt die Mächtigkeit größtenteils zwischen 5 m und 10 m, wobei diese mit Annäherung an das Tertiäre Hügelland abnehmen. Lediglich kleinräumig kommt es zu Erhöhungen auf über 15 m, beispielsweise im Gebiet westlich Berglern.

### **3.5 Grundwasserflurabstände im quartären Hauptgrundwasserleiter**

Das folgende Kapitel beschreibt die Ergebnisse zur Konstruktion der Grundwasserflurabstände des quartären Hauptgrundwasserleiters und basiert auf den Ergebnissen die in den Projekten GEPO und GeoPot erzielt wurden. Für die Konstruktion wurde hauptsächlich die die interpolierten Grundwassergleichen und das DGM (2 m) verwendet.

#### **3.5.1 Überblick**

Die Flurabstände des quartären Hauptgrundwasserleiters wurden über die Differenz zwischen Geländeoberkante (GOK) und der Grundwasseroberfläche (GWO) zum Zeitpunkt der Stichtagsmessung im April 2014 konstruiert und sind folgendermaßen definiert: „Als Grundwasser-Flurabstand wird der lotrechte Höhenunterschied zwischen einem Punkt der Erdoberfläche und der Grundwasseroberfläche des oberen Grundwasserstockwerkes bezeichnet“ (Hölting und Coldewey, 2013).

Der Flurabstand unterliegt den Schwankungen der Grundwasseroberfläche, welche anthropogene und natürliche Ursachen haben können. Die hier ermittelten Flurabstände spiegeln die Verhältnisse eines Zeitraums mit mittleren Niedrigwasserständen wieder, da diese sich auf die Stichtagsmessung 2014 beziehen. Aufgrund des niederschlagsarmen Winters 2013/2014 und einer länger anhaltenden Trockenperiode im ersten Quartal 2014 muss davon ausgegangen werden, dass die Flurabstände in der Regel geringer sind, als in der hier vorliegenden Darstellung. Zu Darstellungen anderer Bemessungszeiträume, wie mittleren oder hohen Grundwasserständen, kann naturgemäß ein deutlicher Unterschied bestehen.

### 3.5.2 Datengrundlage und Berechnung der Grundwasserflurabstände

Die Datengrundlage für die Grundwasserflurabstände bilden ebenfalls die erhobenen Messdaten, welche für die Konstruktion der Grundwasseroberfläche des quartären Hauptgrundwasserleiters (siehe Kapitel 3.3) verwendet wurden. Aus dem Verschnitt des konstruierten Rasters des Grundwassergleichensplans mit dem digitalen Geländemodell (DGM, 2 m horizontale Auflösung) resultierte die Darstellung des Flurabstandes, ebenfalls im Rasterdateiformat. Bereiche, die als grundwasserfrei klassifiziert wurden sind auch beim Flurabstand ausgespart worden. Abschließend erfolgt eine Klassifizierung der Flurabstände nach Wertebereichen gemäß dem abgebildeten Maßstab. Neben den grundwasserfreien Bereichen existieren Gebiete, in denen die Grundwassersituation unbekannt oder fraglich ist. Diese Bereiche wurden in der digitalen Isolinien-Darstellung der Flurabstände (als Vektordatensatz) attribuiert und sollten bei der Ermittlung der lokalen Flurabstände in der Beurteilung miteinbezogen werden.

Auch bei der Konstruktion des Flurabstandes ist vorab anzumerken, dass es, wie in Kapitel 3.3 erläutert, maßstabs- und methodenbedingt zu lokalen Unsicherheiten kommen kann. Neben anthropogenen Veränderungen und Einwirkungen auf den Untergrund, spielt vor allem die gegebene Topographie eine wichtige Rolle in Bezug auf Flurabstandsänderungen. Analog zum Grundwassergleichensplan haben natürliche Anschnitte im Gelände, wie beispielsweise Flusstäler und Terrassenkanten, markante Auswirkungen auf den Flurabstand. Künstliche Veränderungen, wie Aufschüttungen und Abtragungen, beeinflussen ihn meist kleinräumig. Diese Veränderungen, beispielsweise im Bereich des Olympia- oder des Westparks, führen zu kleinräumigen Änderungen der Flurabstände, wobei die Grundwasseroberfläche dabei relativ unverändert bleiben kann. Aufgrund der Messpunktdichte und des Betrachtungsmaßstabs können starke kleinräumige Veränderungen des Flurabstands oftmals nicht erfasst werden. Es ist dabei zu erwähnen, dass im hier verwendete digitalen Geländemodell (DGM) methodenbedingt Artefakte beinhaltet sind, welche die tatsächliche gebäudefreie Topologie nicht exakt wiedergibt. Daher können, bedingt durch die Darstellung der Geländehöhe im DGM, auch bei der Konstruktion des Flurabstands sehr lokal unplausible Werten auftreten.

Die allgemeine hydrogeologische Situation und der Verlauf der Grundwassergleichen wurden bereits im Kapitel 3.3 zum Grundwassergleichensplan erläutert. Deshalb wird im Folgenden größtenteils nur noch auf Sonderfälle eingegangen, die sich bei der Betrachtung der Flurabstandskarte ergeben.

### 3.5.3 Beschreibung und Interpretation der Grundwasserflurabstände im quartären Hauptgrundwasserleiter

Generell nehmen die Flurabstände von Süden nach Norden, analog zum Gefälle der Grundwasseroberfläche des quartären Hauptgrundwasserleiters, und in ähnlicher West-Ost-Ausrichtung ab (Abb. 23). Die Mächtigkeit des quartären Schotterkörpers verringert sich und die quartäre Grundwasseroberfläche nähert sich der Oberfläche an. Dies zeigt sich an einer Zunahme von Moor- und Moosgebieten im nördlichen Bereich der Schotterebene.

Von der südlichen Stadtgrenze Münchens bis zum Nordrand der Schotterebene schwanken die Flurabstände zumeist zwischen 0 m und 10 m. Im südlichen Teil der Schotterebene werden Flurabstände von bis zu über 100 m erreicht, was jedoch auf die lokal vorhandene Geländeerhöhung im Moränengebiet zurückzuführen ist. Außerhalb der Moränen liegen die maximalen Flurabstände im Süden bei circa 60 m. Es ist zudem eine generelle Abnahme der Flurabstände in Richtung der Vorfluter, insbesondere der Isar, zu beobachten. Nur lokal kann es, wie zum Beispiel im östlichen Stadtgebiet durch die Hochterrassen, zu einer Umkehr der Verhältnisse kommen. Dann erhöhen sich die Flurabstände, durch eine Zunahme der Geländehöhe, flächenhaft.

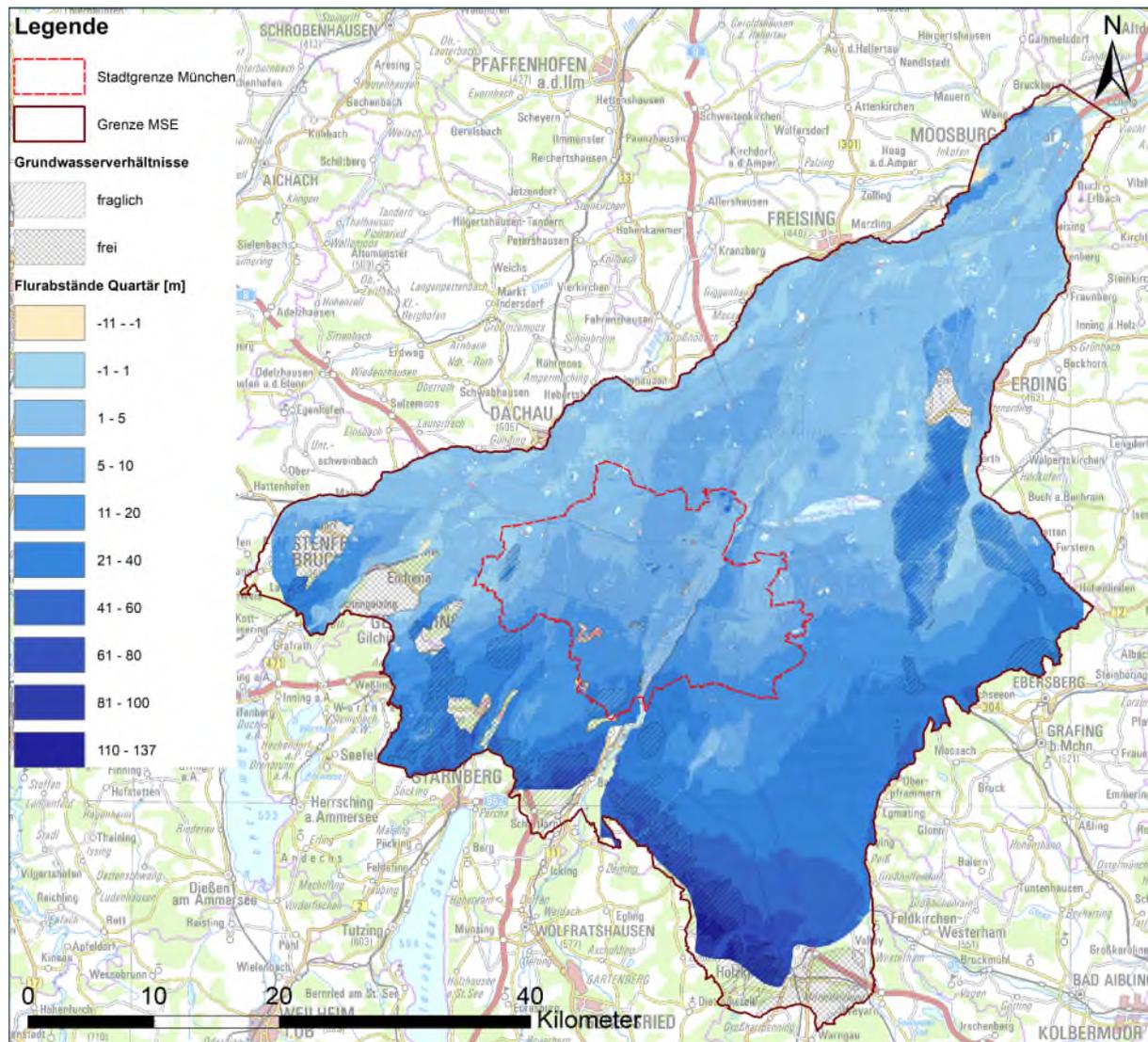


Abb. 23: Überblick über die Flurabstände im quartären Hauptgrundwasserleiter der Münchner Schotterebene (MSE). Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind als „fraglich“ oder „frei“ gekennzeichnet.

Im **Stadtgebiet München** nehmen die Flurabstände ebenfalls von Süden nach Norden ab (siehe Abb. 24). Dabei finden sich an der südlichen Stadtgrenze, im Bereich Solln – Großhessellohe, die generell höchsten Flurabstände von circa 30 m. Ansonsten fällt im südlichen Stadtgebiet eine zonale, von West nach Ost gerichtete Unterteilung der Flurabstände auf, die sich grob auch über die Isar hinweg verfolgen lässt.

Der zentrale Bereich des Stadtgebietes weist Flurabstände im Bereich zwischen 5 m und 10 m auf, wobei diese nach Norden hin, zum Teil in Form von Buchten, auf kleiner 5 m abnehmen. Dies ist beispielsweise im östlichen Stadtgebiet zwischen Bahnhof Trudering und Johanneskirchen und im westlichen Stadtgebiet von Moosach in Richtung Karlsfeld bzw. Regattaanlage zu beobachten. Ebenso kommt es in kleinräumigen Bereichen zu markanten Schwankungen und Erhöhungen der Flurabstände (auf bis zu 77 m), was zumeist an den lokalen topographischen Gegebenheiten liegt. Als Beispiele für bereichsweise abrupte Änderungen dienen die Hochbereiche westlich der Theresienwiese (Übergang Altstadtstufe zur Niederterrasse), der Westpark, die Bereiche der Hochterrassen östlich der Isar, sowie für lokale Erhöhungen z. B. der künstliche Deponieberg im Bereich Freimann und der Olympiaberg.

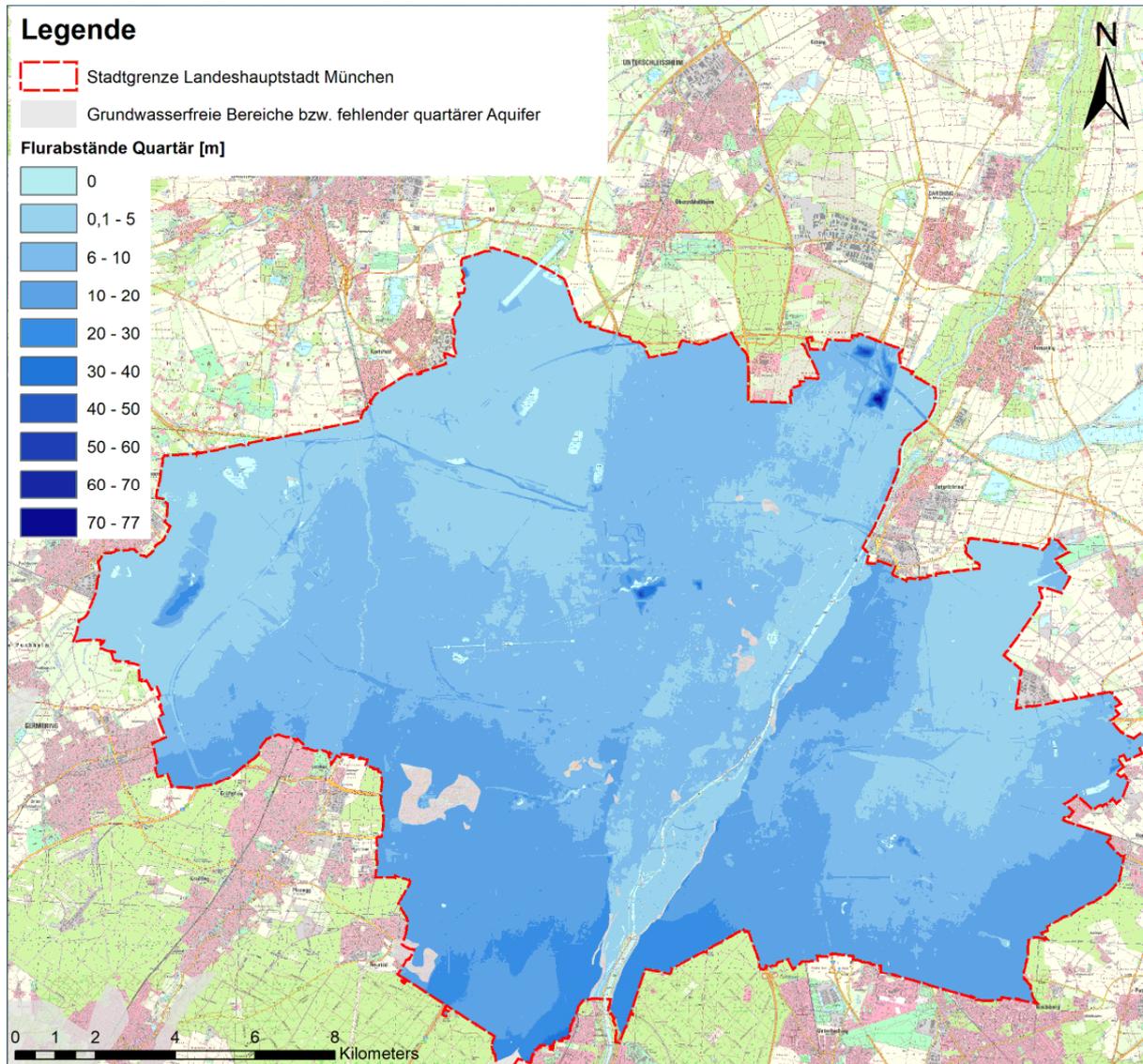


Abb. 24: Überblick über die Flurabstände im quartären Hauptgrundwasserleiter im Stadt München. Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind gekennzeichnet.

Zu einer auffälligen, aber plausiblen Zunahme der Flurabstände kommt es zudem im Bereich der Aubinger Lohe. Hier unterströmt das Grundwasser des quartären Hauptgrundwasserleiters wohl sandig ausgeprägte Bereiche der natürlichen tertiären Geländeerhöhung (vgl. Profil G in Abb. 16 und Legende Abb. 15). Westlich der Isar muss erneut auf die Zonen der deckenden und aufragenden Mergel eingegangen werden. Diese wurden bereits im Kapitel 3.3 ausführlich erläutert und sollen an dieser Stelle nur nochmals erwähnt werden, da sich die Flurabstände im Bereich der deckenden Mergel durch die Differenz zwischen Geländeoberkante und gespanntem Grundwasserspiegel, anstatt wie sonst üblich durch die freie Grundwasseroberfläche, definieren können. Im Bereich des Isaralluviums herrschen generell niedrige Flurabstände, meist zwischen 0 m bis 5 m. Lokal kann es auch hier zu Erhöhungen kommen, beispielsweise im Bereich „Südlicher Friedhof“ bis Lehel. Hier steigen die Flurabstände lokal bis auf 7 m an.

Im Bereich der **Moränen** im **südlichen Münchner Umland** gibt es starke Anstiege der Flurabstände. Durch den lokalen Anstieg der Geländeoberkante erhöhen sich in gleichem Maße die Flurabstände. Zu beobachten ist dies beispielsweise östlich von Moosinning im nördlichen Teil des Arbeitsgebietes, oder im Moränengürtel im Süden. Neben diesen teils drastischen Anstiegen des Flurabstandes gibt es im

Münchner Umland auch Bereiche, in denen die Veränderungen moderat ausfallen. Auf der Buchendorfer Hochfläche, die sich südlich an das Stadtgebiet München anschließt, schwanken die Flurabstände nur geringfügig, wobei die genauen Verhältnisse, durch eine geringe Messpunktdichte in diesem Bereich, mit einer hohen Unsicherheit behaftet sind. Weiter nach Südosten, in Richtung Pullacher Rinne, nehmen die Abstände dann stetig zu, bis sie bei Baierbrunn ihr Maximum erreichen. Die Differenzen von Geländeoberkante und Grundwasseroberfläche unterscheiden sich auf der tertiären Hochfläche, im Gegensatz zu der mit mächtigen quartären Sedimenten gefüllten Rinne, deutlich und führen zu einer konstanten Zunahme der Flurabstände in Richtung Südosten. Im südlichen Teil der Schotterebene, wo steile Hang- und Terrassenkanten entlang der Isar auftreten, schwanken die Flurabstände beträchtlich. Dies liegt vor allem an heterogenen Werten der Gelände- und Grundwasseroberfläche, die in diesen Bereichen durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden. Zum Teil wurden diese Bereiche ausgespart, da eine sinnvolle Konstruktion der Isolinien hier nicht immer möglich ist. Auffällig ist des Weiteren ein spornartiger Fortsatz, der sich vom westlichen Stadtgebiet bis nach Unterschleißheim erstreckt. Hier sind die Flurabstände flächenhaft höher als auf vergleichbarer Höhe im östlichen Teil des Arbeitsgebietes. Die Moräne im Nordosten wurden hierbei nicht im Detail betrachtet.

In Bereichen der angebundenen, nicht fließenden **Oberflächengewässer** bilden sich zumeist trichterartige Strukturen aus. Dies ist plausibel und liegt am Abfall der Geländeoberkante bis auf Höhe des Gewässers. Die Flurabstände nehmen hier radial ab und tendieren im Bereich der Gewässer gegen Null.

### 3.6 Grundwasserfließgeschwindigkeit und Grundwasserfließrichtung im quartären Hauptgrundwasserleiter

Das folgende Kapitel beschreibt die Darstellung der Grundwasserfließgeschwindigkeiten im quartären Hauptgrundwasserleiter und basiert auf den Ergebnissen die in den Projekten GEPO und GeoPot erzielt wurden.

#### 3.6.1 Überblick

Die Grundwasserfließgeschwindigkeit spielt bei Transportprozessen, wie dem Schadstofftransport oder konvektiven Wärmetransport, eine wichtige Rolle. Beim advektiven Transportprozess werden Schadstoffe oder die gespeicherte Wärme im Grundwasser mit der Abstandsgeschwindigkeit der Grundwasserströmung verfrachtet. Daher hat die Abstandsgeschwindigkeit einen großen Anteil an der Verteilung von Schadstoffen oder Wärme im grundwassererfüllten Untergrund. Sie bestimmt den Transport des Schadstoffes oder der Wärme über Schadstoff-/Wärmestromfahnen im Abstrom einer Kontaminationsfläche bzw. einer Wärmenutzung.

Im Allgemeinen werden für den quartären Grundwasserleiter der Münchner Schotterebene Grundwasserfließgeschwindigkeiten von wenigen Metern pro Tag angegeben (Dohr & Gruben 1999: 24). Bei speziellen Verhältnissen, wie sehr gut durchlässigem Schotter und einem relativ großen Grundwassergefälle, werden maximale Strömungsgeschwindigkeiten von mehr als 20 m pro Tag möglich (Dohr 1995: 4). Müller (1952), Seiler (1979) und Kühnhardt & Niessner (1995) beschreiben Werte von 12 m/d bis 15 m/d in den quartären Kiesen der Münchner Schotterebene. Zosseder (2007) ermittelte über einen Tracerversuch im quartären Grundwasserleiter Abstandsgeschwindigkeiten zwischen 12 m/d und 26 m/d mit mittleren Geschwindigkeiten von 16 m/d. Kisskalt (1940) beschreibt maximale Abstandsgeschwindigkeit von über 63 m/d.

Die Grundwasserfließrichtung in der Münchner Schotterebene ist im Allgemeinen östlich der Isar von Südost nach Nordwest, und westlich der Isar von Südwest nach Nordost, gerichtet (Dohr 1995: 4). Auf

den Hoch- und Niederterrassen können weitgehend gleichmäßige Strömungsverhältnisse angenommen werden. Im Bereich geomorphologischer Terrassenkanten kommt es allerdings zu Störungen im generellen Fließfeld und die Grundwasserfließrichtung verlagert sich teilweise deutlich in Richtung Isar (Dohr 1995: 5). In anderen Bereichen hat sich das Quartär rinnenartig in die Tertiäroberfläche eingeschnitten. In diesen Rinnen fließt das Grundwasser bevorzugt ab, sodass hier höhere Grundwasserfließgeschwindigkeiten auftreten und die Strömungsrichtung deutlich vom generellen Verlauf abweichen kann (Kapitel 3.2.3).

### 3.6.2 Datengrundlage und Berechnung von Grundwasserfließgeschwindigkeit und Grundwasserfließrichtung

Um die flächenhafte Variation der Grundwasserfließgeschwindigkeit im quartären Grundwasserleiter der Münchner Schotterebene abschätzen zu können, wurde die Grundwasserfließgeschwindigkeit über eine statische Darcy-Strömungsanalyse (in ArcGIS©) flächenabdeckend berechnet.

Basis für die flächenabdeckende Berechnung der Grundwasserfließgeschwindigkeit ist die räumlich hoch aufgelösten Datenbasis. Dabei werden die Grundwasseroberfläche (siehe Kapitel 3.3), die über die konstruierte Basisfläche des quartären Grundwasserleiters abgeleitete grundwassererfüllte Mächtigkeit (siehe Kapitel 3.4) und die ermittelte flächenverteilte hydraulisch Durchlässigkeit (siehe Kapitel 3.7) mit ein.

Die in ArcGIS© implementierte Darcy-Strömungsanalyse berechnet über das Darcys-Gesetz ein Flussfeld. Dieses ist ein Vektorfeld von Grundwasserfließgeschwindigkeiten und wird durch zwei Raster dargestellt, eines für den Betrag der Fließgeschwindigkeit und eines für die Fließrichtung. Dabei wird eine durchschnittliche Geschwindigkeit (Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$ ) berechnet, indem die Darcy-Geschwindigkeit  $v$  [m/s] durch die effektive Porosität  $n_e$  des Mediums [-] geteilt wird. Die Berechnung erfolgt jeweils für die Rasterzellen der Eingangsdatensätze. Es wurde eine Zellengröße für das Raster von 10 m x 10 m gewählt. Für die Berechnung wurde die untenstehende Formel verwendet, wobei  $K$  die hydraulische Leitfähigkeit [m/s],  $\Delta h$  das hydraulische Gefälle [-],  $T$  die Transmissivität [m<sup>2</sup>/s] und  $b$  die grundwassererfüllte Mächtigkeit [m] ist (vgl. Esri (o.J.) und Hölting, B. und W. G. Coldewey 2013, S. 24 ff.).

$$v_a = \frac{v}{n_e} = \frac{(-K \cdot \Delta h)}{n_e} = \frac{(-T \cdot \Delta h)}{b \cdot n_e}$$

Als Eingangsdaten für die Geschwindigkeitsfeldberechnung wurden die erarbeiteten Grundlagen, wie oben beschrieben, herangezogen. Mit der grundwassererfüllten Mächtigkeit und der regionalisierten hydraulischen Durchlässigkeit wurde außerdem eine Verteilung der Transmissivität (Abb. 25) berechnet.

Die Variation der effektiven Porosität zeigt in der Regel einen engen Zusammenhang mit der Variation der hydraulischen Durchlässigkeit (Entenmann, 1992). Daher ist, um die effektive Porosität im Bereich der Schotterebene abzuleiten, ein empirischer Zusammenhang über eine Regressionsanalyse gewählt worden (Zosseder, 2007). Dadurch ergaben sich Werte für die effektive Porosität zwischen 16 % und 25 %. Die räumliche Verteilung der effektiven Porosität entspricht dabei der räumlichen Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte.

Bei der Interpretation der berechneten Grundwasserfließgeschwindigkeiten ist zu beachten, dass die in die Berechnung mit einfließenden Grundwassergleichen einen relativen Grundwasserniedrigstand im April 2014 repräsentieren. Daher kommt es mit hoher Wahrscheinlichkeit, bei geänderten Grundwasserpotentialen, auch zu Veränderungen in den Fließgeschwindigkeiten. Eine noch deutlich höhere Unsicherheit bei der Berechnung der Grundwasserfließgeschwindigkeiten stellt jedoch die Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit dar, deren Regionalisierung nur mit einer relativ auf die Fläche betrachteten geringen Punktdichte durchgeführt werden konnte.

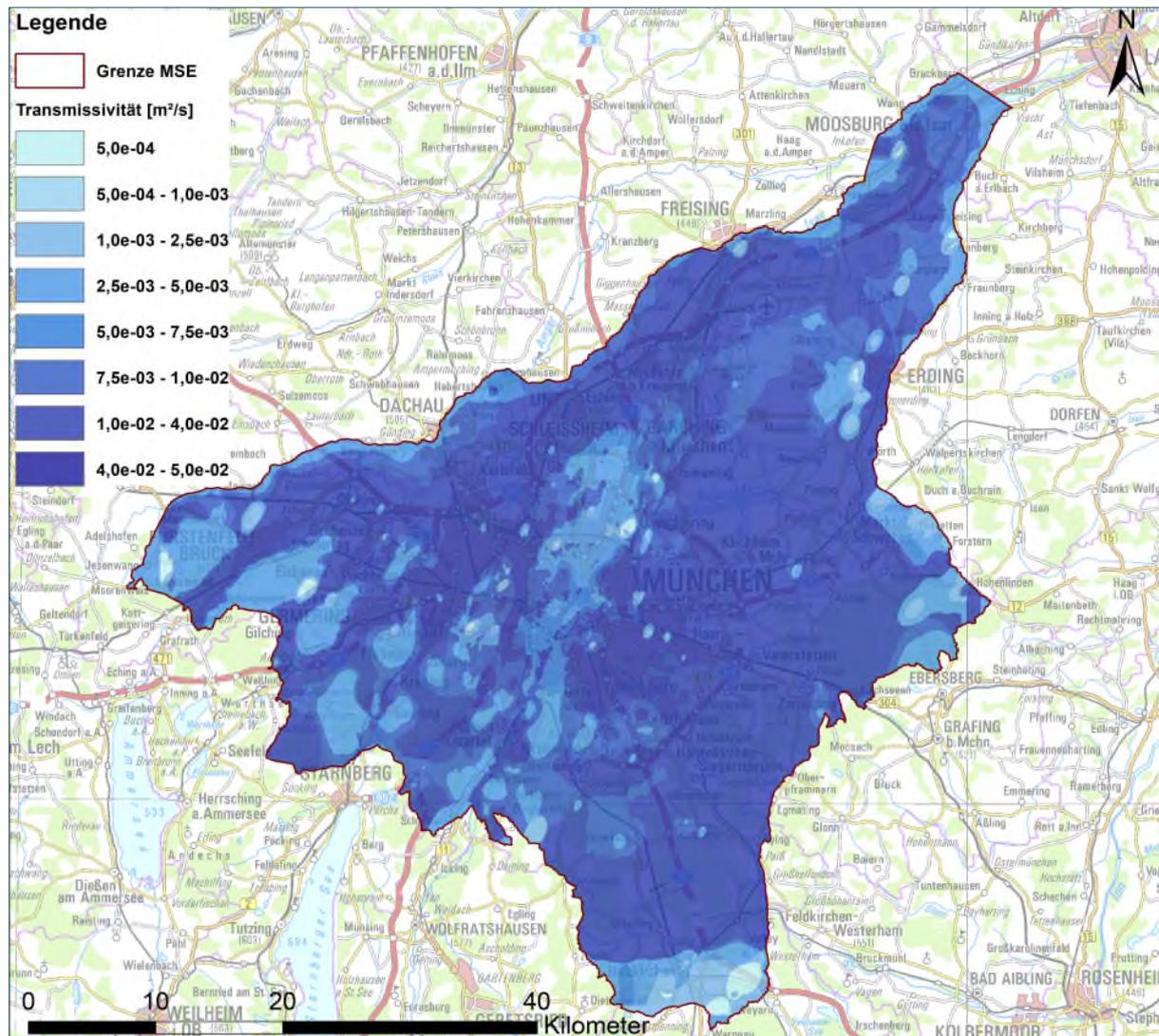


Abb. 25: Übersicht über die, durch die regionalisierte hydraulische Durchlässigkeit und die grundwassererfüllte Mächtigkeit berechnete, Verteilung der Transmissivität im Bereich der Münchner Schotterebene (MSE) (Abbildung überarbeitet nach Zosseder 2015).

Die Berechnung der Grundwasserfließrichtung folgt analog der Berechnung der Grundwasserfließgeschwindigkeit. Die maßgebliche Basis für die Ableitung der räumlichen Grundwasserfließrichtungen liefern die Grundwasserhöhengleichungen. Die berechneten Fließgeschwindigkeiten wurden für eine einheitliche und besser interpretierbare räumliche Darstellung nach nachfolgender Tab. 5 in Richtungsklassen zusammengefasst. Dabei sind die südlichen Richtungen Südost, Süd und Südwest in eine Klasse zusammengefasst worden, da alle diese Richtungen nur sehr untergeordnet vorkommen. Bei der Interpretation der Grundwasserfließrichtungen ist anzumerken, dass ihre Genauigkeit in Abhängigkeit der räumlichen Auflösung des Grundwassergleichenplans zu beurteilen ist. Daher sind die berechneten Fließrichtungen in Gebieten mit geringerer Messpunktdichte mit höheren Unsicherheiten behaftet. Zudem gilt zu beachten, dass die Berechnungen Grundwasserfließrichtungen bei relativem Niedrigwasser darstellen (Zeitpunkt der Stichtagsmessung im April 2014).

Tab. 5: Klassifizierung der Grundwasserfließrichtung im Bereich der Schotterebene

Richtungs-klassifizierung	N	NO	O	SO-S-SW	W	NW
Richtung in Grad	337,5 – 22,5	22,5 – 67,5	67,5 – 112,5	112,5 – 247,5	247,5 – 292,5	292,5 – 337,5

### 3.6.3 Beschreibung und Interpretation der Grundwasserfließgeschwindigkeit und Grundwasserfließrichtung im quartären Grundwasserleiter

#### 3.6.3.1 Grundwasserfließgeschwindigkeiten (Quartär)

Die berechnete Verteilung der **Grundwasserfließgeschwindigkeiten** im Bereich der Schotterebene zeigt Abb. 26, die im Bereich des Stadtgebietes München Abb. 27.

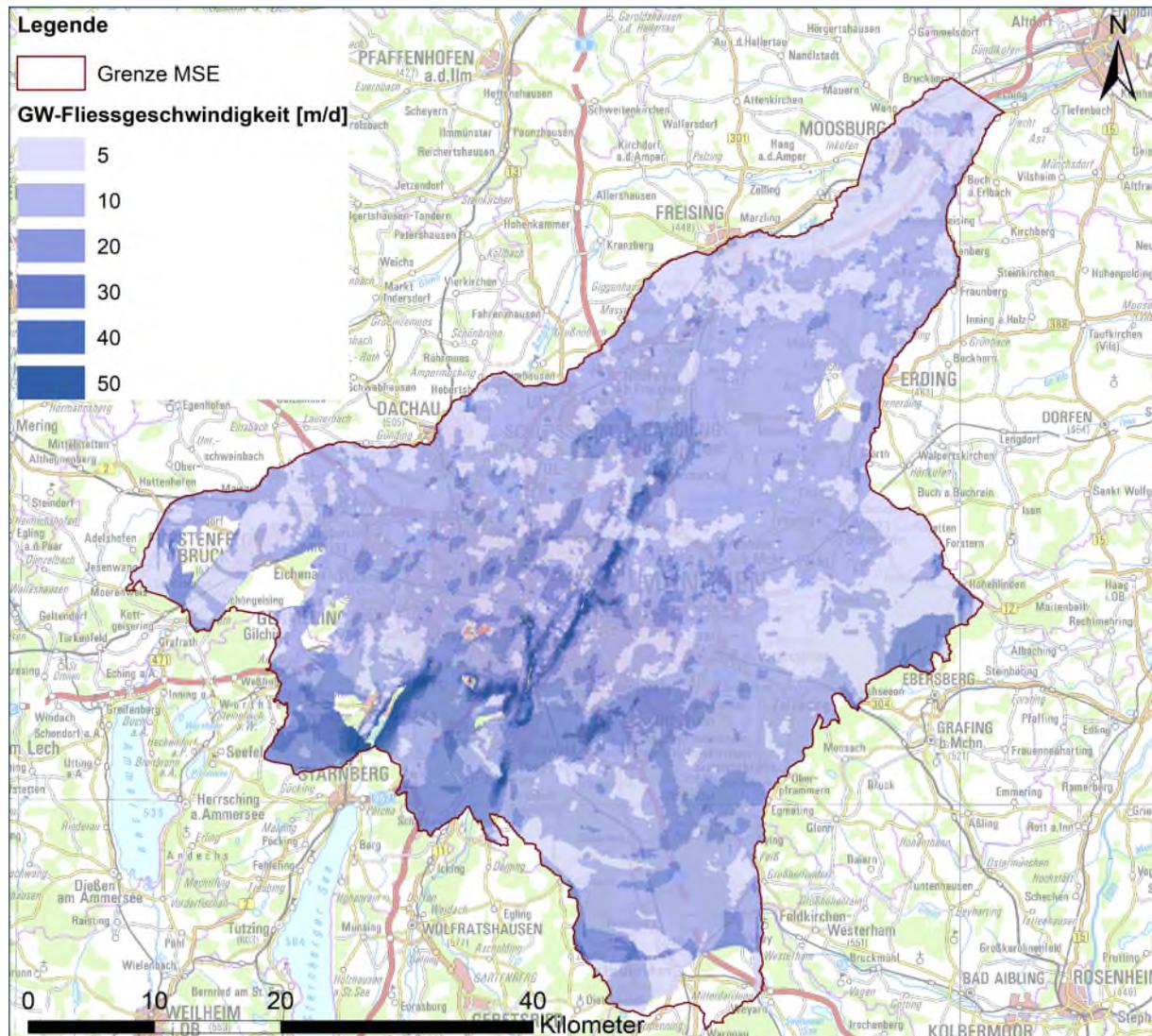


Abb. 26: Grundwasserfließgeschwindigkeiten im quartären Hauptgrundwasserleiter der Münchner Schotterebene (MSE) (Stand 2014). Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, sind ausgespart.

Es ist ersichtlich, dass vorzugsweise Geschwindigkeiten zwischen 5 m/d und 10 m/d auftreten. Der über die Gesamtfläche berechnete Mittelwert liegt bei circa 11 m/d. Im Stadtgebiet München sind im Bereich größerer Flächen Geschwindigkeiten zwischen 10 m/d und 20 m/d zu finden, speziell im westlichen Stadtgebiet und südlich der Stadt München. In den Randbereichen der Schotterebene zeigen sich vermehrt geringere Fließgeschwindigkeiten. Die extrem hohen Fließgeschwindigkeiten mit über 30 m/d befinden sich an den Hangkanten an der Isar, im Stadtgebiet und entlang des Höhenrückens Gauting bzw. der Würmtalrinne. Diese Beobachtungen bestätigen die Annahme von Dohr (1995: 4), dass dort sehr hohe Grundwasserfließgeschwindigkeiten auftreten. Im Vergleich der berechneten

Grundwasserfließgeschwindigkeiten, zwischen dem Umland in der Schotterebene und dem Stadtgebiet, fällt auf, dass niedrige Geschwindigkeiten im Stadtgebiet weniger häufig auftreten, als Fließgeschwindigkeiten zwischen 10 m/d und 20 m/d. Jedoch ist dazu einschränkend zu erwähnen, dass die räumliche Auflösung der Grundwasserhöhengleichen und damit auch der hydraulischen Gefälle im Stadtgebiet um ein Vielfaches höher ist als im Umland. Dies kann maßstabsbedingt bewirken, dass die lokal auftretenden, hohen hydraulischen Gefälle im Umland von München nicht erkennbar sind und daher auch weniger häufig höhere Grundwasserfließgeschwindigkeiten auftreten.

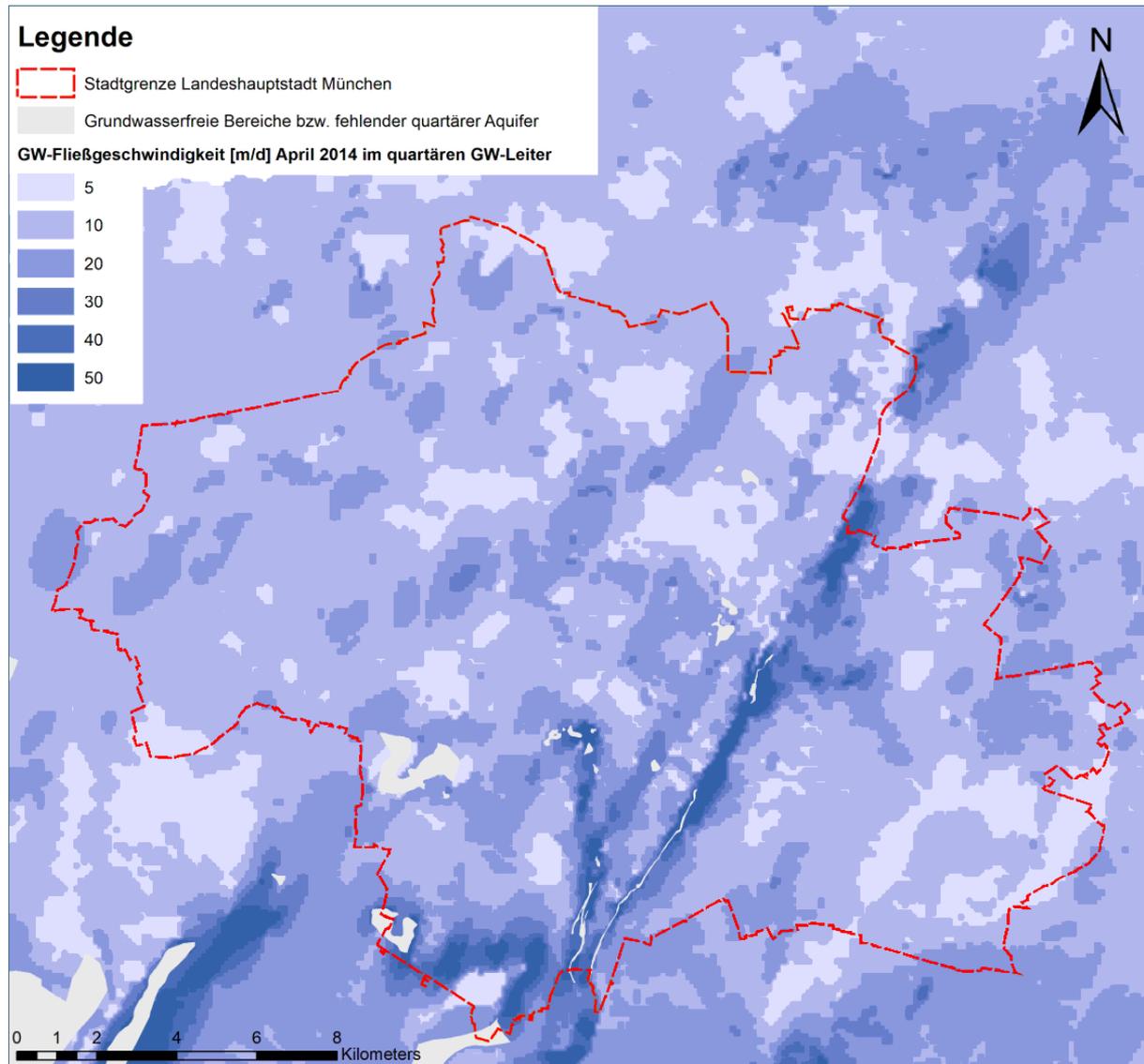


Abb. 27: Grundwasserfließgeschwindigkeiten im quartären Hauptgrundwasserleiter im Stadtgebiet München (Stand 2014). Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind laut Legende gekennzeichnet.

### 3.6.3.2 Grundwasserfließrichtungen (Quartär)

Das Grundwasser im quartären Hauptgrundwasserleiter der Münchner Schotterebene fließt in mehr als der Hälfte der Fläche direkt nach Norden (Abb. 28). Die zweite Hauptfließrichtung ist Nordost. Jedoch treten auch zu einem signifikanten Teil **Grundwasserfließrichtungen** nach Nordwesten und direkt nach Osten auf. Bei der Betrachtung der Grundwasserfließrichtungen wird der große Einfluss der Isar auf das Fließregime deutlich. Wie bereits beschrieben, dominiert östlich der Isar, in Flussnähe,

die Fließrichtung nach Nordwest. Diese Richtung kann sich jedoch auch lokal weiter ausbreiten. Möglicherweise sind dafür Rinnenstrukturen in der Quartärbasis verantwortlich, wie auch bei „Grub“ im Südosten von München. Des Weiteren ist auffällig, dass sich die Fließrichtung des Grundwassers westlich der Isar in Flussnähe auch direkt nach Osten, ohne nördliche Strömungskomponente, ausrichtet. Zudem treten westlich der Isar großräumig, und nicht nur in Flussnähe, Strömungsrichtungen des Grundwassers nach Nordwesten auf. Insbesondere ist dies im Nordwesten der Münchner Schotterebene erkennbar. Generell zeigt der westliche Teil, im Vergleich mit dem östlichen Teil ein unruhigeres Strömungsregime. Abb. 29 zeigt die Grundwasserfließrichtungen im Stadtgebiet München.

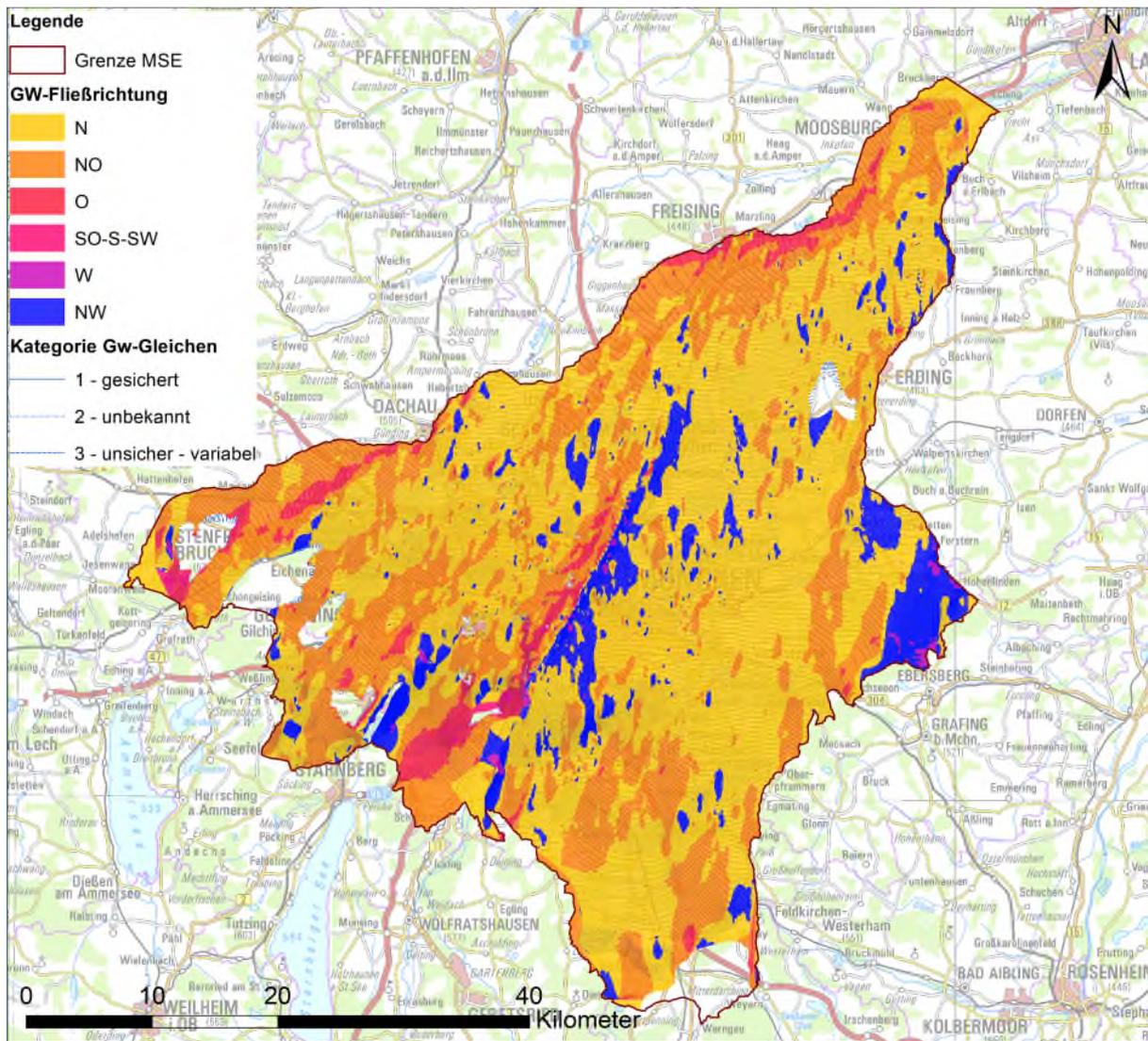


Abb. 28: Grundwasserfließrichtungen im quartären Hauptgrundwasserleiter der Münchner Schotterebene (MSE) (Stand 2014). Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, sind ausgespart.

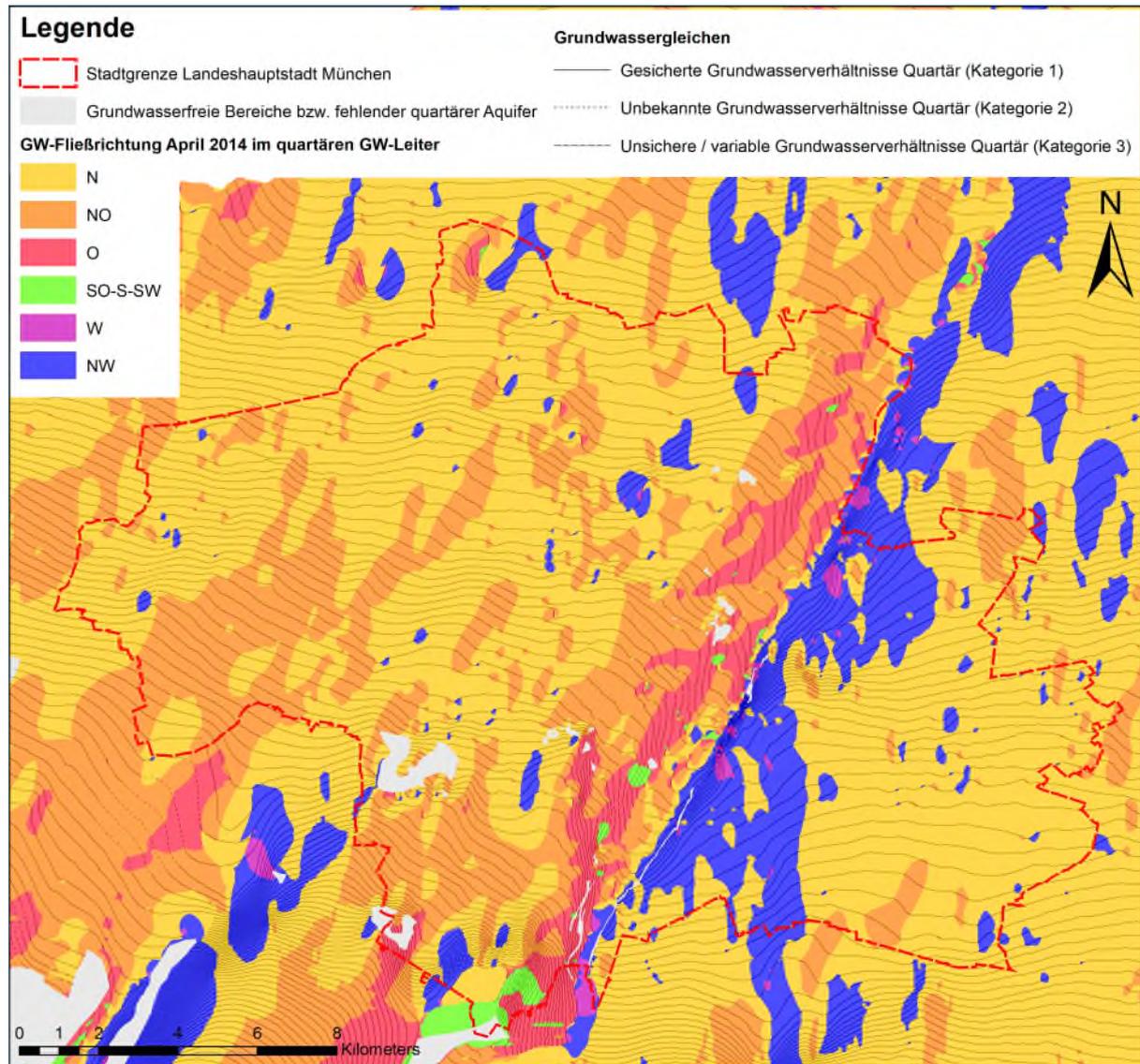


Abb. 29: Grundwasserfließrichtungen im quartären Hauptgrundwasserleiter im Stadtgebiet München (Stand 2014). Bereiche in denen der quartäre Hauptgrundwasserleiter nicht ausgeprägt oder angebunden ist, bzw. kein Grundwasser vorhanden ist, sind gekennzeichnet.

### 3.7 Hydraulische Durchlässigkeit des quartären Hauptgrundwasserleiters

Das folgende Kapitel beschreibt die Ergebnisse zur Abschätzung der hydraulischen Durchlässigkeit des quartären Hauptgrundwasserleiters und basiert auf den Ergebnissen die in den Projekten GEPO und GeoPot erzielt wurden.

#### 3.7.1 Überblick und bisheriger Kenntnisstand

Um den quartären Hauptgrundwasserleiter der Münchner Schotterebene als Ressource für Trinkwasser, Brauchwasser oder geothermisch zu nutzen ist eine flächendeckende Information über die hydraulische Durchlässigkeit ( $k_f$ -Wert) signifikant, denn die Ergiebigkeit eines Grundwasserleiters ist unter anderem entscheidend davon abhängig (z. B. Schirm 1968: 50). Bislang wurde die hydraulische Durchlässigkeit in der Regel nur über mittlere Werte beschrieben und liefert somit nur bedingt eine räumliche verteilte Aussage. Zudem sind oftmals nur ungenaue Informationen über die genaue Ermitt-

lungsmethode der beschriebenen hydraulischen Durchlässigkeit angegeben. Somit sind die Unsicherheiten in den verfügbaren Werten zur hydraulischen Durchlässigkeit oftmals groß. Um eine detaillierte Aussage über die Größen und flächenverteilten Unterschiede der hydraulischen Durchlässigkeit im quartären Grundwasserleiter der Münchner Schotterebene zu geben, wurde versucht, archivierte Informationen (z. B. Gutachten zu Pumpversuchen) zur hydraulischen Durchlässigkeit zu sammeln und systematisiert neu auszuwerten. Analog wurde mit den Daten zur Oberen Süßwassermolasse verfahren (Kapitel 4.5).

Im Folgenden werden die in der Literatur verfügbaren Angaben für den Durchlässigkeitsbeiwert der quartären Kiese der Münchner Schotterebene zusammengefasst.

Zimniok (1967: 94 ff.) untersuchte anhand von vier Bohrprogrammen die hydrogeologischen Gegebenheiten der Nord-Süd-U-Bahn Trasse. Dabei wurden maximale Durchlässigkeitsbeiwerte von bis zu  $3,0 \cdot 10^{-2}$  m/s für Rollkieslagen angegeben, während für verlehnte Schotter oder solche mit starker tertiärer Beimengung Durchlässigkeitsbeiwerte von  $5,0 \cdot 10^{-4}$  m/s ermittelt wurden. Zusammenfassend wird für den quartären Schotter ein mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert von  $1,7 \cdot 10^{-2}$  m/s angegeben.

Für die V-Trasse zwischen Haupt- und Ostbahnhof München ermittelte Exler (1967: 110) Durchlässigkeitsbeiwerte zwischen  $4,0 \cdot 10^{-1}$  m/s und  $5,0 \cdot 10^{-1}$  m/s. Die Streuung von zwei Zehnerpotenzen ist dabei aufgrund der stark schwankenden Kies-Sand-Verhältnisse der Schotter bedingt. Für das Gebiet gibt er einen Mittelwert von  $5,0 \cdot 10^{-3}$  m/s an.

Schirm (1968) untersuchte die hydrogeologischen Verhältnisse der Münchner Schotterebene östlich der Isar, insbesondere des Grundwasserleiters, welcher vom altdiluvialen Deckenschotter gebildet wird. Dort wurde der geringste Durchlässigkeitsbeiwert im Ostteil des Hohenlindener Feldes mit  $3,0 \cdot 10^{-5}$  m/s ermittelt, während der höchste Durchlässigkeitsbeiwert mit  $2,7 \cdot 10^{-2}$  m/s im Raum Trudering angegeben ist. Schirm (1968) nimmt weiterhin im Bereich des Abfanggrabens (Aschheim), einen Durchlässigkeitsbeiwert von  $1,0 \cdot 10^{-2}$  m/s an. Die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte schwanken hierbei um wenige Zehnerpotenzen. 54 % der Werte liegen in der Größenordnung von  $1,0 \cdot 10^{-3}$  m/s, 35 % bei einer Größenordnung von  $1,0 \cdot 10^{-2}$  m/s. Nur weniger als 2 % der Werte liegen niedriger.

Gebhardt (1968) untersuchte die geologischen und hydrologischen Verhältnisse beim Münchner U-Bahn-Bau im Bereich der U-Bahn Strecke zwischen Freimann im Norden und Harras im Süden. Er konnte für die Grobschotter der Münchner Schotterebene einen mittleren Durchlässigkeitsbeiwert von  $1,0 \cdot 10^{-2}$  m/s ermitteln. Für Bereiche mit Auffüllungen gibt er einen Wert von  $2,0 \cdot 10^{-4}$  m/s an. Insgesamt aber nennt Gebhardt (1968: 56) eine Schwankungsbreite der Durchlässigkeitsbeiwerte von circa zwei Dekaden.

Blasy (1974: 27 ff.) hat die Grundwasserverhältnisse westlich der Isar (München - Starnberg) untersucht und ermittelt dabei einen mittleren Durchlässigkeitsbeiwert von  $8,0 \cdot 10^{-3}$  m/s, wobei 68 % der Werte zwischen  $1,0 \cdot 10^{-4}$  m/s und  $1,0 \cdot 10^{-3}$  m/s liegen.

Seiler (1973: 352) ermittelte innerhalb eines Grundwasserversuchsfeldes in München (Dornach) die hydraulische Durchlässigkeit und nutzbare Porosität der fluvioglazialen Kiessande der Münchner Schotterebene. Aus einem dreimonatigen Pumpversuch und der Auswertung nach Cooper & Jacob resultierte dabei ein mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert von  $0,45 \cdot 10^{-2}$  m/s.

Procher (1985) untersuchte die hydraulische Durchlässigkeit auf den Trassenbereichen entlang der U-Bahn Linie U8/1 und errechnete dabei 82 Durchlässigkeitsbeiwerte. Diese liegen zwischen einer Spannweite von  $1,0 \cdot 10^{-2}$  m/s und  $4,5 \cdot 10^{-2}$  m/s. Speziell für die Niederterrasse wurde ein mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert von  $1,2 \cdot 10^{-2}$  m/s bestimmt.

Das ehemalige Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW) gibt in Ismaning einen Durchlässigkeitsbeiwert von  $4,5 \cdot 10^{-3}$  m/s an (Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft, 1983).

Vogt (2006: 11) gibt bei Untersuchungen zur geotechnischen Begutachtung für die allgemeine hydraulische Durchlässigkeit der quartären Kiese am Münchner Flughafen einen mittleren Bereich von  $5,0 \cdot 10^{-3}$  m/s an. Bei feinkornfreien und sandarmen Kiesen werden Durchlässigkeitsbeiwerte von  $1,0 \cdot 10^{-1}$  m/s angegeben. Für feinkornreiche Zwischenlagen liegen die Durchlässigkeitsbeiwerte nach (Vogt 2006: 11 f.) bei  $1,0 \cdot 10^{-5}$  m/s.

Salameh (1974) beschäftigte sich mit Hydrogeologie im Nordwesten der Münchner Schotterebene und dem angrenzenden Tertiär zwischen Isar und Paar. Für die Münchner Schotterebene südöstlich der Amper, zwischen Fürstenfeldbruck und Ottershausen, wird ein Durchlässigkeitsbeiwert von  $1,3 \cdot 10^{-2}$  m/s ermittelt.

Grottenthaler et al. (1980) beschreibt in den Erläuterungen zur geologischen Karte Fürstenfeldbruck (1:25000) einen Bereich für die hydraulische Durchlässigkeit  $1,0 \cdot 10^{-3}$  m/s bis  $9,0 \cdot 10^{-3}$  m/s. Für einen Brunnen in Mauern, der Sedimente der Moränenablagerung abteuft, wird ein Durchlässigkeitsbeiwert von  $8,0 \cdot 10^{-4}$  m/s angegeben. Allerdings wird erwähnt, dass es nicht gesichert ist, ob es sich an der Lokation um Moränenablagerung handelt (Grottenthaler et al. 1980: 58).

Krause (2001) beschreibt das Moränengebiet „Andechser Höhenrücken“ südlich von München und gibt einen Durchlässigkeitsbeiwert von  $1,0 \cdot 10^{-4}$  m/s bis  $1,0 \cdot 10^{-5}$  m/s für die Kiese aus dem Günz- und Mindelglazial,  $1,0 \cdot 10^{-3}$  m/s bis  $1,0 \cdot 10^{-4}$  m/s für Riss-Hochterrassenschotter und  $7,8 \cdot 10^{-4}$  m/s bis  $1,2 \cdot 10^{-3}$  m/s für die Kiese aus dem Würmglazial. Für postglaziale Schotter werden noch höhere Durchlässigkeitsbeiwerte von bis zu  $1,0 \cdot 10^{-2}$  m/s angegeben. Krause (2000) gibt allerdings auch Durchlässigkeitsbeiwerte für die Sedimente der Moränenablagerung an,  $3,2 \cdot 10^{-4}$  m/s bis  $7,4 \cdot 10^{-5}$  m/s für kiesige Moränensedimente und  $1,0 \cdot 10^{-7}$  m/s für feinkörnige Sedimente der Grundmoräne (Krause 2000: 156f.).

### 3.7.2 Datengrundlage und Berechnung der hydraulischen Durchlässigkeit

Da der quartäre Grundwasserleiter der Münchner Schotterebene durch die Entnahme von Brauch- und Trinkwasser, durch Wasserhaltungen bei Baumaßnahmen, durch Altlastenuntersuchungen oder auch geothermische Anlagen intensiv genutzt wird, sind in den Archiven der Wasserwirtschaftsämter, Landratsämter, des Referats für Gesundheit und Umwelt der Stadt München, der Münchner Stadtentwässerung oder des Tiefbauamts München viele Gutachten und Aufzeichnungen von Pumpversuchen vorhanden.

Auf diese umfangreiche, aber bisher für eine Flächenauswertung weitgehend ungenutzte Datenbasis wurde zurückgegriffen, um die räumliche Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit in der Münchner Schotterebene zu bestimmen. Die archivierten Pumpversuche wurden bis zum Jahr 2014 digital erfasst. Aufgrund des hohen Umfangs der vorhandenen Unterlagen konnten bis dato nicht alle verfügbaren Pumpversuchsdaten gesichtet und ausgewertet werden, sondern nur eine repräsentative Auswahl.

Die recherchierten Unterlagen wurden nach ihrer Lokalität sortiert und nach dem Vorhandensein einer Dokumentation der Pumpversuche selektiert. Im Anschluss wurde überprüft, ob die Beschreibung des Pumpversuchs auch qualitative und quantitative ausreichende Datengrundlage bietet, die sich für eine Auswertung zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes eignet.

Um die hydraulische Durchlässigkeit im quartären Hauptgrundwasserleiters der Münchner Schotterebene zu beschreiben und lokale bzw. regionale Unterschiede herauszuarbeiten, wurden die

Pumpversuchsdaten nach verschiedenen, standardisierten Verfahren neu ausgewertet. Zunächst wurden mehrere Auswerteverfahren angewandt, um ein repräsentatives Auswerteverfahren zu ermitteln, welches für die meisten vorhandenen Datengrundlagen anwendbar ist. Dieses Verfahren stellt das Theis-Verfahren (Absenkung und Wiederanstieg) mit Jakob-Korrektur (ungespannte Verhältnisse) dar und wurde prioritär angewendet. In einigen Fällen wurden auch Beobachtungsmessstellen in die Auswertung miteinbezogen und nach Dupuit-Thiem ausgewertet. Vereinzelt wurde auch das Verfahren nach Dupuit-Thiem über die „Einbohrloch“-Methode in die Auswertung miteinbezogen. Bei nur selten auftretenden gespannten Verhältnissen in der Münchner Schotterebene ist mit der Methode nach Theis (ohne Korrektur) ausgewertet worden. Die Auswertungen erfolgten mit der Software Hydrotec© und Aquasol©. Auf Basis dieser Auswertungen wurde eine räumliche Datenbank für die Durchlässigkeitsbeiwerte der Münchner Schotterebene aufgebaut und bis Ende 2019 erweitert (Kapitel 4.5): Es wurden ebenfalls ermittelte Durchlässigkeitsbeiwerte aus der Literatur miteinbezogen, wenn ihre Lage mit hoher Genauigkeit und das angewandte Auswerteverfahren bekannt und qualitativ einschätzbar beschrieben war (z. B. Schirm: 1968).

Insgesamt wurden mehrere hundert Pumpversuche innerhalb der Münchner Schotterebene recherchiert. Ende 2015 lagen bereits für 478 Lokalitäten ausgewertete Durchlässigkeitsbeiwerte für den quartären Grundwasserleiter vor. Dabei wurden die dort vorliegenden Daten im Durchschnitt mit zwei verschiedenen Auswerteverfahren anhand von jeweils zwei Pumpstufe ausgewertet, so dass insgesamt mehr als 1800 Auswertungen vorgenommen wurden. Abgedeckt wurde dabei vornehmlich die Stadt und der Landkreis München, der Raum Erding, Freising und Fürstenfeldbruck.

Um die Vergleichbarkeit der Durchlässigkeitsbeiwerte, insbesondere für eine Flächeninterpretation, zu gewährleisten, wurden alle Pumpversuche nach einheitlichen Verfahren neu ausgewertet (Abb. 30). Um einschätzen zu können, ob die Unterschiede zwischen den Werten auch räumlich andere hydraulische Verhältnisse repräsentieren und nicht nur durch die Qualität der Daten und der Auswertung hervorgerufen werden, wurde versucht, alle ermittelten Werte der hydraulischen Durchlässigkeit bezüglich ihrer Aussagegüte zu klassifizieren.

Hierfür ist ein Güte-Beurteilungssystem erarbeitet worden, das generell in zwei Bereiche eingeteilt ist. Der erste Bereich bewertet die Modellgüte des angewandten Auswerteverfahrens. Der zweite Bereich berücksichtigt die Unsicherheiten in den dokumentierten verwendeten Messwerten. Die Güte eines ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerts wird dann weiter, anhand von fünf verschiedenen Kriterien eines Entscheidungsbaums bewertet.

Die fünf Kriterien sind:

- Räumliche Aussagekraft: Werden Beobachtungsbrunnen mit einbezogen?
- Dynamisches Verfahren: Wird stationär oder instationär ausgewertet?
- Brunneneintrittsverluste: Beeinflussen die Brunneneintrittsverluste die Auswertung stark?
- Angaben zur Grundwassermächtigkeit: Ist die Grundwassermächtigkeit ermittelt/angegeben?
- Unsicherheiten in der Angabe anderer notwendiger Parameter: Wie genau ist die Förderrate, Absenkung, Abstand zu Beobachtungsmessstellen gemessen bzw. dokumentiert?

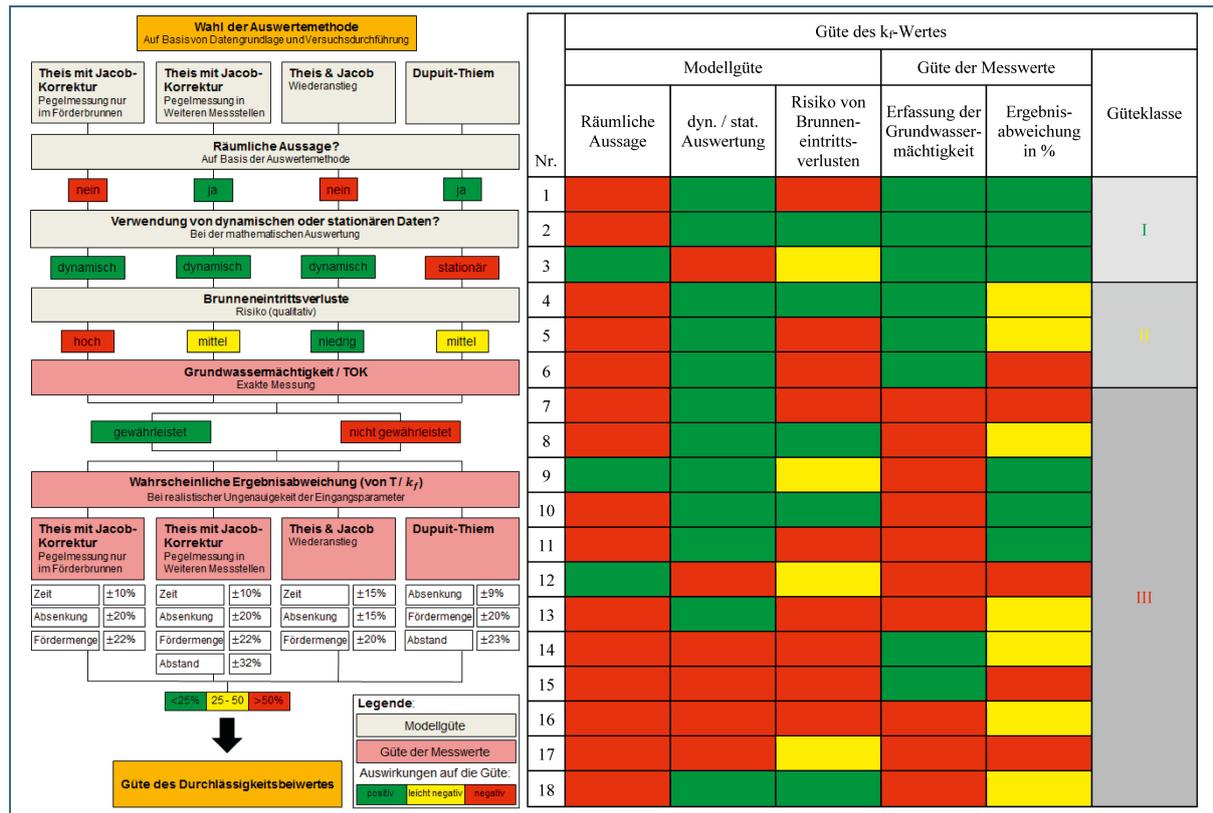


Abb. 30: Entscheidungsbaum nach der Ampelmethode zur Beurteilung der Güte eines ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerts auf Basis der vorhandenen Gutachten (links) und die Kombination der einzelnen begutachteten fünf Kriterien um die drei Güteklassen abzuleiten (rechts) (Abbildung überarbeitet nach Zosseder 2015).

Die Gütebeurteilung erfolgt nach einem Ampel-Schema. Beeinträchtigt ein Kriterium die Ermittlung des Durchlässigkeitsbeiwerts nicht negativ, sprich erzeugt es keine hohen Unsicherheiten bzw. Varianz bei der Auswertung, so bekommt dieses Kriterium eine „grüne“ Markierung. Bei einem leicht negativen Einfluss wird das Kriterium „gelb“ markiert und erzeugt es hohe Unsicherheiten bei der Auswertung wird es „rot“ markiert. Am Ende des Entscheidungsbaumes ergeben sich anhand der Farbkodierung in den fünf Feldern und ihrer Kombination drei unterschiedliche Güteklassen. Die Güteklassen wurden aus einer durchgeführten Sensitivitätsanalyse, die exemplarisch bei den Auswertemethoden durchgeführt wurde, abgeleitet und können folgendermaßen beschrieben werden:

- **Güteklasse I (hohe Güte):** Die Erfassung der Grundwassermächtigkeit und der Eingangsparameter ist gesichert. Brunneneintrittsverluste können auftreten.
- **Güteklasse II (mittlere Güte):** Die Erfassung der Grundwassermächtigkeit ist gesichert, die der Eingangsparameter jedoch nicht mehr. Brunneneintrittsverluste können auftreten.
- **Güteklasse III (niedrige Güte):** In diese Güteklassen fallen alle Durchlässigkeitsbeiwerte, bei denen die Erfassung der Grundwassermächtigkeit nicht gesichert ist und zudem auch andere Parameter mit Unsicherheiten behaftet sind (Brunneneintrittsverluste, unsichere Eingangsparameter).

Nicht alle verwendeten Durchlässigkeitsbeiwerte konnten einer vollständigen Gütebeurteilung unterzogen werden. Bei verwendeten Literaturwerten wurde die Güteklasse 2 oder 3 angesetzt, je nachdem wie es möglich war, die Ermittlung der Werte nachzuvollziehen.

An der Mehrzahl der ausgewerteten Standorte wurden mehrere Durchlässigkeitsbeiwerte ermittelt. Zum einen wurden, je nach Möglichkeit bzw. Datengrundlage und -güte, alle oben genannten Verfah-

ren (Absenkung und Wiederanstieg nach Theis mit Jacob-Korrektur, Dupuit-Thiem) zur Pumpversuchsauswertung herangezogen. Zum anderen wurden innerhalb der Auswertung mit den einzelnen Verfahren mehrere Pumpstufen betrachtet, die wiederum einzelne Durchlässigkeitsbeiwerte an einem Pumpversuchsort liefern. Die einzelnen Pumpstufen innerhalb eines Verfahrens (z. B. Absenkung nach Theis mit Jacob Korrektur) wurden zu einem repräsentativen Wert für dieses Verfahren gemittelt. Lagen mehrere Pumpversuche an einem Ort vor, so sind diese einzeln ausgewertet und aufgeführt worden. Für die räumliche Auswertung wurde dann aus allen an einem Ort verfügbaren Durchlässigkeitsbeiwerten einmal das einfache geometrische Mittel gebildet und zum anderen, unter Berücksichtigung der zugewiesenen Güteklasse, ein gewichtetes geometrisches Mittel angegeben. Die Gewichtung erfolgte dabei in der Weise, dass die Durchlässigkeitsbeiwerte mit einer Güteklasse 1 dreifach höher in die Mittelwertbildung eingingen als die Werte der Güteklasse 3. Die Werte der Güteklasse 2 gingen zweifach höher gewichtet als die Werte der Güteklasse 3 ein. Dadurch, dass teilweise mehrere Werte an einem Standort zur Verfügung standen, konnte dort eine Standardabweichung der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte angegeben werden.

Um eine generelle Übersicht über die Flächenverteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte in der Münchner Schotterebene zu erstellen, wurden die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte mit Werten aus der Literatur (z. B. Schirm, 1968) ergänzt und über geostatistische Verfahren interpoliert.

Um ein räumliches Bild der Verteilung der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte (aus dem Zeitraum 2012 bis 2015) zu bekommen, wurde ein vereinfachtes Modell für die räumliche Schätzung herangezogen. Bei der Variogrammanalyse wurde ein geschachteltes Modell an die räumliche Varianz der Daten angepasst, dass zum einen die hohe Änderung der Werte auf kurzer Distanz berücksichtigt und zum anderen eine ansteigende globale Trendkomponente bei weiteren Entfernungen beinhaltet.

### **3.7.3 Beschreibung und Interpretation der hydraulischen Durchlässigkeit im quartären Hauptgrundwasserleiter**

#### **3.7.3.1 Allgemeines**

Die Auswertungen der Pumpversuche ergab nach der Klassifikation nach DIN 18130-1 (1998) allgemein eine sehr gute bis gute hydraulische Durchlässigkeit (circa 40 % zu 60 %) im quartären Grundwasserleiter der Münchner Schotterebene. Wie in Abb. 31 und Tab. 6 ersichtlich, liegt der abgeschätzte Durchlässigkeitsbeiwert im Mittel (Median) bei  $5,6$  bis  $5,7 \cdot 10^{-3}$  m/s. Dies ist im Einklang mit den oben genannten Werten aus der Literatur. In Bereichen mit hoher hydraulischer Durchlässigkeit liegen die Durchlässigkeitsbeiwerte bei  $2,0 \cdot 10^{-2}$  m/s (90 %-Perzentil). Selten treten höhere Durchlässigkeitsbeiwerte von bis zu  $1,0 \cdot 10^{-1}$  m/s auf. Die niedrigsten mittleren Durchlässigkeitsbeiwerte im Bereich der Münchner Schotterebene liegen bei  $5,0 \cdot 10^{-4}$  m/s, sehr selten niedriger.

Bei der Betrachtung der Unterschiede in den Güteklassen ergab die statistischen Auswertungen nur geringe Unterschiede. Jedoch zeigte sich die Tendenz, dass die Auswertungen der Pumpversuche in der Güteklasse 3 leicht geringere Durchlässigkeitsbeiwerte ergeben. Die geometrische Standardabweichung lag bei Werten mit mehreren Auswertungen an einem Standort etwa zwischen 1 und 2. Es zeigte sich bei den Untersuchungen, dass die Fehlervarianz in der Pumpversuchsauswertung an einem Ort in der Regel doch deutlich kleiner ist als die räumliche Varianz der Durchlässigkeitsbeiwerte. Dies stellt die Grundvoraussetzung für die räumliche Interpretation der hydraulischen Durchlässigkeit mit dem zur Verfügung stehenden Datensatz dar.

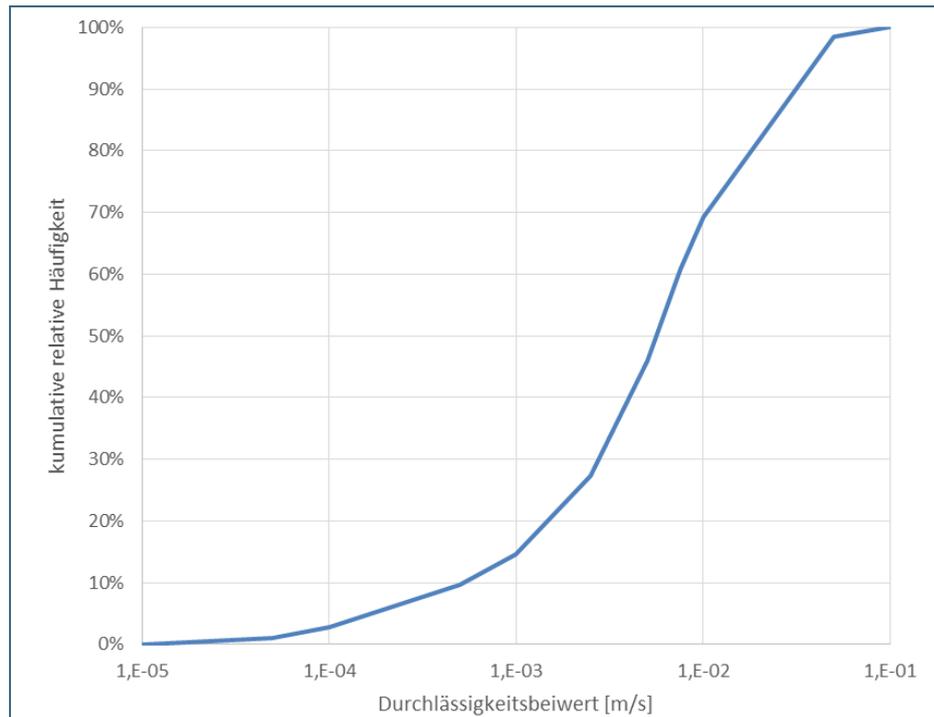


Abb. 31: Kumulative Häufigkeiten der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im quartären Grundwasserleiter der Münchner Schotterebene

Tab. 6: Statistische Lagemaße der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte im quartären Grundwasserleiter der Münchner Schotterebene

Durchlässigkeitsbeiwert [m/s]	Anzahl	Minimum	10%-Perzentil	25%-Perzentil	50%-Perzentil	75%-Perzentil	90%-Perzentil	Maximum
Alle Werte (geometrisches Mittel mehrerer Werte an den einzelnen Lokationen)	472	1,1E-05	5,3E-04	2,2E-03	5,6E-03	1,2E-02	2,1E-02	1,3E-01
Alle Werte (nach Güteklasse gewichtetes geometrisches Mittel mehrerer Werte an den einzelnen Lokationen)	472	1,1E-05	5,0E-4	2,2E-03	5,7E-03	1,2E-02	2,1E-02	1,3E-01
Werte der Güteklasse 1	133	1,1E-05	4,6E-04	1,6E-03	5,7E-03	1,5E-02	2,6E-02	1,0E-01
Werte der Güteklasse 1 + 2	246	1,1E-05	7,1E-04	2,2E-03	5,6E-03	1,4E-02	2,6E-02	1,0E-01
Werte der Güteklasse 3	287	3,6E-05	4,3E-04	1,6E-03	5,1E-03	1,0E-02	1,7E-02	1,3E-01

Es wurde der Versuch unternommen, einen räumlichen Unterschied der Durchlässigkeitsbeiwerte in Abhängigkeit der unterschiedlichen Einheiten des Quartärs bzw. der Lithologien herauszuarbeiten. Jedoch ergaben sich hierbei zuerst keine signifikant auswertbaren Unterschiede. Erst mit den weiteren Auswertungen der Jahre 2016 bis 2019 konnten die verschiedenen quartären Untereinheiten differenzierter betrachtet werden (siehe Kapitel 3.7.3.3).

### 3.7.3.2 Regionale Verteilung der ermittelten hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) im quartären Hauptgrundwasserleiter

Bei der Betrachtung der räumlichen Interpolation der hydraulischen Durchlässigkeit (Abb. 32) lassen sich einige Hypothesen ableiten. Zuerst fällt auf, dass die Randbereiche der Münchner Schotterebene tendenziell eine relativ geringe hydraulische Durchlässigkeit aufweisen. Als Beispiel für mögliche Ursachen dieser niedrigeren Durchlässigkeitsbeiwerte in den Randbereichen, werden die geologischen Verhältnisse, z. B. im Raum Erding, angeführt. Dieses Gebiet stellt einen Übergangsbereich zum Tertiären Hügelland, mit generell heterogenen Ablagerungsverhältnissen, dar. Zum einen kann der quartäre Grundwasserleiter offengelegt auftreten, zum anderen durch Löß-, Moor- und Moränenablagerungen überdeckt sein. Außerdem kann die Nähe zum Tertiären Hügelland niedrigere hydraulische Durchlässigkeit hervorrufen, da es lokal zu einem Übergang von kiesig-sandigem zu sandig-schluffigem Untergrund kommt (Doben et al. 1996). Eine Ausnahme zu den am Rand der Schotterebene auftretenden, niedrigeren Werten, stellt der nordwestliche Teil der MSE, mit sehr hohen Durchlässigkeitsbeiwerten, dar.

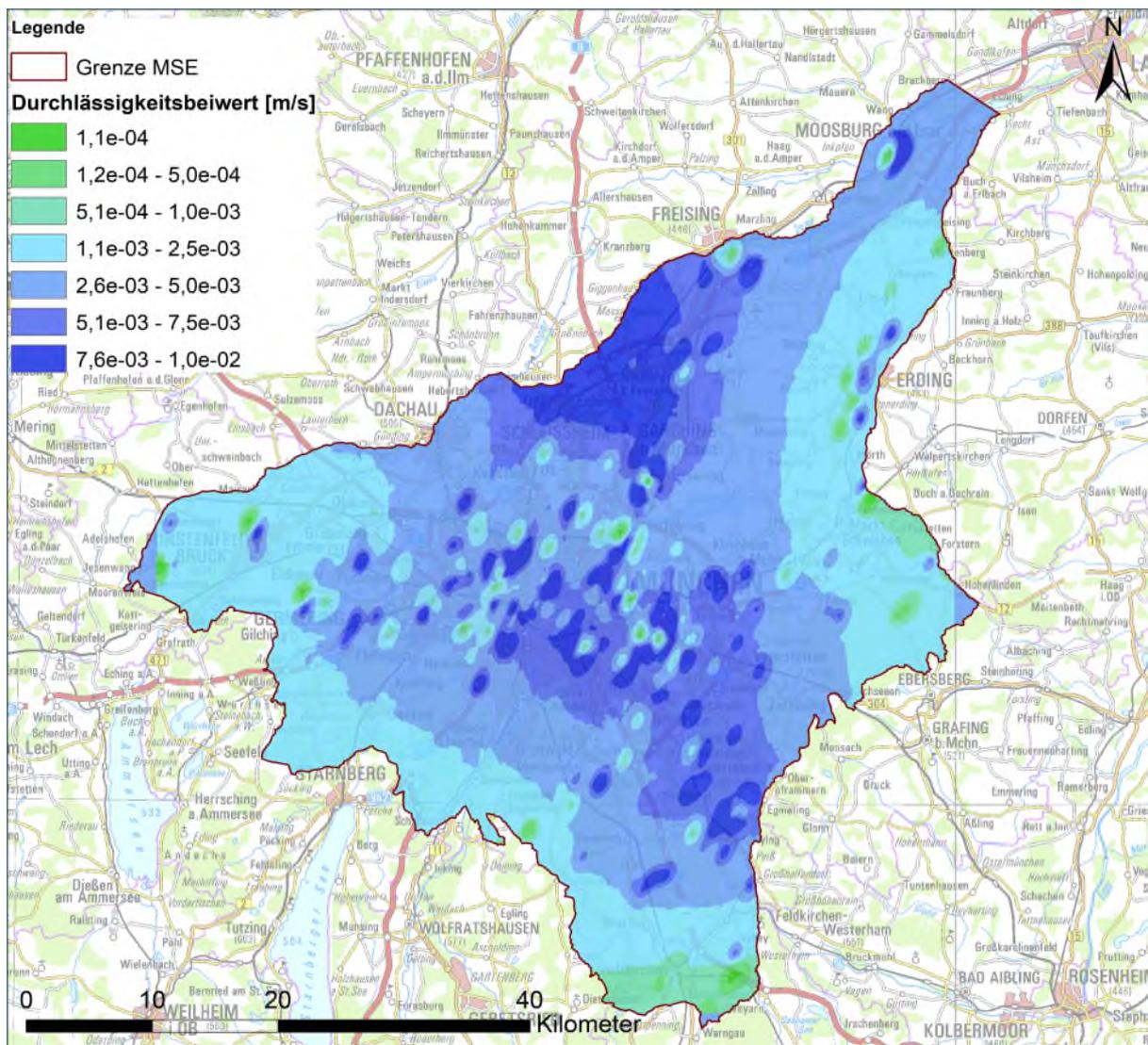


Abb. 32: Die regionalisierte Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte in der Münchner Schotterebene (MSE) auf Basis der erarbeiteten Werte und ihrer Gütebeurteilung (Stand 2015). An den einzelnen Lokalitäten wurden die vorliegenden Durchlässigkeitsbeiwerte über ihre Güte gewichtet gemittelt (Abbildung überarbeitet nach Zosseder 2015).

Im Stadtgebiet München zeigt sich eine hohe räumliche Varianz der Durchlässigkeitsbeiwerte. Es wird vermutet, dass die hydraulische Durchlässigkeit im Osten Münchens leicht erhöht ist. In wie weit die engräumige, räumliche Variation der hydraulischen Durchlässigkeit auf geologische Strukturen, wie tertiäre Rinnen oder lithologische Unterschiede, z. B. zwischen der Hoch- und Niederterrasse, zurückzuführen ist, kann erst mit einer detaillierteren Auflösung und höheren Punktdichte beurteilt werden.

Um eine lokale Beurteilung der hydraulischen Durchlässigkeit durchzuführen, wurden die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte für einige Gemeinden, soweit es die Datenlage zuließ, separat dargestellt (Abb. 33). Im Raum Fürstenfeldbruck wurden ebenfalls Durchlässigkeitsbeiwerte aus Pumpversuchen an Brunnen ermittelt, die in Moränenablagerungen abgeteufelt wurden. Aus diesen Auswertungen (vier verfügbaren Pumpversuche für Moränen), ergab sich ein mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert von  $4,3 \cdot 10^{-5}$  m/s. Dieser Wert zeigt eine gute Übereinstimmung mit den von Krause (2001) angegebenen Werten.

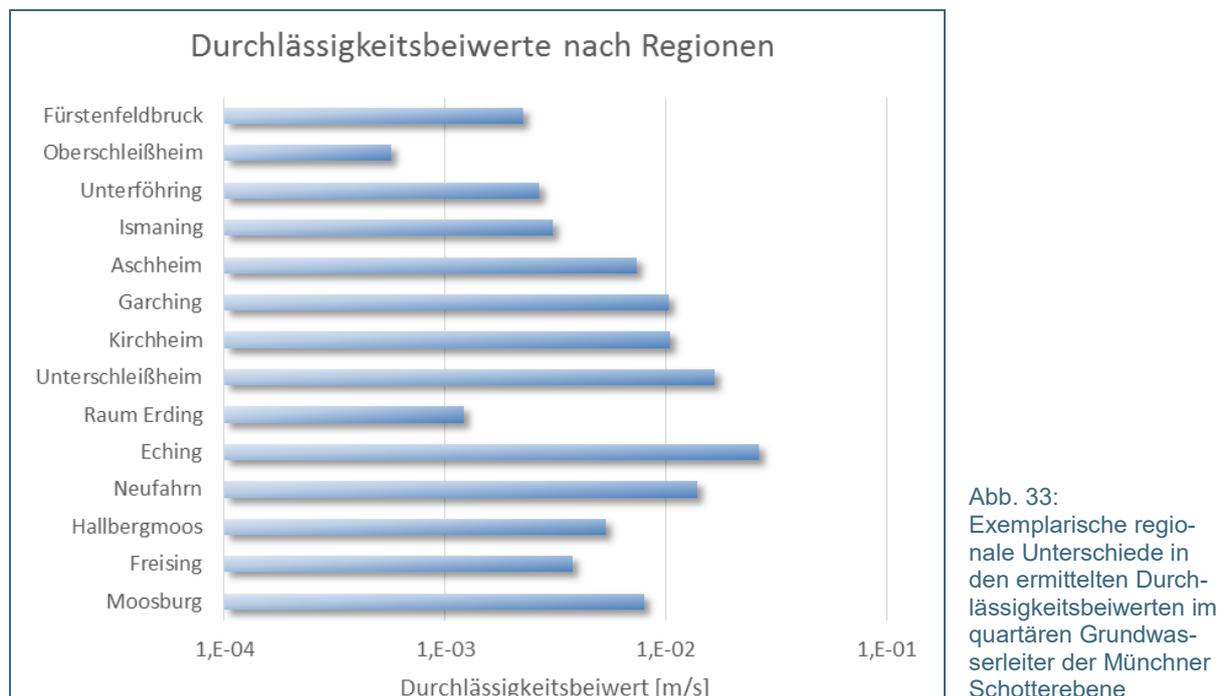


Abb. 33: Exemplarische regionale Unterschiede in den ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerten im quartären Grundwasserleiter der Münchner Schotterebene

### 3.7.3.3 Ermittelte hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) im quartären Hauptgrundwasserleiter nach hydrogeologischen Großeinheiten

Die Auswertung der Pumpversuche erfolgte 2016 bis 2019 nach den hydrogeologischen Großeinheiten des Quartärs (Abb. 34 und Abb. 35), als Ergänzung zu den bereits durchgeführten, generellen Auswertungen aus dem Jahr 2012 bis 2015 (siehe Kapitel 3.7.3.2). Die Großeinheit der OSM wird in Kapitel 4.5.3 beschrieben.

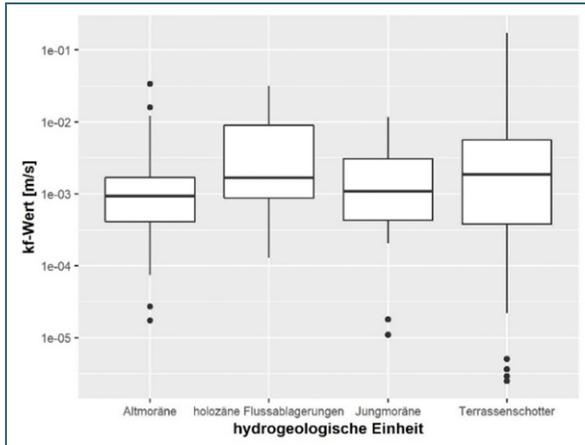


Abb. 34: Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte in den quartären bzw. holozänen Einheiten

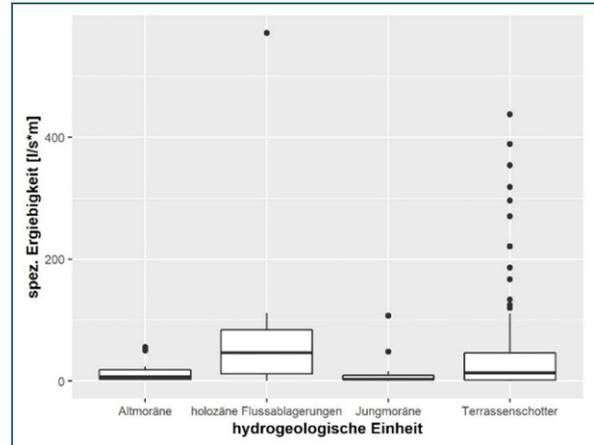


Abb. 35: Verteilung der spezifischen Ergiebigkeiten in den quartären bzw. holozänen Einheiten

### Fluviatile Ablagerungen

Bei den Auswertungen des Durchlässigkeitsbeiwertes in den fluviatilen Ablagerungen, wurde weiter in Terrassenschotter, welche würmeiszeitliche Nieder- und risseiszeitliche Hochterrassensedimente umfassen, sowie holozäne Flussablagerungen unterschieden. Der geometrische Mittelwert des  $k_f$ -Wertes (Güteklasse 1 und 2) in den holozänen Flussablagerungen beträgt  $4,39 \cdot 10^{-4}$  m/s, wobei sich 80 % der Durchlässigkeitsbeiwerte im Wertebereich zwischen  $5,92 \cdot 10^{-4}$  m/s und  $1,87 \cdot 10^{-2}$  m/s bewegen. Die Auswertung der Pumpversuche ergab eine spezifische Ergiebigkeit von  $66,63$  l/(s\*m). Der Maximalwert konnte mit  $571,12$  l/(s\*m) im Raum Freising bestimmt werden. 90 % der errechneten Werte aus holozänen Flussablagerungen liegen unter  $100$  l/(s\*m).

### Terrassenschotter

Im Bereich der Terrassenschotter konnten 178 Pumpversuche ausgewertet werden. Der ermittelte geometrische Mittelwert der ausgewerteten Pumpversuche liegt bei  $1,02 \cdot 10^{-3}$  m/s (Güteklasse 1 und 2). Der Wertebereich der ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte liegt zwischen  $2,54 \cdot 10^{-4}$  m/s (10 %-Quantil) und  $1,8 \cdot 10^{-2}$  m/s (90 %-Quantil). Auffallend ist, dass die ermittelten  $k_f$ -Werte im Münchner Stadtgebiet relativ niedrig sind (geom. Mittelwert:  $1,22 \cdot 10^{-4}$  m/s). Die im Quartär des Münchner Stadtgebiet erhobenen  $k_f$ -Werte stammen aus den U-Bahnbauprojekt zur U5-Verlängerung und sind lokal eng begrenzt. Diese  $k_f$ -Werte tendieren generell niedriger auszufallen, verglichen mit den ermittelten Werten von 2012 bis 2015 ( $5,6 \cdot 10^{-3}$  m/s), welche eine deutlich weitere räumliche Abdeckung aufweisen. Der Wert entspricht auch den mittleren Durchlässigkeitsbeiwerten, welche in den anderen Landkreisen des Projektgebiets erhoben wurden (geom. Mittelwerte zwischen  $6,67 \cdot 10^{-4}$  m/s und  $7,72 \cdot 10^{-3}$  m/s). Der Terrassenschotter weist im Mittel eine spezifische Ergiebigkeit von  $42$  l/(s\*m) auf. Vergleichbar zu den holozänen Flussablagerungen liegen 80 % der Werte im Intervallbereich von  $0,38$  l/(s\*m) bis  $101,8$  l/(s\*m).

### Jungmoranenlandschaft

Die lokalen Grundwasserleiter innerhalb von Moränenlandschaften sind meist deutlich kleiner und heterogener ausgeprägt als der quartäre Hauptgrundwasserleiter der Schotterebene. Im Süden der Schotterebene befinden sich lokale Grundwasserleiter in der würmeiszeitlichen Jungmoränenlandschaft der Landkreise Ebersberg, Landsberg, Starnberg und Fürstfeldbruck. Insgesamt konnten in diesen Grundwasserleitern 17 Pumpversuche ausgewertet werden. Die mittlere hydraulischen Durch-

lässigkeitsbeiwerte liegen bei  $9,4 \cdot 10^{-4}$  m/s. Dabei variieren die errechneten  $k_f$ -Werte in dem Wertebereich von  $9,5 \cdot 10^{-3}$  m/s und  $3,6 \cdot 10^{-4}$  m/s. Die Auswertung der Pumpversuche ergab einen mittleren Wert von  $14,7$  l/(s\*m) für die spezifische Ergiebigkeit. Dabei lagen 80 % der Werte für die spezifische Ergiebigkeit zwischen  $0,89$  l/(s\*m) und  $31,86$  l/(s\*m).

### Altmoränenlandschaft

Fast alle Pumpversuche, die im Bereich der Altmoränenlandschaft verzeichnet sind, wurden in den Grundwasserhorizonten der risszeitlichen Endmoränengebiete durchgeführt. Diese sind in den Landkreisen Ebersberg, Erding, Fürstenfeldbruck und Landshut zu finden. 32 Pumpversuche konnten hier ausgewertet werden, deren Durchlässigkeitsbeiwert durch ein Mittel von  $6,2 \cdot 10^{-4}$  m/s beschrieben werden kann. Die Abweichungen liegen im Bereich von  $3,05 \cdot 10^{-3}$  m/s (90 %-Quantil) bis  $7,2 \cdot 10^{-5}$  m/s (10 %-Quantil). Die spezifische Ergiebigkeit wird im Mittel bei  $13,51$  l/(s\*m) benannt. Dabei liegen 80 % der Werte im Bereich von  $1,43$  l/(s\*m) bis  $34,4$  l/(s\*m).

Ein einzelner Wert wurde im Landkreis Erding erhoben, der einer mindeleiszeitlichen Moräne zuzuordnen ist. Die Auswertung ergab hier einen Durchlässigkeitsbeiwert von  $1,23 \cdot 10^{-3}$  m/s bei einer spezifischen Ergiebigkeit von  $20,6$  l/(s\*m).

#### 3.7.3.4 Ermittelte hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) im quartären Hauptgrundwasserleiter nach Landkreisen

In Tab. 7 sind die gemittelten  $k_f$ -Werte und die spezifische Ergiebigkeit für die jeweiligen hydrogeologischen Großeinheiten in den verschiedenen Landkreisen zusammengefasst. Die Großeinheit der OSM wird in Kapitel 4.5.3 zusammengefasst.

Tab. 7: Zusammenfassung der Ergebnisse der Pumpversuchsauswertung nach Landkreis und hydrogeologische Großeinheit. „kf\_all“ beschreibt den geometrische gemittelten  $k_f$ -Wert aller Güteklassen, „kf\_GK\_1\_2“ den geometrisch gemittelten  $k_f$ -Werte der Güteklasse 1 und 2 und „spezErg“ gibt den arithmetisch gemittelten  $k_f$ -Wert der spezifischen Ergiebigkeit an.

Landkreis	Geologische Einheit	Anzahl	kf_all (m/s)	kf_GK1_2 (m/s)	spezErg (l/s*m)
Dachau	Niederterrassenschotter	4	1,25E-03	-	10,6
Ebersberg	Jungmoräne (würmzeitlich)	13	5,69E-04	6,36E-04	7,7
Ebersberg	Niederterrassenschotter	16	6,67E-04	8,48E-04	31,3
Ebersberg	Rißmoräne	10	3,09E-04	2,14E-04	13,3
Erding	Altmoräne (Mindel)	2	1,48E-03	1,43E-03	20,7
Erding	holozäne Flussablagerungen	3	3,23E-04	2,70E-04	1,7
Erding	Niederterrassenschotter	12	2,01E-03	1,05E-03	17,8
Erding	Rißmoräne	16	2,45E-03	1,44E-03	14,7
Freising	holozäne Flussablagerungen	18	3,54E-03	5,89E-04	54,2
Freising	Niederterrassenschotter	12	5,38E-03	6,88E-03	108,4
Fürstenfeldbruck	holozäne Flussablagerungen	2	1,09E-03	-	58,7
Fürstenfeldbruck	Jungmoräne (würmzeitlich)	2	1,74E-03	1,41E-03	9,4
Fürstenfeldbruck	Niederterrassenschotter	40	1,86E-03	3,06E-03	19,2
Fürstenfeldbruck	Rißmoräne	3	8,90E-05	2,06E-04	8,5
Landsberg	holozäne Flussablagerungen	1	9,43E-04	-	-
Landsberg	Jungmoräne (würmzeitlich)	1	1,17E-02	-	-
Landsberg	Niederterrassenschotter	4	2,32E-03	1,98E-04	-

Landkreis	Geologische Einheit	Anzahl	kf_all (m/s)	kf_GK1_2 (m/s)	spezErg (l/s*m)
Landsberg	Rißmoräne	1	7,70E-05	7,70E-05	-
Landsberg	Schotter Mindel	2	1,19E-04	4,60E-05	-
München	Niederterrassenschotter	27	1,73E-03	4,04E-03	53,0
München Stadt	Niederterrassenschotter	32	1,16E-04	1,22E-04	5,1
Starnberg	holozäne Flussablagerungen	1	1,02E-02	-	51,6
Starnberg	Jungmoräne (würmzeitlich)	1	1,06E-02	1,05E-02	107,5
Starnberg	Niederterrassenschotter	29	7,71E-03	1,16E-02	84,8

## 4 Grundwasserverhältnisse der Oberen Süßwassermolasse (OSM)

Das folgende Kapitel beschreibt die Grundwasserverhältnisse der oberflächennahen, tertiären Grundwasserleiter (OSM) und basiert auf den Ergebnissen, die vorwiegend im Projekt GeoPot erzielt wurden. Basis der hydrogeologischen Interpretation der oberflächennahen tertiären Grundwasserstockwerke war eine umfassende geologische 3D-Modellierung, resultierend in ein 3D-Lithofaziesmodell, mit dem die verschiedenen Grundwasserhorizonte klassifiziert werden konnten. Ein zweiter Schwerpunkt lag in einer flächendeckenden Stichtagsmessung zur Bestimmung der hydraulischen Verhältnisse dieser Stockwerke, sowie die Auswertung von Grundwasserganglinien.

### 4.1 Geologische und hydrogeologische Beschreibung der Oberen Süßwassermolasse (T1 bis T4) und 3D Lithofaziesmodell München

Das bearbeitete Gebiet liegt im bayerischen Molassebecken, in welchem allgemein die abgetragenen Schuttmassen der Alpen abgelagert wurden. Im Bereich der Münchner Schotterebene ist die Molasse von den mächtigen Ablagerungen des Quartärs bedeckt. Unterhalb des tertiären Schichtpaketes finden sich die mesozoischen Sedimente aus der Trias, dem Jura und der Kreide, sowie die des Kristallins. Die tertiären Schichtfolgen haben eine Gesamtmächtigkeit von über 2.000 m (Hafen und Eckenberger, 1992: 13), wobei für das betrachtete Gebiet nur die oberen 200 m bis 300 m relevant sind. Eine detaillierte Darstellung der zugehörigen Einheiten der OSM bietet das Kapitel der hydrofaziellen Untergliederung (4.2.3). Die Oberfläche des Tertiärs fällt generell nach NE ein (siehe Kapitel 3.2). Die Basis des Hauptgrundwasserleiters der OSM, welcher sich in mehrere grundwasserleitende Horizonte untergliedert, liegt im Großraum München bei circa 280 m ü. NN (Hafen und Eckenberger, 1992: 13). Damit errechnet sich für den Bereich der OSM (Hangendserie), mit mehreren grundwasserführenden Horizonten (T1 – T4), eine ungefähre Gesamtmächtigkeit von circa 210 m im Raum München (Hafen und Eckenberger, 1992: 13 ff.).

Die Grundwasserdeckschichten im Arbeitsgebiet bilden im zentralen bzw. südlichen Teil die quartären Ablagerungen (Schotterdecken bzw. Schotterterrassen) der Münchner Schotterebene. Im südlichen Teil schließen die Ablagerungen der Alt- und Jungmoränen an. Im Bereich des Tertiären Hügellandes sind es die Sand-Kies-Schluff-Wechselfolgen, welche von Unger (1983) als Mischserie bzw. Hangendserie klassifiziert wurden. Die Hangendserie bildet die Grundwasserdeckschicht des oberen tertiären Hauptgrundwasserleiters (T1). Die „Nördlichen Vollsotter“, die regional auftreten und zumeist kiesig-sandig ausgebildet sind, haben hohe wasserwirtschaftliche Bedeutung. An deren Randbereichen besteht zumeist eine Verzahnung mit einer feinsandig bis schluffigen Fazies, die, primär im Bereich der sandig ausgebildeten Grundwasserleiter, eine bedeutende Rolle in Bezug auf die Trink- und Brauchwassernutzung spielt (Prösl und Anders, 2011: 19). Die obersten Schichten der tertiären Sedimentfolge („Tertiäroberkante“) sind im Süden vorrangig als schluffig-feinsandige Sedimente („Flinzgesteine“) ausgebildet, wogegen im Norden zunehmend sandig-kiesige Schichtfolgen im Liegenden der Quartärbasis auftreten (Prösl und Anders, 2011: 20). Dies zeigt sich auch durch hydraulische Fensterstrukturen, die in einem SW-NE verlaufenden Band am Nordrand der Schotterebene verlaufen.

Durch die differenzierte lithofazielle Ausbildung des Quartärs und des Tertiärs, sind im Bereich der Münchner Schotterebene oberflächennah generell zwei Hauptgrundwasserstockwerke, das obere (Quartär) und das untere (Tertiär – Obere Süßwassermolasse) Hauptgrundwasserstockwerk ausgebildet. Informationen zum quartären Hauptgrundwasserstockwerk bietet Kapitel 3. Das tertiäre Hauptgrundwasserstockwerk ist ein ausgedehnter, großräumig zum Teil zusammenhängender Grundwasserkörper. Vertikal wird es durch stauende Schichten in verschiedene Niveaus gegliedert, wobei die

grundwasserführenden Schichten in horizontaler Richtung nicht durchgehend vorhanden sind, sondern linsenartig auskeilen (Hafen und Eckenberger, 1992: 16 f.). Die feinsandigen bis kiesigen Horizonte stellen die wasserführenden Schichten dar. Bereits Egger et al. (1983) beschrieb, dass die grobkörnig ausgebildeten Horizonte als Drainage für die feinkörnigeren Sedimente dienen. Trotz der hohen Heterogenität, in Bezug auf die vertikale und horizontale Verbreitung der grundwasserführenden Schichten innerhalb der Hangendserie, lassen sich Tiefenbereiche definieren, in denen diese verstärkt auftreten können (Hafen und Eckenberger, 1992: 16 f.). Die Verbreitung der grundwasserführenden Schichten, sowie der detaillierte Ausbau der Oberen Süßwassermolasse, wird in der Literatur, z. B. Prösl und Anders, 2011: 22 ff.; Unger, 1983; Doppler et al., 2005, bereits erläutert. Zudem bietet das Kapitel 4.2 (Geologisches 3D-Lithofaziesmodell und hydrofazielle Untergliederung) einen Überblick über die Genese und die Lithologie der OSM. Da die allgemeine Grundwasserfließrichtung von SW nach NE verläuft, bewegt sich das Grundwasser von einem Bereich mit sandiger Fazies im Süden in Richtung kiesiger Serien im Norden, welche zum Teil mit den quartären Kiesen in direktem Kontakt stehen (Prösl und Anders, 2011: 23 ff.).

Laut Egger et al. (1983) ist das bayerische Molassebecken für die wasserführenden, jungtertiären Schichten (circa 50 m – 250 m u. GOK), wie folgt hydraulisch gekennzeichnet. Im Westteil bilden die Donau, im Ostteil die Isar, der Inn und ebenfalls die Donau die Hauptvorflut. Die Grenze liegt in etwa auf einer Linie zwischen Freising und Neustadt a. d. Donau. D.h., das betrachtete Arbeitsgebiet liegt größtenteils im westlichen, jedoch auch zum Teil im östlichen Gebiet. Im Bereich zwischen Isar und Amper ist die Grundwasserfließrichtung der jungtertiären Grundwasserleiter generell SW-NE gerichtet. Das Grundwassergefälle liegt nach Egger et al. (1983) zwischen 2 ‰ – 5 ‰. Im Westen des Arbeitsgebietes hat die Amper nur im Bereich zwischen Ammersee und Grafrath eine Vorflutfunktion für den tertiären Grundwasserleiter. Salameh (1974) identifizierte im Bereich zwischen Fürstenfeldbruck und Haimhausen eine Grundwasserscheide für den tertiären Grundwasserleiter. Diese verläuft im westlichen Bereich in paralleler Ausrichtung zur Amper in SSW-NNE Richtung (Hafen und Eckenberger, 1992: 21 ff.). Die Südgrenze des tertiären Grundwasserleiters verläuft etwa im Bereich zwischen Inning am Ammersee und München-Forstenried. Die Grundwasserführung der OSM geht in diesem Bereich zurück, da die sandig-kiesigen Horizonte nur noch geringmächtig ausgeprägt sind und eine tonig-schluffigen Fazies dominiert (Hafen und Eckenberger, 1992: 21 ff.). Dies wird auch deutlich, da in diesem Bereich die generelle Anzahl an Messstellen und Brunnen, die die OSM erschließen merklich zurückgeht.

Die folgende, generelle hydrogeologische Unterteilung in die verschiedenen grundwasserführenden Horizonte der Oberen Süßwassermolasse nach Prösl und Anders (2011), konnte nach Bestätigung durch das 3D-Lithofaziesmodell der TU München, in Teilen übernommen werden. Die Einteilung wurde intensiv geprüft, zum Teil überarbeitet und verfeinert. Im Stadtgebiet München wurde eine weitere Unterteilung des T1 Horizonts (T1A bis T1D) durchgeführt. Alle weiteren Details des 3D-Lithofaziesmodells und der hydrofaziellen Unterteilung sind in Kapitel 4.2 vermerkt.

Das Hauptgrundwasserstockwerk der quartären Sedimente wurde intensiv aufgearbeitet und in Kapitel 3 beschrieben. Die tertiären Schichtfolgen sind bis auf ein Niveau von circa 440 m ü. NN – 430 m ü. NN (Raum Freising – Moosburg), bzw. 600 m ü. NN im Süden (Raum Starnberg – Wolfratshausen) abgetragen (siehe Kapitel 3.2). Das sehr unruhigen Relief der „tertiären“ Oberfläche mit eingetieften Rinnenstrukturen, erstreckt sich vom Bereich der Moränen im südlichen Projektgebiet in Richtung Norden bis an den Rand des Tertiären Hügellandes im Bereich von Dachau über Freising bis Moosburg (Prösl und Anders, 2011: 31).

Der oberste Teil der tertiären Schichtfolge, der über einem Niveau von circa 450 m ü. NN ausgeprägt ist, wird von einer Wechselfolge aus Feinsanden, Kiesen und eher undurchlässigen Sedimenten (Schluffe, Mergel, Tone) ausgebildet. Da der generelle Aufbau der Schichten und die Ablagerungsbedingungen sehr heterogen sind, lassen sich die definierten stratigraphischen Einheiten nicht zwingend mit einer

hydrogeologischen Untergliederung der OSM in Einklang bringen. Die Fragestellung nach getrennten, hydraulischen Niveaus bzw. nach eigenständigen, zumindest in Teilbereichen durchhaltenden Grundwasserstockwerken im Arbeitsgebiet, bestimmte die weiteren Arbeiten. Es zeigte sich durch den geologischen Aufbau im 3D-Lithofaziesmodell (Kapitel 4.2) und durch die Messungen der Piezometerhöhen (Kapitel 4.3.2), dass man zumindest in Teilbereichen von mehreren voneinander hydraulisch abgegrenzten Horizonten ausgehen kann. Im Bereich der kiesig bis sandig ausgebildeten Vollsottern und den sie umgebenden Feinsandserien lassen sich lokal bis zu vier tertiäre Grundwasserstockwerke unterscheiden (Prösl und Anders, 2011: 33 ff.).

Für das **obere, tertiäre Grundwasserstockwerk (T1)** kann im Bereich des Tertiären Hügellandes die Basis in einem Niveau zwischen circa 460 m ü. NN – 440 m ü. NN angesetzt werden. Lokal kann es von kleinen, unabhängigen Schichtwasservorkommen (zumeist im Bereich über 500 m ü. NN) überlagert werden. Das im Liegenden folgende, **mittlere, tertiäre Grundwasserstockwerk (T2)** tritt in einem Niveau zwischen circa 450 m ü. NN – 380 m ü. NN, mit zum Teil deutlichen Abweichungen auf. Es entwässert, wie auch der T1-Aquifer, zum Teil direkt in Richtung der Hauptvorflutern Amper, Ilm und Abens im nördlichen Tertiären Hügelland und Sempt und Isar im Ost- bzw. Nordostteil. Die Grundwasserneubildung erfolgt für das T2-Stockwerk nach dem Leaky-Aquifer-Prinzip. Die Grundwasservorkommen **im unteren und tieferen tertiären Grundwasserstockwerk (T3 und T4)** sind von direkten klimatischen Einwirkungen abgekoppelt. Die Grundwasserneubildung erfolgt ausschließlich nach dem Leaky-Aquifer-Prinzip. Die Stockwerke treten im Niveau von circa 380 m ü. NN – 330 m ü. NN (T3) und circa 330 m ü. NN – 290 m ü. NN (T4), mit zum Teil deutlichen Abweichungen auf (Prösl und Anders, 2011: 33 ff.).

#### **Oberes tertiäres Grundwasservorkommen (T1) (OSM)**

Das **obere, tertiäre Grundwasserstockwerk (T1)** ist im Bereich der Münchner Schotterebene und den angrenzenden Gebieten nachweisbar und kann zum Teil tritiumhaltiges Grundwasser enthalten. Es ist zumeist direkt vorflutbezogen und tritt in einem Niveau zwischen circa 500 m ü. NN – 450 m ü. NN auf, wobei es im nördlichen Bereich der Münchner Schotterebene (Großraum Flughafen München) erodiert wurde. Innerhalb des Tertiären Hügellandes kann es von lokalen Schichtwasservorkommen überlagert sein.

Die lithofazielle Ausbildung der oberen grundwasserführenden Schichtfolge besteht im Norden aus einer Wechselfolge von Feinsanden, sandigen Schluffen und untergeordnet Kiesen, deren Anteile lokal stark wechseln. Aufgrund der Lage ihrer Basis, im Bereich von circa 460 m ü. NN – 440 m ü. NN, entwässern sie direkt zu den Vorflutern (Prösl und Anders, 2011: 39 ff.).

Im Bereich der Münchner Schotterebene und in den südlich anschließenden Gebieten glazialer Sedimentüberlagerung, wird das oberflächennahe Tertiär von Schotterterrassen und glazialen Sedimenten (Moränen und Altschotter) überlagert. Hier bestehen die tertiären Gesteinsfolgen im Niveau zwischen 600 m ü. NN – 450 m ü. NN aus Flinzsanden, Sandmergeln und Flinzmergeln und nur untergeordnet aus Kiesen. Vielfach werden die quartären Kiese von Flinzsanden unterlagert. Erst im Liegenden dieser oberen Flinzsande treten die horizontbildenden bzw. trennenden Flinzmergel auf (Prösl und Anders: 39 ff.). Die im Liegenden folgenden Flinzsand-/Sandmergelserien sind, im Gegensatz zum bisherigen Wissensstand, oft in hydraulischen Kontakt mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter und werden dem oberen, tertiären Grundwasserstockwerk (T1) zugeteilt. Details zur Interaktion zwischen quartärem und tertiärem Grundwasserleiter gibt das Kapitel 4.2.4.

Das **obere, tertiäre Grundwasserstockwerk (T1)** konnte im **Stadtgebiet München** mit Hilfe des 3D-Lithofaziesmodells in weitere, zum Teil korrespondierende **Unterhorizonte (T1A – T1D)** unterteilt werden (Kapitel 4.2).

Im „Maisach-Amper-Gebiet“ bildet die Maisach, sowie die Amper, aber auch die Moosach die südliche Vorflut. Die Glonn und die Amper bilden die nördliche Vorflut. Zwischen Abens, Paar und Ilm besteht eine Grundwasserscheide. Im Westen bildet der Lech die Vorflut. Im „Abens-Gebiet“ bildet die Abens die Vorflut für das obere Grundwasservorkommen (T1). In Richtung Amper und Ilm besteht eine flache Grundwasserscheide. Diese erstreckt sich in den Hochlagen des Tertiären Hügellandes zwischen Au in der Hallertau und Haag an der Amper. Im „Isen-Vils-Gebiet“ ist eine schmale Hochzone ausgebildet, die zu den jeweils angrenzenden Vorflutern (Strogn, Vils, und Isen) hin entwässert (Prösl und Anders, 2011: 39 ff.).

Die Potentialdifferenzen zwischen dem quartären und dem oberen, tertiären Grundwasserstockwerk nehmen von Süden nach Norden, soweit das obere, tertiäre Grundwasserstockwerk ausgebildet ist, ab. Es erfolgt eine von oben nach unten gerichtete Grundwasserströmung bis auf Höhe Dietersheim (Prösl und Anders, 2011: 39 ff.). Ab dort scheint das obere, tertiäre Grundwasserstockwerk (T1) erodiert zu sein und wird durch das mittlere, tertiäre Grundwasserstockwerk (T2) lokal als oberflächennahes Stockwerk abgelöst.

### **Mittleres tertiäres Grundwasservorkommen (T2) (OSM)**

Das **mittlere, tertiäre Grundwasserstockwerk (T2)** ist im zentralen und nördlichen Arbeitsgebiet großflächig verbreitet, im südlichen Bereich sind, wohl aufgrund der faziellen Ausprägung, kaum Belegpunkte verfügbar. Es ist wegen der lithologischen Ausbildung des Grundwasserleiters deutlich zwischen einem Nord- und Südteil zu unterscheiden. Der Grund ist die Verbreitung der unterschiedlichen Faziesräume, der der „Nördlichen Vollschotter“ (nördlich der Linie Dachau–Neufahrn–Erding) einerseits und der Feinsand-Mergelserien im Süden andererseits. Das Verbreitungsniveau liegt in einem Bereich zwischen 450 m ü. NN – 380 m ü. NN.

Zwischen dem Südrand des Tertiären Hügellandes (Bereich zwischen Moosach und Moosburg) und dem Bereich Neufahrn bis Erding fehlen die Gesteine des oberen tertiären Grundwasserleiters (T1). Hier liegt der quartäre, kiesig ausgebildete Grundwasserleiter direkt über dem kiesig bzw. schluffig-tonig ausgebildeten mittleren, tertiären Grundwasserleiter (T2). Im Raum München und im südlich anschließenden Gebiet, wird das mittlere tertiäre Grundwasserstockwerk (T2) von dem dort ausgebildeten oberen, tertiären Grundwasserstockwerk (T1) überlagert. Zwischen den Grundwasserleitern sind Trennschichten mit einer Mächtigkeit von bis zu 30 m eingeschaltet. Zumeist sind die gut durchlässigen, kiesig bis feinsandig ausgebildeten, wasserführenden Horizonte nicht durchhaltend. Das Grundwasserströmungsbild zeigt, ein von SW nach NE ausgerichtetes Fließschema, wobei das Ampertal und das Isartal östlich von Freising die Hauptvorflutzone darstellen. Das „Isen-Vils-Gebiet“ ist auf die Isar ausgerichtet und zwischen Amper und Abens besteht eine flache Grundwasserscheitelzone (Prösl und Anders, 2011: 39 ff.).

Es bestehen lokal ausgeprägte Potentialdifferenzen, wie z. B. südlich des Bereichs zwischen Eching und Erding (Kontakt Quartär und T2) (Prösl und Anders, 2011: 39 ff.). Die hier auftretenden Differenzen zwischen dem quartären und dem mittleren tertiären Grundwasservorkommen haben eine von oben nach unten gerichteten Strömung. Nördlich dieses Bereichs kehren sich die Verhältnisse um und es tritt ein von unten nach oben gerichteter Aufstieg von Grundwasser in den quartären Grundwasserleiter auf. Im Gebiet zwischen Glonn und Amper besteht eine von unten nach oben gerichteten Strömung (Aufstieg von T2 in T1). In den übrigen Gebieten, z. B. im „Isen-Vils-Gebiet“ und im „Amper-Abens-Gebiet“, existiert ein Zufluss von Grundwasser aus dem oberen (T1) in das untere Stockwerk (T2)

### **Unteres (T3) und Tieferes (T4) tertiäres Grundwasservorkommen (OSM)**

Das **untere, tertiäre Grundwasserstockwerk (T3)** ist zumindest in großen Teilen durch das mittlere, tertiäre Grundwasserstockwerk (T2) überlagert und reicht von Norden bis nach Süden über den Raum

München hinaus. Das untere Grundwasserstockwerk (T3) besteht im Nordteil (Tertiäres Hügelland) aus den Schotterserien der Älteren Serie, die im Raum Freising eine Mächtigkeit von 15 m – 25 m aufweisen. Südlich des Bereichs zwischen Dachau und Erding sind hauptsächlich Feinsand-Serien mit eingeschalteten feinsandigen Schluffen und Sandmergeln bzw. vereinzelt Kieslagen vorhanden. Die grundwasserführenden Schichten liegen in einem Niveau von circa 380 m ü. NN – 330 m ü. NN (Prösl und Anders, 2011: 39 ff.).

Das Grundwasserfließschema ist generell in Richtung NE gerichtet. Im Raum Freising ist ein großräumiger Absenktrichter entwickelt (Prösl und Anders, 2011: 39 ff.), der sich durch aktuelle Messungen bestätigen ließ. Im Ampertal und im Bereich nördlich von Oberding kann lokal mit einem Aufstieg von Grundwasser in das mittlere, tertiäre Grundwasserstockwerk (T2) gerechnet werden.

Im Stadtbereich von München ist das **tiefe, tertiäre Grundwasserstockwerk (T4)** durch Brunnen (z. B. Brauereien) nachgewiesen. Es erschließt ein Niveau zwischen circa 330 m ü. NN – 290 m ü. NN. Zumeist ist der Grundwasserleiter durch lateral begrenzte Feinsandschichten ausgeprägt (Prösl und Anders, 2011: 39 ff.). Es ist, aufgrund einer nicht bekannten, hydrogeologisch wirksamen Begrenzung im Arbeitsgebiet, von einem, wenn auch begrenzten Zustrom, aus Richtung Süden auszugehen. Im Gegensatz zur Studie von Prösl und Anders (2011) zeigt sich, durch ausgewertete Messungen, ein in Richtung N ausgerichtetes Fließschema.

## 4.2 Geologisches 3D-Lithofaziesmodell München und hydrofazielle Untergliederung

### 4.2.1 Einführung und geographische Lage

Das 3D-Lithofaziesmodell (Version 1, 2019) umfasst die dreidimensionale Darstellung der Geologie im Raum München, bis auf einer maximalen Tiefe von 180 m ü. NN. Das 3D-Lithofaziesmodell stellt ein Voxel-Modell dar, zeigt die wahrscheinlichste Verteilung der Lithologien, anhand von drei Lithofaziestypen (Ton/Schluff, Sand und Kies) im Untergrund und umfasst das Quartär und die Oberen Süßwassermolasse (OSM).

Auf Basis von 20.114 Bohrungen, 3D-Variogrammanalysen der betrachteten Lithofaziestypen und 3D-Trends wurde je Einzelzelle des Voxel-Modells die Wahrscheinlichkeit jedes Lithofaziestypes untersucht. Die Modellierung folgte einem reproduzierbaren Verfahren und beinhaltete eine erste Phase, bei der die Rohdaten aus den Bohrprofilen des Bodeninformationssystems Bayern (BIS-BY) einheitlich qualitätskontrolliert, wenn nötig korrigiert und homogenisiert wurden. Die horizontale Auflösung des großräumigen Modells beträgt in der vorliegenden Version 100 m, die Vertikale liegt bei 1 m. Die Erstellung erfolgte mit der kommerziellen Software SKUA Version 2018 der Firma Paradigm.

Neben der Untersuchung der lithofaziellen Verteilung im 3D-Raum wurde auch eine Unterteilung und Beschreibung der identifizierten durchlässigen Modellkörper der Oberen Süßwassermolasse durchgeführt. Durch eine detaillierte dreidimensionale Betrachtung der lithologischen (faziellen) Verhältnisse, auf Basis aller verfügbaren Bohrdaten, lassen sich zusätzlich entscheidende Parameter und Rahmenbedingungen ableiten. Schlüsselaspekte sind hier, unter anderem, die räumliche Definition der Grundwasserkörper, die Zuordnung von Grundwasserstandsmessungen zu den entsprechenden modellierten Horizonten und die Identifizierung sowie Abschätzung von Nutzungspotentialen des Untergrundes.

Die topographische Grundlage der Abbildungen wurde vom Bayerischen Landesamt für Breitband, Digitalisierung und Vermessung erstellt und zur Verfügung gestellt. Das Modellgebiet erstreckt sich über das

Stadtgebiet München und das nahe, angrenzende Umland. Die bedeutendsten Flüsse des Gebietes sind die Isar und die Würm, welche das Gebiet von Süden nach Norden durchfließen.

#### 4.2.2 Datengrundlage, Aussageweite und Methodik zum Aufbau des 3D-Lithofaziesmodells

##### Datengrundlage

Grundlage des 3D-Lithofaziesmodells ist die Interpretation der Bohrbeschreibungen der Bohrprofile aus dem Bodeninformationssystem Bayern (BIS-BY). Aus der nachfolgenden Abbildung sind diese Bohrungen und ihre räumliche Lage ersichtlich (Abb. 36). Über die Punktdichte und Abdeckung des Modellraums, zusammen mit den Bohrtiefen, lassen sich unter anderem Rückschlüsse auf die Aussagesicherheit der Modellierung ziehen. Das 3D-Untergrundmodell stellt in erster Linie eine bestmögliche konsistente Interpretation der Daten dar. Im Folgenden werden die Eingangsdaten aufgeschlüsselt dargestellt und erläutert.

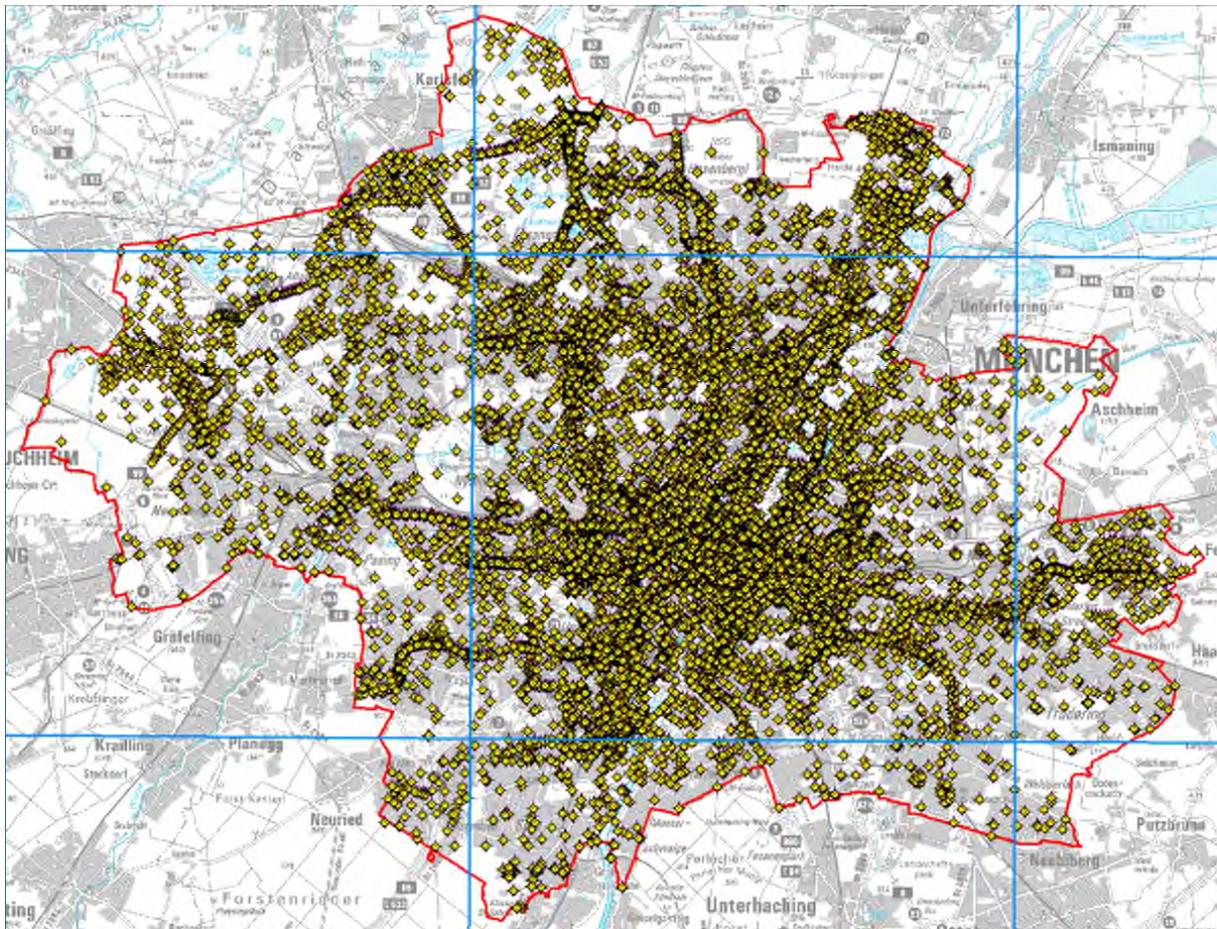


Abb. 36: Lage der verwendeten Bohrungen im Modellgebiet

##### BIS-Bohrungen

Ausgangsdaten für die Modellierung sind vor allem die Bohrungen aus dem Bodeninformationssystem Bayern (BIS-BY), die im Laufe der Projekte GEPO und GeoPot durch Rechercharbeiten und Digitalisierung ergänzt wurde. Im Arbeitsgebiet sind 20.114 Bohrungen und die dazugehörigen 210.322 Bohrschnitte (Stand: 05/2018) bearbeitet worden.

## Geländemodell

Sämtliche Daten wurden mit dem Geländemodell DGM 3 (3 m-Gitter) der Bayerischen Landesvermessungsverwaltung in Beziehung gesetzt, welches auch zur Abbildung der Geländeoberfläche verwendet wurde.

## Modellüberblick

Das Modellgebiet erstreckt sich über eine Länge von rund 27 km und eine Breite von etwa 21 km. Das Volumen reicht dabei von der Erdoberfläche bis in eine Tiefe von 180 m ü. NN. Im 3D-Modell wurden insgesamt drei Lithofaziestypen erfasst. Ein Verzeichnis der verwendeten Lithofaziestypen und der modellierten geologischen Horizonte findet sich in Tab. 8 und Tab. 9. Die tektonischen Verhältnisse bilden keine erfassbaren Störungen im Bearbeitungsfeld ab.

## Qualitätskontrolle der Datengrundlage

Bei der Erstellung geologischer 3D-Untergrundmodelle muss die Konsistenz aller verwendeten Eingangsdaten geprüft und sichergestellt werden. Die Bohrdaten aus dem Bodeninformationssystem Bayern (BIS-BY) stellen die primären Daten für die geologische 3D-Modellierung dar. In der ersten Phase wurde der aktuellste Stand der Bohrdaten im BIS-BY (Mai 2018) im Gebiet gesichtet und geprüft. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Prüfung aller relevanten Informationen über die lithologische Zusammensetzung der jeweiligen Bohrabschnitte. Von ursprünglich 210.322 Bohrabschnitten konnten 186.967 Bodenansprachen (circa 89 %) bei der 3D-Modellierung berücksichtigt werden. Die verwendbaren Bohrabschnitte entsprechen äquivalent einer gesamten Bohrabschnittslänge im Modellgebiet von circa 347 km. Bei 23.355 Bohrabschnitten konnten die aufgetretenen Inkonsistenzen nicht korrigiert werden. Diese Bohrabschnitte wurden bei der geologischen 3D-Modellierung nicht eingebunden. Bei 15.115 Bohrabschnitten wurden Inkonsistenzen identifiziert, die korrigiert und in die Modellierung integriert werden konnten.

## Einarbeitung der Datengrundlage

Um die lithologischen Informationen aus dem BIS-BY bestmöglich in der geologischen 3D-Modellierung nutzen zu können, wurden die in der Bohrsprache enthaltenen, qualitätskontrollierten Bestandteile in Korngrößengruppen getrennt und ihre Massenanteile quantifiziert. Darauf basierend findet eine Interpretation und eine Zuweisung der Lithofaziestypen je Bohrsprache statt (Tab. 8). Insgesamt werden im geologischen 3D-Modell drei Lithofaziestypen betrachtet: Ton/Schluff (1), Sand (2) und Kies (3). Die den Bohrabschnitten zugewiesenen Lithofaziestypen aller betrachteten Bohrungen stellen die Basisdaten für die Modellierung dar.

Tab. 8: Lithofaziestypen des Modells

Kürzel	Beschreibung	Farbe (Farbmaßzahlen nach DIN 6164-1)	Korngrößenbereich (mm)
TU	Ton/Schluff	violett (14:5:4)	≤ 0,063
S	Sand	orange (6:6:2)	> 0,063 – 2
G	Kies	gelb (2:6:1)	> 2

## Methodik zum Aufbau des Modells und Horizontunterteilung

Die nachstehende Abb. 37 zeigt schematisch den Workflow der Modellierung:

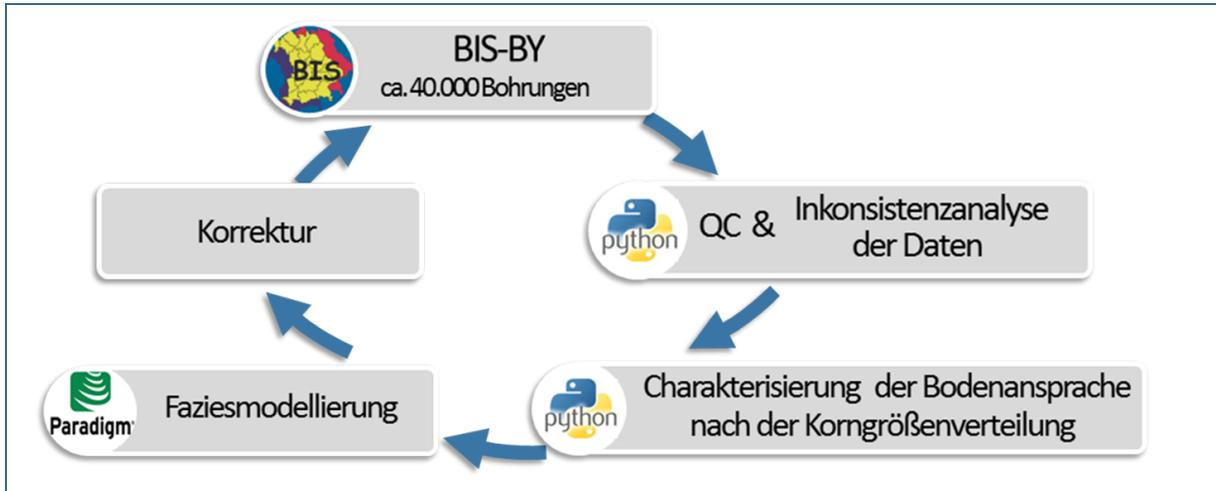


Abb. 37: Schematischer Workflow der 3D-Lithofaziesmodellierung

Für die 3D-Modellierung der Lithofazies wurde das geostatistische Simulationsverfahren Sequential Indicator Simulator (SIS) verwendet. Bei dieser Methode wurde die räumliche Variabilität jedes Lithofaziestyps aus den 3D-Variogrammen entnommen. Gestützt auf die primären Daten, die Variogrammmodelle, und die sekundären Daten (geologische Trends), wurde je Einzelzelle des Voxel-Modells die Wahrscheinlichkeit jedes Lithofaziestypes ermittelt. Die Schätzung der Wahrscheinlichkeiten in jedem Punkt definierte den zugeordneten Lithofaziestyp je Zelle. Das finale 3D-Lithofaziesmodell entstand aus der Betrachtung aller 450 simulierten Realisationen. In jeder Einzelzelle des Modells wurde der Lithofaziestyp zugeordnet, der statistisch am häufigsten vertreten ist.

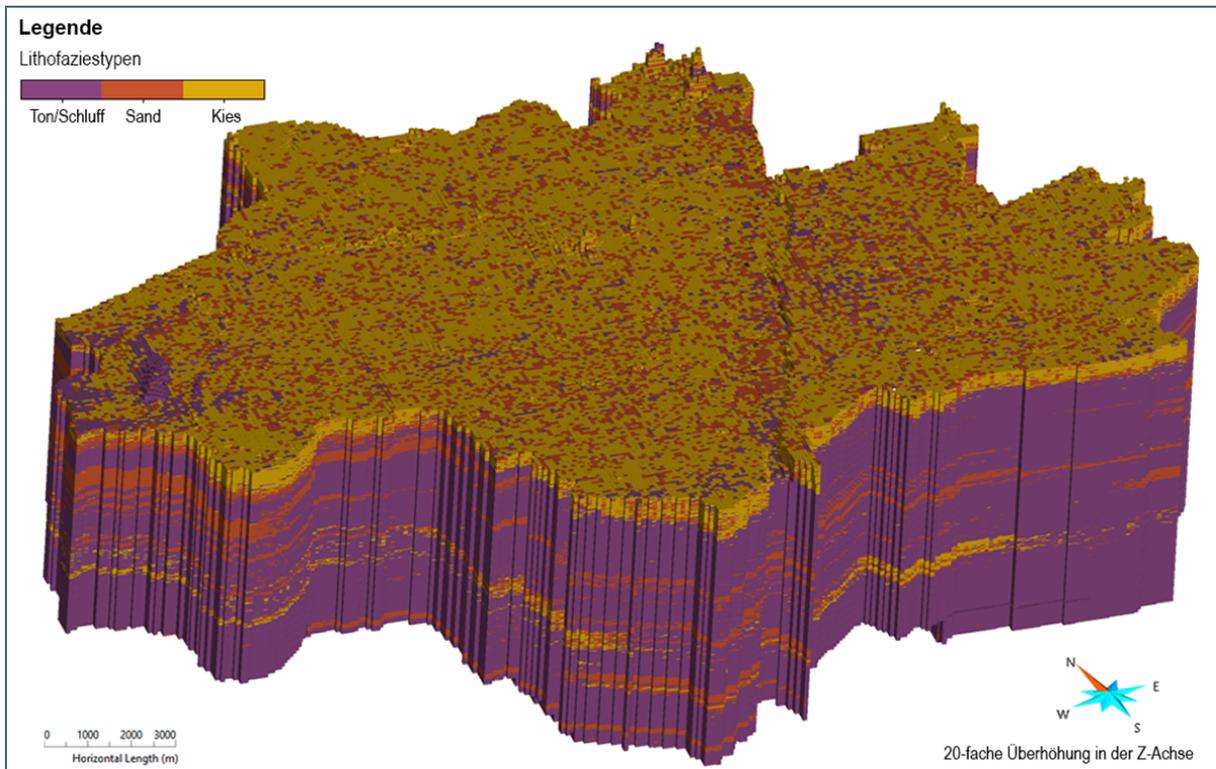


Abb. 38: Finale Wahrscheinlichkeitsverteilung der Lithofaziestypen im 3D-Lithofaziesmodell des Arbeitsgebiets

Hinter der finalen, lithofaziellen Verteilung des Untergrundes (Abb. 38) steht eine komplexe Reihe von zusammenhängenden, geologischen Körpern, die sich ohne weitere Analyse nur schwer unterscheiden und auswerten lassen. Ziel der Untergliederung des 3D-Lithofaziesmodells ist es, Lithofaziestypen signifikant zu unterscheiden und verschieden generierte Körper getrennt zu analysieren. Abb. 39 a zeigt einen schematischen Süd-Nord-Profilschnitt im Stadtgebiets München, der die Ausgangssituation bei der Untergliederung des 3D-Lithofaziesmodells verdeutlicht.

Dazu wurden getrennte geologische Körper errechnet, welche im 3D-Modell aus benachbarten Zellen bestehen, die mindestens eine Zelleseite teilen. Dies führte zu einer Identifizierung der geometrischen Zusammenhänge zwischen den existierenden geologischen Körpern im Untergrund. Die Ergebnisse dieser sogenannten Konnektivitätsanalyse lieferten ausschlaggebende Informationen für eine erste Untergliederung der Horizonte nach zusammenhängenden geologischen Körpern. Abb. 39 b zeigt ein Schema der Situation nach der ersten Untergliederung der Horizonte. Die resultierende Unterteilung der Horizonte zeigt unter anderem vier großräumige Modellhorizonte in der Oberen Süßwassermolasse in grobkörnigen Fazies (Sand und/oder Kies), die als T1, T2, T3 und T4 gekennzeichnet sind.

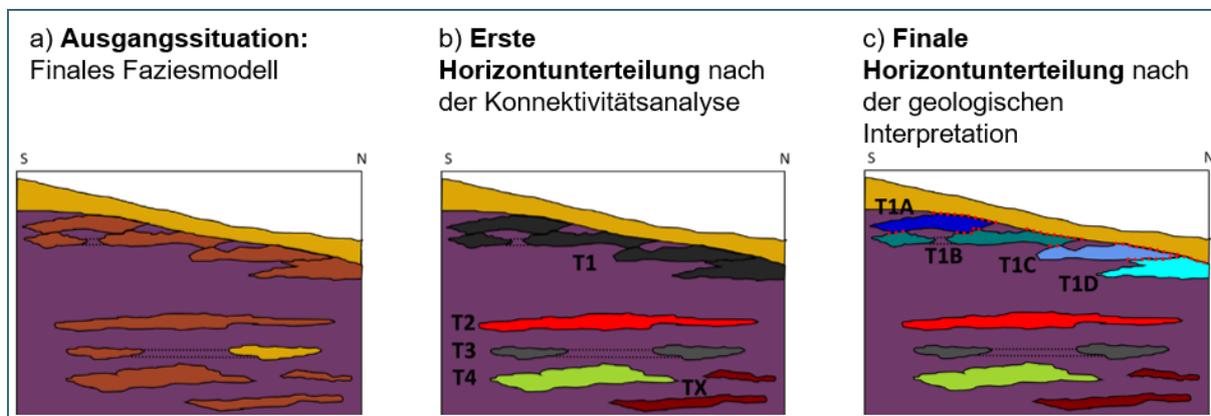


Abb. 39: Schematische Darstellung der finalen Horizontunterteilung des 3D-Lithofaziesmodells

Wie aus Abb. 39 b ersichtlich, zeichnet sich der oberste sandige Horizont der OSM (T1) durch seine komplexe und heterogene Ausprägung aus. Der T1-Horizont weist oft Teilbereiche auf, die lokal in der Vertikalen und in der Horizontale durch feinkörnige Trennschichten von den anderen Bereichen des gleichen T1-Körpers getrennt sind. Im Gegensatz dazu zeigt T1 auch Bereiche, in denen sich mehrere grobkörnige Körper vereinigen. Aufgrund der Komplexität war es erforderlich, den T1-Horizont detaillierter zu untergliedern, um Kontaktzonen und isolierte Bereiche herauszuarbeiten. Daher wurde der T1-Horizont nach geologischen Interpretation und anderer Kriterien weiter unterteilt. Zu diesen Kriterien zählen unter anderem die Ausprägung der Trennschichten und der grobkörnigen Horizonte, die Schüttungsrichtungen der grobkörnigen Ablagerungen und die berechneten Eintrittswahrscheinlichkeiten der Lithofaziestypen im Modell. Abb. 39 c stellt eine schematische Darstellung der finalen Horizontunterteilung dar.

### 4.2.3 Beschreibung und Interpretation des 3D-Lithofaziesmodells München

#### Finale Horizontunterteilung des 3D-Lithofaziesmodells München

Abb. 40 zeigt die Ergebnisse der Horizontunterteilung im 3D-Lithofaziesmodell München. Die wesentlichen Arbeitsabläufe, die zur Erstellung von geologischen 3D-Untergrund-Modellen notwendig sind, zeigt Abb. 37 im vorigen Abschnitt. Eine detaillierte Beschreibung zur Methodik des 3D-Modells bietet die Publikation von Albarrán-Ordás und Zosseder (2022).

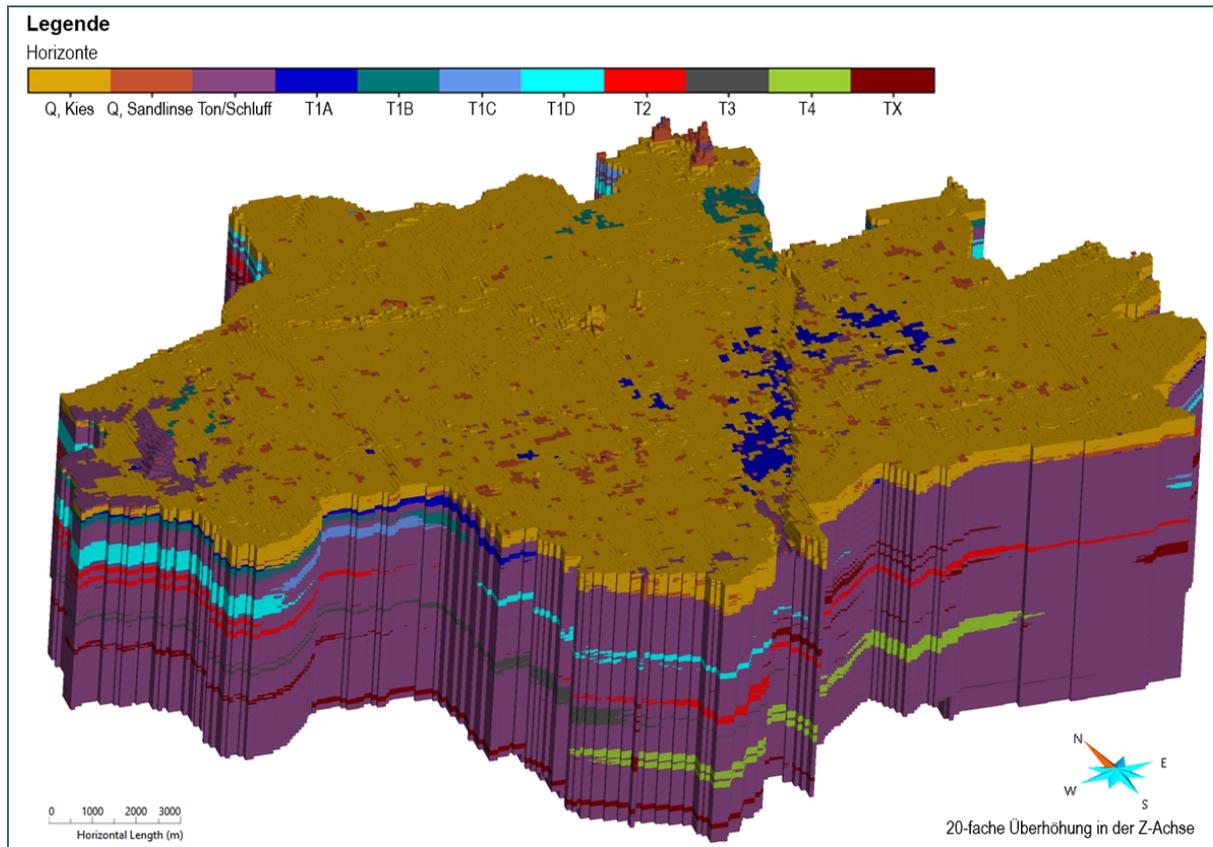
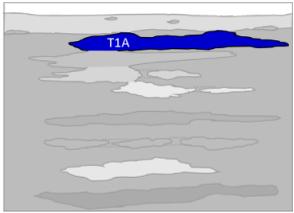
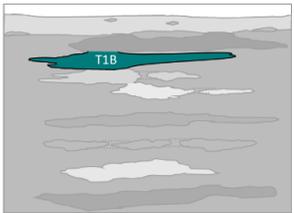
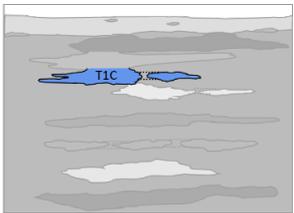
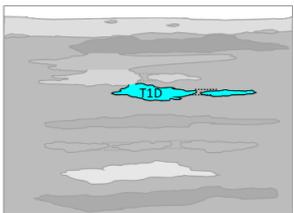
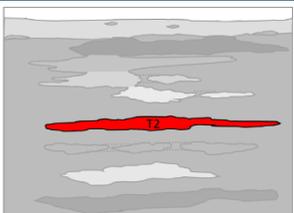
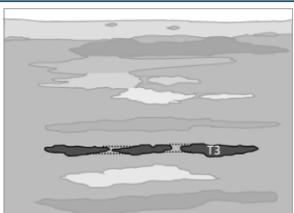
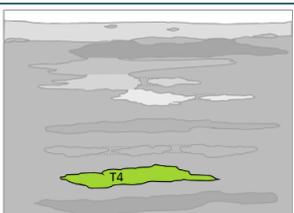


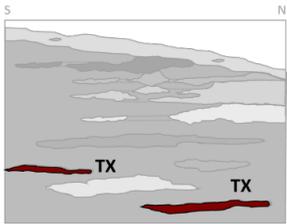
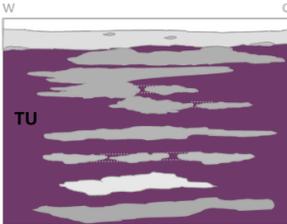
Abb. 40: Finale Horizontunterteilung des 3D-Lithofaziesmodell (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2019)

Des weiteren gibt Tab. 9 eine Übersicht über die modellierten geologischen Horizonte.

Tab. 9: Übersicht der modellierten geologischen Horizonte (verändert nach Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2019)

Stratigraphie, Name, Kürzel	Lithologie, Gesamtmächtigkeit	Beschreibung	Schema
Quartär kiesige Ablagerung <i>Q, Kies</i>	Kies, 0 m – 40 m	Quartäre kiesige Ablagerungen.	
Quartär Sandlinse <i>Q, Sandlinse</i>	Sand, -	Kleinräumige sandige Ablagerungen, die im kiesig ausgebildeten Quartär oder an der Quartärbasis ausgebildet sind. Kennzeichen: Kleinräumig, isoliert, keine räumliche Kontinuität.	
<b>OSM</b> <b>Horizont T1</b> <i>T1A bis T1D</i>		<b>T1:</b> Erster (bezogen auf Höhenlage m ü. NN) großräumig zusammenhängender, durchlässiger Horizont der OSM im Modellgebiet.	

Stratigraphie, Name, Kürzel	Lithologie, Gesamtmächtigkeit	Beschreibung	Schema
OSM Horizont T1A <i>T1A</i>	Sand, 0 m – 24 m	<b>T1A:</b> Nach Untergliederung T1: Erster Horizontbereich (A) innerhalb T1.	
OSM Horizont T1B <i>T1B</i>	Sand, 0 m – 29 m	<b>T1B:</b> Nach Untergliederung T1: Zweiter Horizontbereich (B) innerhalb T1.	
OSM Horizont T1C <i>T1C</i>	Sand, 0 m – 24 m	<b>T1C:</b> Nach Untergliederung T1: Dritter Horizontbereich (C) innerhalb T1.	
OSM Horizont T1D <i>T1D</i>	Sand 0 m – 29 m	<b>T1D:</b> Nach Untergliederung T1: Vierter Horizontbereich (D) innerhalb T1.	
<b>OSM</b> <b>Horizont T2</b> <i>T2</i>	Sand und Kies, 0 m – 27 m	Zweiter (bezogen auf Höhenlage m ü. NN) großräumig zusammenhängender, durchlässiger Horizont der OSM im Modellgebiet.	
<b>OSM</b> <b>Horizont T3</b> <i>T3</i>	Sand und Kies, 0 m – 47 m	Dritter (bezogen auf Höhenlage m ü. NN) großräumig zusammenhängender, durchlässiger Horizont der OSM im Modellgebiet.	
<b>OSM</b> <b>Horizont T4</b> <i>T4</i>	Sand und Kies, 0 m – 23 m	Vierter (bezogen auf Höhenlage m ü. NN) großräumig zusammenhängender, durchlässiger Horizont der OSM im Modellgebiet.	

Stratigraphie, Name, Kürzel	Lithologie, Gesamtmächtigkeit	Beschreibung	Schema
OSM, unklassifiziert  TX	Sand und Kies, k.A.	Unklassifizierte, durchlässige Körper	
Quartär und OSM Ton/Schluff  TU	Ton und Schluff, k.A.	Feinkörnige Horizonte (Schluff und Ton)	

### Ergebnisse der Horizontunterteilung mit Einbeziehung der Kontaktzonen

Bei der finalen Horizontunterteilung des 3D-Modells stellte sich heraus, dass mehrere Teilbereiche der durchlässigeren Horizonte Q, T1A, T1B, T1C und T1D aufgrund der zum Teil fehlenden feinkörnigen Trennschichten in direkter Verbindung miteinander stehen. Deshalb ist in diesen Bereichen eine vertikale hydraulische Interaktion zwischen den betroffenen Horizonten zu erwarten. Diese Zonen sind hydrogeologisch von großer Bedeutung und bedürfen damit einer besonderen Aufarbeitung im 3D-Modell.

Abb. 41 zeigt eine schematische Darstellung der Horizontunterteilung mit Einbeziehung der Kontaktzonen. Die Kontaktzonen zwischen den unterschiedlichen Horizonten werden in Abb. 41 (c) als rote gestrichelte Linien dargestellt. Diese Bereiche zeigen Zonen, wo zwei oder mehrere grundwasserführende Körper ohne eine dazwischenliegende Trennschicht in direkter Verbindung stehen, und eine vertikale hydraulische Interaktion zu erwarten ist. In einem weiteren Schritt wurde das 3D-Modell in Teilbereiche untergliedert, welche die Information zur direkten vertikalen Verbindung der Körper miteinander integriert Abb. 41 (d). Abb. 42 zeigt die Ergebnisse der Horizontunterteilung mit Einbeziehung der Kontaktzonen im Münchner Stadtgebiet.

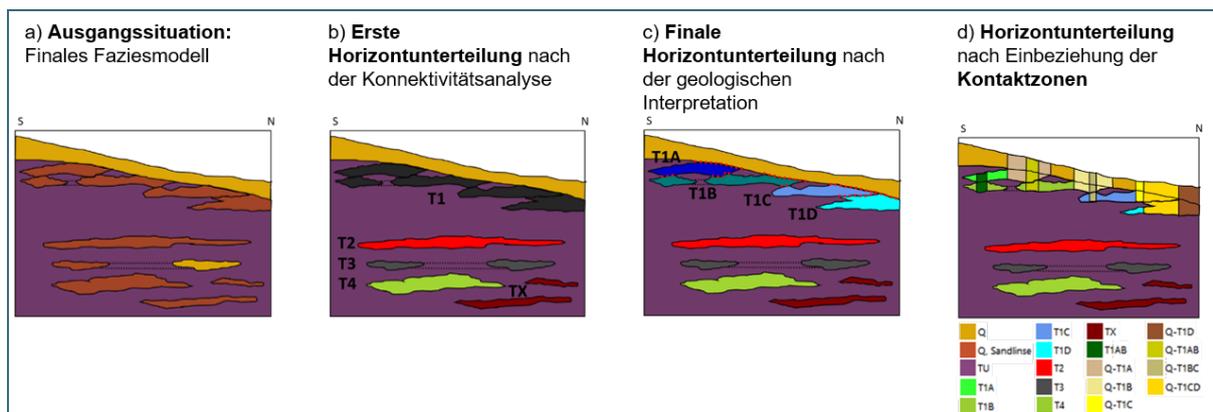


Abb. 41: Schematische Darstellung der Horizontunterteilung des 3D-Lithofaziesmodells mit Einbeziehung der Kontaktzonen (Albarrán-Ordás, A., Zosseder, K. 2019)

So sind beispielsweise Bereiche, die mit „Q-T1A“ gekennzeichnet sind, Zonen, wo keine Trennschicht zwischen den quartären kiesigen Ablagerungen, welche den quartären Hauptgrundwasserleiter bilden, und den darunterliegenden sandigen Sedimenten des tertiären T1A-Horizontes vorliegen und diese damit in direkter Verbindung stehen. Im Gegenteil dazu sieht man Teilbereiche im Quartär, die mit der

Klasse „Q“ gekennzeichnet sind, direkt von feinkörniger geringleitender Fazies unterlagert werden und damit keine Interaktionsbereiche zu tertiären Grundwasserleiter bilden. Durch die Anwendung dieses Prinzips konnten zahlreiche Kombinationen festgelegt werden, die es ermöglichen, die vertikalen Interaktionen zwischen den quartären und tertiären durchlässigen Horizonten zu identifizieren und ins 3D-Modell einzubeziehen.

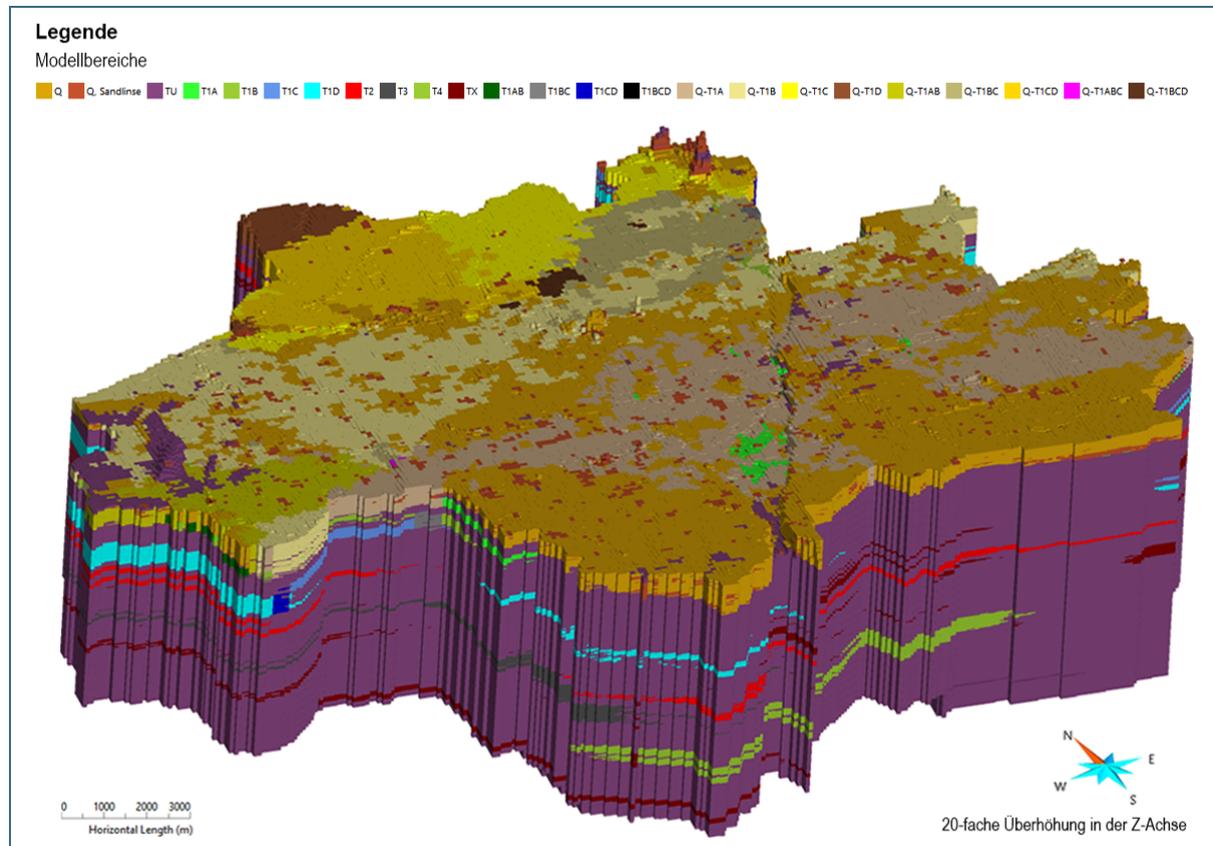


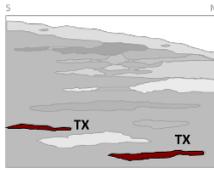
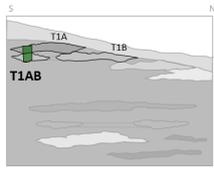
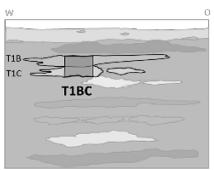
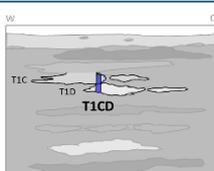
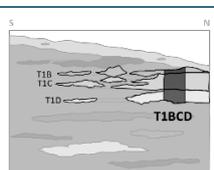
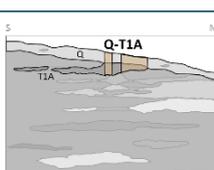
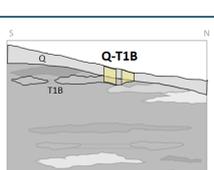
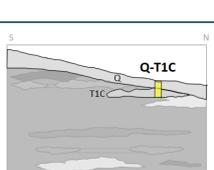
Abb. 42: Horizontunterteilung des 3D-Lithofaziesmodell mit Einbeziehung der Kontaktzonen

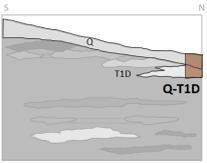
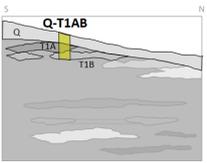
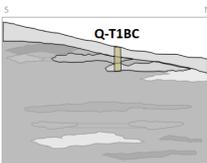
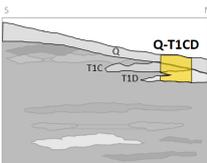
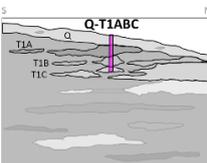
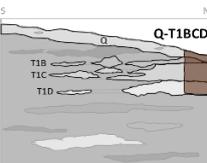
Im Folgenden werden alle identifizierte Modellbereiche aufgelistet und beschrieben (Tab. 10).

Tab. 10: Übersicht der Modellbereiche nach der Einbeziehung der Kontaktzonen

Kürzel	Lithologie	Beschreibung	Schema
Q	Kies	<p>Quartäre kiesige Ablagerungen, die direkt von einer feinkörnige Trennschicht unterlagert sind.</p> <p>Diese Bereiche des 3D-Lithofaziesmodells stellen Zonen dar, wo flächendeckend keine vertikale hydraulische Interaktion zwischen dem Quartär und den darunterliegenden OSM-Grundwasserleitern zu erwarten ist.</p>	
Q, Sandlinse	Sand	<p>Kleinräumige sandige Ablagerungen, die im kiesig ausgebildeten Quartär oder an der Quartärbasis angeschlossen sind. Diese Ablagerungen sind insbesondere dadurch gekennzeichnet, dass sie kleinräumig und isoliert im Quartärbereich des 3D-Modells auftreten und keine räumliche Kontinuität aufweisen.</p>	

Kürzel	Lithologie	Beschreibung	Schema
T1A	Sand	<p><b>T1:</b> Erster, bezogen auf die Höhenlage in m ü. NN, großräumig zusammenhängender durchlässiger Horizont in der OSM im Modellgebiet.</p> <p><b>A:</b> Nach der Untergliederung der Horizonte entspricht dieser Horizont dem höchstgelegenen Horizontbereich (A) innerhalb T1.</p> <p>Zu den zwei obengenannten Beschreibungsmerkmale kommt hinzu, dass diese Ablagerungen in der Vertikalen von allen anderen durchlässigen Körpern durch eine feinkörnige Trennschicht getrennt sind.</p>	
T1B	Sand	<p><b>T1:</b> Erster, bezogen auf die Höhenlage in m ü. NN, großräumig zusammenhängender durchlässiger Horizont in der OSM im Modellgebiet.</p> <p><b>B:</b> Nach der Untergliederung der Horizonte entspricht dieser Horizont dem zweiten höchstgelegenen Horizontbereich (B) innerhalb T1.</p> <p>Zu den zwei obengenannten Beschreibungsmerkmale kommt hinzu, dass diese Ablagerungen in der Vertikalen von allen anderen durchlässigen Körpern durch eine feinkörnige Trennschicht getrennt sind.</p>	
T1C	Sand	<p><b>T1:</b> Erster, bezogen auf die Höhenlage in m ü. NN, großräumig zusammenhängender durchlässiger Horizont in der OSM im Modellgebiet.</p> <p><b>C:</b> Nach der Untergliederung der Horizonte entspricht dieser Horizont dem dritt tiefst gelegenen Horizontbereich (C) innerhalb des T1.</p> <p>Zu den zwei obengenannten Beschreibungsmerkmale kommt hinzu, dass diese Ablagerungen in der Vertikalen von allen anderen durchlässigen Körpern durch eine feinkörnige Trennschicht getrennt sind.</p>	
T1D	Sand	<p><b>T1:</b> Erster, bezogen auf die Höhenlage in m ü. NN, großräumig zusammenhängender durchlässiger Horizont in der OSM im Modellgebiet.</p> <p><b>D:</b> Nach der Untergliederung der Horizonte entspricht dieser Horizont dem tiefsten Horizontbereich (D) innerhalb des T1.</p> <p>Zu den zwei obengenannten Beschreibungsmerkmale kommt hinzu, dass diese Ablagerungen in der Vertikalen von allen anderen durchlässigen Körpern durch eine feinkörnige Trennschicht getrennt sind.</p>	
T2	Sand und Kies	<p>Zweiter, bezogen auf die Höhenlage in m ü. NN, großräumig zusammenhängender durchlässiger Horizont in der OSM im Modellgebiet.</p>	
T3	Sand und Kies	<p>Dritter, bezogen auf die Höhenlage in m ü. NN, großräumig zusammenhängender durchlässiger Horizont in der OSM im Modellgebiet.</p>	
T4	Sand und Kies	<p>Vierter, bezogen auf die Höhenlage in m ü. NN, großräumig zusammenhängender durchlässiger Horizont in der OSM im Modellgebiet.</p>	

Kürzel	Lithologie	Beschreibung	Schema
TX	Sand und Kies	Unklassifizierte, durchlässige Körper	
T1AB	Sand	Durchlässige Ablagerungen der Horizonte T1A und T1B, die durch keine feinkörnigen Trennschichten getrennt sind und damit in direkter Verbindung stehen.  Diese Bereiche des 3D-Lithofaziesmodells stellen Zonen dar, wo eine vertikale hydraulische Interaktion zwischen T1A und T1B zu erwarten ist.	
T1BC	Sand	Durchlässige Ablagerungen der Horizonte T1B und T1C, die durch keine feinkörnigen Trennschichten getrennt sind und damit in direkter Verbindung stehen.  Diese Bereiche des 3D-Lithofaziesmodells stellen Zonen dar, wo eine vertikale hydraulische Interaktion zwischen T1B und T1C zu erwarten ist.	
T1CD	Sand	Durchlässige Ablagerungen der Horizonte T1C und T1D die durch keine feinkörnigen Trennschichten getrennt sind und damit in direkter Verbindung sind.  Diese Bereiche des 3D-Lithofaziesmodells stellen Zonen dar, wo eine vertikale hydraulische Interaktion zwischen T1C und T1D zu erwarten ist.	
T1BCD	Sand	Durchlässige Ablagerungen der Horizonte T1B, T1C und T1D die durch keine feinkörnigen Trennschichten getrennt sind und damit in direkter Verbindung sind.  Diese Bereiche des 3D-Lithofaziesmodells stellen Zonen dar, wo eine vertikale hydraulische Interaktion zwischen T1B, T1C und T1D zu erwarten ist.	
Q-T1A	Kies und Sand	Durchlässige Ablagerungen der Horizonte Q und T1A die durch keine feinkörnigen Trennschichten getrennt sind und damit in direkter Verbindung sind.  Diese Bereiche des 3D-Lithofaziesmodells stellen Zonen dar, wo eine vertikale hydraulische Interaktion zwischen Quartär und T1A zu erwarten ist.	
Q-T1B	Kies und Sand	Durchlässige Ablagerungen der Horizonte Q und T1B die durch keine feinkörnigen Trennschichten getrennt sind und damit in direkter Verbindung sind.  Diese Bereiche des 3D-Lithofaziesmodells stellen Zonen dar, wo eine vertikale hydraulische Interaktion zwischen Quartär und T1B zu erwarten ist.	
Q-T1C	Kies und Sand	Durchlässige Ablagerungen der Horizonte Q und T1C die durch keine feinkörnigen Trennschichten getrennt sind und damit in direkter Verbindung sind.  Diese Bereiche des 3D-Lithofaziesmodells stellen Zonen dar, wo eine vertikale hydraulische Interaktion zwischen Quartär und T1C zu erwarten ist.	

Kürzel	Lithologie	Beschreibung	Schema
Q-T1D	Kies und Sand	Durchlässige Ablagerungen der Horizonte Q und T1D die durch keine feinkörnigen Trennschichten getrennt sind und damit in direkter Verbindung sind.  Diese Bereiche des 3D-Lithofaziesmodells stellen Zonen dar, wo eine vertikale hydraulische Interaktion zwischen Quartär und T1D zu erwarten ist.	
Q-T1AB	Kies und Sand	Durchlässige Ablagerungen der Horizonte Q, T1A und T1B die durch keine feinkörnigen Trennschichten getrennt sind und damit in direkter Verbindung sind.  Diese Bereiche des 3D-Lithofaziesmodells stellen Zonen dar, wo eine vertikale hydraulische Interaktion zwischen Quartär, T1A und T1B zu erwarten ist.	
Q-T1BC	Kies und Sand	Durchlässige Ablagerungen der Horizonte Q, T1B und T1C die durch keine feinkörnigen Trennschichten getrennt sind und damit in direkter Verbindung sind.  Diese Bereiche des 3D-Lithofaziesmodells stellen Zonen dar, wo eine vertikale hydraulische Interaktion zwischen Quartär, T1B und T1C zu erwarten ist.	
Q-T1CD	Kies und Sand	Durchlässige Ablagerungen der Horizonte Q, T1C und T1D die durch keine feinkörnigen Trennschichten getrennt sind und damit in direkter Verbindung sind.  Diese Bereiche des 3D-Lithofaziesmodells stellen Zonen dar, wo eine vertikale hydraulische Interaktion zwischen Quartär, T1C und T1D zu erwarten ist.	
Q-T1ABC	Kies und Sand	Durchlässige Ablagerungen der Horizonte Q, T1A, T1B und T1C die durch keine feinkörnigen Trennschichten getrennt sind und damit in direkter Verbindung sind.  Diese Bereiche des 3D-Lithofaziesmodells stellen Zonen dar, wo eine vertikale hydraulische Interaktion zwischen Quartär, T1A, T1B und T1C zu erwarten ist.	
Q-T1BCD	Kies und Sand	Durchlässige Ablagerungen der Horizonte Q, T1B, T1C und T1D die durch keine feinkörnigen Trennschichten getrennt sind und damit in direkter Verbindung sind.  Diese Bereiche des 3D-Lithofaziesmodells stellen Zonen dar, wo eine vertikale hydraulische Interaktion zwischen Quartär, T1B, T1C und T1D zu erwarten ist.	
TU	Ton und Schluff	Feinkörnige Horizonte (Schluff und Ton)	

## Ergebnisse zu den Horizonten T1 bis T4 aus der Analyse des 3D-Modells

Im Folgenden werden die Modellergebnisse tabellarisch zusammengefasst (Tab. 11 bis Tab. 17). Es wird jeweils auf Verbreitung, Lagerung, Mächtigkeit, lithologische Ausbildung und Interaktionsbereiche der modellierten grundwasserführenden Horizonte, sowie auf die Menge der Eingangsdaten (Bohrungsdichte) eingegangen.

### Tertiärer Horizont T1A

Tab. 11: Auswertung der Modellergebnisse für den tertiären Horizont T1A

Attribute	Beschreibung
Verbreitung	Dieser Horizont ist hauptsächlich in der südlichen Hälfte des Stadtgebiet Münchens, mit Ausnahme einiger großen Bereiche der Stadtbezirke Thalkirchen-Obersendling-Forstenried-Fürstenried-Solln, Ramersdorf-Perlach und Obergiesing-Fasangarten, verbreitet. Er erstreckt sich mit einer Fläche von circa 95 km <sup>2</sup> auf 22 % des Arbeitsgebietes. Siehe Abb. 43.
Lagerung	Der Horizont liegt zwischen 492 m ü. NN und 533 m ü. NN. Das entspricht einen Tiefenbereich zwischen knapp 0 m u. GOK entlang der Isar und circa 50 m unter GOK im Raum Obersendling an der tiefsten Stelle des Horizontes. Dieser Sachverhalt weist deutlich auf eine potentielle Interaktion mit der Isar hin.
Mächtigkeit	Die Mächtigkeit liegt meist unter 12 m (Perzentil 90) und erreicht im Maximum 23 m – 24 m im Raum Bogenhausen, Haidhausen und Berg am Laim. Der Mittelwert des gesamten T1A-Horizonts liegt bei circa 6 m.
Lithologische Ausbildung	Der T1A-Horizont ist sandig ausgebildet.
Interaktionsbereiche	Der T1A-Horizont interagiert sowohl mit dem quartären Grundwasserleiter, als auch mit dem unmittelbar darunterliegenden tertiären Horizont T1B. Wie aus Abb. 50 und Abb. 51 ersichtlich, existiert ein Kontakt, zwischen den quartären Kiesen und den T1-Sande, vielerorts im südlichen Teil des zentralen Stadtgebiets. Nur bei den am weitesten südlich gelegene Stadtbezirken auf beiden Seiten der Isar ist eine ausgeprägte Trennschicht aus feinkörnigen Sedimenten vorhanden, die als Barriere zwischen Quartär und T1A wirkt. Der Kontakt zwischen den Horizonten T1A und T1B findet vorwiegend im äußersten Westen des Stadtgebiets München, zwischen Aubing und Pasing, statt.
Bohrungsdichte	Die Bohrungsdichte im T1A-Horizont liegt im Durchschnitt bei circa 19 Bohrungen pro 0,5 km <sup>2</sup> . Insgesamt erreichen 8.495 Bohrungen diesen Horizont im 3D-Modell. Daraus lässt sich ableiten, dass nur 25 % des gesamten T1A-Volumens durch keine einzige Bohrung gebohrt wird. Diese Situation stellt a priori eine sehr gute Datenbasis für die 3D-Modellierung dar.

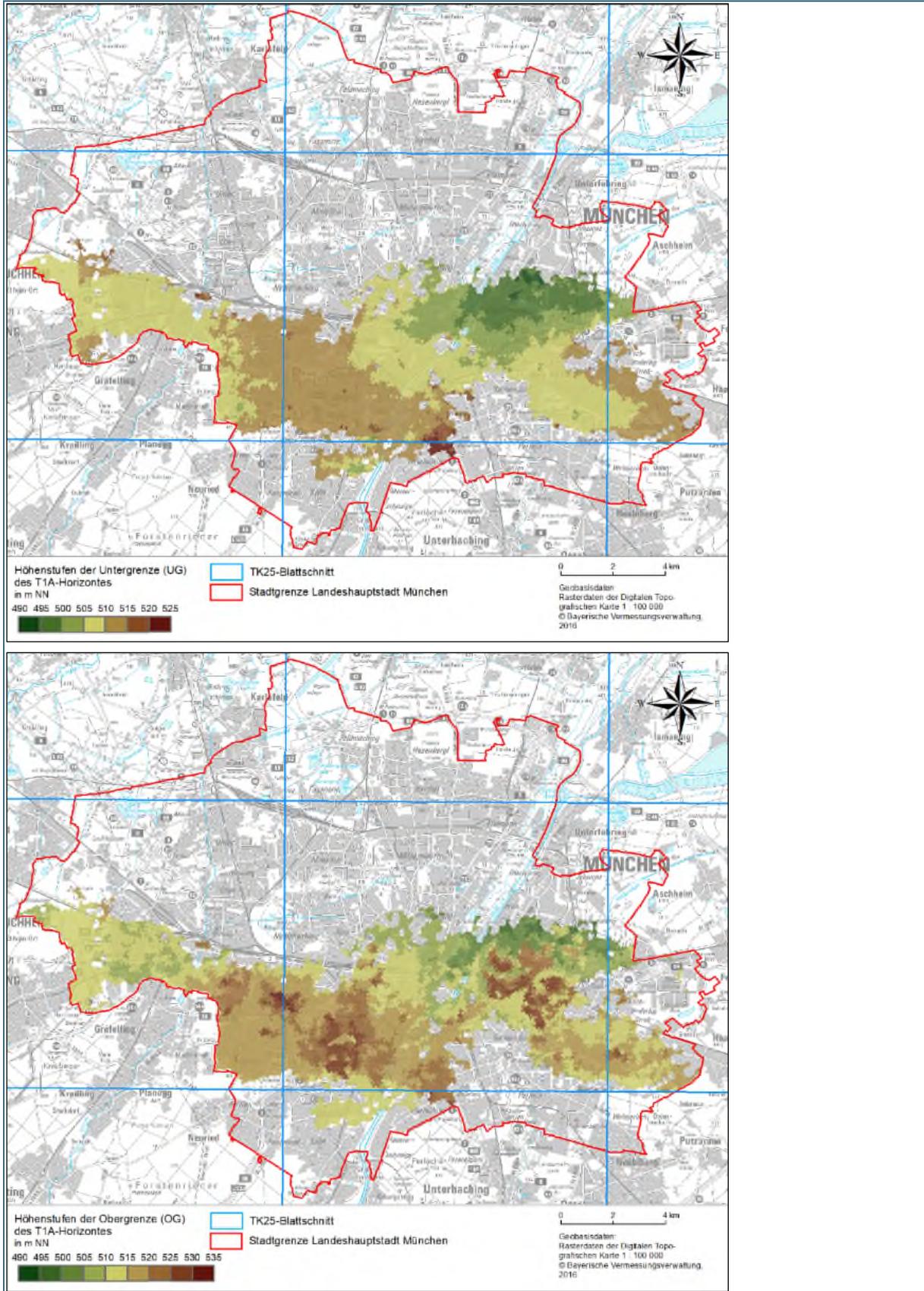


Abb. 43: Verbreitung und modellierte Untergrenze und Obergrenze des T1A-Horizontes (Angaben in m ü. NN)

## Tertiärer Horizont T1B

Tab. 12: Auswertung der Modellergebnisse für den tertiären Horizont T1B

Attribute	Beschreibung
Verbreitung	Dieser Horizont ist in einem zentralen, W-E verlaufenden Streifen im Stadtgebiet München verbreitet. Er erstreckt sich mit einer Fläche von circa 163 km <sup>2</sup> auf circa 53 % des Stadtgebiets. Siehe Abb. 44.
Lagerung	Der T1B-Horizont liegt zwischen 476 m ü. NN und 518 m ü. NN, was eine Tiefenlage in m u. GOK zwischen 0 und 70 entspricht. Die tiefste Lage des T1B (< 1 m u. GOK) liegt am Nordostende des Horizontes im Isarbereich im Raum Oberföhring-Freimann. Analog zum T1A weist dies auf einen potentiellen Kontakt zwischen T1B und der Isar hin.
Mächtigkeit	Die Mächtigkeit erreicht im Maximum einen Wertebereich von 25 m – 29 m im Raum Pasing und Olympiapark. Markant ist die starke Ausprägung des T1B auf einer Linie zwischen Gern und Johanneskirchen. Im gesamten T1B-Körper liegt die Mächtigkeit meist unter 15 m. Der Mittelwert liegt bei circa 8 m.
Lithologische Ausbildung	Der T1B-Horizont ist sandig ausgebildet.
Interaktionsbereiche	<p>Abb. 50 und Abb. 52 zeigen die Kontaktbereiche des T1B mit den weiteren Horizonten. T1B interagiert sowohl mit dem quartären Grundwasserleiter, als auch mit den tertiären Horizonten T1A und T1C. Zudem wurden auch in sehr kleinen Bereichen des 3D-Modells Kontakte zwischen T1B, T1C und T1D beobachtet.</p> <p>Der Kontakt zwischen den quartären Kiesen und T1B findet vor allem im nördlichen Teil statt. Ausnahmen sind Kleinbereiche, in denen die dazwischenliegende feinkörnige Trennschicht nicht vollständig erodiert ist und an Ausprägung gewinnt.</p> <p>Interaktion zwischen T1A und T1B: ist unter Punkt „Tertiärer Horizont T1A“ beschrieben.</p> <p>T1B und T1C sind vor allem im Norden, im Raum Freimann und Schwabing Nord in Kontakt. Zusätzliche und nur lokal vertretene Kontaktzonen sind auch in Kleinbereichen im Raum Pasing, Isarvorstadt und Trudering zu erkennen.</p> <p>Im Norden des Stadtgebiets, in der Lerchenau, wurde im 3D-Modell ein Kontakt zwischen den Horizonten T1B, T1C und T1D festgestellt. Hier ist der T1C-Horizont mit einer Mächtigkeit größer 20 m sehr stark ausgeprägt und die Trennschichten in feinkörniger Fazies zwischen T1B, T1C und T1D fehlen zum Teil.</p>
Bohrungsdichte	Im Durchschnitt beträgt die Bohrungsdichte im T1B-Horizont circa 6 Bohrungen pro 0,5 km <sup>2</sup> . In diesem Fall erreichen 4.267 Bohrungen die Obergrenze des Horizontes. Damit ist circa 50 % des gesamten Volumens des T1B-Körpers durch Bohrungen abgedeckt. Hervorzuheben ist hier die hohe Bohrungsdichte entlang einigen Abschnitten der U-Bahn-Trassen (U1, U2), im Altstadtbereich und im Raum Pasing und Aubing.

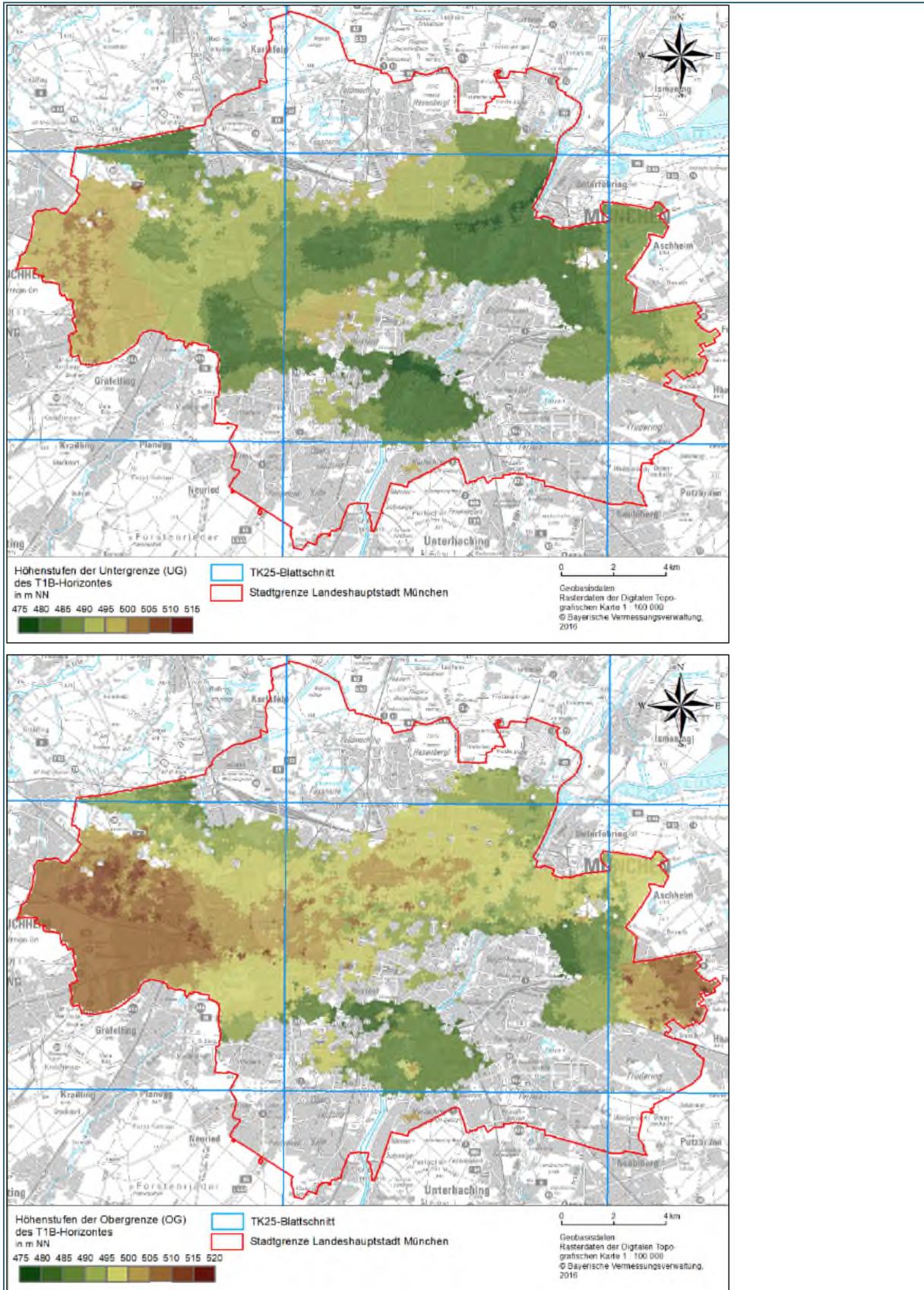


Abb. 44: Verbreitung und modellierte Untergrenze und Obergrenze des T1B-Horizontes (Angaben in m ü. NN)

## Tertiärer Horizont T1C

Tab. 13: Auswertung der Modellergebnisse für den tertiären Grundwasserhorizont T1C

Attribute	Beschreibung
Verbreitung	Wie aus Abb. 45 ersichtlich, ist dieser Horizont überwiegend im nördlichen Teil, aber auch teilweise in getrennten Bereiche im Osten und Westen des Stadtgebietes München verbreitet. Die südlichen Teile des T1C scheinen in einem Streifen in WNW-ESE-Richtung zu verlaufen, wobei der Horizont westlich der Isar bis Pasing im 3D-Modell nicht ausgeprägt ist. T1C erstreckt sich mit einer Gesamtfläche von circa 115 km <sup>2</sup> auf 37 % des Münchner Stadtgebiets.
Lagerung	Der Horizont liegt im Stadtgebiet zwischen 465 m ü. NN und 496 m ü. NN. In Bezug auf die Geländeoberkante liegt die höchste Lage des T1C auf weniger als 3 m u. GOK im Norden (Raum Feldmoching) und im Isarbereich (Raum Fröttmaning). Wie bei den Horizonten T1A und T1B weist dies auf einen potentiellen Kontakt zwischen T1C und der Isar in diesem Bereich hin. Unmittelbar östlich des Altstadtrings, im Isarbereich, liegt T1C auf einer Tiefe zwischen 25 m und 35 m u. GOK, was eine Interaktion mit der Isar in Frage stellt. Die tiefste Stelle des Horizontes befindet sich im Süden auf einer Höhe von über 80 m unter GOK.
Mächtigkeit	Die Mächtigkeit erreicht im Maximum 20 m bis 24 m in einem breiten Bereich im Norden (Raum Milbertshofen) und liegt durchschnittlich im gesamten T1C-Verbreitungsgebiet bei circa 9 m. Die Mächtigkeitswerte des T1C liegen meistens unter 16 m (Perzentil 90).
Lithologische Ausbildung	Der T1C-Horizont ist sandig ausgebildet.
Interaktionsbereiche	<p>Abb. 50 und Abb. 53 zeigen die Kontaktbereiche des T1C mit den anderen Horizonten. T1C interagiert sowohl mit dem quartären Grundwasserleiter, als auch mit den tertiären Horizonten T1B und T1D.</p> <p>Der Kontakt zwischen den quartären Kiesen und dem T1C-Horizont findet vor allem im nördlichen Teil des Stadtgebiets statt.</p> <p>Kontakt zwischen T1C und T1B und Kontakt zwischen T1B, T1C und T1D: unter Punkt „Tertiärer Horizont T1B“ beschrieben.</p> <p>Wie ersichtlich, verlaufen die tertiären Horizonte <u>T1C und T1D</u> im nördlichen Teil des Münchner Stadtgebiets größtenteils zusammen. Diese Situation ist nördlich der Bundesstrasse B 304 zwischen Moosach und Allach häufig anzutreffen. Nur lokal vertretenen Kontaktzonen sind auch in Kleinbereichen im Westen und im Isarbereich auf der Höhe Fröttmanings.</p>
Bohrungsdichte	Der T1C-Horizont wird im 3D-Modell durch 1.983 Bohrungen wenigstens teilweise erbohrt. Damit beträgt die Bohrungsdichte im Mittel circa 3 Bohrungen pro 0,5 km <sup>2</sup> . Als Folge wird circa 45 % des gesamten Volumens des T1C-Horizontes mindestens durch eine Bohrung durchgebohrt (siehe blaue Bereiche im Bild). Markant ist die hohe Bohrungsdichte entlang der U-Bahn-Trasse der U2 im Norden und in der Umgebung der Kläranlage Gut Grosslappen. Beide weisen reichsweite Werte von über 100 Bohrungen pro 0,5 km <sup>2</sup> auf.

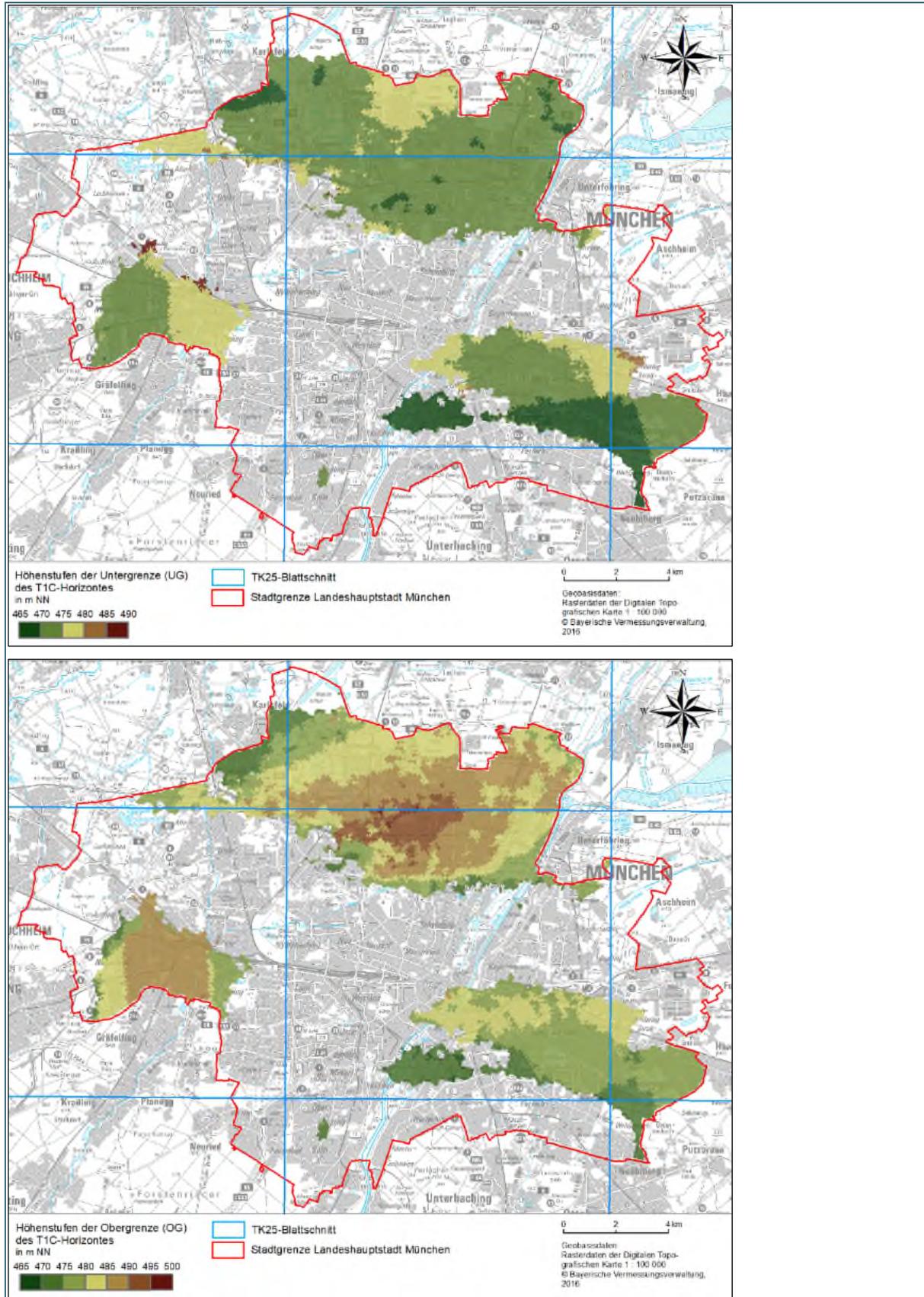


Abb. 45: Verbreitung und modellierte Untergrenze und Obergrenze des T1C-Horizontes (Angaben in m ü. NN)

**Tertiärer Horizont T1D**

Tab. 14: Auswertung der Modellergebnisse für den tertiären Horizont T1D

Attribute	Beschreibung
Verbreitung	Dieser Horizont ist sehr heterogen im Stadtgebietsbereich verbreitet. Wie aus Abb. 46 ersichtlich, ist T1D vor allem an den Randgebieten der Stadt ausgeprägt. Zudem erkennt man deutlich, dass dieser Horizont sich ebenso in einem Streifen entlang der S-Bahn-Trasse zwischen Pasing und Berg am Laim erstreckt. Der T1D-Horizont deckt mit einer Gesamtfläche von 144 km <sup>2</sup> 46 % des gesamten Münchner Stadtgebiets ab.
Lagerung	Der T1D-Horizont liegt im Stadtgebiet auf einer Tiefe zwischen 435 m ü. NN und 474 m ü. NN. Bezüglich der Geländeoberkante liegt T1D, je nach Gebiet, in einer Tiefenspanne zwischen 11 m und 138 m u. GOK. Seine höchste Lage befindet sich im Norden (im Raum Feldmoching und im Isarbereich bei Fröttmaning) auf Tiefen zwischen 11 m und 25 m u. GOK. Die tiefste Stelle des Horizontes findet man in Tiefen um 120 m u. GOK am südlichen Ende der Stadt im Raum Solln.
Mächtigkeit	Die Mächtigkeit erreicht maximal 20 m bis 29 m im Westen, im Norden und im Nordosten. Der Mittelwert im gesamten T1D-Verbreitungsgebiet liegt bei circa 12 m. Die Mächtigkeiten liegen häufig unter 26 m (Perzentil 90). Entlang der S-Bahn-Trasse liegen die Werte meist zwischen 4 m und 10 m.
Lithologische Ausbildung	T1D ist vorwiegend sandig ausgebildet. Im Osten und im Norden sind zum Teil ansteigende kiesige Anteile zu beobachten.
Interaktionsbereiche	Abb. 50 und Abb. 54 zeigen die Interaktionsbereiche des T1D-Horizontes. T1D interagiert sowohl mit dem quartären Grundwasserleiter, als auch mit den tertiären Horizonten T1B, T1C und T1D.  Der Kontakt zwischen den quartären Kiesen und T1D findet in einem sehr kleinen Bereich am nördlichen Ende der Stadt statt.  Kontakt zwischen T1D und T1C ist unter Punkt „Tertiärer Horizont T1C“ beschrieben. Kontakt zwischen T1D, T1B und T1C ist unter Punkt „Tertiärer Horizont T1C“ beschrieben.
Bohrungsdichte	T1D wird im Stadtgebietsbereich durch insgesamt 438 Bohrungen teilweise erschlossen. Die meisten Bohrungen liegen entlang der U-Bahn-Trassen der Linien U2 und U3 und dem Autobahnring (A99) im Norden. In innenstädtischen Gebieten liegt eine hohe Bohrungsdichte auf einer Linie zwischen Hauptbahnhof und Ostbahnhof vor. Die Bohrungsdichte im gesamten T1D-Körper hat einen Mittelwert von 0,3 Bohrungen pro 0,5 km <sup>2</sup> . Damit wird nur 12 % des gesamten Volumens des T1D-Körpers durch Bohrungen abgedeckt.

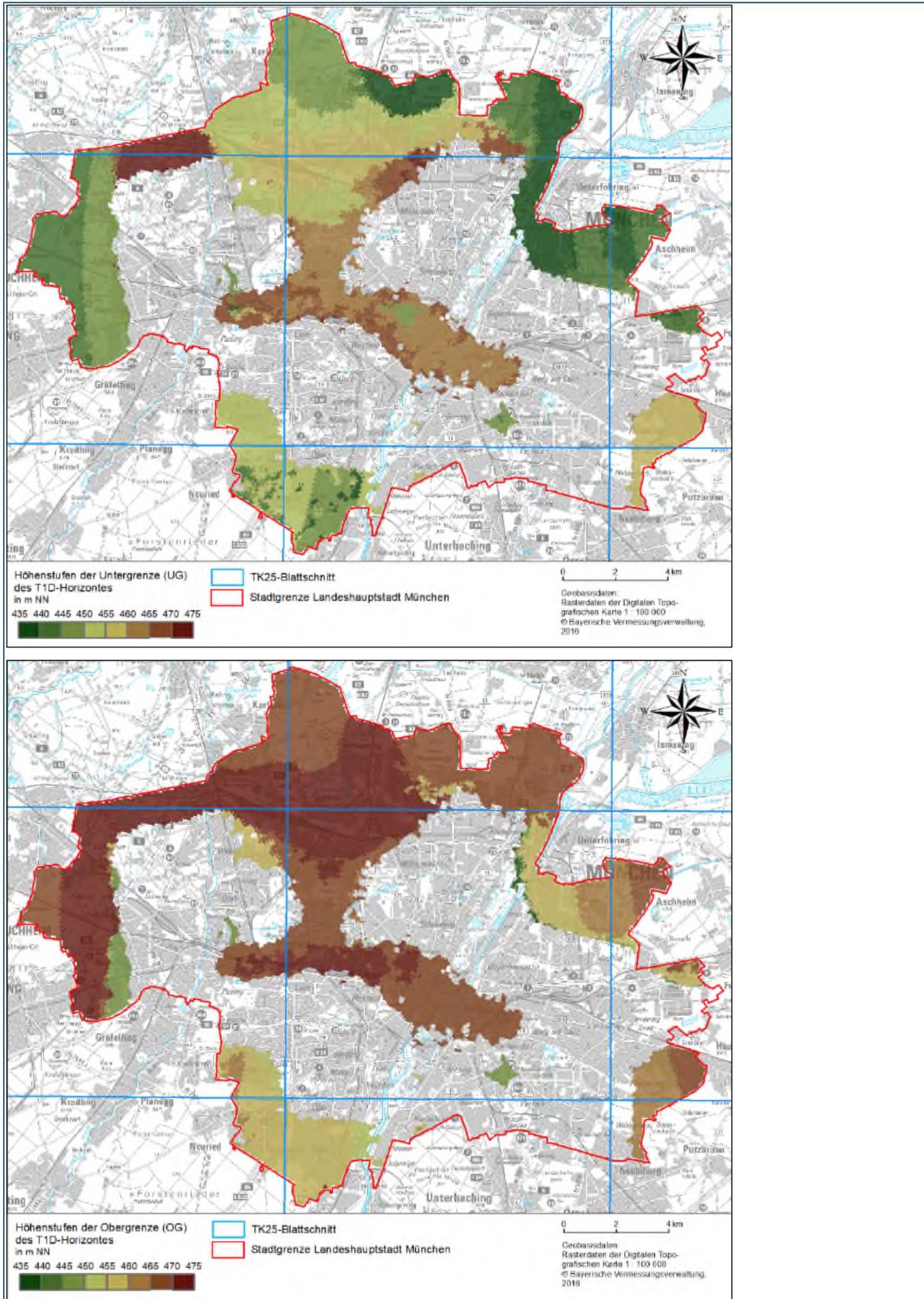


Abb. 46: Verbreitung und modellierte Unter- und Obergrenze des T1D-Horizontes (Angaben in m ü. NN)

## Tertiärer Horizont T2

Tab. 15: Auswertung der Modellergebnisse für den tertiären Horizont T2

Attribute	Beschreibung
Verbreitung	Der T2-Horizont erstreckt sich mit einer Fläche von 235 km <sup>2</sup> auf 76 % des Stadtgebiets. Damit ist T2 der am weitesten verbreitete tertiäre Horizont im Stadtgebiet. Siehe Abb. 47.
Lagerung	Der Horizont liegt zwischen 381 m ü. NN und 448 m ü. NN. In Bezug auf die Geländeoberkante liegt der Horizont in einem breiten Tiefenbereich zwischen 43 m bis 195 m u. GOK vor. Die höchste Lage des T2 befindet sich im Norden, am Grenzbereich des Landkreises Dachau bei Karlsfeld, auf einer Tiefe zwischen 43 m und 50 m u. GOK. Im Süden der Stadt liegt die tiefste Stelle des T2 zwischen 180 m und 195 m u. GOK.
Mächtigkeit	Obwohl der T2 im Stadtgebiet fast überall flächendeckend anzutreffen ist, ist seine Ausprägung sehr heterogen. Während die Mächtigkeit oft unter 14 m liegt (Perzentil 90), betragen die maximalen Werte im Nordwesten, im Süden und in einem zentralen Bereich zwischen den S-Bahnhöfen Hirschgarten und Donnersbergerbrücke 20 m bis 27 m. Der Mittelwert im gesamten T2-Verbreitungsgebiet liegt bei circa 8 m.
Lithologische Ausbildung	T2 ist vorwiegend sandig ausgebildet. Im Norden gibt es zum Teil ansteigende kiesige Anteile.
Interaktionsbereiche	Im Modell sind im Bereich des Stadtgebiets keine Interaktionsbereiche mit anderen durchlässigen Horizonten zu erkennen.
Bohrungsdichte	Die Bohrungsdichte im T2-Horizont liegt im Durchschnitt bei nur circa 0,1 Bohrungen pro 0,5 km <sup>2</sup> . Insgesamt erreichen im Modell 86 Bohrungen diesen Horizont. Daraus lässt sich ableiten, dass nur 6 % des gesamten Volumens des T2-Körpers durch Bohrungen erschlossen ist. Die Karte der Bohrungsdichte des Horizontes zeigt Bereiche, in der Umgebung der Münchner Brauereien und im Norden des Wasserwerks Karlsfeld, wo zum Teil eine Bohrungsdichte von 6 Bohrungen pro 0,5 km <sup>2</sup> vorliegt.

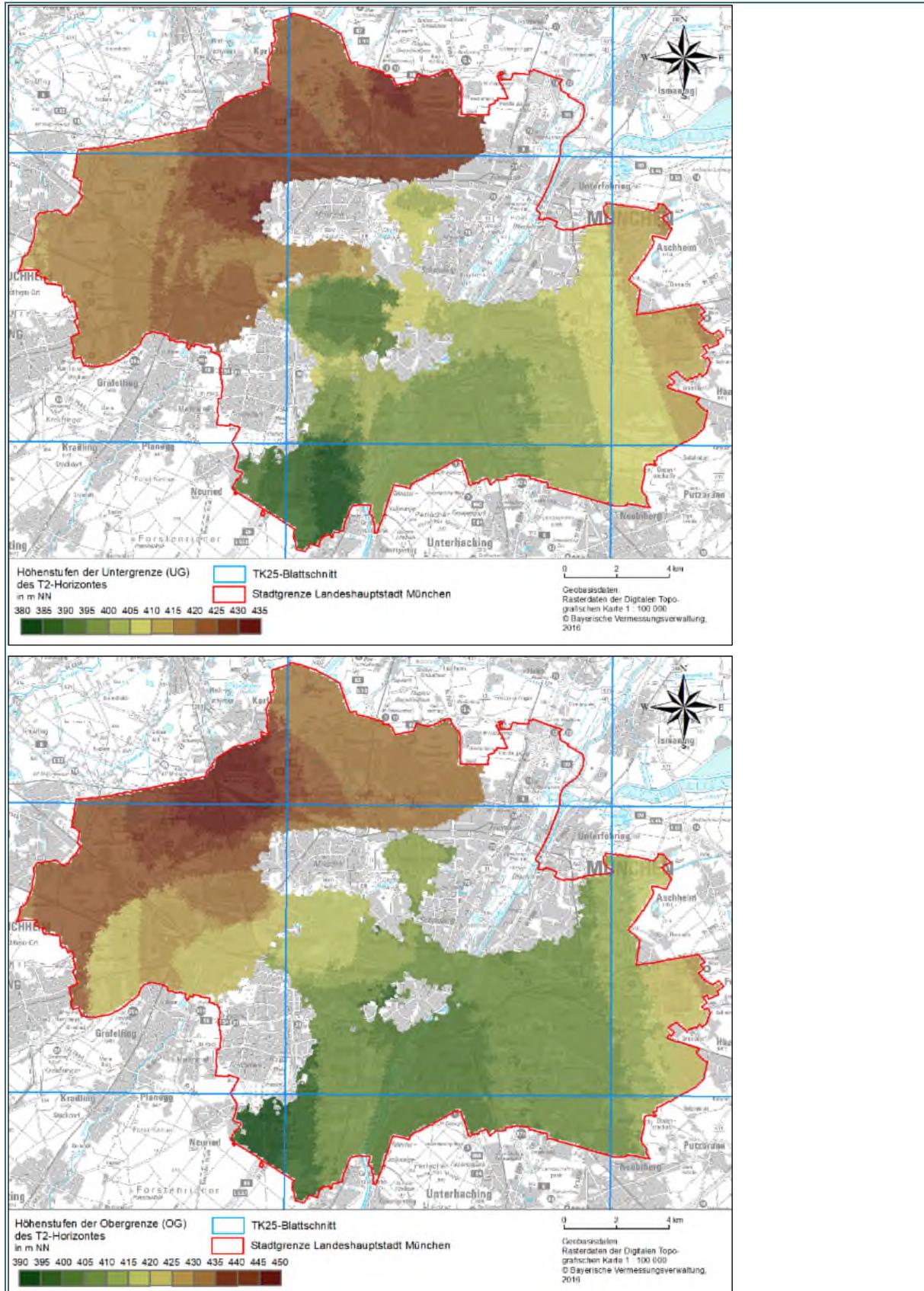


Abb. 47: Verbreitung und modellierte Untergrenze und Obergrenze des T2-Horizontes (Angaben in m ü. NN)

### Tertiärer Horizont T3

Tab. 16: Auswertung des Modellergebnisses für den tertiären Horizont T3

Attribute	Beschreibung
Verbreitung	Der T3-Horizont ist nur in der westlichen Hälfte des Stadtgebietes München verbreitet. Er erstreckt sich mit einer Fläche von 134 km <sup>2</sup> auf 43 % des gesamten Stadtgebietsbereichs. Siehe Abb. 48.
Lagerung	Der Horizont liegt zwischen 352 m ü. NN und 414 m ü. NN, was eine Tiefenlage von 88 m bis 213 m unter Geländeoberkante entspricht. Die höchste Lage des T1B (zwischen 88 m und 100 m u. GOK) liegt im Norden der Stadt München, am Grenzbereich zum Landkreis Dachau bei Karlsfeld. Analog zu T1A, weist dies auf einen potentiellen Kontakt zwischen T1B und der Isar hin. Die tiefste Stelle des Horizontes befindet sich im Süden, bei Solln und Neuried, auf einer Höhe von über 200 m unter GOK.
Mächtigkeit	Obwohl die Mächtigkeit ein Maximum von 40 m – 47 m, im Nordwesten im Raum Untermenzing, erreicht, liegt der Mittelwert des gesamten Horizonts bei nur circa 7 m. Die Mächtigkeitswerte liegen meist unter 12 m (Penzentil 90).
Lithologische Ausbildung	Der T3-Horizont ist sowohl in sandiger, als auch in kiesiger Fazies ausgebildet. Vor allem in Richtung Westen und Norden sind immer höhere kiesige Anteile anzutreffen.
Interaktionsbereiche	Im 3D-Modell sind im Raum des Stadtgebiets keine Interaktionsbereiche mit anderen durchlässigen Horizonten zu erkennen.
Bohrungsdichte	Die Bohrungsdichte im T3-Horizont liegt im Durchschnitt bei nur circa 0,05 Bohrungen pro 0,5 km <sup>2</sup> . Insgesamt erreichen im Stadtgebiet nur 18 Bohrungen diesen Horizont. Daraus lässt sich ableiten, dass nur circa 4 % des gesamten Volumens des T3-Körpers durch Bohrungen erschlossen und große Teile interpoliert wurden.

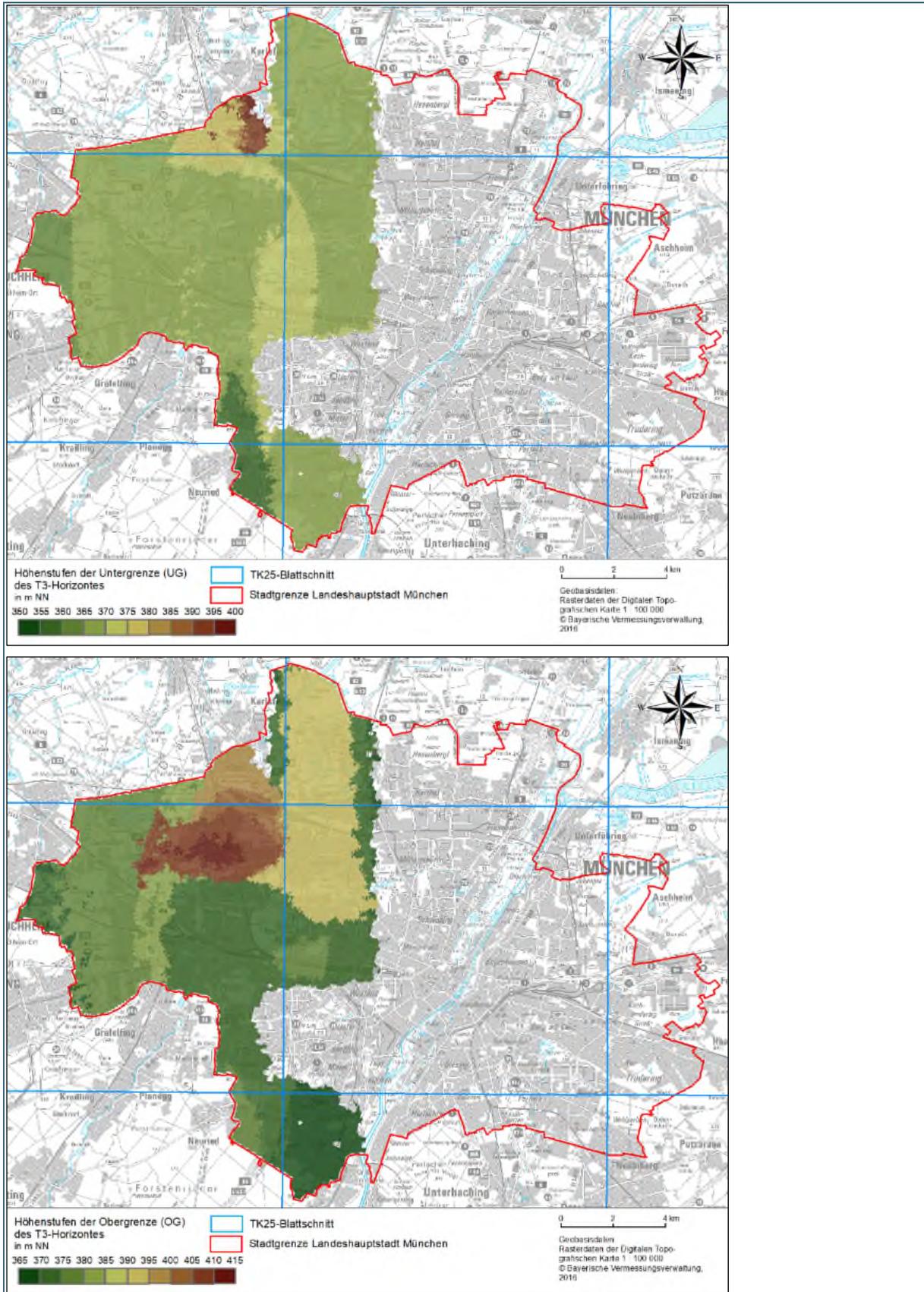


Abb. 48: Verbreitung und modellierte Untergrenze und Obergrenze des T3-Horizontes (Angaben in m ü. NN)

## Tertiärer Horizont T4

Tab. 17: Auswertung der Modellergebnisse für den tertiären Horizont T4

Attribute	Beschreibung
Verbreitung	Der T4-Horizont verläuft in einem Nord-Süd gerichteten, breiten Streifen im zentralen Stadtgebiet. T4 erstreckt sich mit einer Fläche von 154 km <sup>2</sup> auf knapp 50 % des Arbeitsgebietes. Siehe Abb. 49.
Lagerung	Der Horizont liegt zwischen 283 m ü. NN und 329 m ü. NN. Bezüglich der Geländeoberkante entspricht dies einer Tiefenlage von 157 m bis 282 m u. GOK. Die höchste Lage des T4 (zwischen 157 m und 170 m u. GOK) liegt im Norden der Stadt bei Karlsfeld. Die tiefste Stelle des T4-Horizontes liegt, mit einem Wertebereich von 260 m bis 282 m u. GOK, im südlichen Stadtgebiet.
Mächtigkeit	Die Mächtigkeit erreicht im Maximum 23 m und liegt durchschnittlich bei circa 18 m.
Lithologische Ausbildung	T4 ist faziell sandig und kiesig ausgebildet. Im westlichen Bereich des Stadtgebiets erkennt man einen raschen lateralen Fazieswechsel der Sedimente von Sanden zu Kiesen. In ähnlicher Weise wird im zentralen Bereich ein Fazieswechsel in der Vertikale sichtbar, in dem die Sedimente mit der Tiefe grobkörniger werden.
Interaktionsbereiche	Im 3D-Modell des Stadtgebietes sind keine Interaktionsbereiche mit anderen durchlässigen Horizonten erkennbar.
Bohrungsdichte	Die Bohrungsdichte im T4-Horizont liegt im Durchschnitt bei nur circa 0,05 Bohrungen pro 0,5 km <sup>2</sup> . Insgesamt erreichen im Stadtgebiet nur 33 Bohrungen diesen Horizont. Daraus lässt sich ableiten, dass nur circa 3 % des gesamten Volumens des T4-Körpers durch Bohrungen erschlossen ist. Die Ausbreitung des T4 wird durch die Interpolation zwischen den Bohrungen geprägt.

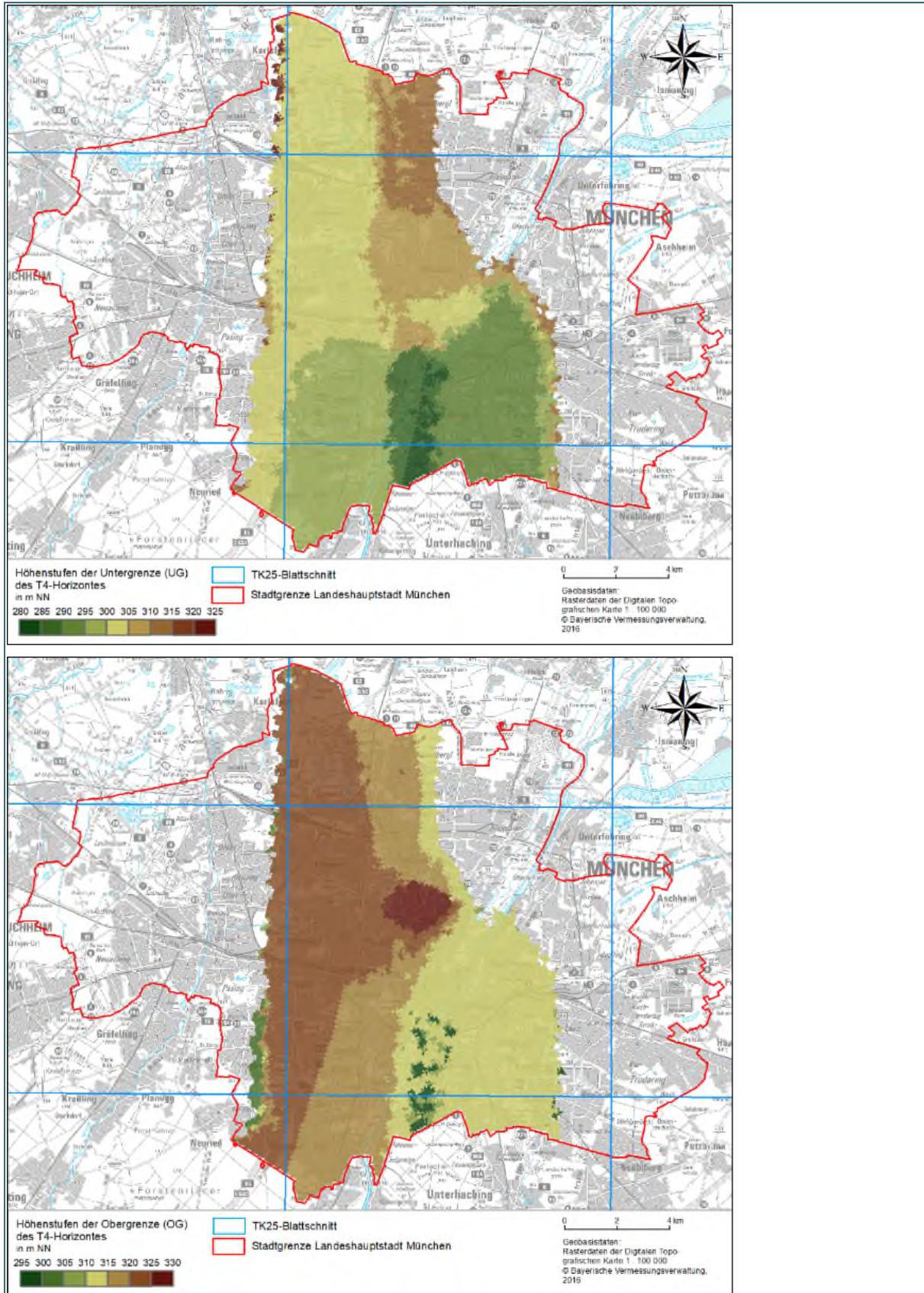


Abb. 49: Verbreitung und modellierte Unter- und Obergrenze des T4-Horizontes (Angaben in m ü. NN)

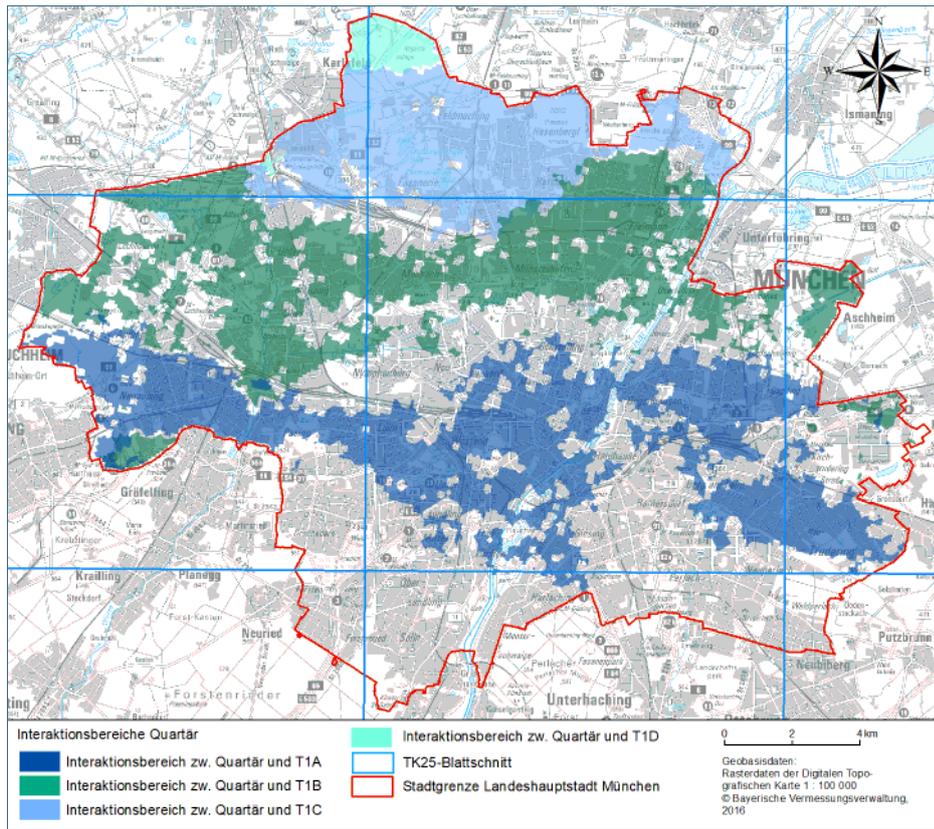


Abb. 50:  
Interaktionsbereiche  
zwischen Quartär und  
Horizont T1A bis T1D

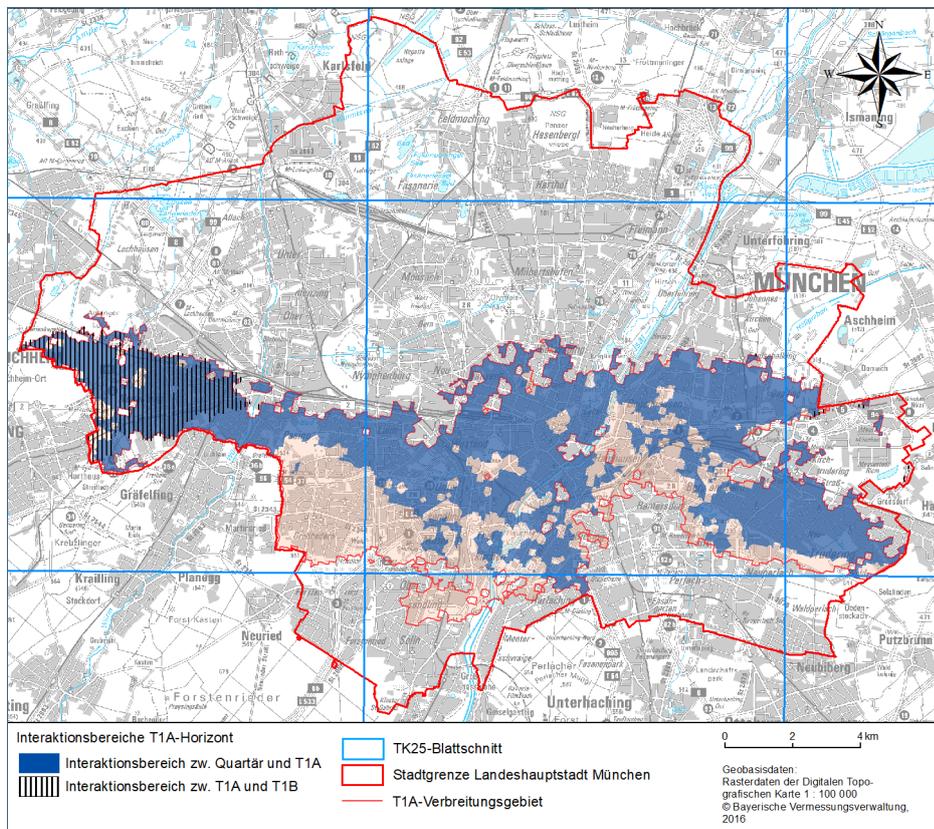


Abb. 51:  
Interaktionsbereiche  
T1A Horizont

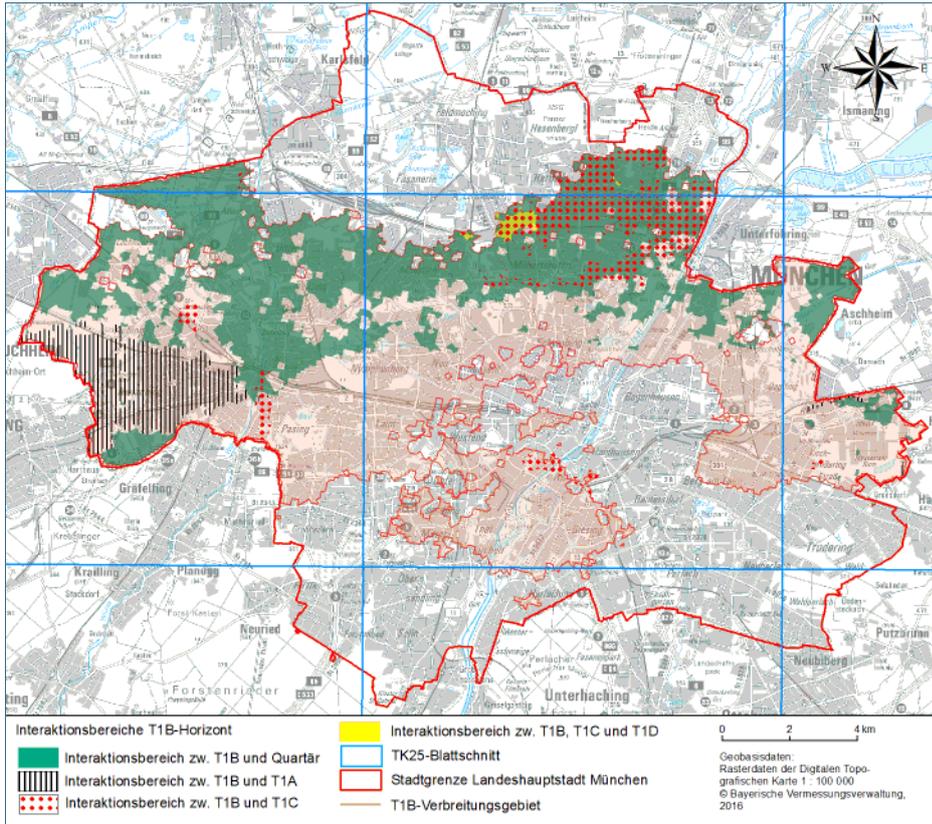


Abb. 52:  
Interaktionsbereiche  
T1B Horizont

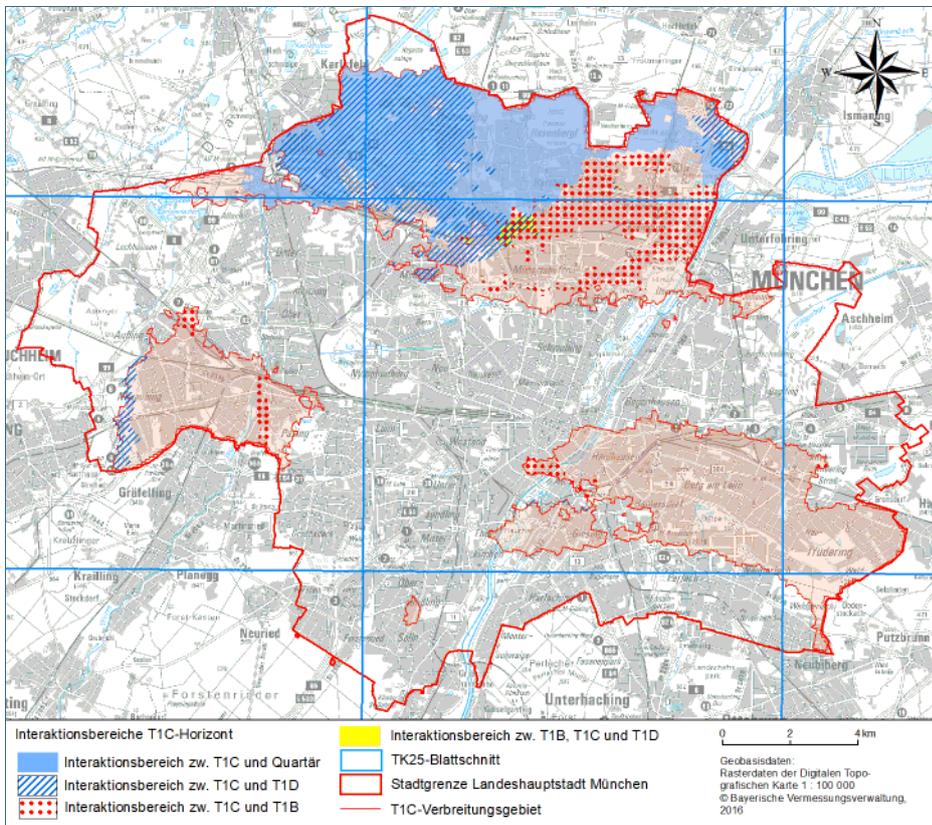


Abb. 53:  
Interaktionsbereiche  
T1C Horizont

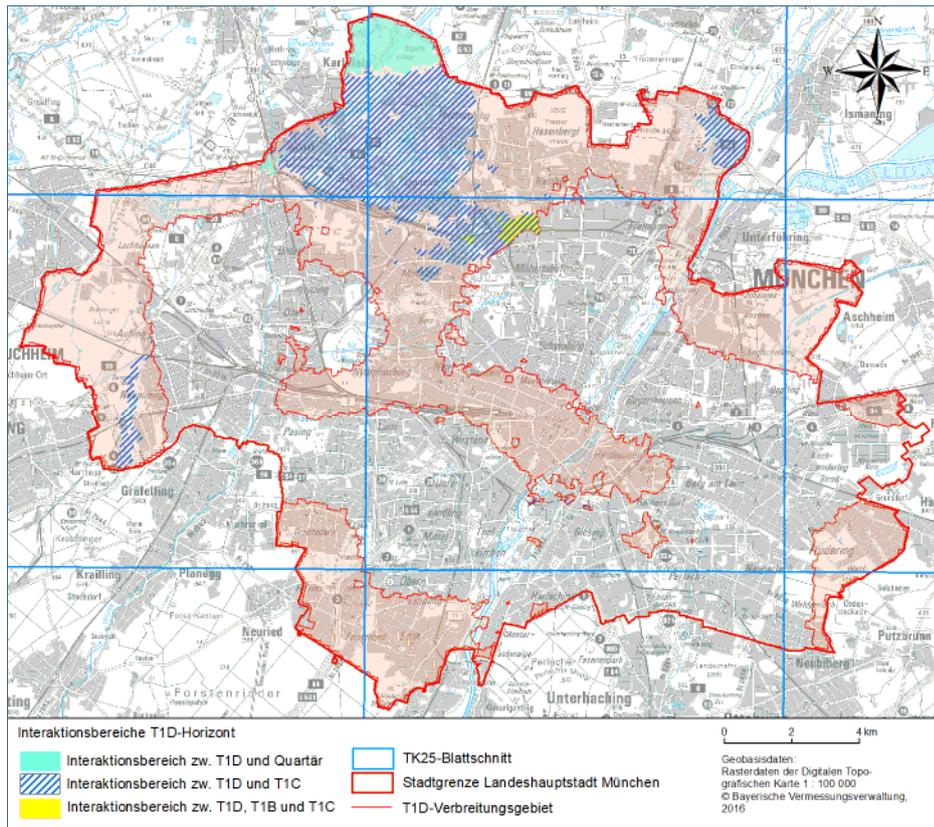


Abb. 54:  
 Interaktionsbereiche  
 T1D Horizont

#### 4.2.4 Beschreibung und Interpretation der hydraulischen Interaktionsbereiche zwischen Quartär und Tertiär

Generell wird in den Kapiteln zum 3D-Lithofaziesmodell (Kapitel 4.2.3) auf die Interaktionsbereiche zwischen Quartär und Tertiär, als auch zwischen den tertiären Horizonten untereinander eingegangen. Folgende Ergebnisse sind als **Ergänzung und als Validierung** der Erkenntnisse des 3D-Modells zu sehen.

- Ausbreitung der hydraulischen Kontaktzonen zwischen dem quartären Grundwasserleiter und dem tieferliegenden Tertiärgrundwasserleiter
- Die durch die Betrachtung der Bohrdaten identifizierten, potentiellen Kontaktzonen zwischen dem quartären und tertiären Grundwasserstockwerk, wurden mit denen sich aus dem 3D-Modell ergebenden Interaktionsbereichen abgeglichen. Wie aus Abb. 55 ersichtlich ist, liegen die zuerst ermittelten Interaktionsbereiche größtenteils in den Interaktionsbereichen des 3D Modells. Abb. 55 zeigt ebenfalls eine Übersicht über das Messnetz der Drucksonden aus Phase 1 und 2, die zur Beobachtung der potentiellen hydraulischen Fenster eingebaut wurden.

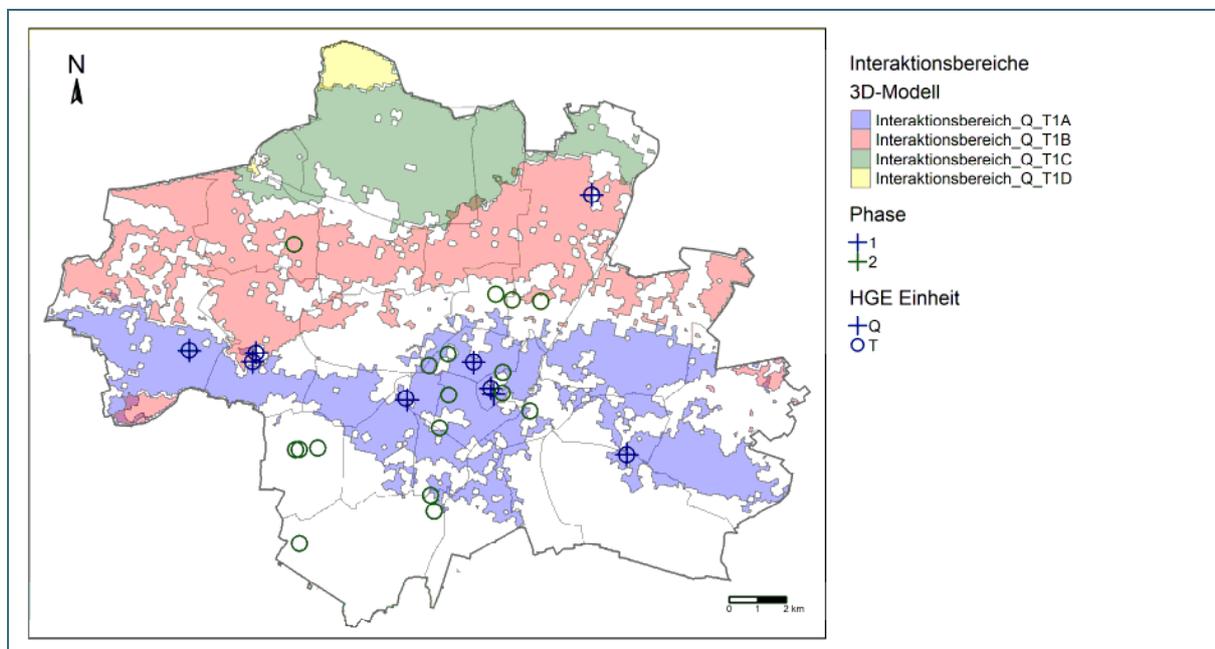


Abb. 55: Übersicht der Bereiche mit vermutetem hydraulischem Kontakt zwischen dem quartären und tertiären Grundwasserstockwerk. Die lithofazielle Verteilung der Interaktionsbereiche im Liegenden der quartären Ablagerungen, nach dem finalem 3D-Lithofaziesmodell im Münchner Stadtgebiet, sind farbig hinterlegt.

#### 4.2.4.1 Auswertung der Grundwasserganglinien: Phase 1

Abb. 56 zeigt die Grundwasserstände der Messstellen im Raum Pasing über einen Zeitraum von einem Jahr. Zur Darstellung der hydrogeologischen Situation wurde aus dem 3D-Lithofaziesmodell ein Profilschnitt in diesem Bereich erstellt (Abb. 57). Im Bereich der Doppelmessstellen „Ebenböckstraße“ sowie „Pasing Bhf“ sind die quartären Kiese durch einen (lokalen) Stauhhorizont von den tertiären Sanden getrennt. Die Quartär-Messstelle in der Radolfzeller Straße ist dagegen zusätzlich in den Flinsanden verfiltert, welche die quartären Kiese ohne Trennhorizont unterlagern. Die Filterstrecke der Tertiär-Messstelle befindet sich in den tertiären Sanden, die – getrennt durch einen Stauhhorizont – folgen.

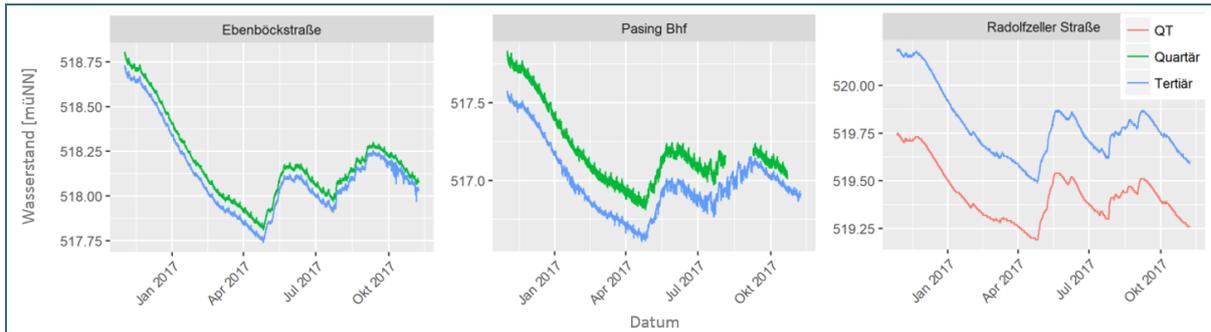


Abb. 56: Grundwasserganglinien der quartären und tertiären Messstellen in der Ebenböckstraße (links), am Bahnhof Pasing (Mitte) und in der Radolfzeller Straße (rechts)

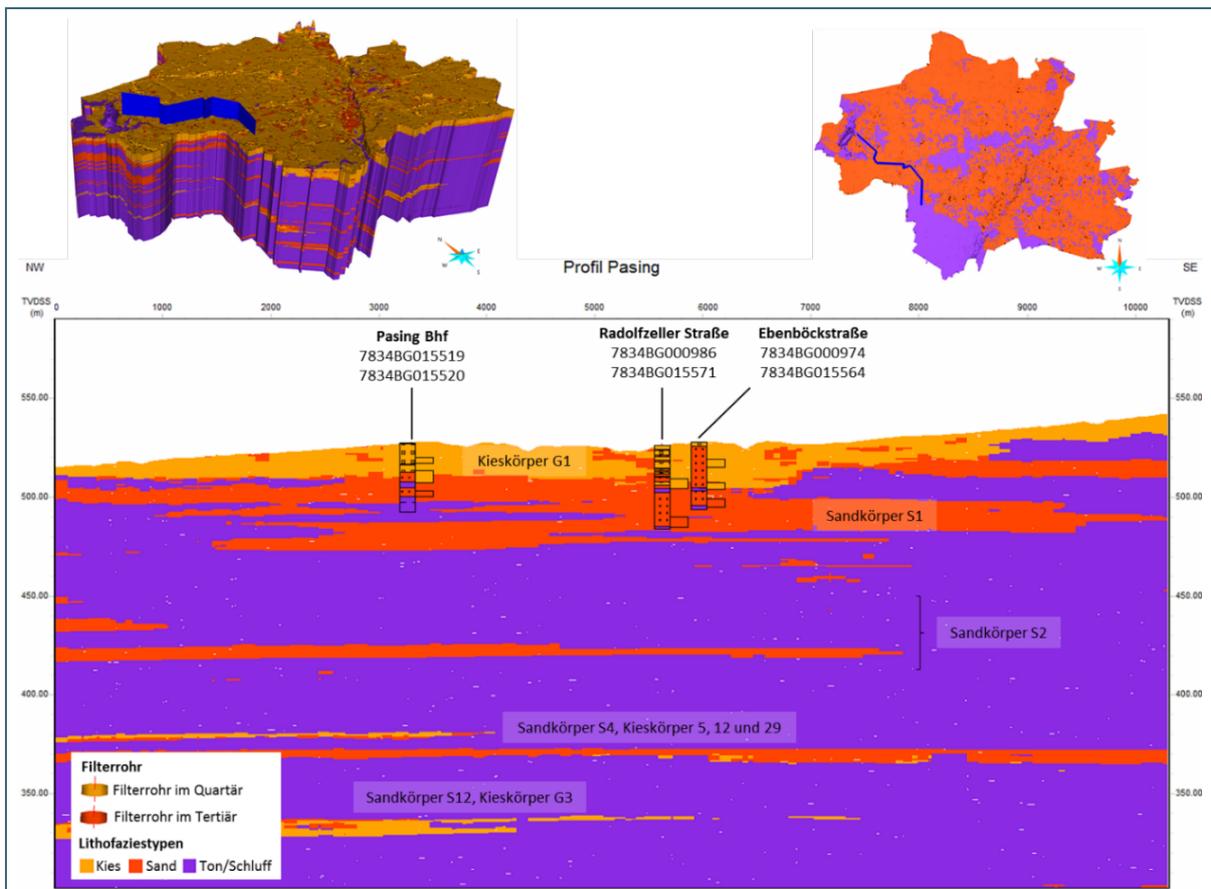


Abb. 57: Profil im Raum Pasing

Die drei Messstellen zeigen über das Jahr gesehen sehr ähnliche Grundwasserschwankungen. Die Grundwasserstände der Messstellen in der Ebenböckstraße und am Bahnhof Pasing fallen von November 2016 bis Ende April 2017 relativ konstant um etwa 1 m ab, steigen im Mai um circa 0,4 m an, gefolgt von einem Abfall im Juli (circa 0,2 m). Nach einem erneuten Anstieg der Grundwasserstände im August/September (circa 0,3 m) fallen sie zum Jahresende hin wieder ab. Der Potentialunterschied im Bereich Ebenböckstraße beträgt 0,1 m, am Bahnhof Pasing ist er mit 0,25 m etwas höher. Die freien Grundwasserstände in den quartären Messstellen verlaufen relativ parallel zu den tertiären Druckspiegeln. Dieser Verlauf der Grundwasserganglinien deutet auf eine großräumige Interaktion zwischen quartärem und tertiärem Grundwasserstockwerk hin. Eine größere zeitliche Verzögerung, also eine Phasenverschiebung der Grundwasserstände der verschiedenen Horizonte, ist, wenn überhaupt nur geringfügig ausgeprägt.

Die Grundwasserstände der Messstellen im Bereich Radolfzeller Straße zeigen ähnliche saisonale Schwankungen. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Messstellen sind die Schwankungen des tertiären Grundwassers im Vergleich zum Quartär zeitlich verzögert, während der Druckspiegel circa 0,45 m über dem des quartären Grundwasserleiters (freie Grundwasserverhältnisse) liegt. Dieser Ganglinienverlauf deutet großräumig ebenfalls auf eine Interaktion hin, jedoch aufgrund der lokal stauenden Schicht mit einer zeitlichen Verzögerung.

Abb. 58 zeigt die Grundwasserganglinien von vier Messstellen aus der Innenstadt über den Zeitraum Juli bzw. August bis November 2017. Abb. 59 stellt exemplarisch das geologische Profil in diesem Gebiet dar.

Am Heimeranplatz liegt der Druckwasserspiegel des tertiären Grundwasserleiters etwa 0,5 m über dem der freien quartären Grundwasseroberfläche. Während in beiden Messstellen ein ähnlicher saisonaler Verlauf zu sehen ist und der Potentialunterschied über den gesamten Messzeitraum gleichbleibt, wurden in der quartären Messstelle kurzzeitige Grundwasseranstiege in unregelmäßigen Abständen aufgezeichnet. In beiden Messstellen wurden die Höchstwerte im September und die Tiefstwerte im Juli gemessen. Der Verlauf der quartären Ganglinie gibt einen Hinweis auf spontane Korrespondenz des quartären Grundwassers auf externe Einflüsse (z. B. Starkregen o.Ä.); aufgrund des ähnlichen saisonalen Verlaufs und dem konstanten Potentialunterschied kann zudem von einer zumindest großräumig bestehenden Interaktion zwischen Quartär und Tertiär ausgegangen werden, wobei der Grundwasserdruckspiegel leicht „gedämpft“ auftritt.

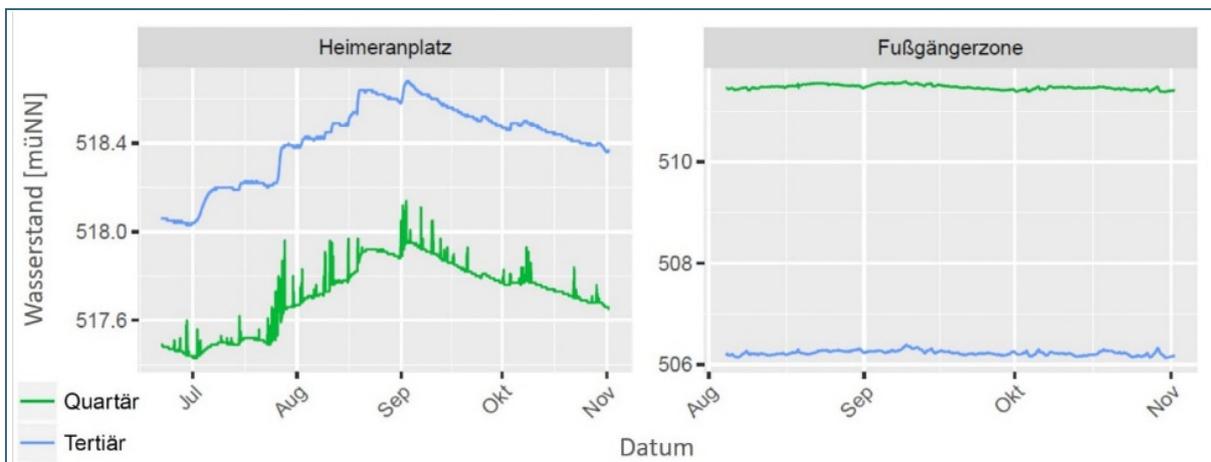


Abb. 58: Grundwasserganglinien der quartären und tertiären Messstellen am Heimeranplatz (links) und in der Fußgängerzone (rechts)

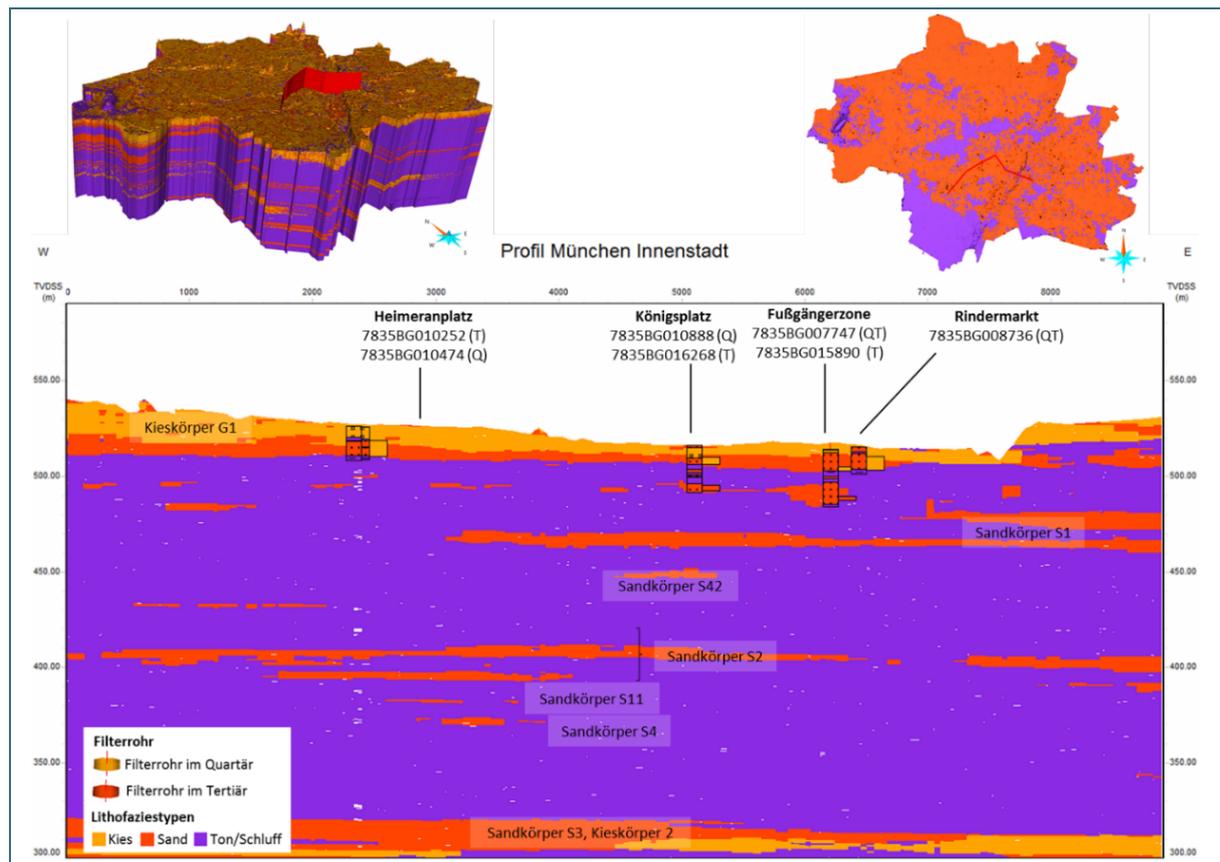


Abb. 59: Profil aus dem 3D-Modell im Raum München Innenstadt (Heimeranplatz bis Rindermarkt)

In der Münchner Fußgängerzone liegt der Druckwasserspiegel des tertiären Grundwasserleiters circa 5 m unter der quartären Grundwasseroberfläche. In der tertiären Messstelle wurden während des Messzeitraums mit 0,26 m leicht größere Schwankungen aufgezeichnet (Quartär: 0,21 m). Größere Schwankungen und Verzögerungen sind dem Verlauf nicht zu entnehmen. Eine zumindest großräumige Interaktion kann auch hier angenommen werden. Zusätzlich ist das gesamte Gebiet stark anthropogen beeinflusst und die Grundwasseroberfläche auch durch Nutzungen zum Teil abgesenkt, was die geringe Varianz im Verlauf der Ganglinien erklären könnte.

In Abb. 60 sind die Ganglinien zweier Grundwassermessstellen in Freimann dargestellt (Messzeitraum: November 2016 bis November 2017). Der Druckwasserspiegel des tertiären Grundwasserleiters liegt circa 0,15 m über dem der quartären Grundwasseroberfläche. Bis Mai zeigen sie ähnliche Grundwasserschwankungen, anschließend erhöht sich der Potentialunterschied. Gegen Ende des Messzeitraums steigt der quartäre Grundwasserstand und gleicht sich dem des tertiären Grundwasserleiters an. Die Tiefstwerte wurden in beiden Messstellen im Februar aufgezeichnet, die Höchstwerte im Mai (Tertiär) bzw. Mai und November (Quartär). Durch die nur leicht abweichend verlaufenden Grundwasserstände über das Jahr, ist eine lokale, direkte Interaktion der beiden Grundwasserhorizonte, sowie eine großräumige Interaktion denkbar. Im Bereich Freimann ist der T1A-Horizont nicht mehr ausgebildet. Der lokal tiefer liegende T1B/C-Horizont interagiert bereichsweise mit dem Quartär (siehe Grundwassergleichpläne OSM). Dies kann eine komplexere Situation, sowie verzögerte und nur bereichsweise parallele Verläufe der Grundwasserstände zur Folge haben.

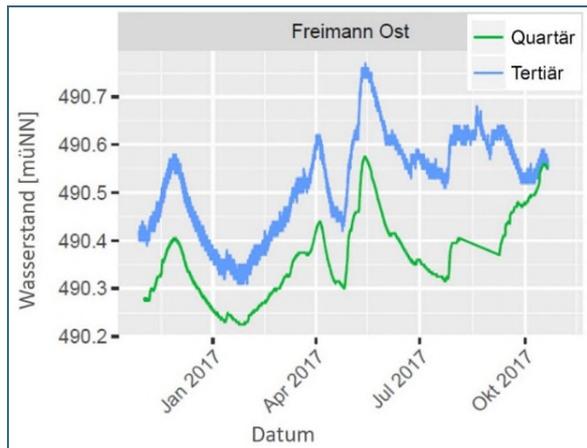


Abb. 60:  
Grundwasserganglinien  
der im Quartär und Tertiär  
verfilterten Messstellen in  
München-Freimann

#### 4.2.4.2 Auswertung der Grundwasserganglinien: Phase 2

Um die Reichweite möglicher Einflüsse der Interaktionsbereiche auf die Grundwasserganglinien der Grundwasserhorizonte der OSM zu untersuchen, wurden in der Phase 2 die Datenlogger in Messstellen eingebaut, die sich, auf Basis der Informationen des 3D-Modells, in verschiedenen Entfernungen zu einer hydraulischen Kontaktzone befinden. Beispielhaft wird die Reichweite möglicher Einflüsse der Interaktionsbereiche auf die Grundwasserganglinien im Folgenden anhand zweier Profilschnitte für den Horizont T1B und T1C aufgezeigt.

##### Auswertung und Validierung anhand von Profilschnitten

Auf Basis des 3D-Lithofaziesmodells für den Großraum München (Kapitel 4.2) ist es möglich, geologische Profilschnitte zu exportieren. Beispielhaft werden zwei dieser Profilschnitte nachgehend verwendet, um Erkenntnisse zu den hydraulischen Kontaktzonen zu erläutern.

### Profil 1: T1B-Horizont

In Abb. 61 ist die Lage der Messstellen und der Profilverlauf des ersten Untersuchungsgebietes dargestellt.

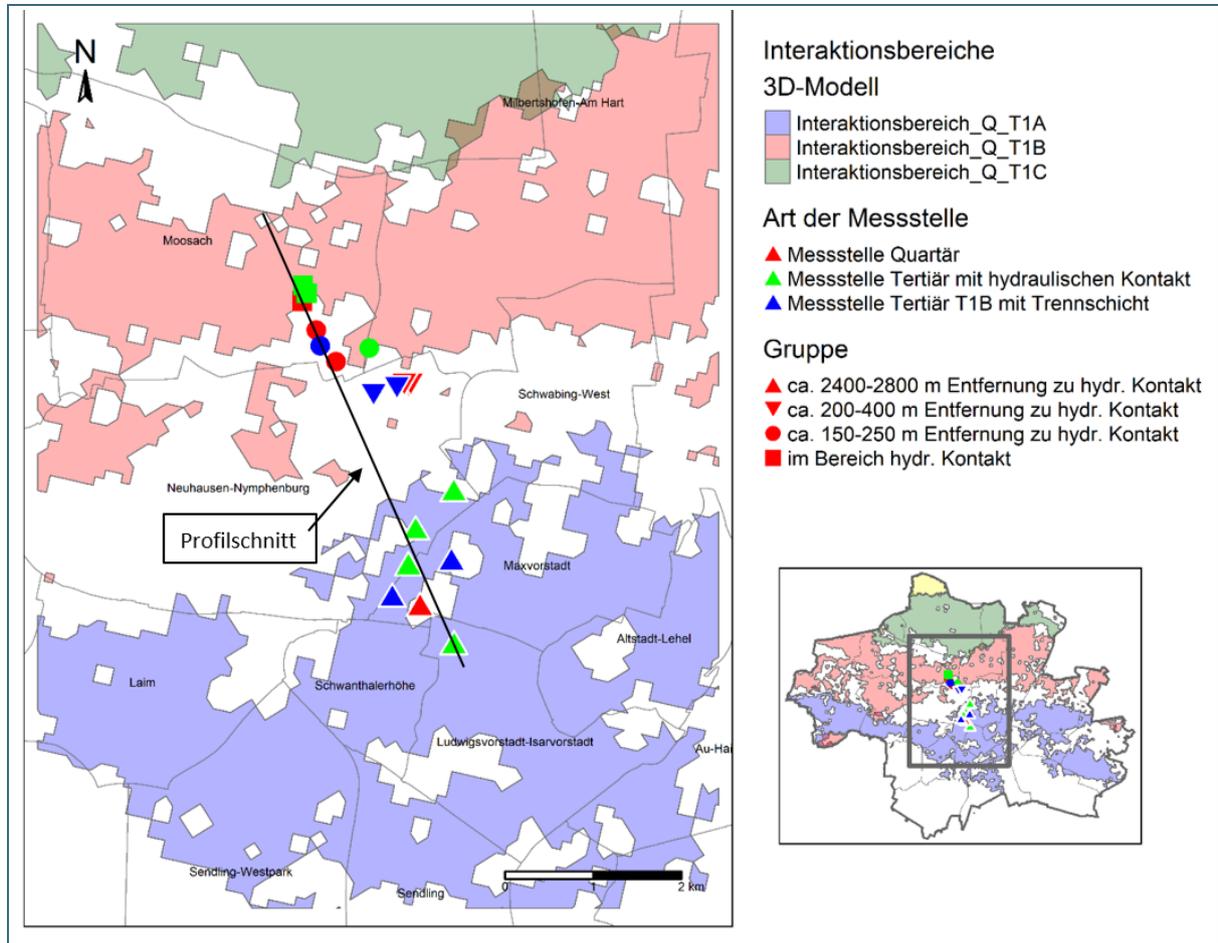


Abb. 61: Ausgewählte Messstellen und die Lage des Profilschnitts 1 zur Untersuchung der Reichweite der Auswirkungen der Interaktionsbereiche auf die Ganglinien im T1B-Horizont

Wie Abb. 62 zeigt, ist im SSE eine mächtige Trennschicht zwischen dem T1B-Horizont und dem quartären Grundwasserleiter vorhanden. Diese Trennschicht wird in Richtung NNW geringmächtiger und ist im Bereich der Messstellen der Gruppe 4 nicht mehr vorhanden. Im Bereich der Gruppen 2 und 3 befinden sich östlich und westlich bereits einige hydraulische Kontaktbereiche zwischen Q und T1B (Abb. 62).

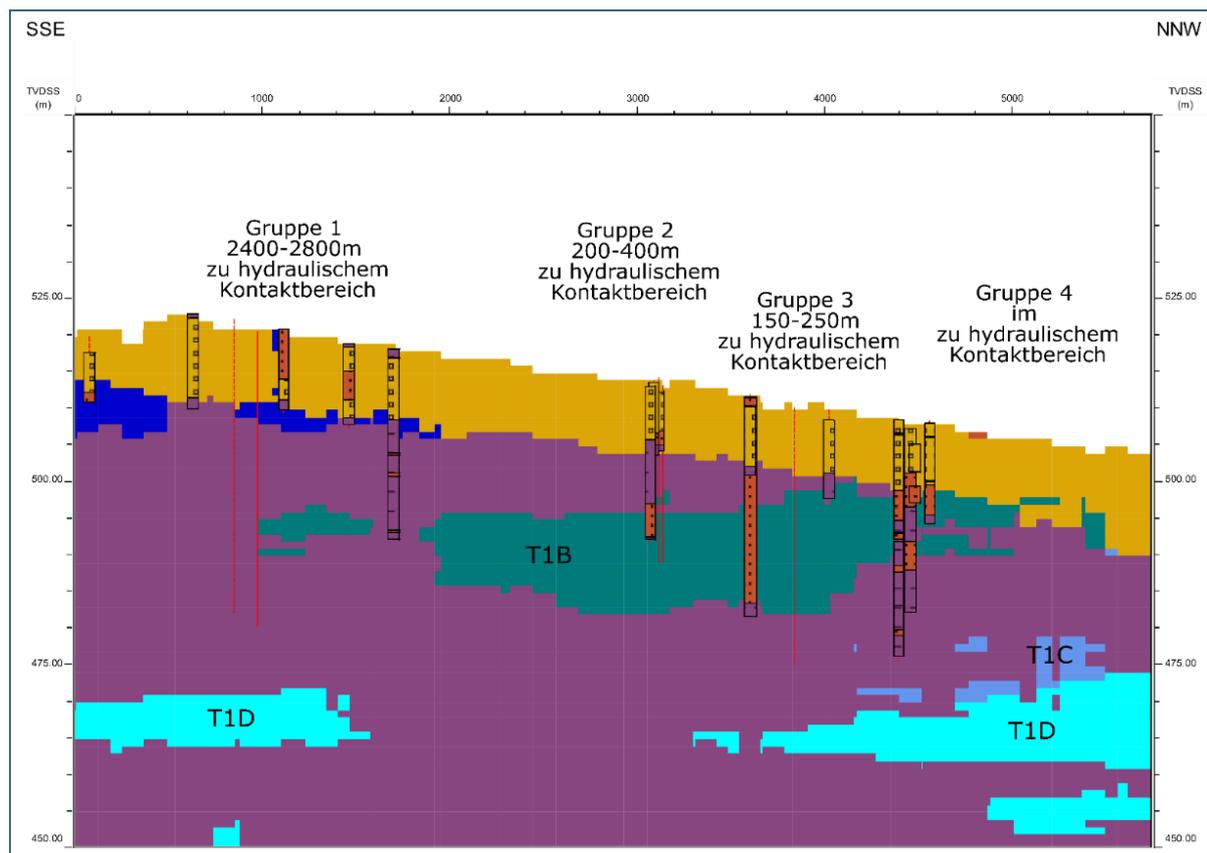


Abb. 62: Profilschnitt im Untersuchungsgebiet. Im SSE ist noch eine mächtige Trennschicht (lila) zwischen T1B-Horizont (grün) und dem quartären Grundwasserleiter (gelb) vorhanden. In NNW Richtung wird diese Trennschicht zunehmend geringermächtig und ist im Bereich der Gruppe 4 nicht mehr vorhanden. Dargestellt sind auch die lithologischen Profile (falls vorhanden) der Messstellen für die die Grundwasserganglinien verglichen werden.

Die Grundwasserganglinien des T1B-Horizonts, in Abhängigkeit zur Entfernung zur hydraulischen Kontaktzone, sind in Abb. 63 dargestellt. Zusätzlich sind als Vergleich Grundwasserganglinien räumlich naheliegender Messstellen dargestellt, die in den quartären Kiesen oder im T1A-Horizont ohne Trennschicht zum quartären Grundwasserleiter verfiltert sind. Da die Messstellen der jeweiligen Gruppen sich zwar in räumlicher Nähe aber nicht an der identischen Position befinden, ist ein Vergleich der absoluten Druckspiegelhöhen nicht sinnvoll. Ein relativer Vergleich über den Verlauf ist aber möglich (Abb. 63).

Im Bereich des hydraulischen Kontakts (Gruppe 4) zeigen die Ganglinien (Abb. 63) sehr ähnliche Verläufe. Auch die deutliche Absenkung ab 2018 und der starke Anstieg Anfang 2019 sind nahezu identisch abgebildet. In den mittleren Entfernungen (Gruppe 2 und 3) sind die Verläufe über längere Zeit auch sehr ähnlich. Jedoch gibt es in Gruppe 2 Mitte 2018 eine deutliche Absenkung der Grundwasseroberfläche in beiden Ganglinien des T1B-Horizonts. Diese Absenkung ist in den Ganglinien des quartären Grundwasserleiters nicht vorhanden. Auch die Ganglinien der am weitesten von der hydraulischen Kontaktzone entfernt liegenden Messstellen des T1B-Horizonts (Gruppe 1) zeigen einen ähnlichen Verlauf wie die Ganglinien im quartären Grundwasserleiter. Tendenzielle Unterschiede sind in dem kurzen Vergleichszeitraum nicht eindeutig auszumachen. Insgesamt scheinen sich die Ganglinien auch in größerer Entfernung zu den hydraulischen Kontaktzonen, bei ungestörten Verhältnissen, ähnlich wie die des quartären Grundwasserleiters zu verhalten. Kurzfristige Änderungen in den Ganglinien können dagegen schon ab einer geringeren Entfernung zu dem hydraulischen Kontaktbereich auf den Horizont der OSM beschränkt sein und sich nicht in den Grundwasserständen des quartären Grundwasserleiters widerspiegeln. Die Interaktion der Horizonte der OSM und des quartären Grundwasserleiters wird außerdem in Kapitel 5 weiter erläutert.

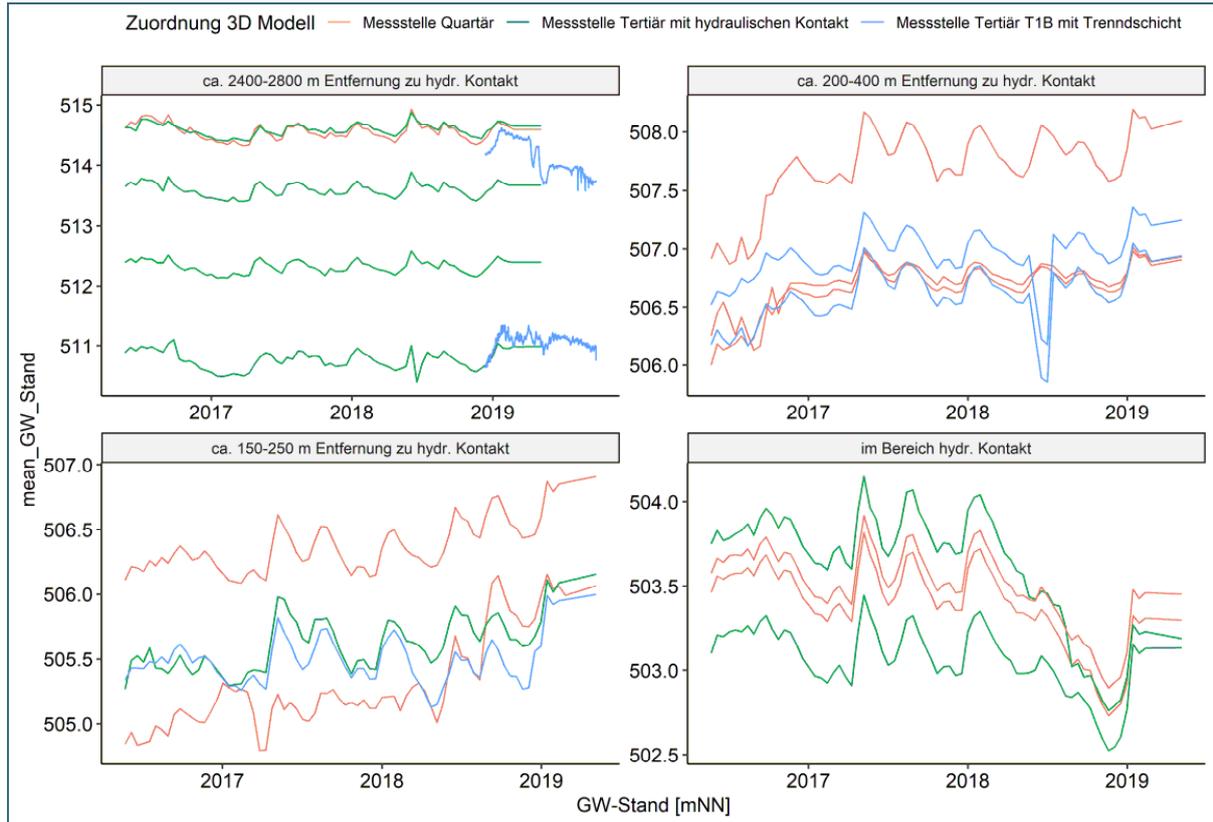


Abb. 63: Grundwasserganglinien des T1B-Horizonts (blau) in Abhängigkeit der Entfernung zur hydraulischen Kontaktzone und dazu als Vergleich Ganglinien von Messstellen, die in der näheren Umgebung im Quartär oder ohne Trennschicht zum Quartär verfiltert sind. Mit zunehmender Nähe zu den Kontaktzonen gleichen sich die Ganglinien immer weiter an.

## Profil 2: T1B- und T1C-Horizont

Während im ersten Profil ein gradueller Übergang dargestellt ist, bei dem die Trennschicht immer geringermächtig wird, ergibt sich bei Profil 2 eine andere Situation. Wie im Profilschnitt (Abb. 65) und bei Betrachtung der Verbreitung der Horizonte der OSM in diesem Gebiet (Abb. 64) ersichtlich, ist der T1C-Horizont im südlichen Bereich, bei Gruppe 1 und 2, durch eine mächtige Trennschicht vom quartären Grundwasserleiter getrennt. Der T1B-Horizont ist im Süden nur geringmächtig und vereinzelt ausgebildet, aber ebenfalls vom quartären Grundwasserleiter getrennt. Im mittleren Bereich sind beide Horizonte nicht ausgebildet, erst im nördlichen Bereich treten sie wieder in größerer Mächtigkeit auf und die hydraulische Trennschicht wird geringmächtiger. Im südlichen Bereich, bei den Gruppen 1 und 2, handelt es sich also um Bereiche, die weit vom nächsten Kontakt zum quartären Grundwasserleiter entfernt liegen oder gar keinen Kontakt haben.

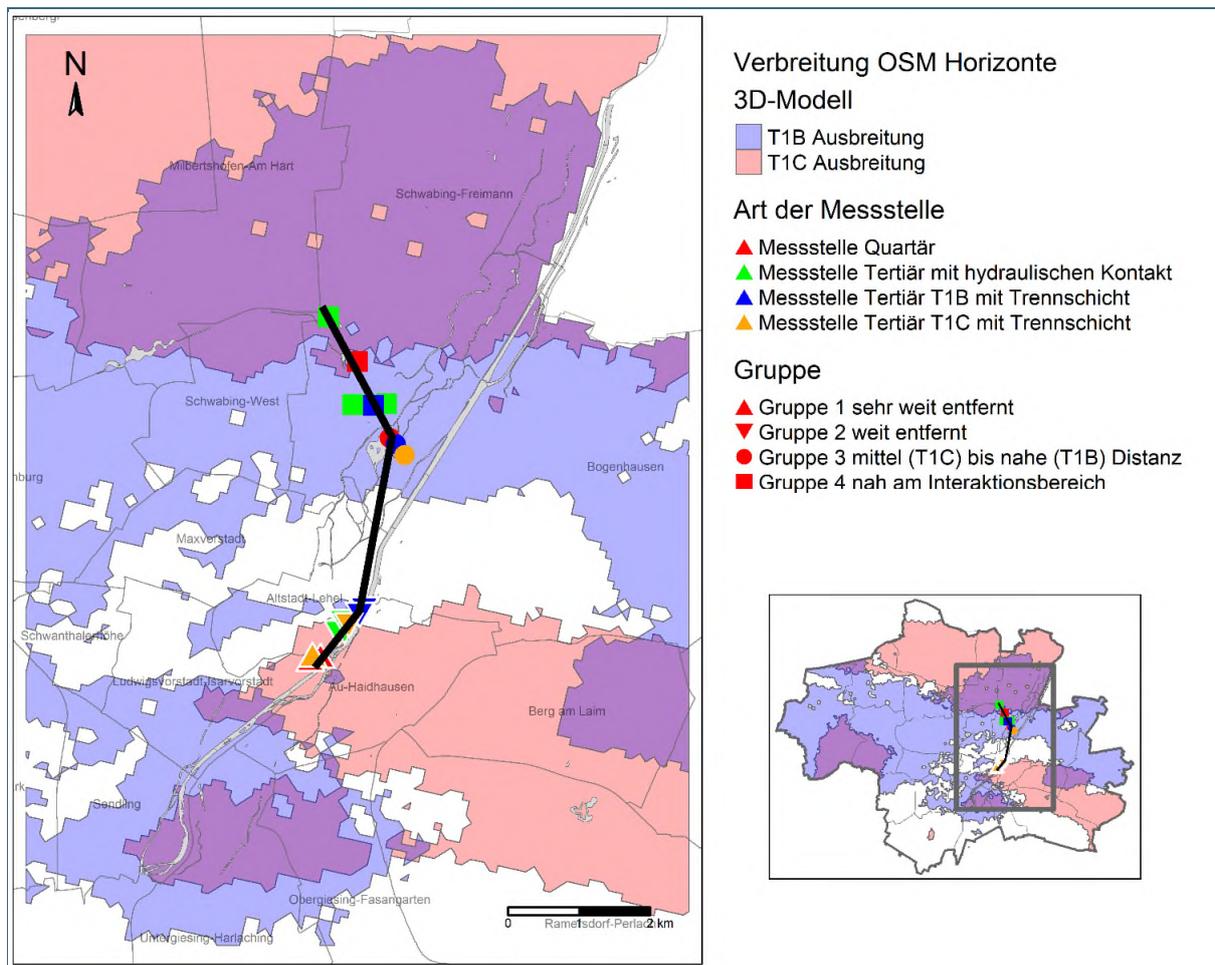


Abb. 64: Verbreitung der Horizonte T1B und T1C im Untersuchungsgebiet. Im südlichen Bereich des Profils ist der T1B-Horizont nur schwach ausgebildet.

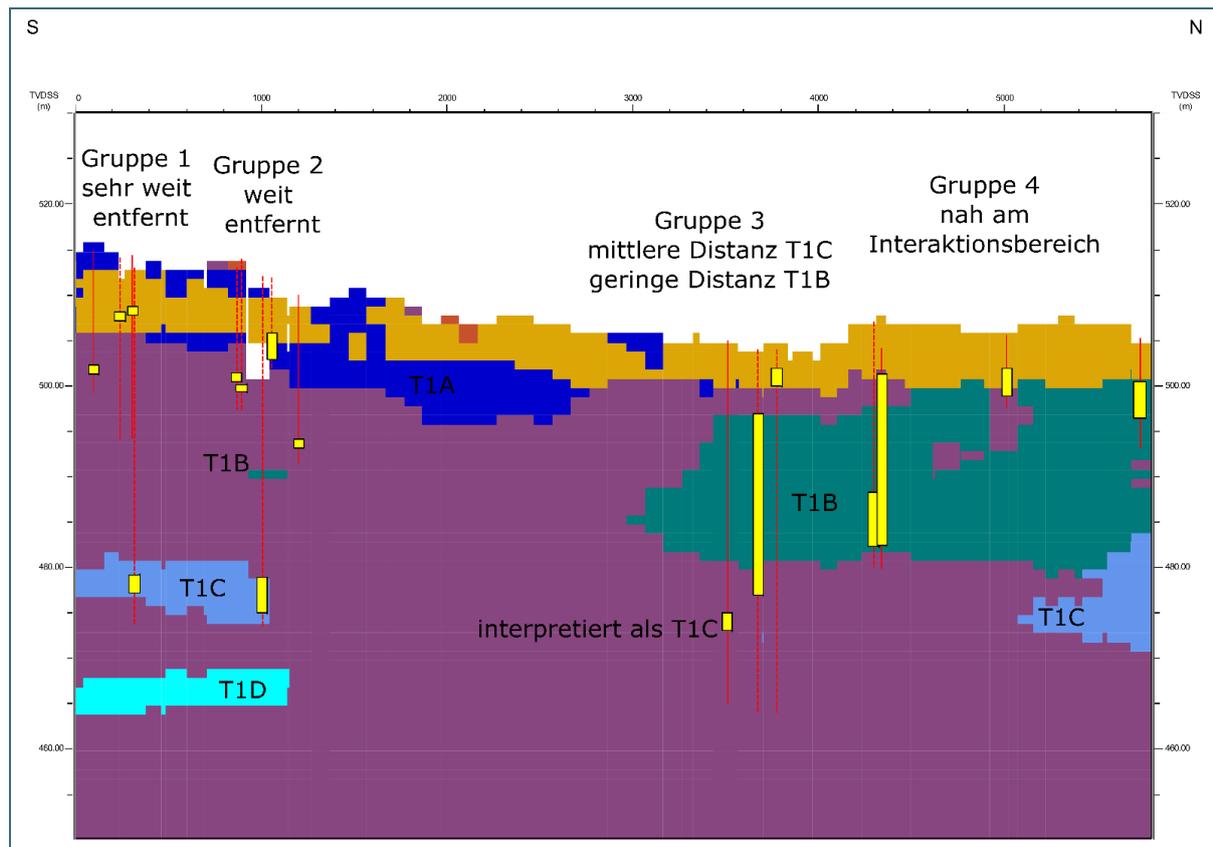


Abb. 65: Profilschnitt durch den Untersuchungsbereich zur Ermittlung der Auswirkungen der hydraulischen Kontaktzonen. Im Süden ist der T1B-Horizont nur schwach ausgebildet und durch eine Trennschicht vom quartären Grundwasserleiter getrennt. Der T1A-Horizont ist in hydraulischem Kontakt mit dem quartären Grundwasserleiter.

Dies ist auch in den Grundwasserganglinien sichtbar (Abb. 66). Die Druckspiegel der Messstellen, die im T1C-Horizont verfiltert sind, liegen im gesamten Betrachtungszeitraum über drei Jahre deutlich über der quartären Grundwasseroberfläche und zeigen auch einen Verlauf, der nicht von den quartären Grundwasserständen beeinflusst scheint. Weiter im Norden, bei Gruppe 3, zeigen die Ganglinien der Messstellen, die im T1B- und T1C-Horizont verfiltert sind, wieder sehr ähnliche Verläufe und auch das Niveau der Grundwasserstände ist wieder angeglichen. Die Situation der Potentialdifferenzen im südlichen Bereich im Untersuchungsgebiet des Profils 2, sowie eine Angleichung im nördlichen Bereich, die über den gesamten Untersuchungszeitraum von drei Jahren vorhanden ist, wurde auch in der Stichtagsmessung belegt. Ähnlich wie bei Profil 1, beschränken sich in der Nähe der hydraulischen Kontaktzonen starke kurzfristige Änderungen, wie z. B. Ende 2018 in Gruppe 3, nur auf einzelne Horizonte (hier T1B). Ansonsten ähneln sich die Verläufe der Ganglinien über lange Zeiträume.

Insgesamt scheinen damit nur weit (> 3 km) vom hydraulischen Kontakt entfernt liegende Bereiche der Horizonte des ersten Grundwasserstockwerks der OSM nicht vom Quartär beeinflusst zu sein. Verringert sich die Distanz zu den hydraulischen Kontaktzonen, zeigen die Grundwasserganglinien des quartären und tertiären Grundwasserleiters ähnliche Verläufe. Lediglich kurzfristige Änderungen können auf einen Horizont beschränkt sein. Im Bereich der hydraulischen Kontaktzonen gleichen sich die Ganglinien des quartären und die des ersten tertiären Grundwasserleiters an. Ebenfalls spiegeln sich kurzfristige Änderungen der Grundwasserspiegel in beiden Horizonten wider.

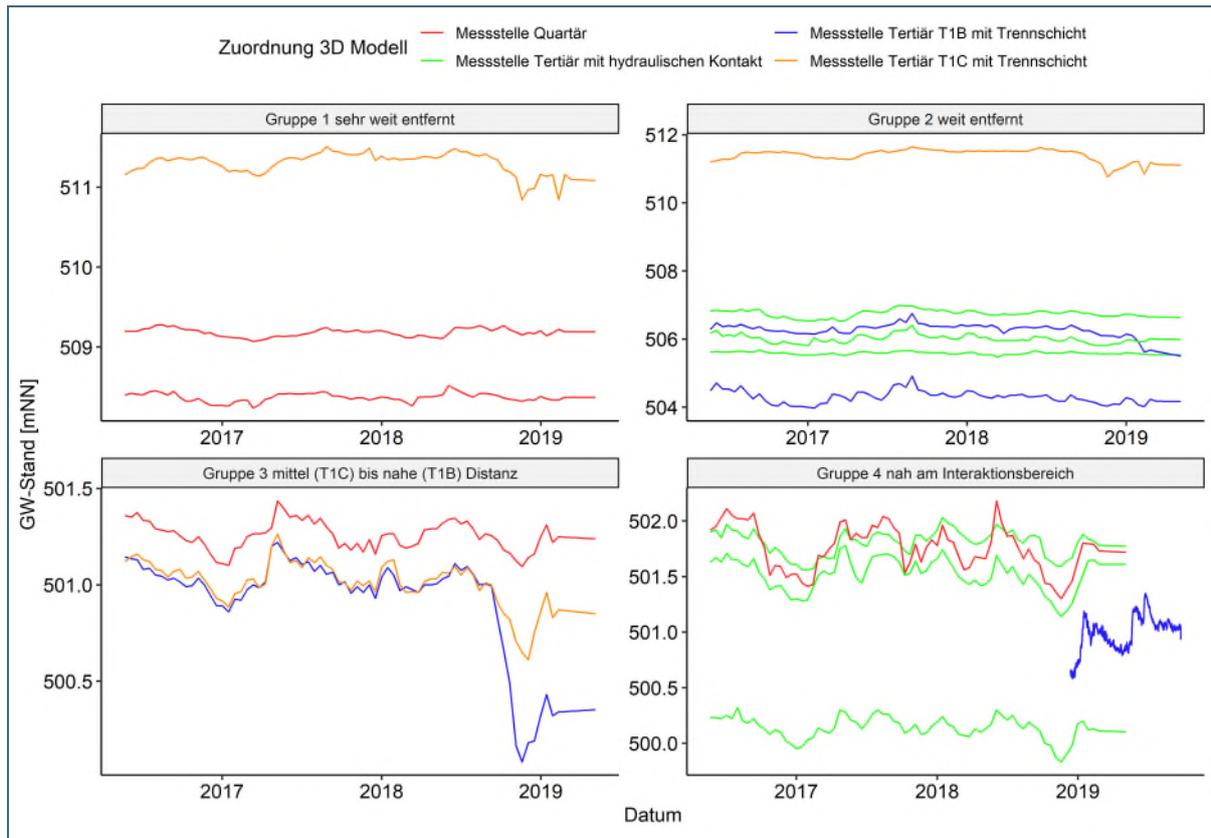


Abb. 66: Grundwasserganglinien des T1B- (blau) und T1C-Horizonts (orange) in Abhängigkeit der Entfernung zur hydraulischen Kontaktzone. Dazu als Vergleich Ganglinien von Messstellen, die in der näheren Umgebung im Quartär oder ohne Trennschicht zum Quartär verfiltert sind. Mit zunehmender Nähe zu den Kontaktzonen gleichen sich die Ganglinien generell mehr an.

### 4.3 Grundwassergleichen und Grundwasserflurabstände in den Grundwasserstockwerken der OSM (T1 bis T4)

Das folgende Kapitel beschreibt die Grundwassergleichen der oberflächennahen, tertiären Grundwasserleiter (OSM) T1 bis T4 zum Zeitpunkt der Stichtagsmessung im Frühjahr 2018 und basiert auf den Ergebnissen, die vorwiegend im Projekt GeoPot erzielt wurden. Auf Basis dieser Auswertungen wurden zudem die Grundwasserflurabstände berechnet.

#### 4.3.1 Überblick und bisheriger Kenntnisstand

Im Jahr 2018 wurde eine umfassende Stichtagsmessung (STM) in der Oberen Süßwassermolasse (OSM) geplant und im Anschluss durchgeführt. Ziel für die Planung war es hierbei, möglichst alle Messpunkte (Brunnen und Grundwassermessstellen), die innerhalb der OSM verfiltert sind aufzunehmen. Zusätzlich wurden Messungen an möglich korrespondierenden Oberflächengewässern und im Quartär verfilterten Messstellen (z. B. bei Mehrfachmessstellen) durchgeführt. Die Messungen wurden in einem großflächigen Gebiet, das die Münchner Schotterebene und das umliegende Tertiäre Hügelland umfasste, durchgeführt. In den tertiären, grundwasserführenden Horizonten liegen zumeist gespannte, lokal auch artesische Grundwasserverhältnisse vor. Auf diese wird genauer im Kapitel 4.4.2 zu den gespannten und artesischen Verhältnissen eingegangen.

Für die Auswertung war eine detaillierte Aufarbeitung der Schicht- und Ausbaudaten der einzelnen Messstellen und Brunnen, sowie die Zuordnung der Messergebnisse zu den einzelnen Horizonten mit

Hilfe des 3D-Modells nötig. Im Zuge der STM erfolgte eine detaillierte Datenerhebung, eine Ermittlung der größtmöglichen Anzahl von Messpunkten und somit eine qualitätsgeprüfte Datenbasis für zukünftige Arbeiten. Die Untergliederung und Zuteilung der flächenhaft gespannten Grundwasserverhältnisse zu einzelnen Grundwasserhorizonten, sowie die Zuteilung der Verfilterung in den Messstellen zu den Horizonten innerhalb der OSM stellte die größte Herausforderung dar.

Ziel war die Erstellung mehrerer stockwerksbasierter Grundwassergleichenpläne für den Großraum München, inkl. des Stadtgebietes in den grundwasserführenden Horizonten der OSM, wobei der Fokus auf dem obersten, tertiären Grundwasserleiter lag. Die Datenlage erlaubte ebenfalls eine Darstellung der etwas tiefer liegenden Grundwasserhorizonte des Tertiärs, wobei die Messpunktdichte mit der Tiefe abnahm und lokal sehr gering ist, so dass die Pläne dieser Horizonte als generalisierte Übersichtspläne angesehen werden sollten. Aufgrund der komplexen Ausgangssituation, sind bislang nur sehr wenige großflächige, detaillierte Darstellungen der tertiären Grundwasserleiter in der Planungsregion 14 (Großraum München) vorhanden. Lediglich Übersichtspläne des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU), Darstellungen mit geringer Datengrundlage und die Auswertungen des Flughafen Münchens erschließen größere, zusammenhängende Gebiete der OSM. Einen umfangreichen Überblick bietet die vom WWA-München in Auftrag gegebene Studie von Prösl und Anders (2011), auf die in der vorliegenden Studie öfter Bezug genommen wird.

Im Zuge der Datenrecherche wurden, wie bereits wie für das Quartär (Kapitel 3.3.1), vorhandene Grundwassergleichenpläne im Bereich des Arbeitsgebietes recherchiert. Auch hier wird aufgrund verschiedener Bezugs- und Recherchequellen, qualitativen Schwankungen und zum Teil fehlenden Informationen (Bezeichnung, Maßstab, Jahr, Quelle) nur eine Übersicht dargestellt (Tab. 18). Ergänzend gibt Tab. 19 eine Auswahl bekannter, großräumiger Pläne (Tertiär) wieder.

Tab. 18: Zusammenfassung recherchierter Grundwassergleichenpläne der OSM (Stand 2018)

Bezeichnung	Anzahl	Bemerkung
GWGL LfU Archiv	Circa 13 (digital) + 14 (Scans)	GWGL-Pläne zum Teil großflächig und zum Teil außerhalb des Arbeitsgebietes (Shapefiles und / oder Raster-Dateien)
GWGL recherchiert und georeferenziert	Circa 27	Circa 27 recherchierte Pläne unterschiedlichen Ausmaßes (lokal bis überregional) und schwankender Qualität (Shapefiles und / oder Raster-Dateien).
GWGL recherchiert und digitalisiert	Circa 30	Circa 30 recherchierte Pläne unterschiedlichen Ausmaßes (lokal bis überregional) und schwankender Qualität, die auf Basis analoger Quellen digitalisiert wurden (Shapefiles).
<b>Zusammenfassung</b>	Circa 84	Insg. liegen für die tertiären Grundwasserleiter circa 84 Pläne in unterschiedlicher Qualität, verschiedenen digitalem Format und Ausdehnung vor (Stand 2018).

Tab. 19: Auswahl vorhandener, großflächiger Grundwassergleichenpläne (Tertiär) (Stand 2018)

Kurzbezeichnung des Plans	Jahr	Verfasser
GWGL OSM Augsburg OGWL / UGWL	1989	Büro Schuler & Gödecke
GWGL Grundwassererkundung ZV Hallertauer Gruppe	1991 / 1992	Dr. Prösl
GWGL WV Stadt Friedberg (UG / OG)	1993	Schaar, J.
GWGL Tertiär: 2. Grundwasserstockwerk (ZV Alto Gruppe – Br. Arzbach)	1994	Büro Schuler & Gödecke
GWGL Höheres & Tieferes Tertiärgrundwasser Erding	1994	Waldinger / März
GWGL Tertiär 1./2. Grundwasserstockwerk (HGWL 1&2) (ZV Alto Gruppe)	1994 / 1995	Büro Schuler & Gödecke

Kurzbezeichnung des Plans	Jahr	Verfasser
GWGL Tertiärer (und quartärer) Grundwasserleiter Kiesabbau Moosburg	1995 / 1996	Dr. Blasy & Dr. Overland
GWGL Grundwassererkundung SW Dachau	2000	Büro Schuler & Gödecke
GWGL Flughafen München (1. bis 3. Grundwasserstockwerk Tertiär)	2001	Dr. Blasy & Dr. Overland
GWGL Tertiär Grundwasserstockwerk 2&3 Freising	2001	Dr. Prösl
GWGL OSM Planungsreg. 10	2002	LfU
GWGL Vorlandmolasse	2003	LfU
GWGL Tertiärstudie Augsburg (OG/UG)	2003	Büro HydroConsult
GWGL OSM Planungsreg. 13	2004	LfU
GWGL WV Moosrain	2004	Dr. Blasy & Dr. Overland
GWGL Tertiär 2. Grundwasserstockwerk Erding / Moosrain	2005	Dr. Blasy & Dr. Overland
GWGL Oberes tertiäres Grundwasserstockwerk (Lehmgrube Kellerer)	2006	Büro Schuler & Gödecke
GWGL Tertiäres Grundwasserstockwerk 1&2 Raum Taufkirchen	2006	Büro HydroConsult
GWGL Tertiärer Hauptgrundwasserleiter 2&3 WV Neufahrn	2006	Büro Boden und Wasser
GWGL Flughafen München (2 Pläne)	2006 & 2007	unbekannt
GWGL Grundwasser-Modell Friedberg (HG 1 & 2)	2007	Büro Boden & Wasser
GWGL Tertiärer Hauptgrundwasserleiter Erding Ost	2009	Büro für GW & Umweltfragen
GWGL T1 bis T4	2011	Anders & Prösl
GWGL Tertiärer Hauptgrundwasserleiter WV Freising Süd	2012	Büro Dr. Knorr
GWGL HGW 1 und 2 (Bay. Schwaben)	2016	Büro HydroConsult

Generell wurde durch die Analyse auf Basis des 3D-Modells (Kapitel 4.2) und Betrachtung der Literatur eine Unterteilung der Grundwasserhorizonte durchgeführt (Kapitel 4.2.3). Die Werte bzgl. der Höhenlage (m ü. NN) der grundwasserführenden Horizonte des 3D-Modells und der Literatur (Prösl und Anders, 2011; Egger, 1978; Hafen und Eckenberger, 1992) stimmen generell in etwa überein. Es handelt sich bei den festgelegten Ober- und Untergrenzen der grundwasserführenden Horizonte um Richtwerte aus dem Stadtgebiet München, welche in Bezug auf das gesamte Arbeitsgebiet lokal zum Teil deutlich abweichen können. Hier war eine zusätzliche Betrachtung weiterer Informationen essentiell. Zudem gestaltete sich eine exakte Zuordnung der Filterstrecken zu definierten Horizonten als schwierig, da sowohl lokale Heterogenitäten, als auch Überlappungen der Filterstrecken in Bezug auf die definierten Horizonte auftreten können.

Die erstellten Grundwassergleichenpläne für die einzelnen Grundwasserhorizonte der OSM beruhen fast ausschließlich auf der Datengrundlage der STM 2018. Eine fachliche Abstimmung der Datengrundlage mit den betreffenden Behörden, z. B. dem WWA München und dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU), ist erfolgt. Die Verteilung der verwendbaren Datenpunkte ist äußerst heterogen verteilt, da Bohrungen ins Tertiär, im Vergleich zu Bohrungen, die das Quartär erschließen, in wesentlich geringerer Zahl auftreten. Im Bereich der Münchner Schotterebene wird zumeist lediglich in Bereichen von Tiefbauwerken (z. B. S- und U-Bahn und dazugehörige Bauwerke) oder Wassergewinnungsanlagen (z. B. Brauereien und Notbrunnen) das Tertiär erschlossen. Liegt das Tertiär an der Oberfläche (z. B. im Tertiären Hügelland), nimmt die Bohrdichte zu, beschränkt sich jedoch meist auf oberflächennahe, bzw. lokale Grundwasserstockwerke. Die Datenübermittlung externen Institutionen, z. B. den Wasserversorgern, unterliegt strengeren Richtlinien, was eine Vervollständigung der Daten erschwerte. Alleine die Betrachtung der verbauten Filterstrecken (aus der Datenbank BIS-BY) erlaubt

ohne den zugehörigen Druckspiegel, zum Zeitpunkt der STM 2018, noch keine verwertbare Information. Es kann aufgrund von Interaktionsbereichen der Grundwasserhorizonte, isolierten oder hangenden Kleinsthorizonten (auf gleicher Höhenlage) oder Mischverfilterungen bzw. hydraulischen Kurzschlüssen innerhalb der GWM zu Abweichungen der Zuordnungen kommen.

Generell handelt es sich bei allen erarbeiteten Darstellungen der Grundwassergleichen in den Horizonten der OSM um Übersichtspläne. Der Anspruch von Detailansichten können die Isolinienpläne maßstabsbedingt und aufgrund der relativ zur Fläche geringen Datendichte nicht erfüllen. So können Detailstudien lokal stark von der hier durchgeführten Auswertung abweichen. Vor allem in Bereichen mit geringer Punktdichte, ist der Verlauf der Isolinien mit großer Unsicherheit behaftet, daher muss eine Interpretation immer unter Berücksichtigung der Verteilung der Stützpunkte erfolgen.

Die Zuordnung der Messergebnisse, die Einteilung der Grundwassermessstellen und Brunnen, sowie deren Zuordnung (Filterstrecken) zu den einzelnen grundwasserführenden Horizonten ist kleinräumig, und vor allem im Umland ebenfalls teilweise unsicher. Im Stadtgebiet konnte dagegen eine detaillierte Zuordnung über das 3D-Modell vorgenommen werden, welche versucht wurde nach Möglichkeit auf das Umland zu übertragen. Jedoch sind die geologischen Verhältnisse in der OSM extrem heterogen und zum Teil nur unzureichend über Bohrungen aufgeschlossen. Daher ist für die Darstellung flächendeckender Grundwassergleichenpläne oftmals, gerade bezogen auf das Umland, ein gewisser freier Interpretationsspielraum erforderlich. Außerdem wird darauf hingewiesen, dass ein flächendeckendes „Durchhalten“ der einzelnen Horizonte, wiederum besonders bezogen auf das außerstädtische Umland, nicht angenommen werden sollte.

Die Datengrundlage der Stichtagsmessung im April 2018, bei der hauptsächlich die Grundwasserstände der Oberen Süßwassermolasse erfasst wurden, lässt, unter Zuhilfenahme der Filterstrecken und des 3D-Modells, die Erstellung nachfolgender Grundwassergleichenpläne in Kapitel 4.3.3 zu.

Es wurden bei der Stichtagsmessung 2018 ebenfalls Messungen im quartären Hauptgrundwasserleiter durchgeführt, z. B. circa 325 Messpunkte im Stadtgebiet, jedoch besitzt der Grundwassergleichenplan des quartären Hauptgrundwasserleiters aus dem Jahr 2015–2016 (Stichtagsmessung 2014) eine wesentlich detailliertere Datengrundlage. Daher wird auf die Grundwassersituation im Quartär detailliert in Kapitel 3 eingegangen. Die Messungen wurden nur bei Bedarf zur Interpretation hydraulischer Kontaktzonen verwendet, beispielsweise im Bereich der nördlichen Schotterebene, und werden daher nachfolgend nur diesbezüglich erwähnt.

## **4.3.2 Datengrundlage und Methodik (Stichtagsmessung 2018)**

### **4.3.2.1 Datenerhebung: Stichtagsmessung 2018 (OSM)**

Im April 2018 wurde, nach 2014, eine zweite umfangreiche Stichtagsmessung im Bereich der Münchner Schotterebene, sowie dem angrenzenden Tertiären Hügelland durchgeführt. Das Gebiet beinhaltete die Landkreise Freising, Erding, Dachau, Fürstenfeldbruck, Ebersberg, Landsberg am Lech, Starnberg, München sowie das Stadtgebiet München. Zusätzlich wurden Messungen auch außerhalb des Arbeitsgebietes vorgenommen um Grenzbereiche besser interpretieren zu können.

Die Messkampagne diente dazu, einen umfangreichen Datensatz mit aktuellen Messdaten zu den Grundwasserständen und daneben auch zu den Grundwassertemperaturen und den spezifischen elektrischen Leitfähigkeiten der Oberen Süßwassermolasse (OSM) zu erheben. Es sollten nach Möglichkeit eine hohe Anzahl an belastbaren Messungen an Brunnenanlagen und Grundwassermessstellen, die in der OSM verfiltert sind, sowie an Oberflächengewässer erhoben werden. Quellen wurden

aus logistischen Gründen, sowie aufgrund bereits vorhandenen Datensätzen im BIS-BY, bei der Messkampagne nicht berücksichtigt.

Im Vergleich zur Stichtagsmessung im quartären Hauptgrundwasserleiter (2014) konnte keine vergleichbar hohe Anzahl an Messungen (circa 6.000 Messpunkte) erreicht werden. Der Hauptgrund bestand darin, dass weitaus weniger Bohrungen in größere Tiefen abgeteuft und als Messstellen oder Brunnen ausgebaut sind. Die Grundwassernutzungen (Brauchwasser-Brunnenanlagen, thermische Grundwassernutzungen) und dazugehörige Messstellen im Bereich der Münchner Schotterebene beschränken sich vor allem auf das quartäre Hauptgrundwasserstockwerk, oft aufgrund wasserrechtlicher Beschränkungen. Lediglich große Trinkwasserbrunnenanlagen sind, aufgrund der geologischen Schutzfunktion, in der OSM verfiltert. Eine entscheidende Rolle spielen zudem die zum Teil erheblichen Mächtigkeiten der quartären Schotterauflage, vor allem im Süden der Münchner Schotterebene. Hier sind selbst Trinkwasserbrunnen zum Teil im Quartär verfiltert. Im Bereich des Tertiären Hügellandes gibt es eine höhere Anzahl von Nutzungen in der OSM, da hier die quartäre Auflage fehlt. Analog zu den Nutzungen verteilen sich auch die Grundwassermessstellen, wobei es im Stadtgebiet München zu einer signifikanten Ballung, z. B. durch Bau- und Wasserhaltungsmaßnahmen der U- und S-Bahnen, kommt.

Aufgrund der geringeren Anzahl an verfügbaren Messpunkten, gestaltete sich die Vorbereitung und Planungsphase intensiver als bei der Stichtagsmessung 2014. Ein Großteil der benötigten Daten musste extern über die jeweiligen Betreiber angefordert werden, da kein öffentlicher Zugang zu den Messstellen und Brunnen zur Verfügung stand. Dabei handelte es sich um mehrere hundert verschiedene Betreiber und mehrere tausend Messobjekte. Die Eigentümer sind vorwiegend Wasserversorger, Betreiber großer Brunnenanlagen (z. B. Brauereien), sowie öffentliche Ämter (z. B. Stadt München). Zusätzliche Messstellen und Brunnen, die direkt zugänglich sind und nach Anfrage gemessen werden durften, wurden aufgesucht. Lediglich Messstellen, die im Vorfeld keinem Betreiber zugeordnet werden konnten, wurden ohne Anmeldung angefahren und vor Ort beurteilt.

Generell wurden, analog zur Stichtagsmessung 2014, hydrogeologisch und geothermisch relevante Daten, z. B. Grundwasserstand, Grundwassertemperatur oder die spez. elektrische Leitfähigkeit im Gelände erfasst oder von den Betreibern angefordert und dokumentiert. Zusätzlich wurde jeder Ausbau der Messstellen und Brunnen mit bestehenden Unterlagen im BIS-BY überprüft, ergänzt und ggf. korrigiert, um später die Daten korrekt auswerten zu können. Bereits im Zuge der Stichtagsmessung 2014 stellte sich die Qualitätsprüfung, vor allem in Bezug auf Messpunkt- und Geländehöhe, als essentiell heraus um eine hohe Qualität der Konstruktion der Isolinienpläne zu gewährleisten. Der Zeitraum für die Durchführung der Geländearbeit wurde auf den April 2018 festgelegt. Die Auswahl des Messzeitraums begründete sich primär auf die Vergleichbarkeit der Daten mit der STM 2014 des quartären Hauptgrundwasserleiters (siehe Kapitel 3.3).

Durch eine intensive Recherche, Datenaufbereitung und Digitalisierung, konnte die Anzahl der potentiellen Messpunkte in der OSM stark erhöht werden. Zum Zeitpunkt der Stichtagsmessung wurde ein Großteil aller verfügbaren Grundwassermessstellen und Brunnenanlagen, die in der OSM verfiltert sind und zu denen Informationen vorlagen, im BIS-BY angelegt. Im Zuge der Nachbereitung wurden erneut Daten recherchiert, angefordert und als Datengrundlage im BIS-BY ergänzt. Es muss zudem auf die Unterteilung der Grundwassermessstellen in die einzelnen Ausbauten hingewiesen werden. Nur durch eine detaillierte Betrachtung konnte abgeschätzt werden, bei welcher Messstelle wie viele Ausbauten hydraulisch aktiv, inaktiv oder nicht mehr vorhanden sind, und in welchem Grundwasserstockwerk die Messstellen oder Brunnen verfiltert sind. Dies sind essentielle Information für eine spätere Auswertung und Zuordnung der Messergebnisse zu den einzelnen grundwasserführenden Horizonten der OSM. Jedoch sind diese Informationen nicht immer zweifelfrei dokumentiert oder überhaupt vorhanden. Es konnten bis zum Beginn der Stichtagsmessung im April 2018, die theoretische

Anzahl möglicher Messpunkte von 584 Brunnenanlagen und 2543 einzelne Ausbauten an Grundwassermessstellen auf 705 Brunnenanlagen und 2.785 Ausbauten an Grundwassermessstellen erhöht werden. Um bei der anschließenden Auswertung auch die Randbereiche für den Grundwassergleichenplan gut abzudecken wurden im Bereich der Grenze der Arbeitsregion Objekte bis zu 5 km Entfernung zur Grenze mit einbezogen. Im nordwestlichen Bereich wurden außerdem die dort ansässigen Wasserversorger in die Messkampagne mit einbezogen. Ziel war hierbei, einen nahtlosen Übergang an Daten zu den existierenden Grundwassergleichenplänen in Grenzregionen zu gewährleisten.

Generell liegen die 87 im BIS-BY verzeichneten Quellen der OSM im Arbeitsgebiet vornehmlich im Bereich des Tertiären Hügellandes. In diesem Bereich streicht die OSM aus und das Gelände wurde von vielen kleineren und größeren Fließgewässern erodiert und eingeschnitten. Die eingemessene Höhe der Quellen entspricht zumeist der Geländehöhe des DGM und liegt oft sehr nahe an den absolut höchsten Punkten der Umgebung. Auf das Einbinden der Quellen und der erfassten Oberflächengewässer in den Grundwassergleichenplan (T1) wird unter 4.3.3.1 eingegangen.

Die Stichtagsmessung konnte im April 2018 wie geplant durchgeführt werden. Die Witterungsbedingungen waren stabil, so dass kurzfristige externe Wettereinflüsse auf die Messergebnisse ausgeschlossen werden konnten. Auffällig bei der Durchführung war die große Anzahl nicht vorhandener bzw. nicht auffindbarer Messstellen (circa 50 %). Bis auf wenige Ausnahmen konnten externe Messungen an Brunnenanlagen oder auf privaten Gelände durchgeführt werden. Zusätzlich wurden im Gelände circa 100 neue und noch unbekannte Objekte aufgefunden und dokumentiert. Alle intern geplanten 1.780 Messpunkte wurden angefahren und geprüft. Zudem wurden im Zuge der Stichtagsmessung 198 Oberflächengewässermesspunkte, meist an Fließgewässern, aufgenommen und eingemessen. Außerhalb des eigentlichen Arbeitsgebietes wurden insg. 51 Objekte gemessen, die mit in die Auswertung aufgenommen wurden. Eine Übersicht aller gemessenen Messstellen, Brunnen und Oberflächengewässer gibt Abb. 67.

Im Anschluss an die durchgeführten Geländearbeiten wurden alle Messergebnisse digitalisiert, homogenisiert und auf Fehler und Plausibilität überprüft. Im Zuge der Stichtagsmessung wurden insgesamt circa 1.880 Objekte intern aufgesucht und bearbeitet, davon circa 850 Objekte im Stadtgebiet. Von circa 1.030 Objekten, die außerhalb der Stadt angefahren wurden, konnten an circa 500 Objekten Messungen durchgeführt werden.

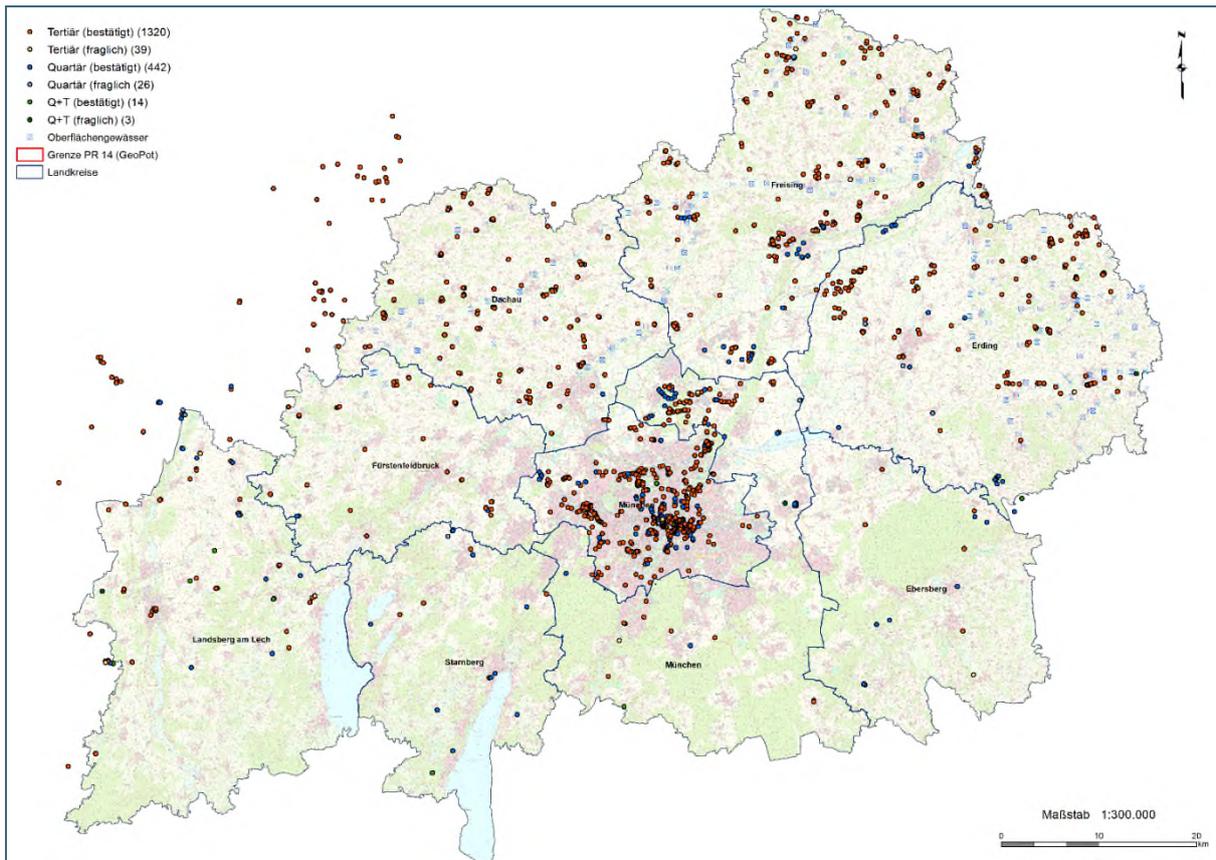


Abb. 67: Bearbeitete Messpunkte der Stichtagsmessung 2018 (Stand Nov. 2018)

#### 4.3.2.2 Auswertung der Messungen und Filterstreckenzuordnung

Nach den intensiven Planungen, Vorarbeiten, der Geländearbeit, sowie einer detaillierten Aufarbeitung und Ergänzung der einzelnen Messpunkte, stand nach der STM eine Gesamtübersicht mit mehr als 2.000 verwertbaren Punktdaten (GWM, Br. und OFG) zur Verfügung. Hierbei muss beachtet werden, dass es sich nicht ausschließlich um Messpunkte handelt, die im Tertiär, sondern auch zum Teil im Quartär verfiltert sind. Bei Beendigung der Messkampagne lagen lediglich für 37 Ausbauten keine Informationen vor. Im Vergleich dazu konnten jedoch für alle anderen Messstellen (2.396 Filterstrecken verteilt auf 1.791 Objekte) Daten über die verbauten Filterstrecken ausgewertet werden. Alle bearbeiteten Messergebnisse der Stichtagsmessung, sowie die 198 aufgenommenen Messungen an den Oberflächengewässern wurden zu einem qualitätskontrollierten Datensatz zusammengefasst.

Die Hauptproblematik der Auswertung der Stichtagsmessung war die korrekte Zuordnung der Messergebnisse zu den einzelnen grundwasserführenden Horizonten. In sich zusammenhängende Grundwasserstockwerke können sich in die Tiefe und Fläche fortsetzen, erscheinen aber lokal zum Teil als getrennte Stockwerke (vgl. z. B. T1 im Stadtgebiet). Eine alleinige Unterscheidung der Grundwasserstockwerke über Grundwasserdruckspiegel und eine Einteilung in zwei oder mehrere Grundwasserpotenzialgruppen, ohne eine Betrachtung der dreidimensionalen Ausbreitung der Grundwasserhorizonte, bietet lediglich eine Annäherung an die realen Verhältnisse. Daher wurde eine Stockwerkseinteilung der grundwasserführenden Horizonte über ein lithologisches 3D-Modell (Kapitel 4.2) realisiert, um großflächig, die durch Bohrungen erschlossenen Grundwasserhorizonte in ein zusammenhängendes Bild zu setzen. Danach wurden die Informationen bzgl. des Ausbaus und des Grundwasserdruckspiegels in das 3D-Modell integriert. Somit war es möglich, jedem Ausbau (Filterstrecke) und der zugehörigen Messungen des Grundwasserstands, ein definiertes Stockwerk zuzuordnen.

Die insgesamt 1.833 Einzelfilterstrecken (nur OSM) wurden somit den verschiedenen grundwasserführenden Horizonten zugeordnet. Dabei wurde primär die definierten Grundwasserhorizonte aus dem 3D-Modell (Kapitel 4.2.3), als auch, zur Validierung, Angaben aus der Literatur (absolute Höhenwerte) herangezogen. Bei mehrfach verfilterten Objekten (z. B. Brunnen) wurde anhand der Einzelzuordnung entschieden, mit welchem Horizont eine Hauptkorrespondenz besteht. Zumeist war diese Einteilung, anhand des Druckspiegels, relativ gut möglich.

#### 4.3.2.3 Verteilung der Messpunkte

Ein Großteil der Messungen beschränkt sich auf den oberen tertiären Grundwasserleiter (circa 500 m ü. NN – 450 m ü. NN). Mischverfilterte Brunnen reichen auch in größere Tiefen. Diese wurden in die Pläne für das mittlere, untere und tiefere Stockwerk (T2 – T4) eingearbeitet. Die Flächenverteilung der Bohrungen zeigte sich sehr heterogen und orientierte sich vor allem auf Bereiche mit hoher Aufschlussdichte in größeren Tiefen. Generell sind die Randbereiche der Stadt, der gesamte östliche Stadtbereich, sowie Areale mit wenig Bebauung (z. B. Parkanlagen usw.) durch eine sehr geringe Aufschlussdichte gekennzeichnet.

Bei ausreichender Datendichte für einen Grundwasserhorizont wurde mit den zugeordneten Messungen des Grundwasserstands eine Interpolation der Grundwassergleichen durchgeführt und auf Plausibilität geprüft. Im Anschluss wurden mischverfilterte Objekte (GWM und Brunnen), welche die jeweiligen Horizonte erschließen integriert und auf Plausibilität bezüglich der flächenhaften Grundwassergleichen geprüft. So konnte ein Teil der mischverfilterten Objekte für das oberflächennahe Tertiär (T1) eingearbeitet werden, wobei ein Großteil dieser zumeist tiefere Aquifere (T2 – T4) erschließt.

Neben den vier Horizonten des oberen tertiären Grundwasserleiters (T1A – T1D) im Stadtgebiet konnten über das 3D-Modell Bereiche identifiziert werden, in denen die einzelnen Horizonte interagieren und gemeinsame Horizonte ausbilden (Kapitel 4.2.3). Hier ist keine Trennung der Grundwasserhorizonte gegeben, da die großflächigen Sandhorizonte in direktem Kontakt stehen. Dies trifft auf den NW Bereich (T1CD) und den NE Bereich im Stadtgebiet (T1BC) zu. Für diese Interaktionsbereiche wurden zwei separate Grundwassergleichenpläne erstellt. Die Messpunktdichte und die regionale Verbreitung nimmt generell mit zunehmender Tiefe, also von T1A bis T1D, ab. Einen Überblick über die jeweiligen verwendeten Stützpunkte der einzelnen Isolinienpläne geben die dazugehörigen Shapefiles der Messpunkte.

Bei der Konstruktion der Grundwassergleichen der verschiedenen Grundwasserhorizonte, wurde deutlich, dass in manchen Bereichen markante anthropogene Absenkungen der Grundwasserdruckspiegel zu beobachten waren. Diese schienen hauptsächlich aus hohen Entnahmemengen durch Brunnenanlagen (z. B. Brauereien) zu resultieren. Diese zum Teil stark abgesenkten Grundwasserdruckspiegel konnten jedoch nicht durchgehend einheitlich verarbeitet werden, da die betreffenden Daten zum Teil nicht aus einem einheitlichen Zeitraum stammen. Zudem hätte eine punktuelle Einarbeitung solcher, zum Teil zeitlich begrenzter, extremen Werte das Gesamtbild der Übersichtspläne (vor allem bezogen auf T2 bis T4) merklich verzerrt. Daher wurden generell nur Absenkung mit geringen Auswirkungen, oder konstanten Verhältnissen (z. B. bei Wasserversorgern) eingearbeitet.

#### 4.3.2.4 Darstellung und Interpolation der Grundwassergleichen

##### **Darstellung der Grundwassergleichen im Stadtgebiet**

Für die tieferen Horizonte (mittlere, untere und tiefere Grundwasservorkommen – T2, T3 und T4) konnte aufgrund der unzureichenden Datendichte keine detaillierten Pläne im Stadtgebiet erstellt werden. Diese tieferen Horizonte wurden jedoch im Rahmen der großräumigen Übersichtspläne mitberücksichtigt. Die drei tieferen Horizonte (unter 450 m ü. NN) sind zum Großteil nur durch Tiefbrunnen

erschlossen und zuweilen in mehreren grundwasserführenden Horizonten mischverfiltert. Daher war es schwierig, Grundwasserdruckspiegel zu einzelnen Horizonten zuzuordnen. Diese bilden einen „Mischzustand“ bzw. mittleren Druckwasserspiegelzustand ab. Die meisten Grundwasserdruckspiegel lassen sich jedoch zumindest in Annäherung einzelnen Tiefenhorizonten zuordnen.

Als Ergebnisse haben sich für das Stadtgebiet München sechs lokale Grundwassergleichenpläne, nach der aus dem 3D-Modell gewonnenen Verbreitung der Grundwasserhorizonte T1A bis T1D (inkl. zwei Mischhorizonte) ergeben. Die tieferen Grundwasservorkommen des Tertiärs (T2 bis T4) wurden überregional, also zusammen mit dem Umland, dargestellt, soweit es die Datendichte zuließ.

### **Darstellung der Grundwassergleichen im Umland**

Im Umland erfolgte die Unterteilung der Darstellung der Grundwassergleichen in die vier Grundwasserhorizonte (oberer, mittlerer, unterer und tieferer GWL) zu den jeweiligen Filterstrecken auf Grundlage des 3D-Modells für das Stadtgebiet. Zudem erfolgte ein Vergleich der festgelegten Tiefenlagen der Horizonte mit der Fachliteratur, welche in etwa eine Übereinstimmung mit den gemessenen Werten des Stadtgebietes ergab. Im Umland lässt sich im 3D-Modell bis dato keine detaillierte Unterteilung durchführen, da sowohl die Datendichte zu gering, als auch die Ablagerungsgegebenheiten zu heterogen sind. Es deutete sich aber an, dass zumindest für das nördliche Umland und das Tertiäre Hügelland mit ähnlichen Tiefenstufen wie für das Stadtgebiet gerechnet werden kann. Es muss generell eine relativ große Abweichung der absoluten Höhen in m über NN berücksichtigt werden. Auch im Umland wurden die einfach verfilterten Objekte zugeordnet, auf Plausibilität geprüft und nach der Interpolation der Grundwassergleichen erneut überprüft. Filterstrecken und dazugehörige Bohrungen, die augenscheinlich in lokalen, schwebenden Stockwerken verfiltert sind, wurden aussortiert. Im Anschluss wurden analog zum Stadtgebiet die mischverfilterten Brunnen und deren Filterstrecken mit den definierten Horizonten (T1 – T4) abgeglichen und bei Übereinstimmung von Filterstrecke und Druckspiegel zu dem Datensatz der jeweiligen Horizonte hinzugefügt. Meist ließen sich einzelne mischverfilterte Objekte eindeutig den definierten Horizonten zuordnen. In wenigen Fällen erfolgte keine Zuordnung, da die zugehörigen Druckspiegel nicht plausibel waren.

Die Datendichte der tieferen Grundwasserleiter ist lokal sehr unterschiedlich und nicht mit dem oberflächennahen, tertiären Grundwasserleiter zu vergleichen. Jedoch war zumindest bereichsweise eine sinnvolle Abdeckung gegeben, so dass für jeden der drei tieferen tertiären Grundwasserleiter (T2 bis T4) ein Übersichtsplan der Grundwassergleichen erstellt werden konnte. Für den oberflächennahen, tertiären Grundwasserleiter (T1) konnte eine großflächige Darstellung der Grundwassergleichen, sowie die bereits beschriebenen Detaildarstellungen fürs Stadtgebiet erstellt werden. Zusätzlich wurden Objekte, deren Grundwasserdruckspiegel kleineren, lokalen Grundwasserverhältnissen zugeordnet wurde, separat ausgewiesen.

Es konnte zusätzlich eine große Anzahl der ermittelten Oberflächengewässermesspunkte (157/198) in die hydraulische Interpretation der oberen tertiären Grundwasserleiter einbezogen werden. Hier besteht eine Interaktion bzw. Vorflutfunktion der größeren Fließgewässer. Alle übrigen Messungen erschließen wohl oberflächlich abfließende oder stehende Gewässer und interagieren höchstens in geringem Maße mit dem oberflächennahen tertiären Grundwasserleiter. Auf die im Arbeitsgebiet liegenden Quellaustritte wird unter Kapitel 4.3.3.1 eingegangen.

### **Analyse, Interpolation und Attributierung**

Als Vorbereitung zur Interpolation folgte eine erste Prüfung der Datenqualität durch eine einfache Interpolation (mittels „Natural Neighbor“ Verfahren) um markante „Ausreißer“ von Messdaten der Grundwasserhöhen in der Fläche zu detektieren, zu überprüfen und gegebenenfalls zu korrigieren. Als nicht

plausible, markante Abweichungen sind hier Werte definiert, die sich nicht ins Gesamtbild der flächenverteilten Grundwassergleichen einfügen und nicht plausible Darstellungen erzeugen.

Auf Basis dieses qualitätsgeprüften Datensatzes erfolgte die Durchführung einer geostatistischen Analyse mit Struktur- und Fehleranalyse, erneuter Datenprüfung und finaler Interpolation, gemäß dem Vorgehen wie in Kapitel 3.3.2.2 bereits beschrieben. Aus der geostatistischen Analyse und Kriging-Interpolation resultieren Darstellungen der Grundwassergleichen, die jeweils nochmals durch einen Abgleich mit der Fachliteratur und regionalen Fachwissen durch Experten auf Plausibilität geprüft und ggf. manuell korrigiert wurden und final im Rasterfile-Format vorliegen.

### 4.3.3 Beschreibung und Interpretation der Grundwassergleichen und Flurabstände der oberflächennahen Oberen Süßwassermolasse

#### 4.3.3.1 Grundwassergleichen des oberen tertiären Grundwasserleiters T1

Die vertikale Verbreitung des grundwasserführenden, oberflächennahen „Oberen tertiären Grundwasserleiters“ (T1) liegt, nach Analyse durch das 3D-Modell im Stadtgebiet, sowie der Interpretation der Bohrungen im Umland, im Hauptbereich von circa 500 m ü. NN – 450 m ü. NN mit lokal zum Teil deutliche Abweichungen. Der Horizont ist großflächig und, soweit über das 3D-Modell erwiesen, bereichsweise durchhaltend ausgeprägt. Jedoch gibt es ebenfalls Bereiche, in denen der T1-Aquifer fehlen kann, bzw. erodiert wurde (nördliche Münchner Schotterebene). Er kann lokal mit tieferliegenden Horizonten (z. B. T2-Aquifer) oder begrenzt ausgebildeten, schwebenden Grundwasserstockwerken (z. B. im Tertiären Hügelland) in Verbindung stehen oder interagieren. Ebenfalls bestehen zum Teil großflächige Interaktionsbereiche mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter, z. B. im Stadtgebiet München.

Im Stadtgebiet München konnte der T1-Aquifer mit Hilfe des 3D-Modells in vier Unterhorizonte gegliedert werden (siehe Kapitel 4.2.3). Die definierten Tiefenbereiche der einzelnen Unterhorizonte des oberen tertiären Aquifers (T1) liegen laut 3D-Modell (im Stadtgebiet), im Mittel auf folgendem Niveau (Tab. 20):

Tab. 20: Übersicht über die definierten Tiefenbereiche der Unterhorizonte des T1-Aquifers im Stadtgebiet München

Bezeichnung des Unterhorizonts	Höhenlage (m ü. NN)
T1A	> 499
T1B	498 – 484
T1C	484 – 470
T1D	470 – 458

Lokale Schichtwasservorkommen, oberhalb von circa 500 m ü. NN, sind vor allem im Tertiären Hügelland ausgebildet und hängen zumeist wohl nicht direkt mit dem oberen tertiären Grundwasserleiter (T1) zusammen. Diese lokalen Kleinst-Aquifere sind zumeist durch oberflächennahe Bohrungen, z. B. im Bereich von Kies- oder Sandgruben, erschlossen und wurden separat bearbeitet. Die gesamte Tiefenstufe des T1-Aquifers (3D-Modell) deckt sich in etwa mit den Angaben zum T1-Horizont aus Prösl und Anders (2011), wobei lokale Abweichungen auftreten können.

#### Stadtgebiet München

Die erschlossenen Unterhorizonte des T1-Aquifers (T1A – T1D) hängen laut 3D-Modell im Stadtgebiet großräumig zusammen. Es lassen sich eine Vielzahl von Verbindungen bzw. Übergangsbereichen zwischen den einzelnen Horizonten, wie auch zum quartären Hauptgrundwasserleiter feststellen. Diese

sind im Kapitel 4.2.3 und 4.2.4 (3D-Modell) beschrieben. Zudem helfen Potentialdifferenzen-Darstellungen, neben den Erkenntnissen aus dem 3D-Modell, Bereiche zu identifizieren bzw. verifizieren, in denen Interaktionen zwischen den einzelnen Horizonten möglich sind (Kapitel 4.4.3 und 4.4.4).

Es lässt sich für jeden einzelnen Grundwasserhorizont ein Darstellung der Grundwasser-Druckspiegel-Isohypsen erstellen, da die definierten, verfilterten Tiefenbereiche jeweils charakteristische Druckspiegel aufweisen (mit Abweichungen in den Kontaktbereichen) (Abb. 68 und Abb. 69, Tab. 21).

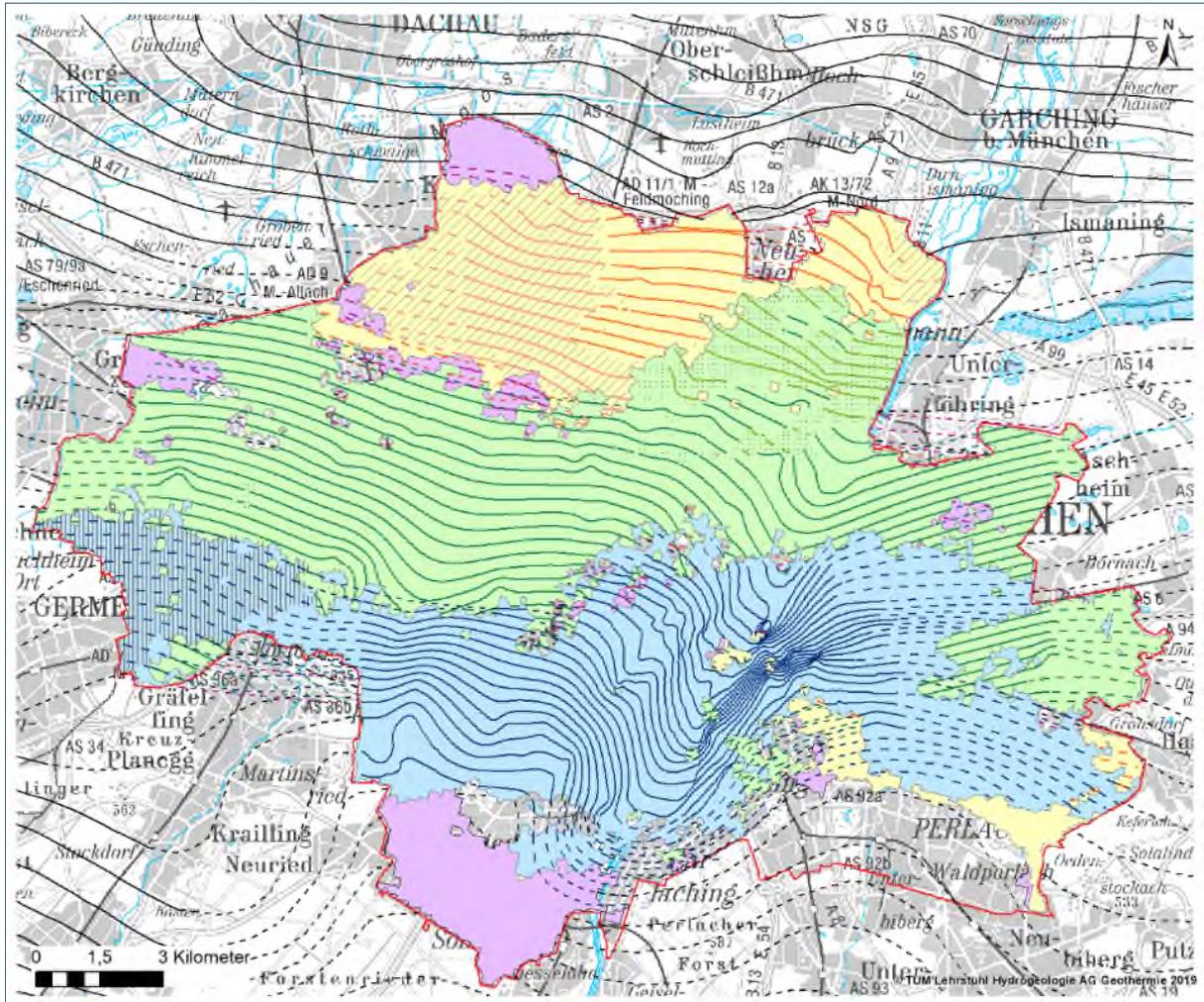


Abb. 68: Übersicht über den oberflächennahen tertiären Grundwasserleiter (T1) im Stadtgebiet. Es konnte durch das 3D-Modell eine Unterteilung in 4 Unterhorizonte (T1A-T1D) vorgenommen werden (Ausbreitung: T1A hellblau, T1B hellgrün, T1C gelb, T1D lila). Gesicherte Bereiche sind durchgängig, unsichere und interpretierte Bereiche gestrichelt dargestellt. Auf eine Beschriftung der Isolinien wurde aufgrund der Übersichtlichkeit in dieser Darstellung verzichtet.

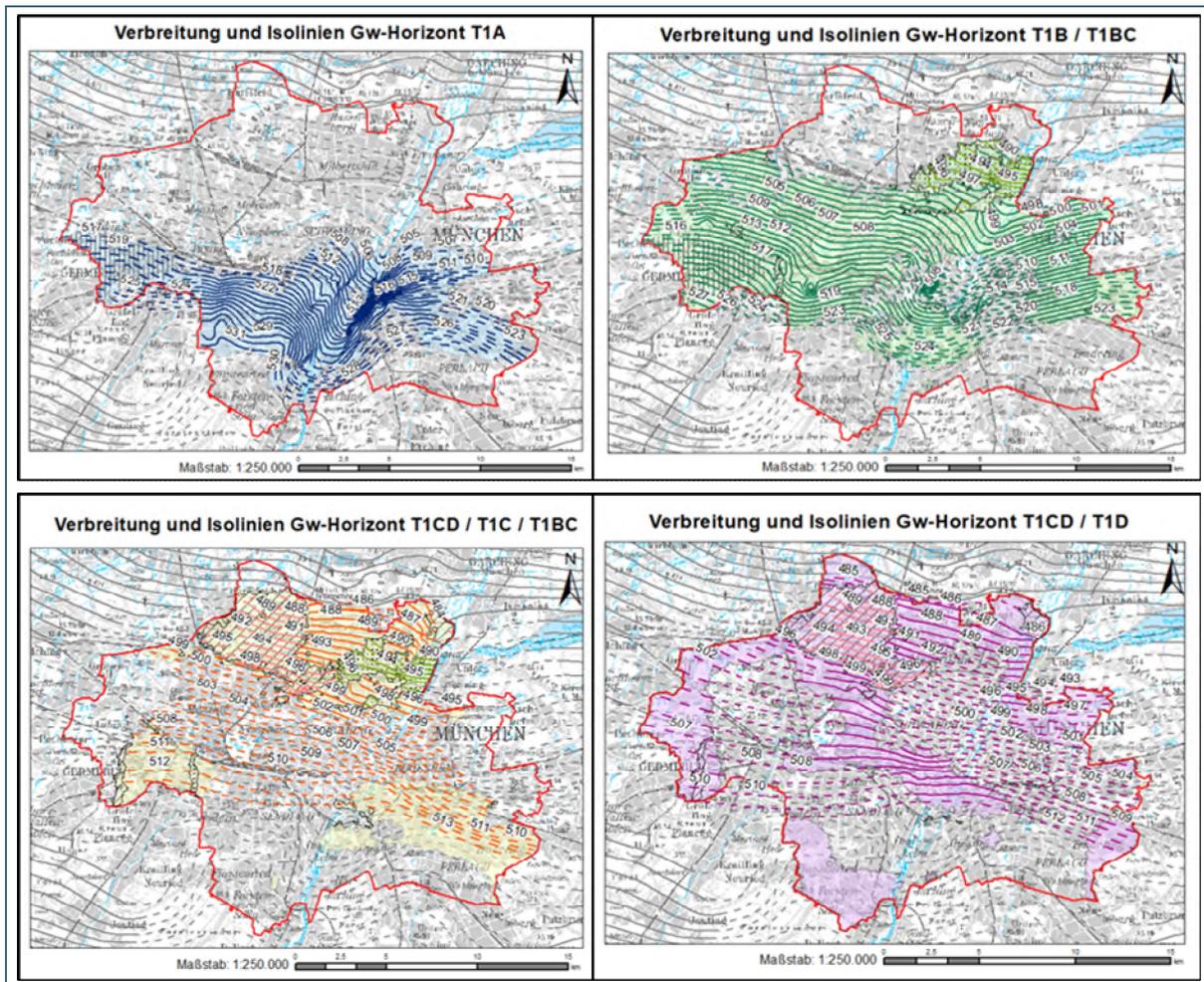


Abb. 69: Übersicht über die einzelnen Unterhorizonte des oberflächennahen tertiären Grundwasserleiters (T1 – in grau hinterlegt) für das Stadtgebiet München. Von Süden nach Norden sortieren sich die Unterhorizonte wie folgt mit der Tiefe. T1A (blau hinterlegt), T1B (grün hinterlegt), T1C (gelb hinterlegt) und T1D (lila hinterlegt). Außerdem sind die Interaktionsbereiche T1BC und T1CD in die Pläne eingearbeitet. Im Anschluss an das Stadtgebiet nach Norden vereinigen sich die auslaufenden Horizonte T1C und T1D zu einem gemeinsamen T1-Horizont, bis dieser in Höhe Dietersheim ausläuft bzw. in den darunterliegenden T2-Horizont übergeht. Interaktionsbereiche zwischen den Horizonten sind vertikal bzw. horizontal schraffiert oder gepunktet gekennzeichnet.

Diese Isolinien erschließen meist nicht den gesamten ausgewiesenen Bereich des Unterhorizonts, da Stützpunkte nicht in allen Bereichen vorhanden waren. Bereichsweise wurden die Isolinien extrapoliert, um z. B. Anschluss an Darstellungen von Grundwassergleichen im das Umland zu gewähren. Diese sind gestrichelt dargestellt und als unsicher einzustufen. In einigen Bereichen der ausgewiesenen Unterhorizonte können jedoch keine Isolinien dargestellt werden, da keine Kenntnis über die Grundwassersituation vorliegt (z. B. südlichster Bereich des T1D-Horizonts).

Im Bereich des nördlichen Stadtgebietes wird die Verbreitung des T1-Sandkörpers lokal homogener, d.h. eine Unterteilung in mehrere Einzelhorizonte ist nicht mehr sinnvoll, da die einzelnen Horizonte „zusammenlaufen“ und sich nach Norden als T1 fortsetzen. Die betreffenden Isolinien (T1C/D im NE und T1B/C im NW) nähern sich ebenfalls T1 an. Nördlich der Stadtgrenze wird der T1-Horizont als zusammenhängender Horizont, analog zum Umland dargestellt. Der obere tertiäre Grundwasserleiter läuft in Richtung Norden immer weiter aus und ist ab Höhe Dietersheim nicht mehr zu identifizieren. Ein Übergang zum mittleren tertiären Grundwasserleiter (T2), der deutlich ausgebildet ist (vgl. Bereich Flughafen), ist fließend. In den Interaktionsbereichen der jeweiligen Horizonte (T1C/D im NE und T1B/C im NW des Stadtgebietes) wurden separate, kleinräumige Grundwassergleichenpläne erstellt (Abb. 69).

Nachfolgend wird tabellarisch die Ausbreitung der Unterhorizonte T1A bis T1D, sowie deren Interaktionsbereiche, mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter und untereinander, dargestellt.

Tab. 21: Ausbreitung und Interaktionen der Unterhorizonte des T1-Aquifers (T1A-T1D) im Stadtgebiet

Horizont	Ausbreitung (grobkörniger Bereich)	Isolinien	Interaktion
T1A	Südlicher Stadtbereich bis circa Stadtmitte, W-E Erstreckung	Bereich zw. 531 m ü. NN und 502 m ü. NN	Interaktion mit Quartär: Bereich München Zentral (W-E, südlicher Stadtbereich); Interaktion mit Tertiär: Bereich München W (T1A/T1B)
T1B	Stadtzentrum, Aussparung im Bereich Altstadt (hier nur Feinkorn), W-E Erstreckung	Bereich zw. 527 m ü. NN und 489 m ü. NN	Interaktion mit Quartär: Bereich München Zentral (W-E, nördlicher Stadtbereich); Interaktion mit Tertiär: Bereich München W (T1A/T1B), Bereich München NE (T1B/T1C)
T1BC	Nordöstlicher Stadtbereich	Bereich zw. 497 m ü. NN und 489 m ü. NN	Interaktion mit Quartär: siehe T1B und T1C; Interaktion mit Tertiär: Bereich München NE (T1B/T1C)
T1C	Nördlicher Stadtbereich flächendeckend, sowie jeweils ein Bereich im W und E in Höhe des Zentrums	Bereich zw. 512 m ü. NN und 484 m ü. NN	Interaktion mit Quartär: Bereich München N; Interaktion mit Tertiär: Bereich München NE (T1B/T1C), Bereich München NW (T1C/T1D)
T1CD	Nordwestlicher Stadtbereich	Bereich zw. 499 m ü. NN und 486 m ü. NN	Interaktion mit Quartär: siehe T1C und T1D; Interaktion mit Tertiär: Bereich München NW (T1C/T1D)
T1D	Flächendeckend über das Stadtgebiet mit großräumigen Aussparungen im W, S, E und N.	Bereich zw. 511 m ü. NN und 485 m ü. NN	Interaktion mit Quartär: Bereich München NW; Interaktion mit Tertiär: Bereich München NW (T1C/T1D)

## Umland

Der oberflächennahe, tertiäre Grundwasserleiter T1 ist im nördlichen Umland in verschiedener Ausprägung zumeist flächendeckend verbreitet, im Bereich der nördlichen Münchner Schotterebene (MSE) fehlt er jedoch völlig, da der Horizont ausläuft bzw. eine Erosionsdiskordanz besteht (Verbreitung siehe Abb. 70). Im Bereich der MSE wird das oberflächennahe Tertiär von quartären Ablagerungen überlagert, im Tertiären Hügelland streicht der obere tertiäre Grundwasserleiter großflächig aus, wird jedoch lokal von unabhängigen Schichtwasservorkommen (und Deckschichten) überlagert. In den Flusstälern überlagern jüngere, quartäre Ablagerungen die tertiären Sedimente.

Weiter ist im Tertiären Hügelland eine genauere Unterteilung des T1-Horizonts analog zum Stadtgebiet, aufgrund von starker Heterogenität mit der bestehenden Datengrundlage nicht möglich. Das Tertiäre Hügelland gliedert sich in einen West- und einen Ostteil. Die Datengrundlage für die Konstruktion der Grundwassergleichen aus der Stichtagsmessung 2018 besteht hier aus 495 Grundwasserstandsmessungen und 198 Messungen an den Oberflächengewässern. Diese sind im Hügelland zum großen Teil an das Grundwasser angebunden und entwässern in Richtung der größeren Vorfluter wie Amper, Glonn, Isen und Isar. Die Messpunkte der Oberflächengewässer wurden mit einer eigenen Signatur versehen und sind somit durch den Layer der Stützpunkte eindeutig identifizierbar. Alle weiteren Daten zu den Oberflächengewässermesspunkten sind in zugehöriger Excel-Datenliste hinterlegt.

Die die 87 im BIS-BY verzeichneten Quellen der OSM liegen vor allem im Bereich des Tertiären Hügellandes. Die eingemessene Höhe der Quellen entspricht zumeist der Geländehöhe des DGM und liegt oft sehr nahe an den absolut höchsten Punkten der Umgebung. Es zeigte sich, in circa 80 % der Fälle, dass diese Höhen zumeist deutlich über den interpolierten Grundwassergleichen des T1-Aquifers liegen. Dies deutet darauf hin, dass durch die Taleinschnitte, lokale und kleinräumige, oberflächennahe Grundwasserstockwerke angeschnitten wurden, und zu den Tälern hin entwässern. Dieser Umstand ist bereits

durch oberflächennahe Bohrungen (GWM, Brunnen) von wenigen Metern Tiefe, z. B. im Areal von Kies- und Sandgruben, bekannt. Meistens scheint es so, dass diese angeschnittenen, lokalen Stockwerke nicht in direkter Verbindung zu dem in größeren Teilen zusammenhängendem T1-Aquifer stehen. Dies zeigt sich vor allem in deutlichen Unterschieden, zum Teil mehrere 10er Meter, zwischen Austrittshöhe der Quelle und den Grundwassergleichen. Vor allem im westlichen Teil des Tertiären Hügellandes sind diese Unterschiede meist sehr deutlich ausgeprägt, im östlichen Teil liegen diese oft näher beieinander. Dies mag zum einen am generellen, heterogenen Aufbau des oberflächennahen Tertiärs liegen, zum anderen auch daran, dass das Relief des Tertiärs im Osten kleinräumiger ausgeprägt scheint. Ebenfalls befinden sich einige wenige Quellaustritte in direkter Nähe der größeren Täler bzw. Fließgewässer. Diese lassen sich zumeist annähernd in das Gesamtbild der Grundwassergleichen einbinden und weisen somit auf eine Verbindung zum T1-Aquifer hin. Eine Einbindung der Quellaustritte in das detaillierte 3D-Modell zur Überprüfung der Quellaustrittshöhen und ihrer Zugehörigkeit zu den Grundwasserhorizonten steht bis dato noch aus. Die vorhandenen Daten zu den bekannten Quellen wurden nicht in die Grundwassergleichenpläne eingearbeitet, da weder eine Überprüfung des aktuellen Zustandes, der eingemessenen Höhe noch der generellen Schüttung im Zuge der Stichtagsmessung 2018 (aus Zeit und Kapazitätsgründen) durchgeführt wurde.

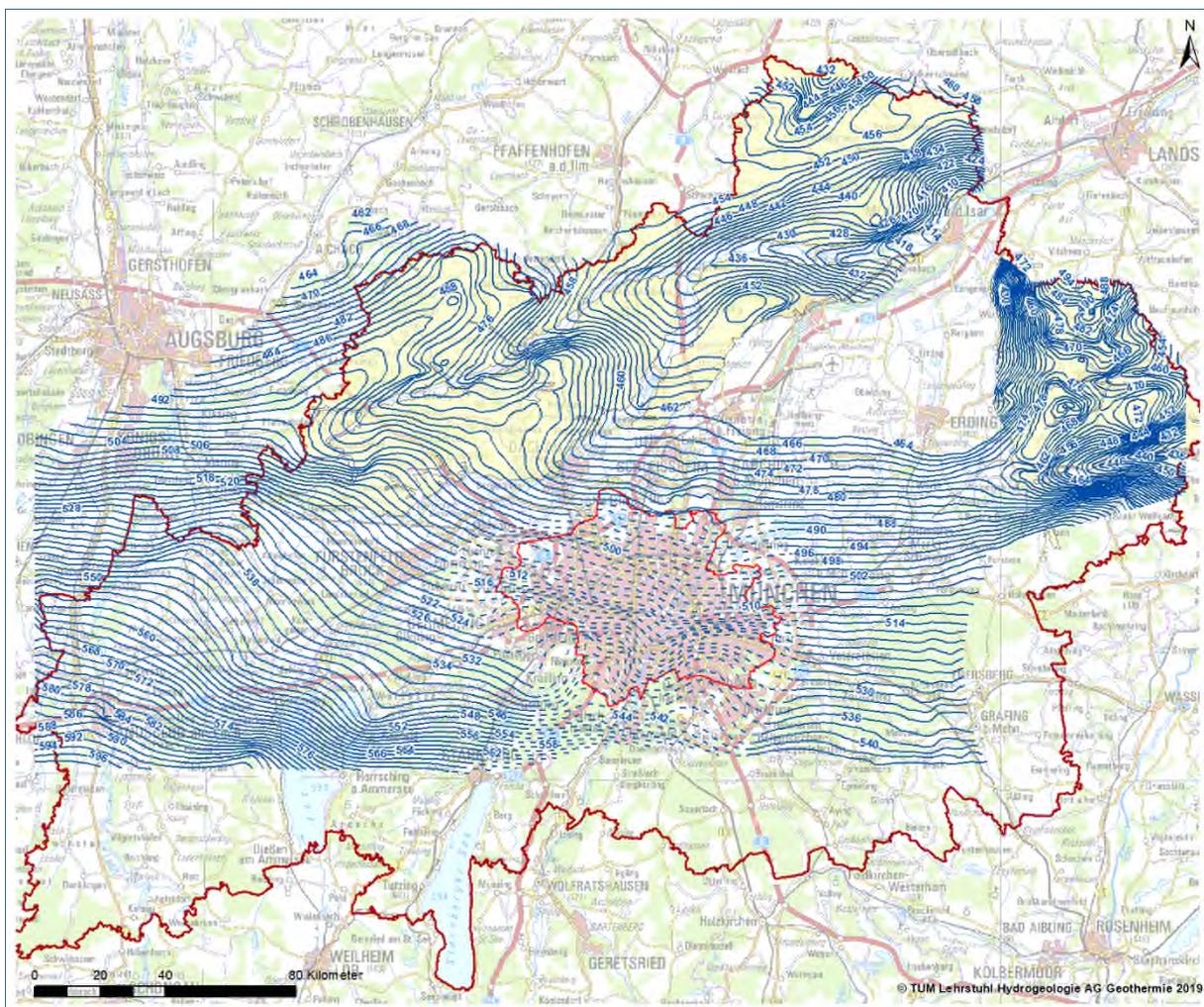


Abb. 70: Übersicht der Isolinien des oberflächennahen tertiären Grundwasserleiters T1. Bereiche, in denen der Grundwasserleiter nicht ausgebildet (nördliche MSE) oder eine zu geringe Stützpunktdichte vorherrscht (südliches und südöstliches Projektgebiet), wurden ausgespart. Der Bereich des Stadtgebietes wurde generalisiert gestrichelt dargestellt, da hierzu gesonderte Pläne der Unterhorizonte vorhanden sind. Lokal kann der Grundwasserleiter von Kleinhorizonten überlagert werden. Die ausstreichende OSM ist gelb hinterlegt.

Der Bereich westlich des Lechs konnte mit aufgenommen werden, da sich die Messpunkte in das Gesamtbild einfügen, jedoch ist der hydraulische Einfluss des Lech nicht allzu signifikant ausgebildet. Im südlichen Bereich des bearbeiteten Gebietes (Lkr. Landsberg a. Lech, Fürstenfeldbruck, Starnberg, München Süd und Ebersberg) ist die Messpunktdichte sehr gering. Dies liegt zum einen vor allem an der geringen Anzahl von Messstellen und Brunnen die dort in der Oberen Süßwassermolasse verfiltert sind, was wiederum an der mächtigen Quartärauflage, sowie mit der generellen, lithologischen Ausprägung des oberflächennahen Tertiärs begründet werden kann. Leider konnte in diesem Bereich kein belastbarer Grundwassergleichenplan des oberen, tertiären Grundwasserleiters angefertigt werden, da hierfür die Datengrundlage nicht ausreichend war. Die Isolinien reichen generell von einem Bereich von 596 m ü. NN im Süden bis zu 410 m ü. NN im Norden. Auf die Interaktion mit anderen großflächig ausgeprägten Grundwasserkörpern (T2 – T4) wird in Kapitel 4.4.3 (Potentialdifferenzen) eingegangen.

### **Einzelbetrachtungen: Grundwassergleichenplan des oberen tertiären Grundwasserleiters (T1)**

#### **Flusstal Isen im Raum Dorfen**

Hier liegt die GOK auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau, so dass die absoluten Höhen der oberflächennahen Filterstrecken bereits auf dem Niveau des mittleren tertiären Aquifers T2 (450 m ü. NN – 380 m ü. NN) liegen. In diesem Fall wird deutlich, dass die definierten Höhenbereiche (in m ü. NN) lediglich als Anhaltspunkte zu verstehen sind und sich lokal Abweichungen ergeben können. Durch die Nähe zur Oberfläche sind diese Messstellen, trotz der Höhenlage (in m ü. NN) der Filterstrecken, dem oberen tertiären Aquifer T1 zuzuordnen, obwohl die absolute Höhe eher dem mittleren tertiären Aquifer entspricht, aber sich kein weiterer tertiärer Aquifer darüber befindet. Die absolute Höhe des tertiären T1-Aquifers scheint in diesem Bereich „abzusinken“. Gespeist wird dieser Bereich durch den oberflächennahen Zufluss von N und S, sowie dem Quartär bzw. den Oberflächengewässern.

#### **Bereich Freising**

Eine ähnliche Situation tritt im Norden der Münchner Schotterebene, im Bereich um Freising auf. Auch hier erschließen die Filterstrecken, der absoluten Höhe (m ü. NN) nach, den mittleren tertiären Aquifer (T2: 450 m ü. NN – 380 m ü. NN). Jedoch handelt es sich hier um einen oberflächennahen Zufluss von Grundwasser, dieses Mal nach Süden aus dem Tertiären Hügelland in Richtung Schotterebene. Daher werden auch diese Bohrungen eher dem oberen Stockwerk (T1) zugeordnet, obwohl die absolute Höhe dagegenspricht. Die ermittelten Grundwasserdruckspiegel fügen sich in diesem Bereich besser in die Isolinien-Konstruktion des T1- als des T2-Plans ein. Der Übergang zwischen dem oberen (T1) und mittleren (T2) Stockwerk ist hier fließend und kann nicht strikt getrennt werden, da diese ineinander übergehen. Dies belegen auch die ähnlichen Höhen der Isolinien an den Randbereichen des Tertiären Hügellandes (T1-Aquifer) im Übergang zur nördlichen Schotterebene (T2-Aquifer).

#### **Nördliche Münchner Schotterebene**

Der gesamte obere tertiäre Grundwasserleiter (T1) fehlt im nördlichen Teil der Schotterebene, da dieser nördlich des Stadtgebietes ausläuft bzw. fließend in den mittleren tertiären Grundwasserleiter (T2) übergeht. Auf die geringmächtige quartäre Überlagerung folgt in diesem Bereich direkt der mittlere tertiäre Grundwasserleiter (T2), der hier somit den oberflächennahen tertiären Grundwasserleiter bildet. Zusätzlich kann es zu großflächigen Interaktionen zwischen dem quartären Hauptgrundwasserleiter und dem mittleren, tertiären Grundwasserleiter (T2) kommen. Das Grundwasser des (zumindest bereichsweise) gespannten T2-Aquifers „drückt“ in den quartären Grundwasserleiter.

### **Punktuell aufgeschlossene, oberflächennahe, lokale unabhängige Grundwasserstockwerke**

Vor allem im Bereich des Tertiären Hügellandes können immer wieder unabhängig agierende Schichtwasservorkommen auftreten. Diese sind oft durch relativ oberflächennah verfilterte Messstellen und Brunnen erschlossen. Es handelt sich hierbei insgesamt um 130 Objekte, deren freie bzw. gespannte Grundwasserverhältnisse sich nicht problemlos den bestehenden Grundwassergleichenplan T1 (bzw. T2 – T4) zuordnen ließen und daher gesondert betrachtet wurden. Zumeist liegen die Messwerte deutlich oberhalb des interpolierten T1-Grundwassergleichenplans. Ein Teil der Punkte könnte auch kleinräumige, unabhängige Grundwasserkörper erschließen.

#### **4.3.3.2 Flurabstände im oberen tertiären Grundwasserleiter T1**

Ergänzend zur Erstellung eines Grundwassergleichenplans je grundwasserführendem, tertiärem Aquifer der erschlossenen Oberen Süßwassermolasse, wurden parallel dazu die zugehörigen Flurabstände flächenhaft aufgearbeitet. Diese sind folgendermaßen definiert: „Als Grundwasser-Flurabstand wird der lotrechte Höhenunterschied zwischen einem Punkt der Erdoberfläche und der Grundwasseroberfläche des oberen Grundwasserstockwerkes bezeichnet“ (Höiting und Coldewey, 2013).

Eine flächenhafte Erarbeitung der Flurabstände in Form einer Flurabstandskarte kommt also nur in Bereichen in Frage, in denen keine (grundwasserführende, quartäre) Überlagerung vorhanden, bzw. kein quartärer Grundwasserleiter ausgeprägt ist und dieser die OSM überlagert. Ein Großteil des bearbeiteten Gebietes liegt im Bereich der Münchner Schotterebene oder im südlich anschließenden Moränengürtel, so dass die dortige flächenhafte Darstellung gemäß der Definition nicht möglich ist. Großflächige, zusammenhängende Bereiche, in denen die OSM nicht von jüngeren Ablagerungen, außer geringmächtigen holozänen Deckschichten, bedeckt ist, befinden sich fast ausschließlich im nördlichen Teil (Tertiäres Hügelland). Flurabstandskarten der tiefer liegenden Aquifere T2 bis T4 sind laut Definition ebenfalls ausgeschlossen.

In den grundwassererfüllten Horizonten der Oberen Süßwassermolasse liegen zum größten Teil gespannten Grundwasserverhältnisse vor. Dies bestätigen Aufzeichnungen zu den Messstellen und Brunnen, sowie der Vergleich zwischen der Lage der Filterstrecke und der gemessenen Grundwasserdruckspiegel im Rahmen der Stichtagsmessung 2018. Je nach tertiärem Grundwasserleiter können die Grundwasserdruckspiegel eine ähnliche Höhe (m ü. NN) wie der zumeist freie Grundwasserspiegel der quartären Überlagerung (soweit vorhanden, Tertiäres Hügelland ausgeschlossen) annehmen. Dies ist jedoch nicht flächendeckend der Fall, sondern muss jeweils lokal geprüft werden. Hierfür eignen sich diejenigen Messungen, die im Zuge der Stichtagsmessung an benachbarten Objekten durchgeführt und sowohl im Quartär als auch im Tertiär verfiltert sind (z. B. Doppelmessstellen im Stadtgebiet). Dies bestätigt die Annahme von Bauer et al. (2005), dass die Grundwasserdruckspiegel wohl größtenteils unterhalb oder auf ähnlichem Niveau des quartären Grundwasserspiegels, soweit dieser ausgebildet ist, liegen. In Bereichen des Tertiären Hügellandes können oberflächennah verfilterte Objekte relativ gering gespannte bzw. freie Grundwasserverhältnisse aufweisen, da lokal ein geringleitender Stauer fehlt. Einen Verschnitt der jeweiligen Grundwasserdruckspiegel untereinander oder mit dem freien, quartären Grundwasserspiegel bietet Kapitel 4.4.3 und 4.4.4.

Die Bearbeitung der flächenhaft verbreiteten Flurabstände der OSM hat sich somit deutlich von den Flurabständen im oberflächennahen und flächenhaft verbreiteten, quartären Hauptgrundwasserleiter, mit zum großen Teil freien Grundwasserverhältnissen, unterschieden. Die einzigen Bereiche, für die eine flächenhafte Konstruktion und Darstellung von Flurabstandskarten in Frage kamen, waren der westliche und östliche Bereich des Tertiären Hügellandes und der dort verbreitete obere tertiäre Grundwasserleiter (T1). Alle anderen Bereiche sind von quartären Ablagerungen überdeckt, oder liegen unterhalb des oberen,

tertiären Grundwasserleiters. Zu beachten ist jedoch, dass lokale Schichtwässer oder kleinräumige Horizonte, zu einer lokalen Abweichung der Flurabstände beitragen können.

### Konstruktion der Flurabstände

Die Datengrundlage zur Erstellung einer Flurabstandskarte leitet sich indirekt aus der durchgeführten Stichtagsmessung und dem erstellten Grundwassergleichenplan des oberen, tertiären Aquifers (T1) ab. Aus den bearbeiteten Isolinien des T1-Aquifers wurde ein Rasterfile (2 m • 2 m) erstellt, das auf einen passenden Bereich, die ausstreichende OSM des Tertiären Hügellandes, extrahiert wurde. Danach wurden die Rasterdaten mit dem digitalen Höhenmodell verschnitten und somit die Differenzen zwischen Geländeoberfläche und Grundwasserdruckspiegel erstellt.

### Ergebnisse

Nach dem Verschnitt zwischen den Grundwasserisolinien des oberflächennahen, tertiären Grundwasserleiters (T1) im Tertiären Hügelland und dem digitalen Geländemodell (DGM) ergibt sich die Darstellung des Flurabstandes in Abb. 71. Die finale Konstruktion des klassifizierten Rasters gibt die Flurabstände entsprechend ihrer Höhe, sowie artesische Bereiche (Grundwasserdruckspiegel oberhalb der GOK) wieder. Die ermittelten Flurabstände liegen zwischen 0 m und 84 m.

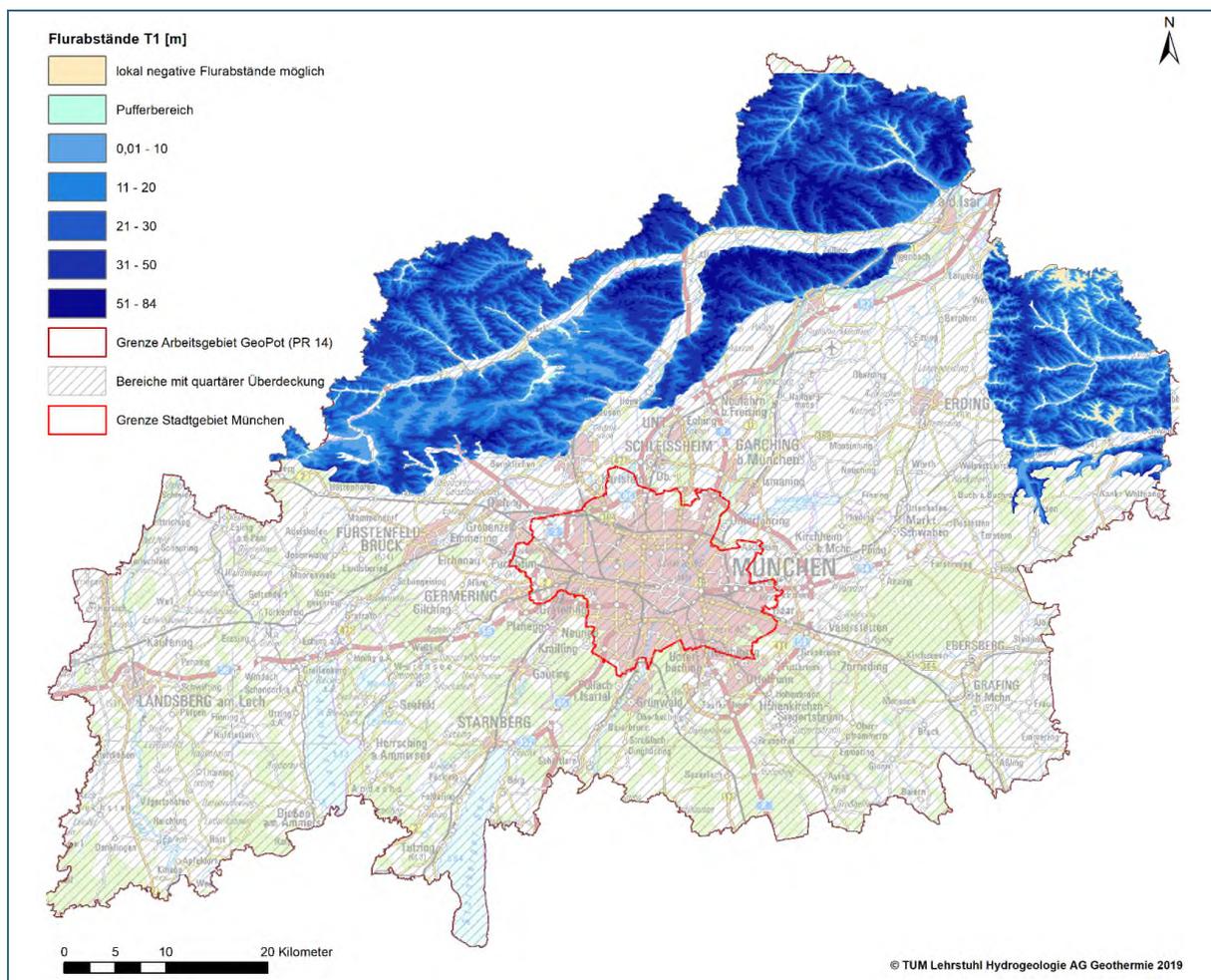


Abb. 71: Übersicht über die ermittelten Flurabstände, im Bereich zwischen 0 m und 84 m, des oberen tertiären Grundwasserleiters (T1) im Tertiären Hügelland. Bereiche mit quartärer Überlagerung, in denen eine Berechnung der Flurabstände laut Definition nicht sinnvoll ist, wurden schraffiert dargestellt (quartäre Überdeckung). Auf die Darstellung von Flurabständen im Bereich kleinräumiger, tertiärer Aufragungen wurde verzichtet.

Bereichsweise, vor allem in kleineren Nebentälern, können negative Flurabstände (artesische Verhältnisse) auftreten. Diese entstehen, da bei der Interpolation der Isolinien des oberflächennahen Grundwasserleiters nicht alle Geländeeinschnitte korrekt wiedergegeben werden können. Hierzu müssten in jedem Taleinschnitt Messungen bzgl. der Höhe des auftretenden Grundwasserspiegels der lokalen Vorfluter gemessen werden, was jedoch aufgrund deren Vielzahl nicht möglich ist. Durch das „Durchhalten“ der Isolinien in diesen Taleinschnitten entstehen in diesen Bereichen zum Teil hohe negative Flurabstände (bis zu circa –40 m), die aber nicht der Realität entsprechen. Bereichsweise kann die geringe Messpunktdichte der Grundwassergleichen ebenfalls ein ausschlaggebender Faktor sein. Zusätzlich spielt die lokale Ungenauigkeit des DGMs eine Rolle, die bereichsweise zu einer Abweichung und unplausiblen Werten des Flurabstandes führen kann. Daher wurde der Bereich zwischen 0 m – 5 m als Schwankungsbereich ausgewiesen, um diesen Verhältnissen entgegenzuwirken.

Es muss beachtet werden, dass lokal anzutreffende, unabhängig agierende Grundwasserstockwerke bei den Flurabständen nicht berücksichtigt sind, da diese nur die Verhältnisse des ersten zusammenhängenden tertiären Grundwasserleiters abbilden.

#### **4.3.3.3 Grundwassergleichen des mittleren tertiären Grundwasserleiters T2**

Die Verbreitung des Grundwasserleiters, der als mittlerer tertiärer Grundwasserleiter T2 definiert wurde, liegt im Hauptbereich zwischen 450 m ü. NN – 380 m ü. NN, jedoch lokal mit deutlichen Abweichungen. Zum Teil steht der mittlere Grundwasserleiter bereichsweise direkt mit dem quartären Grundwasserleiter in Kontakt, z. B. im Bereich der nördlichen Schotterebene. Wie auch der T1-Aquifer, lässt sich die Tiefenstufe des T2-Grundwasserleiters aus dem 3D-Modell für das Stadtgebiet definieren. Wie auch die darunterliegenden Horizonte (T3 und T4), zeigt sich der T2, zumindest im Bereich des Stadtgebietes, als abgeschlossener Grundwasserleiter ohne Kontakt zu anderen ausgewiesenen Grundwasserleitern (T1, T3 oder T4). Die horizontale Verbreitung ist jedoch nicht durchhaltend, d.h. der Grundwasserleiter ist nicht flächendeckend ausgebildet, und besteht teilweise aus unabhängigen, kleineren Linsenstrukturen auf ähnlicher Höhe (bezogen auf m ü. NN). Die durch das 3D-Modell definierte Tiefenstufe entspricht in etwa der Tiefenstufe T2 nach Prösl und Anders (2011).

Der Grundwassergleichenplan des T2-Aquifers, der sowohl das Stadtgebiet, als auch das Umland umfasst, konnte flächendeckend konstruiert werden (Abb. 72).

Nach SE nimmt die Messpunktdichte deutlich ab. Die Hauptfließrichtung des Grundwassers ist nach NE gerichtet. Teilweise sind Depressionen des Druckspiegels, z. B. im Bereich von Wassergewinnungsanlagen zu beobachten. Die Isolinien reichen von einem Bereich von 572 m ü. NN im Süden bis zu 406 m ü. NN im Norden. Auf die Interaktion mit anderen großflächig ausgeprägten Grundwasserkörpern (Q, T1, T3, T4) wird in Kapitel 4.4.3 und 4.4.4 der Potentialdifferenzen eingegangen.

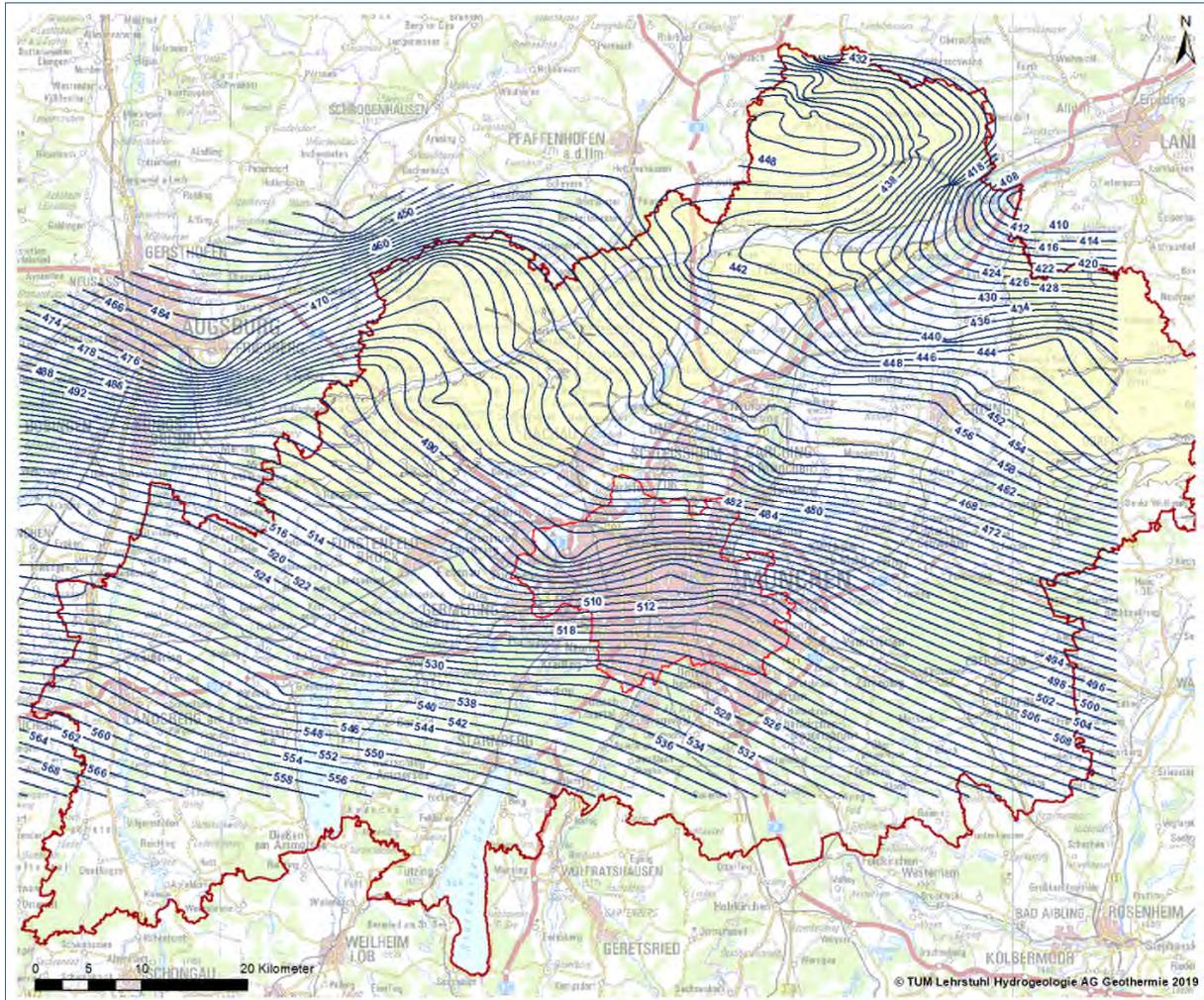


Abb. 72: Übersicht der Isolinien des mittleren, tertiären Grundwasserleiters T2. Bereiche, in denen eine zu geringe Stützpunktdichte vorherrscht, wurden ausgespart. Der Grundwasserleiter ist nicht durchgehend ausgeprägt und kann lokal mit den darüber oder darunter verlaufenden quartären und tertiären Aquifereen interagieren. Die ausstreichende OSM ist gelb hinterlegt. Aufgrund der Stützpunktdichte muss dieser Plan als Übersichtsplan angesehen werden, der für Detailbetrachtungen nicht geeignet ist.

Im Bereich des südlichen Stadtgebietes (Höheniveau circa 450 m ü. NN – 400 m ü. NN) ist ein lokaler Grundwasserleiter mit geringer Ausbreitung durch fünf Notbrunnen erschlossen (Abb. 73). Der Grundwasserdruckspiegel liegt hier im Bereich zwischen 503 m ü. NN und 508 m ü. NN und passt mit einer Differenz von circa 20 m nicht zum Druckspiegel des mittleren tertiären Grundwasserleiters T2. Laut 3D-Modell werden mehrere kleine, lokale Sandhorizonte erschlossen, die alle auf einem ähnlichen Niveau liegen.

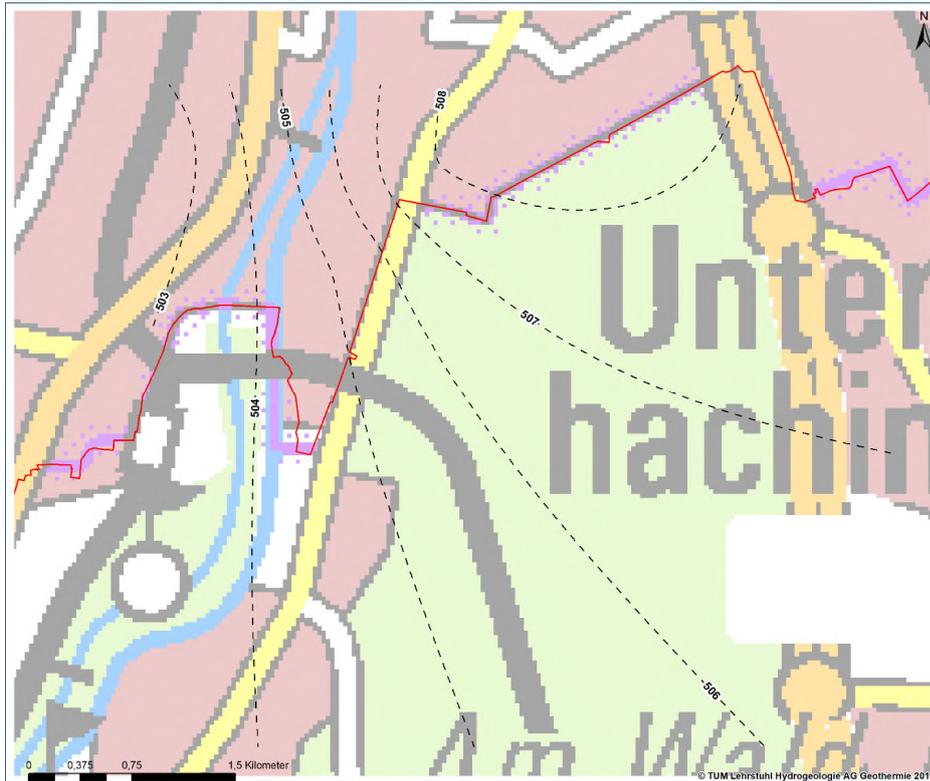


Abb. 73: Übersicht der Isolinien des lokalen „Grundwasserleiters Tx“ im südlichen Stadtgebiet. Bereiche, in denen der Grundwasserleiter nicht ausgebildet oder eine zu geringe Stützpunktdichte vorherrscht, wurden ausgespart. Der Grundwasserleiter ist nicht durchgehend ausgeprägt. Der betreffende Horizont liegt auf ähnlichem Niveau wie der T2-Aquifer, verhält sich aber unabhängig von diesem. Dies zeigt sich sowohl im Verlauf der Isolinien als auch bei den Druckspiegeln.

#### 4.3.3.4 Grundwassergleichen des unteren tertiären Grundwasserleiters T3

Die Verbreitung des Grundwasserleiters, der als unterer, tertiärer Grundwasserleiter T3 definiert wurde, liegt im Hauptbereich zwischen 380 m ü. NN – 330 m ü. NN, jedoch lokal mit deutlichen Abweichungen (Abb. 74).

Wie auch der T1- und T2-Grundwasserleiter, lässt sich die Tiefenstufe des T3-Aquifers aus dem 3D-Modell definieren. Analog zu den anderen, tiefer liegenden, tertiären Grundwasserleitern (T2 und T4), zeigt sich der T3-Aquifer, zumindest im Bereich des Stadtgebietes, als abgeschlossener Grundwasserleiter ohne Kontakt zu anderen Aquiferen. Die horizontale Verbreitung ist jedoch nicht durchhaltend, d.h. der Grundwasserleiter ist nicht flächendeckend ausgebildet, und besteht teilweise aus unabhängigen, kleineren Linsenstrukturen auf ähnlicher Höhe (bezogen auf m ü. NN). Die durch das 3D-Modell definierte Tiefenstufe entspricht in etwa der Tiefenstufe T3 nach Prösl und Anders (2011).

Bereichsweise sind im Umland, vor allem in Richtung Norden, die Druckspiegel des T3- und des T4-Horizonts relativ ähnlich. In diesen Bereichen kann von einem möglichen Interaktionsbereich der Körper ausgegangen werden, was aufgrund der Stützpunktdichte jedoch nicht detailliert nachgewiesen werden kann. In anderen Bereichen (z. B. Raum Karlsfeld) sind die Druckspiegel deutlich unterschiedlich, was auf getrennte Verhältnisse des T3- und des T4-Grundwasserleiters hinweist. Dieses Verhalten der Isolinien lässt sich bereichsweise auch in den oberflächennahen Körpern (Interaktionsbereiche: T1, bereichsweise T2, sowie T1A bis T1D im Stadtgebiet) nachweisen und durch das 3D-Modell belegen.

Ein zusammenhängender Grundwassergleichenplan des T3-Aquifers konnte für den zentralen und nördlichen Bereich des Arbeitsgebiets realisiert werden. Die Messpunktdichte ist relativ gering, da hauptsächlich nur die in großer Tiefe verfilterten Brunnen den Horizont erschließen. Die Hauptfließrichtung des Grundwassers ist nach NE gerichtet. Teilweise sind Absenkungen des Druckspiegels, z. B. im Bereich von Wassergewinnungsanlagen, zu beobachten. Dies ist besonders im Raum Freising, mit Verlauf nach NE, ausgeprägt. Die Isolinien reichen von einem Bereich von 510 m ü. NN im

Süden bis zu 406 m ü. NN im Norden. Auf die Interaktion mit anderen großflächig ausgeprägten Grundwasserkörpern (T1, T2, T4) wird in Kapitel 4.4.4 (Potentialdifferenzen) eingegangen.

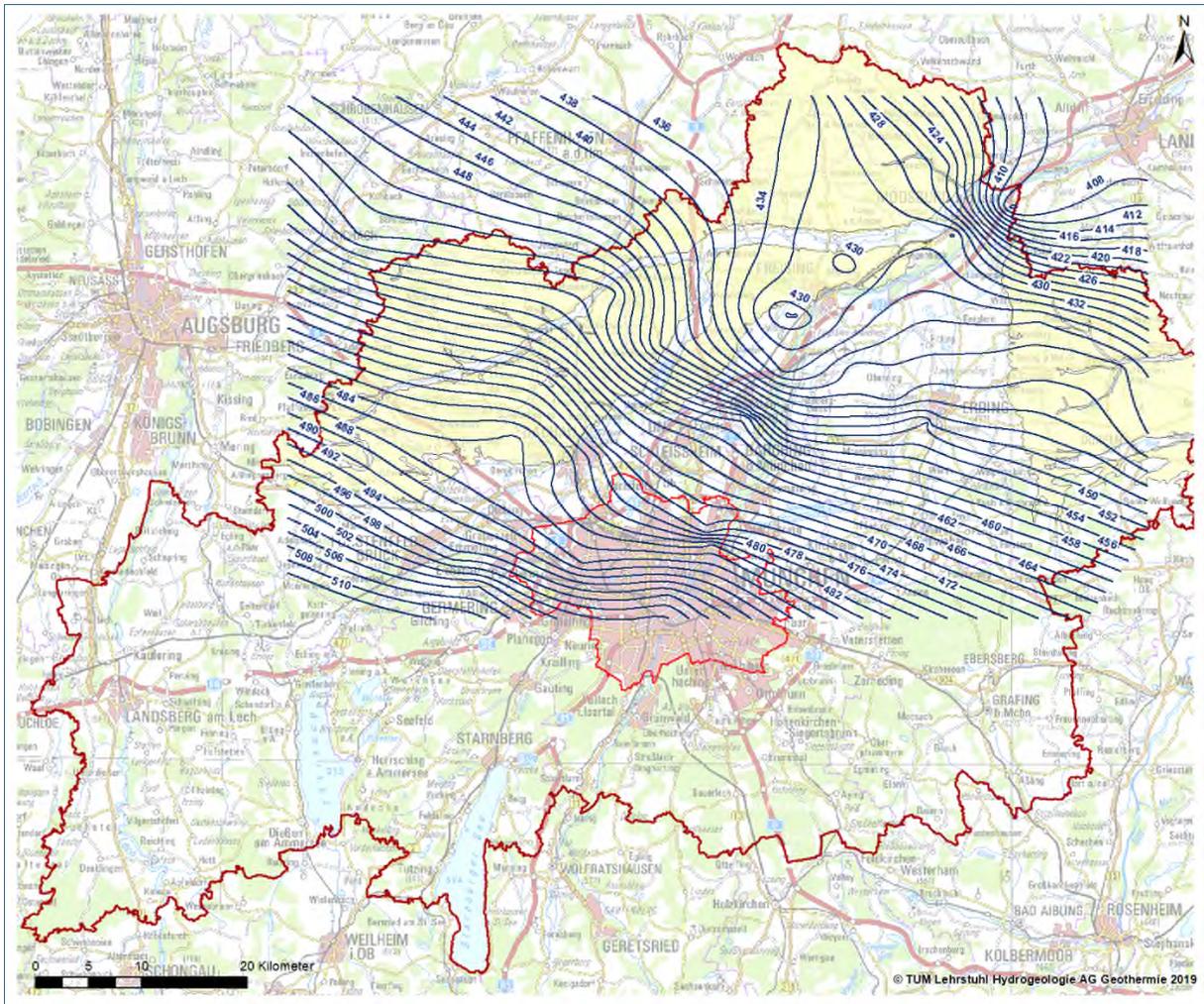


Abb. 74: Übersicht der Isolinien des unteren, tertiären Grundwasserleiters T3. Bereiche, eine zu geringe Stützpunktdichte vorherrscht, wurden nicht dargestellt. Der Grundwasserleiter ist nicht durchgehend ausgeprägt und kann lokal mit den darüber oder darunter verlaufenden Aquiferen interagieren. Die ausstreichende OSM ist gelb hinterlegt. Aufgrund der Stützpunktdichte muss dieser Plan als Übersichtsplan angesehen werden, der für Detailbetrachtungen nicht geeignet ist.

#### 4.3.3.5 Grundwassergleichen des tiefen tertiären Grundwasserleiters T4

Die Verbreitung des Grundwasserleiters, der als tiefer tertiärer Grundwasserleiter T4 definiert wurde, liegt im Hauptbereich zwischen 330 m ü. NN – 290 m ü. NN, jedoch lokal mit deutlichen Abweichungen (Abb. 75).

Wie auch die T1-, T2- und T3-Grundwasserleiter, lässt sich die Tiefenstufe des T4-Grundwasserleiters aus dem 3D-Modell definieren. Analog zu anderen tertiären Haupthorizonten (T2, T3), zeigt sich der T4-Grundwasserleiter, zumindest im Bereich des Stadtgebietes, als abgeschlossener Horizont ohne Kontakt zu anderen ausgewiesenen Grundwasserleitern. Die horizontale Verbreitung ist jedoch nicht durchhaltend, d.h. der Grundwasserleiter ist nicht flächendeckend ausgebildet, und besteht teilweise aus unabhängigen, kleineren Linsenstrukturen auf ähnlicher Höhe (bezogen auf m ü. NN). Die durch das 3D-Modell definierte Tiefenstufe entspricht in etwa der Tiefenstufe T4 nach Prösl und Anders (2011).

Es wurde eine zusammenhängende Darstellung der Gleichen des T4-Grundwasserleiters, der das zentrale und nördliche Stadtgebiet als auch das nördliche Umland umfasst, erstellt. Nach SE nimmt die Messpunktdichte merklich ab. Die Hauptfließrichtung des Grundwassers ist nach NNE gerichtet. Teilweise sind Depressionen des Grundwasserdruckspiegels, z. B. im Bereich von Brunnen oder Wassergewinnungsanlagen zu beobachten. Die Isolinien reichen von einem Bereich von 496 m ü. NN im Süden bis zu 420 m ü. NN im Norden. Auf die Interaktion mit anderen großflächig ausgeprägten Grundwasserkörpern (T1, T2, T3) wird in Kapitel 4.4.4 (Potentialdifferenzen) eingegangen.

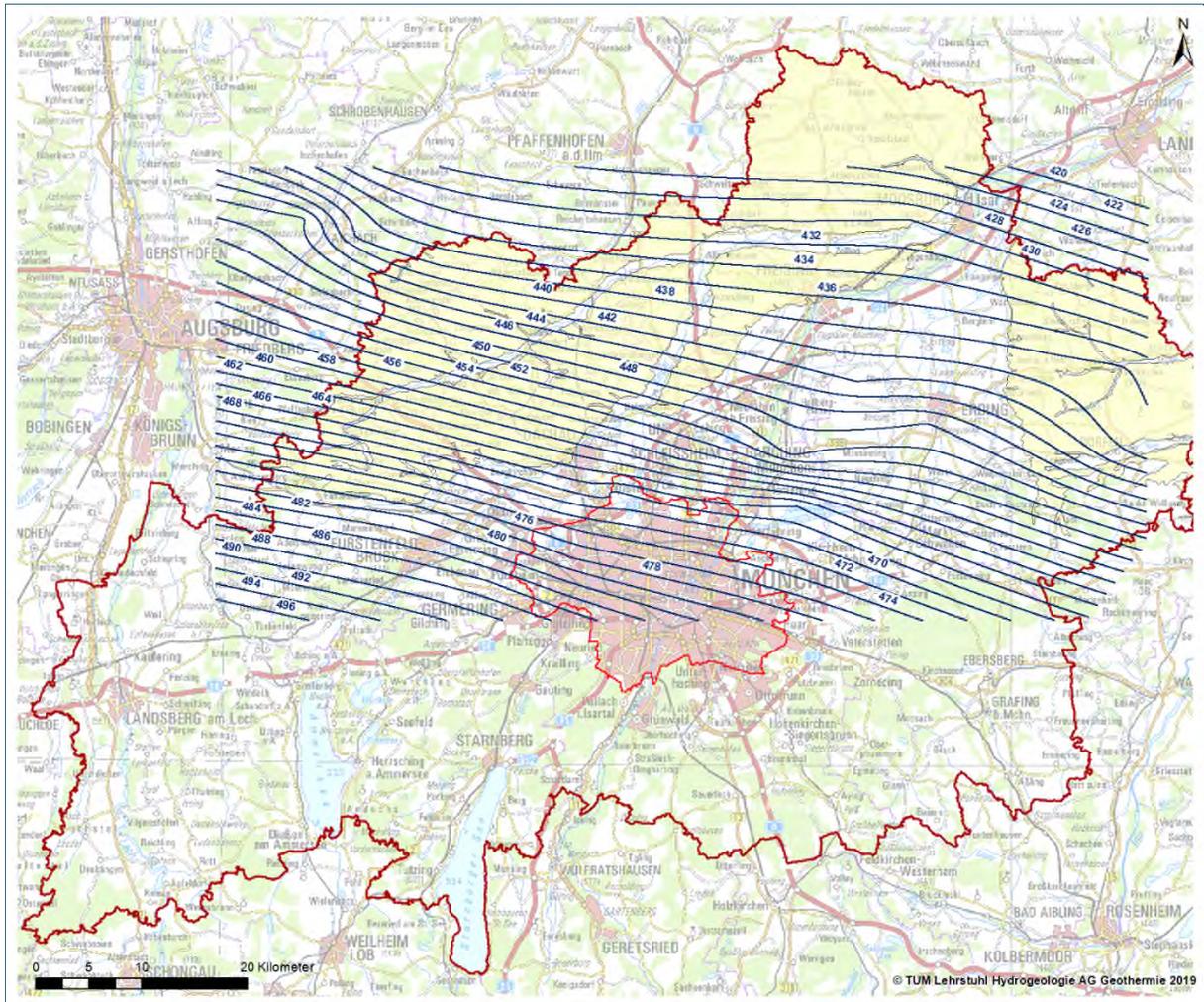


Abb. 75: Übersicht der Isolinien des tiefen, tertiären Grundwasserleiters T4. Bereiche, in denen eine zu geringe Stützpunktdichte vorherrscht, wurden nicht dargestellt. Der Grundwasserleiter ist nicht durchgehend ausgeprägt und kann lokal mit den darüber oder darunter verlaufenden Horizonten interagieren. Die ausstreichende OSM ist gelb hinterlegt. Aufgrund der Stützpunktdichte muss dieser Plan als Übersichtsplan angesehen werden, der für Detailbetrachtungen nicht geeignet ist.

#### 4.4 Angebundene Oberflächengewässer, artesische Bereiche und Grundwasser-Potentialdifferenzen

Das folgende Kapitel beschreibt die Grundwasserverhältnisse der tertiären Grundwasserleiter T1 bis T4 (OSM) auf Basis der Ergebnisse der konstruierten Grundwassergleichen, die im vorherigen Kapitel beschrieben wurden.

#### 4.4.1 Anbindung und Interaktion von Oberflächengewässern an die tertiären Grundwasserleiter

Generell stehen, im Vergleich zum quartären Hauptgrundwasserleiter und natürlicherweise bedingt durch die Tiefenlage der Grundwasserleiter der OSM im Arbeitsgebiet, nur wenige Bereiche in Kontakt oder in Interaktion mit fließenden oder stehenden Oberflächengewässern.

##### **Oberflächengewässer und Quellaustritte im Tertiären Hügelland:**

Auf die Situation der fließenden Oberflächengewässer und Quellaustritte im Tertiären Hügelland wurde bereits in Kapitel 4.3.2 (Stichtagsmessung) und 4.3.3.1 (Grundwassergleichen T1) eingegangen.

##### **Interaktion Isar:**

Die Interaktion der Isar mit dem quartären Hauptgrundwasserleiter wurde in Kapitel 3.3 beschrieben.

Im Zuge der Erstellung der Grundwassergleichen der Oberen Süßwassermolasse zeigte sich, dass in weiten Teilen der Verbreitung der Isolinien der erschlossenen Grundwasserleiter (T1 bis T4) keine, bzw. nur eine sehr geringe Interaktion mit der Isar nachweisbar ist. Meist liegen die erschlossenen Grundwasserleiter zu tief, um direkt zu interagieren. Im Bereich des Stadtgebietes wird jedoch deutlich, dass vor allem die oberflächennah ausgeprägten Teilhorizonte T1A und T1B, im Bereich ihrer Ausbreitung, eine Interaktion mit der Isar zeigen. Dies zeigt sich deutlich am Verlauf der Isolinien. Die tieferliegenden Bereiche T1C und T1D zeigen kaum Interaktion, da ihre Ausbreitung nur geringfügig mit dem Bereich der Isar zusammenfällt. Im nördlichen Stadtgebiet zeigen die Isolinien des T1 Horizonts in Richtung Isar einen unruhigen Verlauf, was jedoch wahrscheinlich hauptsächlich mit der stark beeinflussten Grundwassersituation im Bereich Großlappen zusammenhängt.

Demgegenüber zeigt sich bei einer Detailbetrachtung der Situation im 3D-Modell, dass nicht nur der T1A und T1B Horizont mit der Isar interagieren kann, sondern auch Teile des T1C/T1BC-Horizonts, sowie der sich vereinigende T1C/D-Horizont im nördlichen Stadtgebiet (im Anschluss nach Norden T1), sofern dieser im Bereich der Isar ausgebildet ist. Eine Verlängerung des potenziellen Interaktionsbereichs in Richtung Norden, außerhalb des Stadtgebietes, ist zumindest bereichsweise wahrscheinlich. Zum anderen verringert sich die quartäre Überlagerung nach Norden immer weiter, zum Teil bis auf wenige Meter, was eine Interaktion mit der Isar, oder anderen Gewässern, ebenfalls begünstigt. Über die Intensität und Dynamik der Interaktion, vor allem über das Stadtgebiet hinaus, kann aufgrund der fehlenden Datenbasis keine nähere Auskunft gegeben werden.

##### **Interaktion mit den stehenden Oberflächengewässern im südlichen Projektgebiet:**

Relevante, angebundene Oberflächengewässer finden sich, neben den bereits erwähnten Fließgewässern im Tertiären Hügelland, insbesondere im südlichen Arbeitsgebiet. Die Bereiche des Ammersees, Wörthsees und Pilsensees fallen zumindest zum Teil in den Bereich der interpolierten Grundwassergleichen des T1-Horizonts. Die Grundwassergleichen T2 bis T4 liegen mit großer Wahrscheinlichkeit zu tief (unterhalb 450 m ü. NN), so dass sie die Basis der erwähnten Seen (Ammersee mit circa 452 m ü. NN) nicht, oder nur in äußerst geringem Ausmaß, erreichen. Da es sich bei Wörth- und Pilsensee, im Vergleich zum Ammersee, um kleine und relativ flache Gewässer handelt, kann davon ausgegangen werden, dass sich die Interaktion auf den quartären Grundwasserleiter beschränkt.

Laut den wissenschaftlichen Ergebnissen des „Verbundprojekts Seezeichen“ (Lang et al., 2019: 24 ff.) zeigt sich, dass sich der für den Grundwasserzustrom des Ammersees maßgebliche Grundwasserlei-

ter im Quartär befindet (Lang et al., 2019: 25). Der quartäre Schotter, sowie die Moränenablagerungen, werden von den Ablagerungen der OSM unterlagert. Im Bereich des Ammersees sind die oberen Abschnitte der OSM größtenteils tonig-mergelig-sandig ausgebildet und wirken daher potenziell als Stauhorizont für das Grundwasser im Quartär (Krause, 2001 in Lang et al., 2019: 28). Der Ammersee schneidet bereichsweise in die Ablagerungen der OSM ein, das Quartär ist somit ausgeräumt. Aufgrund der feinkörnigen Ausbildung der tertiären Sedimente ist nicht mit einem mengenmäßig bedeutenden Grundwasserzstrom aus dem Tertiär in den Ammersee zu rechnen (Lang et al., 2019: 29 f.).

#### **4.4.2 Artesische Bereiche in Bezug auf die Grundwasserverhältnisse der OSM**

Artesische Bereiche sind punktuell im Arbeitsgebiet über einzelne Bohrungen aufgeschlossen. Die folgende Beschreibung soll einen Überblick über mögliche artesische Bereiche geben, haben aber aufgrund der zumeist geringen Datendichte und der nicht durchhaltenden Horizonte mit hoher Unsicherheit belegt.

Die Datengrundlage, die zur Berechnung der artesischen Verhältnisse verwendet wurde, beruht primär auf den erstellten Rasterdateien der Grundwasserisolinien (T1-T4) bzw. den Flurabständen. Das generelle Vorgehen bzgl. Flurabstände bzw. artesische Bereiche (T1) wurde bereits in Kapitel 4.3.3.2 beschrieben. Die jeweiligen Grundwasserdruckspiegel (T1 bis T4) wurden mit einem digitalen Höhenmodell (DGM 1 m) verschnitten. Negative Bereiche, d.h. wenn die Grundwasserdruckspiegel oberhalb GOK liegen, stellen theoretisch artesische Bereiche dar. Um die Ungenauigkeiten des DGM und die bei der Interpolation der Grundwassergleichen entstehenden, z. B. im Bereich kleiner Taleinschnitte, nicht korrekte Werte, auszugleichen, wurden die ersten 5 m (negative Flurabstände) als Schwankungsbereich ausgewiesen.

Sekundär wurden Daten von bestehenden Bohrungen (aus dem BIS-BY) zum späteren Abgleich der Bereiche herangezogen. Bei der Verwendung der Punktdaten muss darauf hingewiesen werden, dass diese zum Teil nicht eindeutig den definierten Horizonten zugeordnet werden konnten, bzw. zum Teil auch in verschiedenen Horizonten mischverfiltert sein können. Zusätzlich stammen sie aus verschiedenen Zeiträumen. Daher dienen diese Informationen nur als Anhaltspunkte und für eine lokale Plausibilitätsüberprüfung. Artesische Bereiche konnten zudem nur in den Bereichen dargestellt werden, die auch durch entsprechende Grundwassergleichen im Projekt bearbeitet wurden.

#### **Artesische Verhältnisse des oberflächennahen, tertiären Grundwasserleiters (T1)**

Beim Verschnitt der Isolinien des oberflächennahen, tertiären Grundwasserleiters mit dem digitalen Geländemodell wird deutlich, was sich schon bei der Erstellung der Flurabstände (Kapitel 4.3.3.2) zeigt. Bis auf wenige Bereiche liegen die artesischen Bereiche in den kleineren Nebentälern. Die berechneten Werte liegen meist im Bereich von 0 m – 5 m über GOK, selten darüber. Aufgrund der Ungenauigkeiten des DGM wurde ein Schwankungsbereich von 5 m ausgewiesen (0 m bis –5 m), den den Übergangsbereich abdecken soll. Bereichsweise, vor allem in Gebieten mit geringer Punktdichte, können diese artesischen Bereiche durch Ungenauigkeiten bei der Interpolation der entsprechenden Grundwassergleichen entstehen. Es ist möglich, dass nicht alle Bereiche, in denen kleinräumig geringfügige artesische Verhältnisse auftreten können, dargestellt wurden. In Bereichen, die schon durch punktuelle Aufschlüsse bekannt sind, kann mit einer gewissen Sicherheit von artesischen Bereichen ausgegangen werden. Die Verhältnisse unterliegen jedoch zeitlichen Schwankungen und können nicht konstant ausgeprägt sein.

Hauptbereiche möglicher artesischer Verhältnisse des oberflächennahen, tertiären Grundwasserleiters (T1) sind in Abb. 76 durch ein rotes Rechteck gekennzeichnet. Zudem können lokal weitere, geringfügige artesische Verhältnisse auftreten. Die errechneten Werte liegen im Bereich weniger Meter

und sind in der Fläche „orange“ dargestellt. Selten sind die Werte lokal erhöht. Zusätzlich sind im Bereich des Ammersees und Starnberger Sees punktuell artesische Verhältnisse bekannt, die aber weder überprüft, noch zwingend dem T1-Aquifer zugeordnet werden konnten.

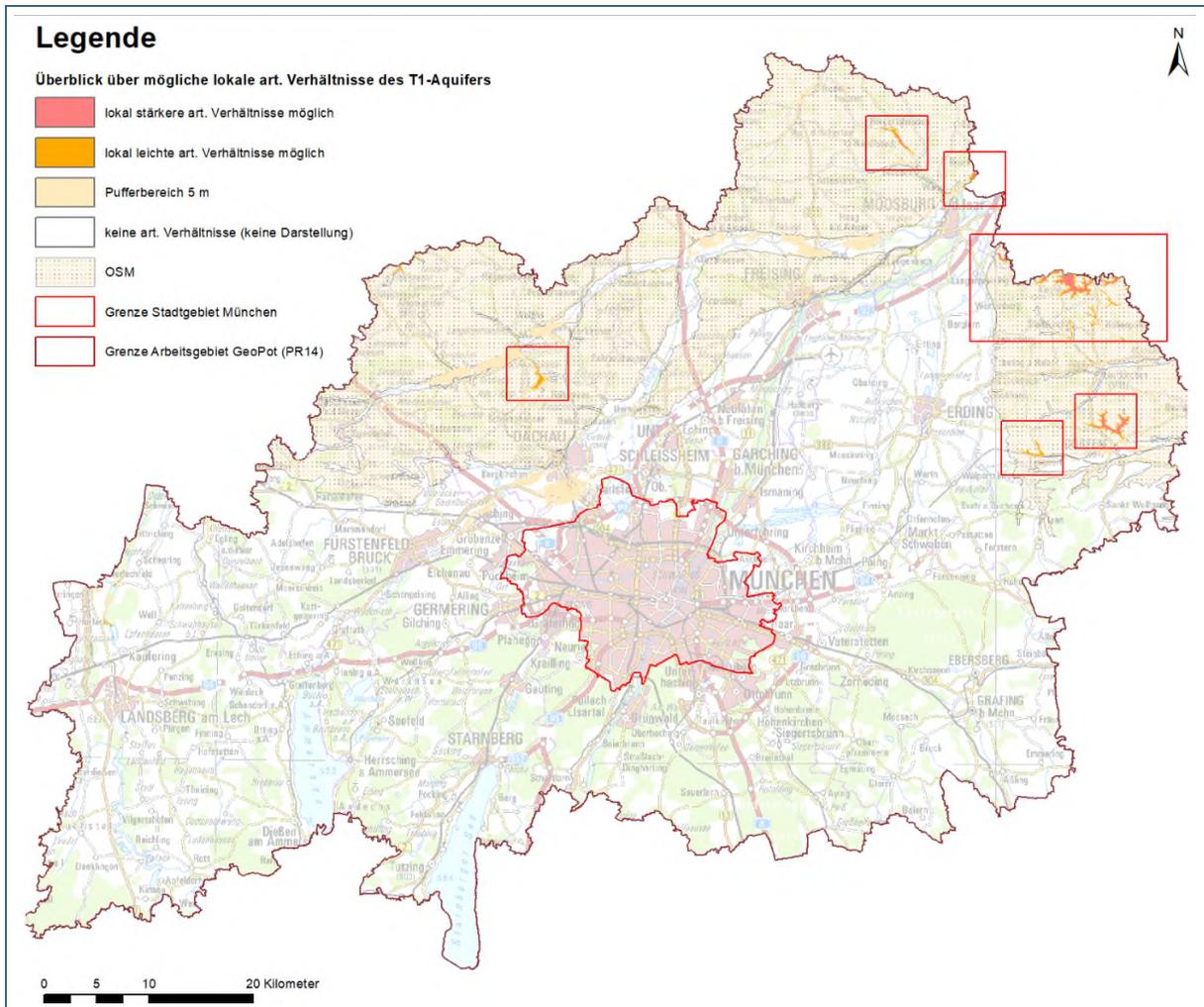


Abb. 76: Darstellung der möglichen artesischen Bereiche des oberflächennahen, tertiären Hauptgrundwasserleiters (T1). Diese wurden durch den Verschnitt der Isolinien (T1) mit dem DGM (1 m) erstellt. Im Bereich der nördlichen Schotterebene ist der T1-Aquifer nicht ausgeprägt und im südlichen Projektgebiet liegen kaum Informationen zur Grundwassersituation vor. Das Stadtgebiet München wurde separat bearbeitet.

### Artesische Verhältnisse der tertiären Grundwasserleiter T2 bis T4

Nachfolgend (Abb. 77, Abb. 78, Abb. 79) werden die Bereiche erläutert, in denen die tieferen tertiären Aquifere, also T2 bis T4, artesische Verhältnisse ausbilden. Es muss erwähnt werden, dass die tieferen Aquifere nicht flächendeckend und durchgehend ausgebildet sind. Die Aquifere sind nur punktuell durch Tiefbohrungen erschlossen. Die Isolinien der Aquifere T2 bis T4, sind trotz zum Teil geringer Messpunktdichte, flächendeckend interpoliert und als „unsicher“ klassifiziert. Daher sollen die nachfolgend dargestellten Bereiche Anhaltspunkte für Bereiche bieten, in denen lokal mit leichten bzw. stärkeren artesischen Verhältnissen gerechnet werden könnte. Wie auch schon beim Verschnitt mit dem T1-Aquifer, wurde eine Pufferzone von 5 m eingearbeitet, um Ungenauigkeiten durch den Verschnitt mit dem DGM miteinzubeziehen.

Die artesischen Bereiche des T2-Aquifers (Abb. 77) konzentrieren sich hauptsächlich auf das Tal der Glonn und Amper. Hier können lokal leichte artesische Verhältnisse ausgeprägt sein. Punktuell sind

auch stärkere Verhältnisse zu beobachten. Der T3- und T4- Grundwasserleiter (Abb. 78, Abb. 79) zeigt im Bereich nordöstlich des Flughafens bis nach Moosburg artesische Tendenzen. In diesem Bereich fehlt der T1-Aquifer vollständig, der T2-Aquifer bildet den oberflächennahen tertiären Grundwasserleiter und interagiert bereichsweise mit dem quartären Grundwasserleiter. Stärkere artesische Verhältnisse können im lokalen Vergleich eher beim T4- als beim T3-Grundwasserleiter auftreten, wobei die beiden Grundwasserleiter bereichsweise auch interagieren können. Die geringe Messpunktdichte, sowie mögliche Interaktionsbereiche zwischen den Grundwasserleitern, muss bei der Darstellung der Grundwassergleichen für den T2- bis T4-Horizont, und somit auch für die artesischen Bereiche, berücksichtigt werden.

Die punktuelle Auswertung der artesischen Verhältnisse bestätigt zum Teil die durchgeführte flächendeckende Analyse. Im Zuge der Auswertung wurden 39 Lokationen überprüft, die punktuell entweder über Archivdaten (BIS-BY) oder bei der Stichtagsmessung 2018 als artesisch gekennzeichnet wurden. Im Endeffekt konnten die Filterstrecken von 29 Objekten den Grundwasserleitern T1 bis T3 zugeordnet werden. Es zeigt sich, dass die bereits ausgewiesenen Bereiche dadurch teilweise bestätigt werden konnten, obwohl die Archivdaten nicht für die Konstruktion der Isolinien verwendet wurde.

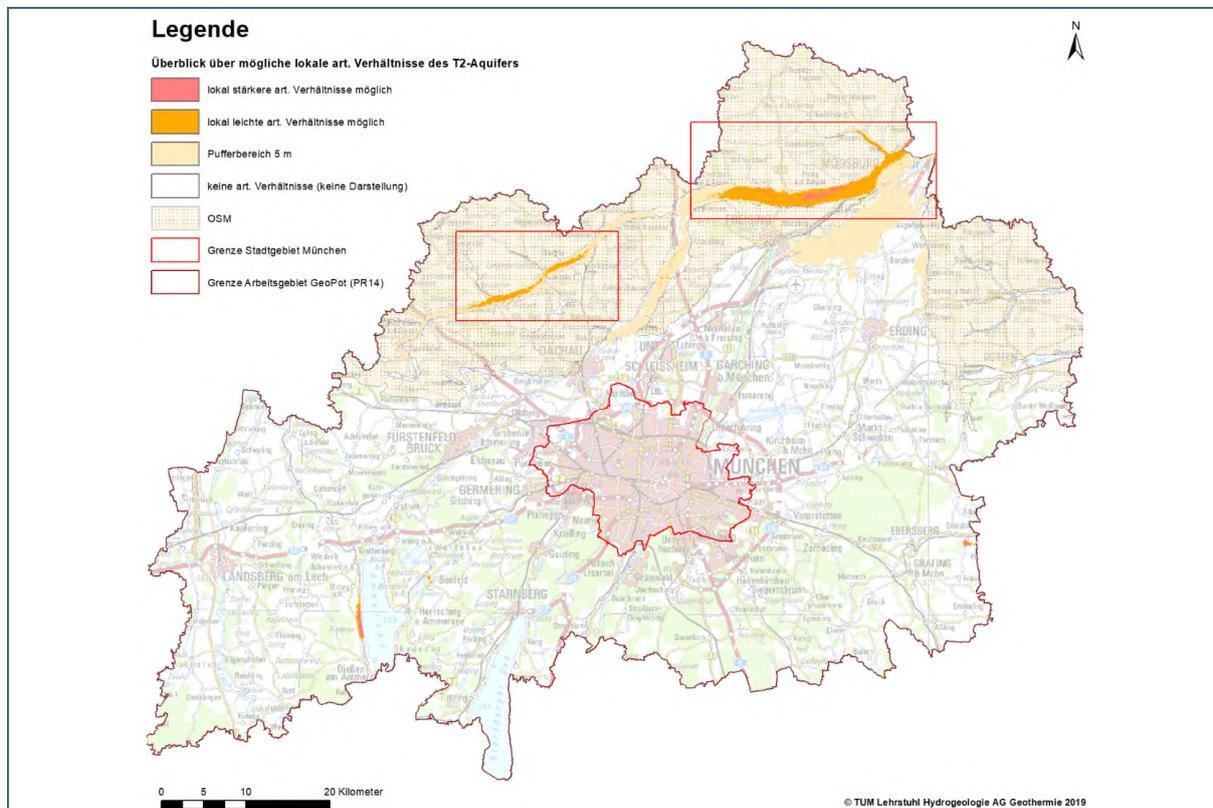


Abb. 77: Mögliche artesische Bereiche des mittleren, tertiären Hauptgrundwasserleiters (T2). Diese wurden durch den Verschnitt der Isolinien mit dem DGM (1 m) erstellt. Mögliche artesische Bereiche sind gelb, orange und rot koloriert.

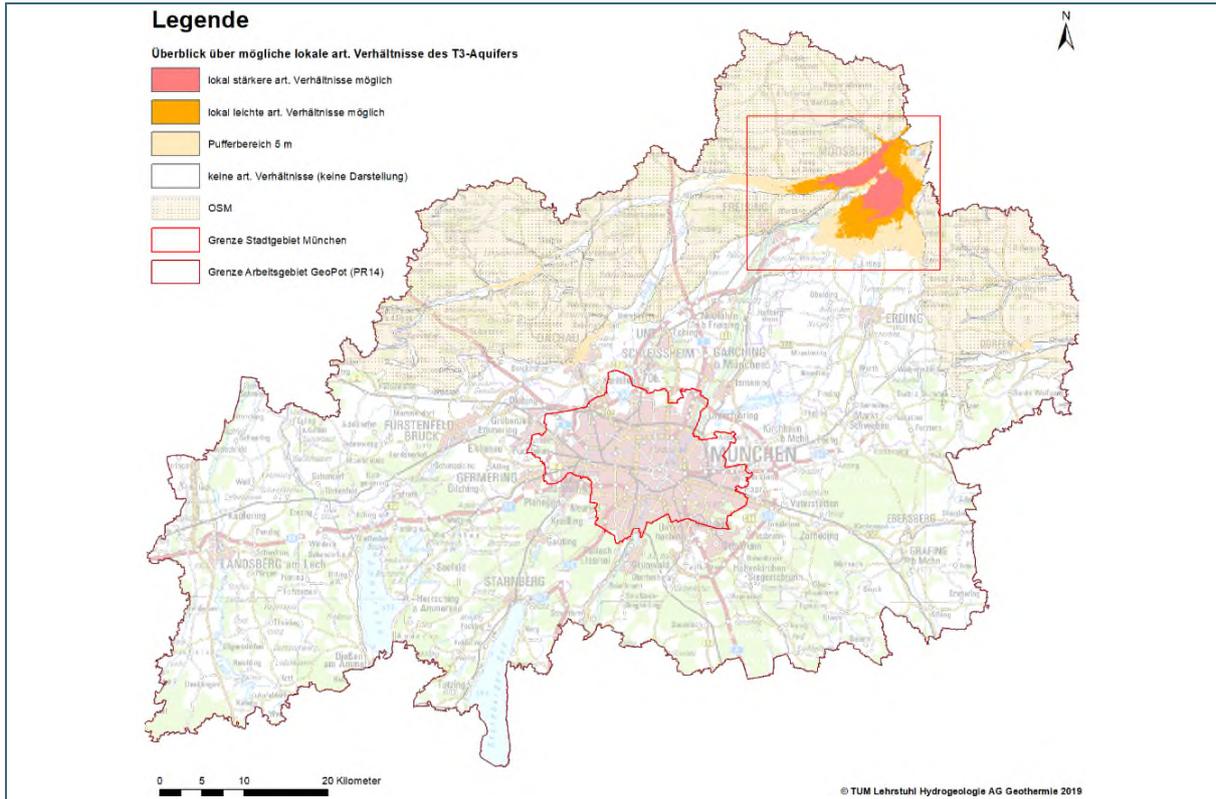


Abb. 78: Mögliche artesische Bereiche des unteren, tertiären Hauptgrundwasserleiters (T3). Diese wurden durch den Verschnitt der Isolinien mit dem DGM (1 m) erstellt. Mögliche artesische Bereiche sind gelb, orange und rot koloriert.

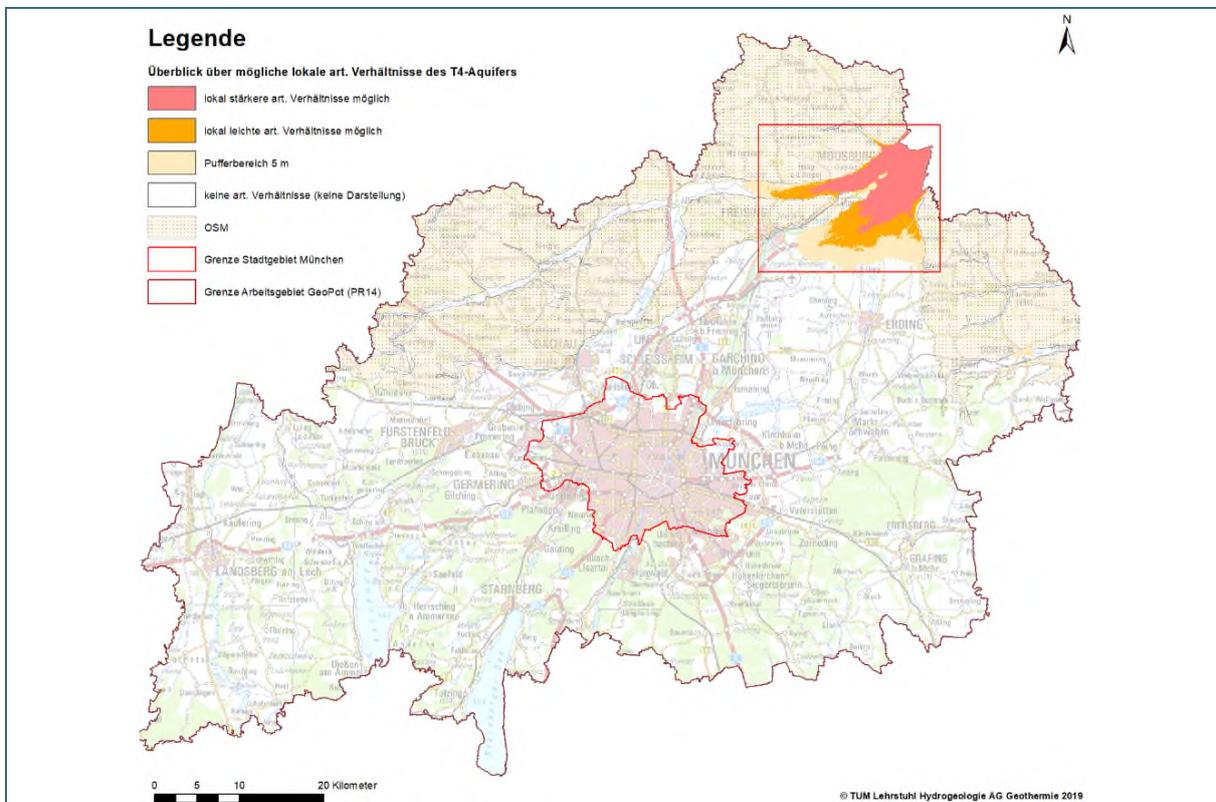


Abb. 79: Mögliche artesische Bereiche des tiefen, tertiären Hauptgrundwasserleiters (T4). Diese wurden durch den Verschnitt der Isolinien mit dem DGM (1 m) erstellt. Mögliche artesische Bereiche sind gelb, orange und rot koloriert.

#### 4.4.3 Grundwasser-Potentialdifferenzen zwischen dem quartärem und den tertiären Grundwasserleitern (T1 bis T4)

##### 4.4.3.1 Allgemeines: Potentialdifferenzen zwischen dem quartärem und den tertiären Grundwasserleitern (T1 bis T4) in Stadtgebiet und Umland

Folgendes Kapitel widmet sich dem Abgleich der Potentialdifferenzen zwischen dem freien, quartären Grundwasserspiegel und den tertiären Grundwasserdruckoberflächen. Zuerst werden die kleinräumigen Unterhorizonte (T1A bis T1D) des oberflächennahen, tertiären Grundwasserspiegels (T1) im Stadtgebiet, danach der Vergleich zwischen freiem, quartärem und gespanntem, tertiären Grundwasserspiegeln im Umland, betrachtet. Das Ziel ist einen Vergleich zwischen dem jeweiligen freien bzw. gespannten Grundwasserspiegel, vor allem im Bereich der Kontaktzonen zwischen Quartär und Tertiär, und eine damit einhergehende Validierung in Bezug auf die Verbreitungsgebiete der Kontaktzonen aus dem 3D-Modell.

Die Datengrundlage bilden die erstellten Grundwassergleichenpläne, von T1A bis T1D im Stadtgebiet, sowie von T1 bis T4 im Umland, als auch die Konstruktion bzw. Messungen des quartären Grundwasserleiters (STM 2014, sowie Messungen im Stadtgebiet von 2018). Generell wurde ein Verschnitt der einzelnen flächenverteilten Grundwassergleichen durchgeführt, um die Differenzen der einzelnen Grundwasser-(Druck)-oberflächen ersichtlich zu machen. Generell können diese Differenzkarten nur in den Bereichen erstellt werden, in denen sowohl aktuelle Messungen im quartären Grundwasserleiter, als auch Messungen im betreffenden tertiären Horizont durchgeführt wurden. Diese Differenzkarten erschließen nicht den gesamten möglichen Ausbreitungsbereich der jeweiligen tertiären Horizonte, liefern aber einen Überblick über die auftretenden Verhältnisse. Insbesondere an den Randbereichen besteht aufgrund der dort zum Teil geringen Anzahl von Messpunkten, eine erhöhte Unsicherheit bei der Darstellung der Potentialdifferenzen.

Der Grundwassergleichenplan der Stichtagsmessung 2014 wurde nur für den Abgleich des großflächigen Bereichs der Schotterebene (Umland) verwendet, da hier keine flächendeckenden Daten für das Quartär aus der Stichtagsmessung 2018 vorliegen. Der Abgleich mit diesen Grundwassergleichen (2014) ist nur bedingt sinnvoll, da der unterschiedliche Zeitraum der Datenaufnahme signifikante Abweichungen bedingen kann. Jedoch sollte der Vergleich generelle, signifikante Aussagen ermöglichen, obwohl Schwankungen in der Grundwasseroberfläche, vor allem im quartären Grundwasserleiter, von zum Teil mehreren cm/dm realistisch sind. Alle großräumigen Ansichten der Potentialdifferenzen sind somit als generelle Übersicht zu sehen und eignen sich nur sehr bedingt für Detailbetrachtungen. Im Stadtgebiet wurde eine flächendeckende Interpolation der Messdaten aus dem quartären Grundwasserleiter von 2018 durchgeführt, diese ist jedoch ebenfalls nur als Näherung zu verstehen, da die Messpunktdichte, im Vergleich zu 2014, wesentlich geringer ist. Jedoch wurde dieser aktuelle Plan, aufgrund der zeitlich besser vergleichbaren Daten, zum Abgleich verwendet.

Mögliche lokale Ungenauigkeiten im Verschnitt der Potentiale können durch die Unsicherheiten aus der Interpolation bedingt sein. Deswegen wurde ein Schwankungsbereich (hellblau; zwischen 0 m und – 1,5 m im Stadtgebiet und –3 m im Umland) eingerichtet, der diese Ungenauigkeiten ein wenig berücksichtigen soll.

Zusätzlich wurden die durch das 3D-Modell erstellen Kontaktbereiche zwischen quartärem Grundwasserleiter und den oberflächennahen tertiären Grundwasserhorizonten zur Interpretation herangezogen. Im Bereich der Kontaktzonen der jeweiligen Grundwasserleiter sollten die Grundwasserstände zumindest ähnlich sein.

#### 4.4.3.2 Stadtgebiet: Potentialdifferenzen des quartären Grundwasserspiegels und der Grundwasserdruckoberfläche T1A (jeweils 2018):

Laut 3D-Modell liegt ein W-E-orientierter, das Stadtzentrum querender Bereich vor, in dem die Flinzsande des T1A-Horizonts in großen Teilen den Schotterkörper des quartären Hauptgrundwasserleiters direkt, d.h. ohne geringleitende Zwischenschicht, unterlagert (siehe Abb. 80, gepunkteter Bereich). Es ist jedoch möglich, dass unterhalb der Flinzsandbereiche lokale geringleitende Schichten ausgeprägt sind, die aber weiträumig meist nicht durchhaltend sind. Großräumig gesehen steht das quartäre Hauptgrundwasserstockwerk, also der Kieskörper, und die zum Teil darauffolgenden Flinzsande bzw. das oberflächennahen Tertiär (T1A) in direktem hydraulischem Kontakt.

Nach dem Verschnitt der Grundwasserdruckoberfläche des T1A-Horizonts mit den interpolierten Messungen des quartären Grundwasserleiters (siehe Abb. 80) zeigt sich, dass in den meisten Bereichen, in denen der T1A-Horizont das Quartär direkt unterlagert sehr ähnliche Grundwasserverhältnisse bestehen (hellblauer, gepunkteter Bereich). D.h. die freie Grundwasseroberfläche des quartären Grundwasserleiters zeigt kaum Unterschiede zu der Grundwasserdruckoberfläche des T1A-Horizonts (Schwankungsbereich von 0 m bis  $-1,5$  m). In den kleinräumig ausgeprägten, in Abb. 80 gelb markierten Bereichen liegt die T1A-Druckoberfläche über der quartären Grundwasseroberfläche. Hier würde das tertiäre Grundwasser in den quartären Grundwasserleiter aufsteigen, jedoch kann lokal eine geringleitende Zwischenschicht ausgebildet sein. In den dunkelblauen markierten Bereichen liegt die freie Grundwasseroberfläche des quartären Grundwasserleiters über der Grundwasserdruckoberfläche des T1A-Horizonts.

#### 4.4.3.3 Stadtgebiet: Potentialdifferenzen des quartären Grundwasserspiegels und der Grundwasserdruckoberfläche T1B und T1BC (jeweils 2018):

Analog zum T1A-Aquifer liegt auch hier ein W-E-orientierter, das nördliche Stadtgebiet querender Bereich vor, wo in diesem Fall der T1B- und T1BC-Grundwasserleiter in großen Teilen den Schotterkörper des quartären Hauptgrundwasserleiters direkt, d.h. ohne geringleitende Zwischenschicht, unterlagert (siehe Abb. 80, schraffierter Bereich).

Nach dem Verschnitt der Grundwasserdruckoberfläche des T1B-Horizonts mit den interpolierten Messungen des quartären Grundwasserleiters zeigt sich, dass in den meisten Bereichen, in denen der T1B-Horizont das Quartär direkt unterlagert, sehr ähnliche Grundwasserverhältnisse bestehen (hellblauer, schraffierter Bereich). Die freie Grundwasseroberfläche des quartären Grundwasserleiters ist weist kaum Unterschiede in den Differenzen zur Grundwasserdruckoberfläche des T1B-Horizonts auf (Schwankungsbereich von 0 m bis  $-1,5$  m). In den kleinräumigen, gelb markierten Bereichen in Abb. 80 liegt die Grundwassersoberfläche des quartären Grundwasserleiters über der Grundwasserdruckoberfläche des T1B-Horizonts, was in diesem Falle jedoch auch an der Unsicherheit in der Interpolation im Bereich des Isartals liegen könnte.

Man erkennt den Übergang von den im Süden blau markierten Bereich in Abb. 80, in dem die Grundwasserdruckoberfläche des T1B-Horizonts noch nicht an die freie Grundwasseroberfläche des quartären Grundwasserleiters heranreicht, zu einem riegelförmigen, hellblauen Bereich in Abb. 80 im Norden, wo die Grundwasserdruckoberfläche des T1B-Horizonts sich der Oberfläche annähert (T1A ist ausgelaufen) und mit dem Quartär in direktem Kontakt steht (schraffierter Bereich). Hier sind die Grundwasserverhältnisse ähnlich ausgeprägt.

Im Bereich des T1BC-Horizonts (NE Stadtgebiet Bereich Großlappen) liegt die freie quartäre Grundwasseroberfläche fast durchgängig über der gespannten Grundwasserdruckoberfläche des tertiären

T1BC-Horizonts. Da in diesem Bereich der T1B- und T1C-Horizont interagieren, ist dies nachvollziehbar. Die tertiäre Grundwasserdruckoberfläche verlagert sich durch die Interaktion etwas weiter nach unten.

#### **4.4.3.4 Stadtgebiet: Potentialdifferenzen des quartären Grundwasserspiegels und der Grundwasserdruckoberfläche T1C und T1CD (jeweils 2018):**

Auch der T1C Horizont bildet einen Bereich aus, der in W-E-Richtung das nördliche Stadtgebiet quert und das quartäre Hauptgrundwasserstockwerk in großen Teilen direkt, d.h. ohne Stauerschicht, unterlagert (siehe Abb. 80, schraffierter Bereich). Im Bereich des nordwestlichen Stadtgebietes besteht, in Bezug auf die Grundwassergleichen, kaum Unterschied zwischen T1C-Horizont (zentral) und T1CD-Horizont (W), was sich im Verschnitt mit den quartären Grundwasserverhältnissen bestätigt. Nach dem Verschnitt der Grundwasserdruckoberfläche des T1C-/T1CD-Horizonts mit den interpolierten Messungen im quartären Grundwasserleiter zeigt sich, dass in den meisten Bereichen, in denen der T1C- bzw. T1CD-Horizont das Quartär direkt unterlagert, sehr ähnliche Grundwasserverhältnisse herrschen (hellblau; schraffierter Bereich in Abb. 80; Schwankungsbereich von 0 m bis -1,5 m). Dieser Trend setzt sich auch in Richtung Osten bis zur Isar (siehe T1BC-Horizont) fort.

Im südlichen Bereich (außerhalb der Schraffur), wo kein direkter Kontakt zwischen dem quartären Hauptgrundwasserleiter und den tertiären T1C- bzw. T1CD-Horizonten besteht, liegen die Potentialdifferenzen im positiven Bereich (dunkelblau markiert, siehe Abb. 80). Das heißt, dass die freie, quartäre Grundwasseroberfläche oberhalb der tertiären Grundwasserdruckoberfläche liegt.

Lediglich in kleinen Bereichen sind die Potentialdifferenzen negativ ausgebildet. Zum einen im Bereich der Isar, wobei hier die Interpolation im Raum des Isartals eine Ungenauigkeit hervorruft. Zum anderen im äußersten Nordwesten. Hier wurden jedoch die Grundwassergleichenpläne des T1C- bzw. T1CD-Horizonts aufgrund mangelnder Stützpunkte ergänzt und interpretiert, was zu einer Abweichung der realen Verhältnisse führen kann. Ebenfalls befindet man sich hier im Randbereich des zum Verschnitt verwendeten Rasterfiles der quartären Messungen von 2018, welches ebenfalls Abweichungen enthalten kann. Diese Umstände pausen sich auf die gerechnete Potentialdifferenz durch und können lokal, wie hier im NW, zu geringfügigen negativen Potentialdifferenzen führen und müssen nicht die realen Begebenheiten abbilden.

#### **4.4.3.5 Stadtgebiet: Potentialdifferenzen des quartären Grundwasserspiegels und der Grundwasserdruckoberfläche T1D und T1CD (jeweils 2018):**

Abschließend erschließt der T1D-Horizont einen kleinen, nordwestlich gelegener Bereich, wo dieser den quartären Grundwasserleiter direkt und ohne Stauer (siehe Abb. 80, schraffierter Bereich). Dieser Bereich wird von den interpolierten Isolinien des T1D-Horizonts nicht erreicht, da dort die Datendichte für eine Darstellung zu gering war.

Jedoch zeigt sich auch im Bereich des T1D-Horizonts, dass sich der unter T1C und T1CD beschriebene Trend fortsetzt. In den meisten südlich gelegenen Bereichen liegt die quartäre Grundwasseroberfläche über dem Druckspiegel von T1D (bzw. T1CD) und die Potentialdifferenzen sind positiv (dunkelblau markiert, siehe Abb. 80) ausgebildet.

Da die Isolinien, bzw. die Grundwasserdruckoberfläche von T1C/T1CD/T1D in Richtung Norden zusammenlaufen und nördlich des Stadtgebietes als gemeinsames T1-Stockwerk ausgebildet sind, ähneln sich die Verhältnisse zueinander (hellblau markierter Bereich in Abb. 80). Man sieht, dass lediglich der bereits beschriebene, nordwestlich gelegene Bereich im T1CD-Horizont, leichte negative Verhältnisse ausbilden kann (gelb markiert, siehe Abb. 80). Das heißt, dass die tertiäre Grundwasserdruckoberfläche des T1CD-Horizonts der quartären Grundwasseroberfläche ggf. leicht überragen

kann. Zudem verhält sich der Bereich im Isartal analog zum Verschnitt des T1C-Horizonts und bildet vermutlich durch Ungenauigkeiten der Rasterdaten leichte negative Potentialdifferenzen aus.

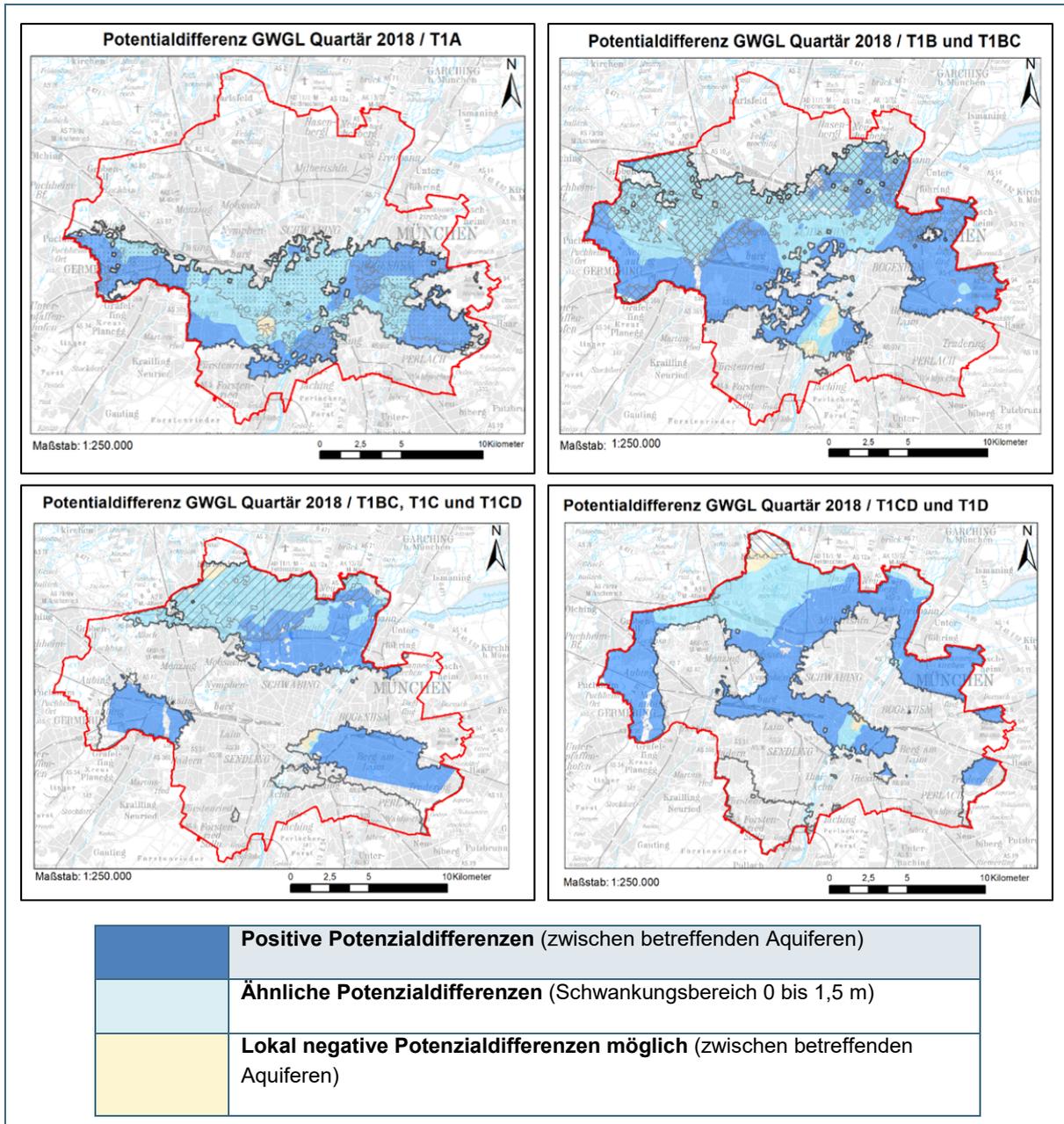


Abb. 80: Verschnitte des freien, quartären Grundwasserspiegels (2018) mit dem Grundwasserdruckspiegel des T1A bis T1D-Horizonts (2018). Positive Potentialdifferenzen sind dunkelblau, ähnliche Grundwasserverhältnisse hellblau und negative Potentialdifferenzen gelb dargestellt. Das Verbreitungsgebiet der Horizonte ist schwarz umrandet, der Interaktionsbereich zwischen den Horizonten und dem Quartär schraffiert dargestellt.

#### 4.4.3.6 Umland: Potentialdifferenzen des quartären Grundwasserspiegels (2014) und der Grundwasserdruckoberfläche T1 (2018):

Der Verschnitt der Grundwassergleichen des quartären Grundwasserleiters aus dem Jahr 2014 im Bereich der Münchner Schotterebene (MSE) mit der Grundwasserdruckoberfläche des tertiären T1-Stockwerks aus dem Jahr 2018 ist räumlich stark eingegrenzt (siehe Abb. 81). Zum einen kann der Verschnitt nur in Bereichen durchgeführt werden, in denen der quartäre Grundwasserleiter ausgeprägt ist. Des Weiteren ist der tertiäre T1-Grundwasserleiter im nördlichen Bereich der Schotterebene (Dreieck Neufahrn – Erding – Moosburg a. d. Isar) nicht ausgebildet. Im südlichen Teil des Arbeitsgebietes ist, aufgrund zu geringer Messpunktdichte, keine flächendeckende Darstellung der Grundwassergleichen für den quartären Grundwasserleiter und/oder den tertiären T1-Horizont verfügbar. Zudem wurde das Stadtgebiet München detailliert separat bearbeitet, was zu einem weiteren ausgesparten Bereich führt. Somit lassen sich in diesem Arbeitsschritt lediglich die Verhältnisse rund um das Stadtgebiet München darstellen. Hier liegen zumeist positive Potentialdifferenzen (dunkelblau markiert in Abb. 81) vor, d.h. die freie, quartäre Grundwasseroberfläche liegt oberhalb der gespannten, tertiären Grundwasserdruckoberfläche (T1). Lediglich im nördlichen Bereich kann es zu einer Annäherung der beiden Grundwasserverhältnisse kommen. Hier wurde ein Schwankungsbereich von 3 m (0 m bis –3 m) eingearbeitet, um den bereits erwähnten Ungenauigkeiten bei den Interpolationen und Verschnitten Rechnung zu tragen. Die quartäre Schotterauflage läuft in Richtung Norden aus und die gespannten Grundwasserverhältnisse des oberflächennahen Tertiärs können sich der quartären Grundwasseroberfläche annähern (hellblau markierter Bereich in Abb. 81). Eine lokale Interaktion dieser beiden Grundwasserleiter ist möglich.

#### 4.4.3.7 Umland: Potentialdifferenzen des quartären Grundwasserspiegels (2014) und der Grundwasserdruckoberfläche T2 bis T4 (2018):

Die sich ergebenden Differenz aus dem Verschnitt der Grundwassergleichen des quartären Grundwasserleiters aus dem Jahr 2014 im Bereich der Münchner Schotterebene (MSE) mit dem Grundwasserdruckspiegel des tertiären T2-, T3- und T4-Stockwerks aus dem Jahr 2018 sind in Abb. 81 dargestellt. Insgesamt können **vier Bereiche** identifiziert werden, in denen die Druckoberfläche des T2- bis T4-Aquifers auf einem ähnlichen Niveau (hellblau markiert in Abb. 81) bzw. über der freien Grundwasseroberfläche des quartären Grundwasserleiters liegt (grau markiert). Bereiche, in denen die Grundwasserdruckoberfläche des jeweiligen Aquifers unterhalb des freien Grundwasserspiegels des quartären Grundwasserleiters liegt (positive Potenzialdifferenzen), sind dunkelblau markiert (Abb. 81) Details zu den Bereichen 1 bis 4 in Bezug auf die Aquifere T2 bis T4 sind nachfolgend zusammengefasst.

**Bereich 1 (Isar Stadtgebiet)**, der nur den T2-Aquifer betrifft, lässt sich wie folgt beschreiben: Die Isar hat sich zum Teil tief in das Tertiär eingeschnitten. Die Grundwasserfließrichtung im quartären Grundwasserleiter ist im zentralen Stadtgebiet in Richtung des Vorfluters Isar gerichtet. Daher verringert sich die Differenz zwischen der freien, quartären und der gespannten Grundwasserdruckoberfläche. Besonders in niedrig gelegenen Bereichen (z. B. Au, Englischer Garten) können die gespannten Verhältnisse des T2-Horizonts im Bereich der freien Grundwasseroberfläche des quartären Hauptgrundwasserleiters liegen (hellblau markiert, Schwankungsbereich von 3 m).

**Bereich 2 (Unter- und Oberschleißheim)**, der ebenfalls lediglich den T2-Aquifer anspricht, stellt sich wie folgt dar: In diesem Bereich kann es zu einer Annäherung der freien Grundwasseroberfläche des quartären Hauptgrundwasserleiters und der gespannten Grundwasserdruckoberfläche des T2-Horizonts kommen (hellblau markiert in Abb. 81). Jedoch liegen die Differenzen hier in einem sehr geringen Bereich. Dies kann einschränkend auch das Resultat der zum Teil geringen Datendichte, sowie der anschließenden Interpolation und Verschneidung der verschiedenen Flächen sein. Zudem ist bekannt, dass sich der T2-Grundwasserleiter im Norden der Stadt München, durch das Abfallen und

Auskeilen der Schotterebene, der Oberfläche annähert, was im Raum Freising zu einem bereichsweisen Aufstieg von Grundwasser aus dem T2-Stockwerk in das Quartär führen kann (siehe: Bereich 4). Ggf. ist dieser Umstand auch im Bereich Unter- und Oberschleißheim die Ursache der geringen Potentialdifferenzen.

**Bereich 3 (Großraum Dachau)**, betrifft sowohl den T2- als auch den T3-Aquifer. Am Randbereich der Schotterebene, im Raum Dachau und nördlich davon, treten ebenfalls äußerst geringe Potentialdifferenzen (Schwankungsbereich 3 m, hellblau markiert in Abb. 81) zwischen der freien Grundwasseroberfläche und der gespannten Grundwasserdruckoberfläche des T2- und des T3-Horizonts auf. In diesem Bereich gibt es jedoch einen direkten Übergang vom quartären Schotterkörper zum Tertiären Hügelland, was viele Unsicherheiten in der Konstruktion der Grundwassergleichen, den Übergängen der einzelnen Horizonte und ihrer Interaktion mit sich bringt. Zudem liegen die Grundwasserdruckoberflächen des T2- und des T3-Horizonts in diesem Bereich auf einem sehr ähnlichen Niveau, was auf einen möglichen Interaktionsbereich schließen lässt und zu einem ähnlichen Bild der Potentialdifferenzen führt. Weiter in Richtung Norden wird der Abstand zwischen den T2- und T3-Druckpotentialen wieder größer. Ein Zustrom in Richtung Schotterebene aus dem Tertiären Hügelland, sowie eine allgemein geringen Datendichte in diesem Bereich, können diese geringen Differenzen ebenfalls beeinflussen.

**Bereich 4 (Großraum Freising / Moosburg)** erschließt, anders als die Bereiche 1 bis 3, sowohl den T2-, T3- als auch den T4-Aquifer. Hier ist lokal mit gespannten Grundwasserverhältnissen im T2-, T3- und T4-Aquifer zu rechnen, welche die freie quartäre Grundwasseroberfläche überragen können. Die Potentialdifferenzen sind in diesem Fall meist gering (hellblau markiert in Abb. 81, Schwankungsbereich 3 m) bis negativ ausgeprägt (grau in Abb. 81). Im markierten Bereich liegen nur in den Randbereichen Messpunkte vor. Ob daher die flächenhafte Ausbreitung die reale Ausprägung abbildet, ist unsicher, da die tieferen, grundwasserführenden Horizonte nicht durchgehend ausgeprägt sind.

Da der T2-Grundwasserleiter im Norden der Schotterebene direkt das Quartär unterlagert, kann es im Bereich von hydraulischen Fenstern (fehlender Geringleiter zwischen quartärem Hauptgrundwasserleiter und Tertiär) zu einem bereichsweisen Aufstieg von Grundwasser vom T2-Stockwerk in das Quartär kommen, was durch diese Potentialdifferenzen bekräftigt wird.

Die Grundwasserdruckoberflächen des T2- und des T3-Horizonts liegen in diesem Bereich zudem auf ähnlichem Niveau, was auf einen möglichen Interaktionsbereich schließen lässt und zu einem ähnlichen Bild der Potentialdifferenzen führt. Zwei Lokationen mit stark gespannten, bzw. artesischen Grundwasserverhältnissen südlich Moosburg, sowie die zum Teil wohl stark anthropogen beeinflussten Grundwasserverhältnisse im Raum Freising, bedingen die in diesem Bereich ausgeprägten Grundwasserverhältnisse im T3-Aquifer.

Die Messpunktdichte für den T4-Horizont ist generell sehr gering, was zu relativ großen Unsicherheiten bei der Konstruktion der Grundwassergleichen, und somit auch für den Verschnitt der Potentiale, führen kann. Die negativen Potentialdifferenzen sollten daher als sehr unsicher angesehen werden. Die generelle Ausprägung des T4-Horizonts ist relativ unbekannt und eine flächendeckende Ausbreitung eher unwahrscheinlich.

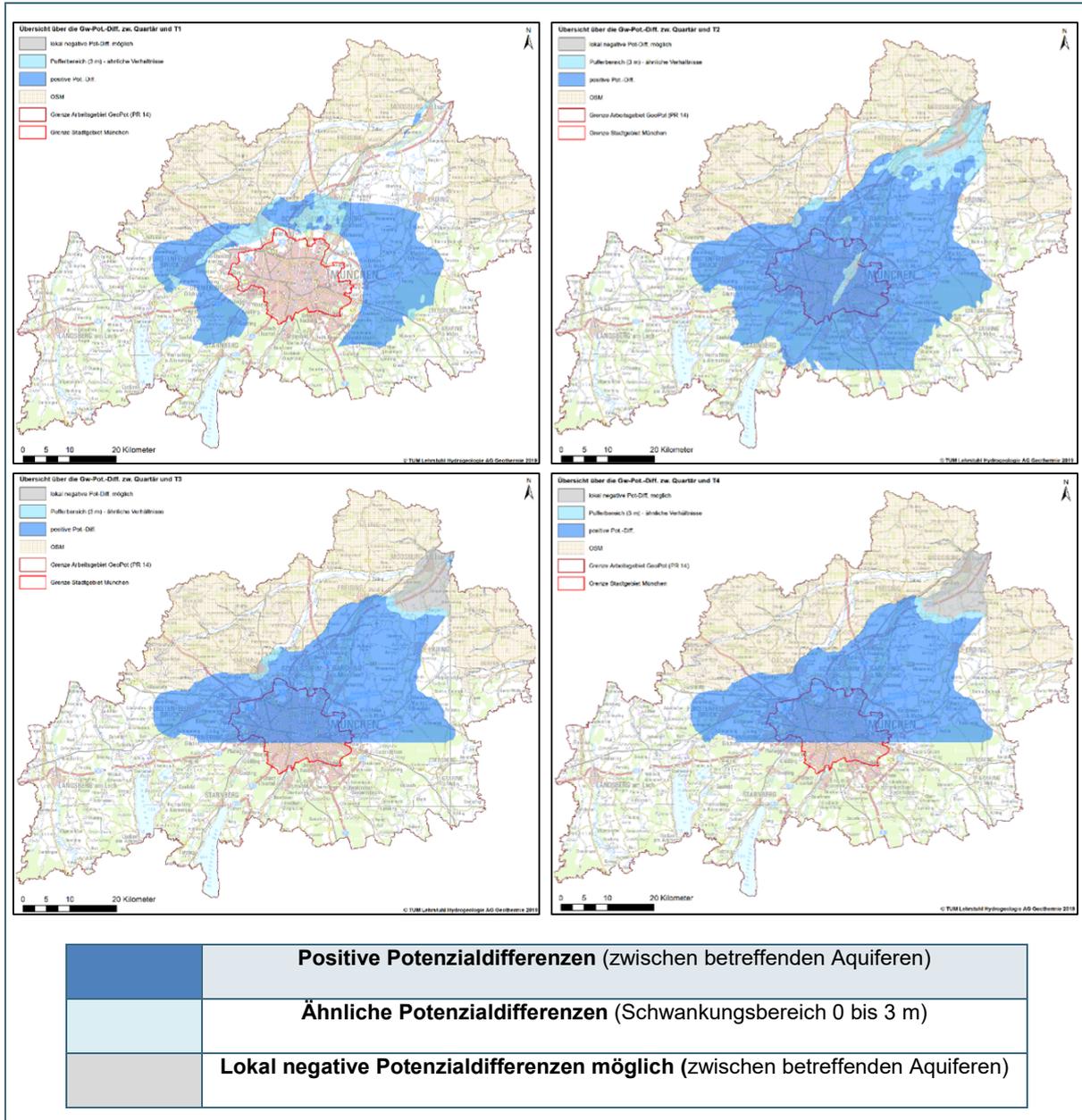


Abb. 81: Verschnitt des freien Grundwasserspiegels des Quartärs (STM 2014) mit dem Grundwasserdruckspiegel des oberflächennahen, tertiären T1-Aquifers bis zum tiefen tertiären Aquifer T4 (STM 2018). Bereiche, in denen die Grundwasserleiter nicht ausgeprägt sind oder nicht konstruiert werden konnten, sind ausgespart. Das Stadtgebiet München wurde beim T1-Aquifer separat bearbeitet.

#### 4.4.4 Grundwasser-Potentialdifferenzen innerhalb der OSM (T1 bis T4 von 2018)

##### 4.4.4.1 Allgemeines: Potentialdifferenzen der tertiären Grundwasserdruckoberflächen im Stadtgebiet und Umland

Folgendes Kapitel widmet sich dem Abgleich und den Verhältnissen der tertiären Grundwasserdruckoberflächen untereinander. Zuerst werden die kleinräumigen Unterhorizonte (T1A-T1D) der oberflächennahen tertiären Grundwasserdruckoberfläche (T1) im Stadtgebiet, danach der Vergleich der gespannten tertiären Grundwasserdruckoberflächen im Umland, betrachtet. Das Ziel hierfür ist wiederum Potentialdifferenzen darzustellen und darüber Interaktions- oder Kontaktbereiche abzuschätzen.

Die Datengrundlage bilden die erstellten Grundwassergleichenpläne der tertiären Horizonte, T1A-T1D im Stadtgebiet, sowie die Übersichtspläne T1 – T4 im Umland aus dem Jahr 2018 (siehe Kapitel 4.3.3). Die Darstellung der Druckdifferenzen können nur in den Bereichen erstellt werden, wo aktuelle Messungen im betreffenden tertiären Horizont durchgeführt und Grundwassergleichen erstellt wurden. Daher erschließen die konstruierten Differenzen nicht den gesamten, möglichen Ausbreitungsbereich der jeweiligen tertiären Horizonte, geben aber einen Überblick über die auftretenden Verhältnisse.

Der Abgleich (Verschnitt) wurde im Stadtgebiet mit den interpretierten und erweiterten Grundwassergleichenplänen des T1A bis T1D Unterhorizonts durchgeführt. In den Randbereichen der Darstellungen besteht, aufgrund der zum Teil geringen Anzahl von Messpunkten, eine erhöhte Aussageunsicherheit. Mögliche Ungenauigkeiten im Verschnitt können verschiedene Ursachen haben. Zum Beispiel haben die zum Verschnitt benötigten Rasterdaten der Grundwassergleichen bereits durch Ihre Interpolationsart und Datengrundlage eine gewisse Unsicherheit. Werden diese Raster miteinander verschnitten, erhöhen sich die Unsicherheiten im Endprodukt, der Potentialdifferenzen. Deswegen wurde ein "Schwankungsbereich" (in Abbildungen hellblau markiert; zwischen 0 m und –2,5 m im Stadtgebiet und –3 m im Umland) eingeführt, der diese Ungenauigkeiten abbilden soll.

##### 4.4.4.2 Stadtgebiet: Potentialdifferenzen der Grundwasserdruckoberflächen von T1A/T1B, T1A/T1C und T1A/T1D

Generell zeigt sich, dass zumeist nur im Isartal lokal negative Potentialdifferenzen auftreten können, was jedoch in den meisten Fällen mit der flächigen Interpolation der Unterhorizonte über das Isartal erklärbar scheint. Des Weiteren können sich lokal kleinere Bereiche negativer Potentialdifferenzen (gelb markiert in Abb. 82) ausbilden, vgl. T1A / T1B im östlichen Stadtgebiet, was jedoch an der Interpretation der Isolinien in diesem Bereich, sowie den Interaktionsbereichen zwischen T1A und T1B, liegen kann. Zwischen T1A und T1B kann es bereichsweise zu der Ausbildung ähnlicher Verhältnisse (hellblau markiert in Abb. 82) kommen, was zu geringen Potentialdifferenzen (Schwankungsbereich 2,5 m) führt. Zumeist jedoch bedingt der Verschnitt zwischen den Unterhorizonten positive Potentialdifferenzen (dunkelblau), sprich die Grundwasserdruckoberfläche von T1B bis T1D liegt unterhalb dem von T1A (Abb. 82).

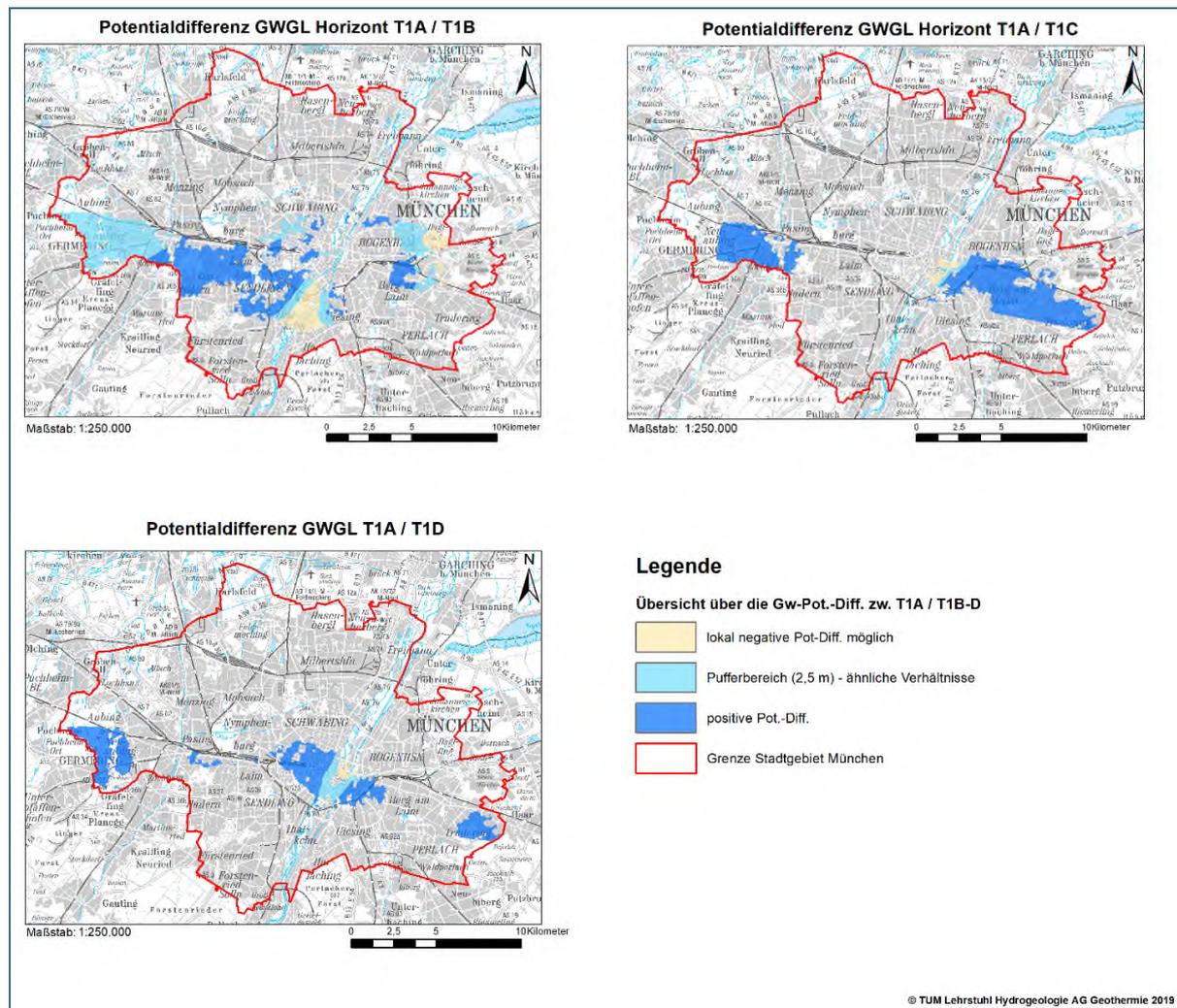


Abb. 82: Lokaler Verschnitt der Grundwasserdruckspiegel des T1A- mit dem T1B / T1C / T1D -Horizont und die sich daraus ergebenden Potentialdifferenzen

#### 4.4.4.3 Stadtgebiet: Potentialdifferenzen der Grundwasserdruckoberflächen von T1B/T1C und T1B/T1D

Beim Vergleich von T1B zu T1C zeigt sich, dass zumeist die Druckoberfläche des T1B- über dem des T1C-Horizonts liegt (dunkelblau markiert in Abb. 83 oben). In wenigen Bereichen bilden die Grundwasserdruckoberflächen von T1B und T1C ein ähnliches Niveau aus, was sich durch geringe Potentialdifferenzen (hellblau markiert in Abb. 83 oben, Schwankungsbereich 2,5 m), vor allem im nördlichen Stadtgebiet nahe des Interaktionsbereichs, zeigt. Negative Potentialdifferenzen (gelb markiert) sind nicht ausgebildet. Beim Vergleich von T1B zu T1D zeigt sich ein ähnliches Bild. Die Druckoberfläche von T1B liegt zumeist oberhalb von T1D (dunkelblau markiert in Abb. 83 oben). In kleinräumigen Bereichen nähern sich die Druckoberflächen an (hellblau markiert in Abb. 83 oben, Schwankungsbereich 2,5 m) und nur kleinräumig (gelb markiert; Altstadtbereich) liegt der T1D-Grundwasserdruckoberfläche über dem von T1B. Grund hierfür könnte die großräumige Grundwasserabsenkung des T1B-Horizonts im Bereich des Stachusbauwerks sein (Abb. 83 oben).

#### 4.4.4.4 Stadtgebiet: Potentialdifferenzen der Grundwasserdruckoberflächen von T1BC/T1D und T1C/T1D

Beim Vergleich der Grundwasserdruckoberflächen von T1C bzw. T1BC zu T1D ist die Situation ähnlich zur Situation von T1B. Die Grundwasserdruckoberfläche von T1BC und T1C liegen zumeist über dem von T1D (dunkelblaue Bereiche, Abb. 83 unten) und nur kleinräumig nähern sich die Grundwasserdruckspiegel an (hellblau; Schwankungsbereich 2,5 m). Diese Annäherung erfolgt in Richtung der Interaktionszonen von T1C mit T1D (T1CD im NE/NW) (Abb. 83 unten).

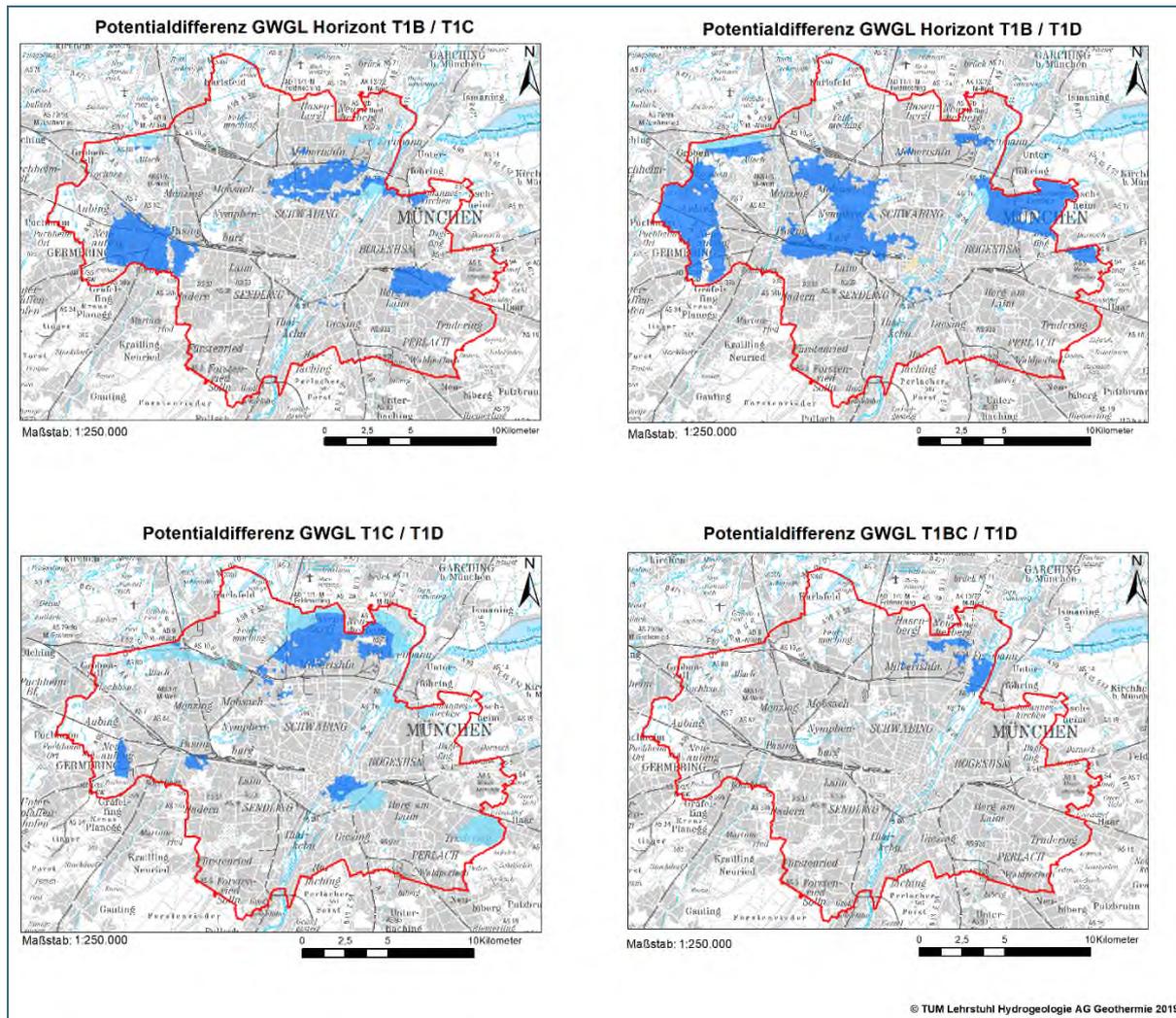


Abb. 83: Lokaler Verschnitt der Grundwasserdruckspiegel des T1B- mit dem T1C- und T1D- Horizont (oben links und rechts). Verschnitt des T1BC -Mischhorizonts mit dem T1D-Horizont (unten rechts) und dem T1C- mit dem T1D-Horizont (unten links). Positive Potentialdifferenzen sind dunkelblau, ähnliche Grundwasserverhältnisse hellblau und negative Potentialdifferenzen gelb dargestellt.

#### 4.4.4.5 Umland: Potentialdifferenzen der Grundwasserdruckoberflächen von T1/T2, T1/T3 und T1/T4

Der tertiäre T1-Grundwasserleiter ist im nördlichen Bereich der Schotterebene (Dreieck Neufahrn – Erding – Moosburg a. d. Isar) nicht ausgebildet, was zu einer Aussparung dieses Bereiches bei der Darstellung der Potentialdifferenzen führt. Im südlichen Teil des Arbeitsgebietes ist, aufgrund mangelnder Messpunktdichte, kein flächendeckender Grundwassergleichenplan des tertiären T1-Horizonts, sowie auch des T2- bis T4-Horizonts, verfügbar. Zudem wurde das Stadtgebiet München separat bearbeitet, was zu einem weiteren Bereich führt, in der keine Potentialdifferenz abgebildet ist.

Der Verschnitt der Grundwasserdruckoberfläche des T1- mit dem T2-Horizont (Abb. 84 a) zeigt, dass in den meisten Bereichen die Potentialdifferenzen positiv (dunkelblau markiert in Abb. 84 a) ausgeprägt sind und die Grundwasserdruckoberfläche des T2- Horizonts unter dem des T1-Horizonts liegt. In den Flusstälern der Glonn und der Amper, bis in Richtung Moosburg a. d. Isar, kommt es sowohl zu Annäherungen der Grundwasserdruckoberfläche (hellblau markiert in Abb. 84 a, Schwankungsbereich 3 m), als auch zu möglichen, negativen Potentialdifferenzen (grau). Der T1-Horizont steht in diesen Bereichen zum Teil in hydraulischem Kontakt zur lokalen Vorflut, was zu einer Abnahme der gespannten Grundwasserverhältnisse führen kann. Im Gegensatz dazu interagiert der mittlere, tertiäre Grundwasserleiter (T2) wohl nur in geringem Ausmaß mit den Vorflutern, was die negativen Potentialdifferenzen hervorrufen kann. In Richtung Moosburg übernimmt der T2-Horizont die Rolle des oberflächennahen, tertiären Grundwasserleiters, was im Randbereich zu Moosburg ebenfalls zu beschriebenen Verhältnissen beitragen kann.

Abb. 84 (b) zeigt, dass nach dem Verschnitt zwischen der Grundwasserdruckoberfläche des T1- mit dem T3-Horizont die meisten Bereiche positive Potentialdifferenzen (dunkelblau markiert) aufweisen und die Grundwasserdruckoberfläche des T3- Horizonts unter dem des T1-Horizont liegt. Lediglich in den Flusstälern der Glonn und der Amper kommt es lokal sowohl zu Annäherungen der Grundwasserdruckoberfläche (hellblau markiert in Abb. 84 b, Schwankungsbereich 3 m), als auch, in Richtung Moosburg, zu möglichen, negativen Potentialdifferenzen (grau). Der T1-Horizont steht in diesen Bereichen zum Teil in hydraulischem Kontakt zur lokalen Vorflut, was zu einer Abnahme der gespannten Grundwasserverhältnisse führen kann. Im Gegensatz dazu interagiert der tiefe, tertiäre Grundwasserleiter (T3) nicht mit den Vorflutern, was die negativen Potentialdifferenzen hervorrufen kann. Lokal können im Raum Dachau ebenfalls geringe (hellblau markiert) bis negative (grau markiert) Potentialdifferenzen auftreten. Die Gründe hierfür können sowohl beim unsicheren Verlauf der Isolinien des T1-Horizonts am Rande des Tertiären Hügellandes, als auch bei der geringen Messpunktdichte des T3-Horizonts, liegen.

Abb. 84 (c) zeigt, dass nach dem Verschnitt der Grundwasserdruckoberfläche des T1- mit dem T4-Horizont die meisten Bereiche positive Potentialdifferenzen (dunkelblau markiert in Abb. 84 c) aufweisen und die Grundwasserdruckoberfläche des T4-Horizonts unter dem des T1-Horizont liegt. In den Flusstälern der Glonn und der Amper kommt es nicht mehr zur Annäherungen der Grundwasserdruckoberfläche (hellblau markiert, Schwankungsbereich 3 m), lediglich Richtung Moosburg sind diese, wie auch mögliche, negative Potentialdifferenzen (grau markiert) ausgeprägt. In diesem Bereich sind evtl. hydraulische Kontakte zwischen dem T3- und T4-Grundwasserleiter vorhanden, was zu einem ähnlichen Bild, in Bezug auf den Verschnitt mit der Grundwasserdruckoberfläche des T1-Horizonts, führen kann.

#### 4.4.4.6 Umland: Potentialdifferenzen der Grundwasserdruckoberflächen von T2/T3 und T2/T4

Wie auch im Vergleich mit dem T1-Horizonts, überragt die Grundwasserdruckoberfläche des T3-, als auch die des T4-Horizonts, die T2-Druckoberfläche im Raum Moosburg. Der T2-Grundwasserleiter fungiert im nördlichen Bereich der Schotterebene als oberflächennaher, tertiärer Grundwasserleiter (T1 ist nicht existent) und ist durch den lokalen Kontakt zum quartären Grundwasserleiter wohl bereichsweise nicht in vergleichbarer Weise gespannt wie im übrigen Gebiet. Dies mag einer der Gründe für die lokalen, negativen Potentialdifferenzen (grau markiert) sein (Abb. 84 (d, e)). Neben dem Bereich um Moosburg liegt die Grundwasserdruckoberfläche des T3-Horizonts im Raum Dachau oberhalb der Grundwasserdruckoberfläche des T2-Horizonts. Bereichsweise sind artesischen Verhältnisse in diesem Bereich bekannt, was die hohe Druckoberfläche erklären könnte. Zusätzlich sind die generell geringe Datenlage und der damit verbundene, relativ unruhige Verlauf der T3-Isolinien in diesem

Bereich ein weiterer Faktor (Abb. 84 (d, e)). Bereiche ähnlicher Grundwasserdruckoberflächen (hellblau markiert in Abb. 84; Schwankungsbereich 3 m) gibt es nur im Übergangsbereich zu den negativen Potentialdifferenzen.

#### 4.4.4.7 Umland: Potentialdifferenzen der Grundwasserdruckoberflächen von T3/T4

Generell zeigt sich im gesamten nordöstlichen Arbeitsgebiet, dass sich die Grundwasserdruckoberflächen von T3 und T4 annähern, bzw. auf ähnlichem Niveau liegen, oder die T4- die T3-Druckoberfläche geringfügig überragt (Freising). Die bereichsweise ähnlichen (hellblau markiert in Abb. 84 f) und negativen (grau markiert) Potentialdifferenzen zwischen dem T3- und T4-Horizont beruhen höchstwahrscheinlich auf der großflächigen Absenkung der T3-Grundwasserdruckoberfläche im Großraum Freising, während sich die Grundwasserdruckoberfläche des T4-Horizonts relativ unbeeinflusst und gleichmäßig von S nach N fortsetzt. Im östlichen Bereich gibt es zudem größere Bereiche, in denen die Druckoberflächen von T3 und T4 auf ähnlichem Niveau liegen (hellblau markiert in Abb. 84 f; Schwankungsbereich 3 m). Dies kann sowohl durch die Interpolation bedingt, oder auf einen möglichen Interaktionsbereich hinweisen. Aufgrund der geringen Datengrundlage in diesem Gebiet, kann die Situation nicht abschließend belegt werden. In allen weiteren Bereichen sind die Potentialdifferenzen positiv ausgeprägt, sprich die Grundwasserdruckoberfläche des T3-Horizonts liegt oberhalb der des T4-Grundwassereiters (Abb. 84 (f)).

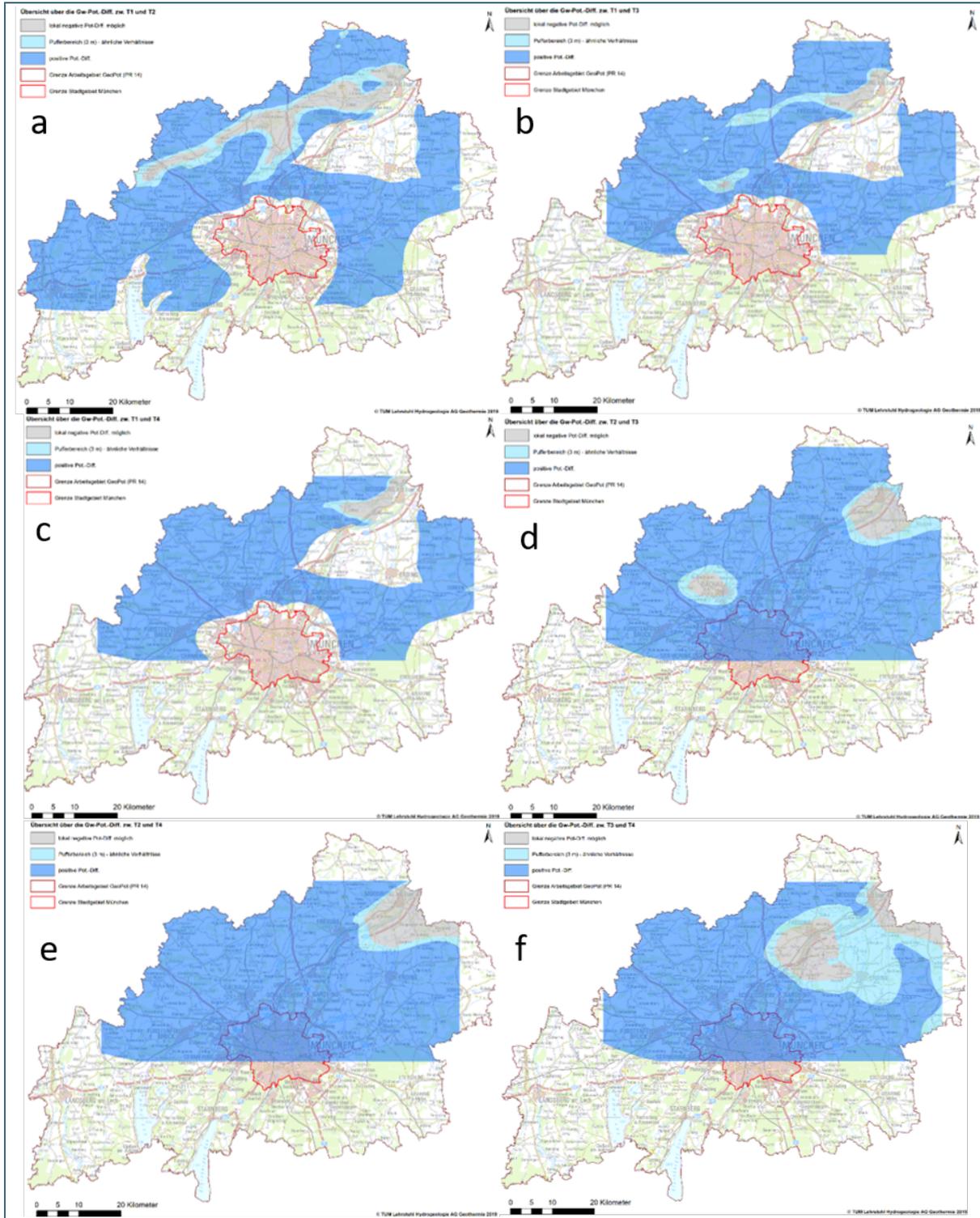


Abb. 84: Verschnitt der Grundwasserdruckspiegel des T1-- mit dem T2- bis T4-Aquifer und die sich daraus ergebenden Potentialdifferenzen (a, b, c). Verschnitt der Grundwasserdruckspiegel des T2-- mit dem T3- und T4-Aquifer und die sich daraus ergebenden Potentialdifferenzen (d, e). Verschnitt der Grundwasserdruckspiegel des T3-- mit dem T4-Aquifer und die sich daraus ergebenden Potentialdifferenzen (f). Bereiche, in denen die Grundwasserleiter nicht ausgeprägt sind oder nicht konstruiert werden konnten, sind ausgespart.

## 4.5 Hydraulische Durchlässigkeit der Grundwasserleiter der Oberen Süßwassermolasse

Das folgende Kapitel beschreibt die Ergebnisse zur Abschätzung der hydraulischen Durchlässigkeit der oberflächennahen tertiären Grundwasserleiter der OSM und basiert auf den Ergebnissen die im Projekt GeoPot erzielt wurden.

### 4.5.1 Überblick und bisheriger Kenntnisstand

Der hydraulische Durchlässigkeitsbeiwert ist ein wichtiger Parameter um das Nutzungspotential eines Grundwasserleiters abschätzen zu können. Da der hydraulische Durchlässigkeitsbeiwert ( $k_f$ -Wert) von kleinräumigen Ablagerungsprozessen abhängig ist, können innerhalb eines Grundwasserleiters starke Heterogenitäten auftreten. Aufgrund der in der Regel begrenzten räumlichen Abhängigkeit der hydraulischen Durchlässigkeit wäre eine hohe räumliche Punktdichte von Durchlässigkeitsbeiwerten von großer Bedeutung.

Um eine qualitative Aussage über die räumliche Verteilung des  $k_f$ -Wertes im Projektgebiet zu geben, wurden die Arbeiten mit der bereits erläuterten Methodik (siehe Kapitel 3.7.2) für die Grundwasserleiter der OSM fortgesetzt. Hierfür wurde archivierte Berichte zu Pumpversuchsauswertungen recherchiert, systematisiert und nach einheitlicher Methodik neu ausgewertet und bewertet. Bei der Auswertung der Pumpversuche wurden stets die drei im Projektgebiet befindlichen hydrogeologischen Großeinheiten, fluviatile quartäre Sedimente, Moränen (siehe jeweils Kapitel 3.7.3) und die Obere Süßwassermolasse, berücksichtigt.

Zur Beschreibung der hydraulischen Durchlässigkeit wurden in den Grundwasserleitern der Oberen Süßwassermolasse größere Studien durchgeführt.

Für eine Studie im Großraum Augsburg wurden 99 Pumpversuche ausgewertet (Hydroconsult GmbH, 2016). 20 davon wurden im ersten tertiären Hauptgrundwasserleiter durchgeführt und zeigen einen mittleren hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwert (Median) von  $8,6 \cdot 10^{-5}$  m/s. Für den zweiten tertiären Hauptgrundwasserleiter konnte ein mittlerer  $k_f$ -Wert von  $1,7 \cdot 10^{-5}$  m/s aus 79 Pumpversuchen berechnet werden. Eine großangelegte Studie zur Beschreibung des hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwertes in der Oberen Süßwassermolasse wurde in den Stadtgebieten von Augsburg und München, sowie im ländlichen Raum zwischen Isar und Lech durchgeführt (Egger, 1978). Die Auswertung der stationären Phase von 178 Pumpversuchen ergab einen  $k_f$ -Wertebereich von  $2 \cdot 10^{-6}$  m/s bis  $2 \cdot 10^{-4}$  m/s, wobei 40 % der ermittelten  $k_f$ -Werte zwischen  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s und  $3 \cdot 10^{-5}$  m/s liegen. Dabei wird für die 75 in München erhobenen  $k_f$ -Werte eine Abweichung zu niedrigeren  $k_f$ -Werten beschrieben. Die festgestellte spezifische Ergiebigkeit liegt in einem Bereich von  $0,2$  l/(s\*m) bis  $2,0$  l/(s\*m). Im Stadtgebiet pendeln sich die Werte zwischen  $0,2$  l/(s\*m) und  $1,0$  l/(s\*m) (Storz et al., 2017). Aus Pumpversuchen in den Tiefbrunnen in Ober- und Unterschleißheim leiten Hafn und Eckenberger (1992) einen Wertebereich für den hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwert von  $4,7 \cdot 10^{-5}$  m/s bis  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s an. Extremwerte für die Ergiebigkeit konnten im Landkreis Freising mit  $20,6$  l/(s\*m) und  $10$  l/(s\*m) errechnet werden (Egger, 1978). Burger (1993) benennt für die hydraulische Durchlässigkeit für die oberen und mittleren tertiären Grundwasserleiter im nördlichen Tertiären Hügelland einen Wertebereich von  $2,3 \cdot 10^{-5}$  m/s bis  $3,4 \cdot 10^{-4}$  m/s. Im Landkreis Fürstfeldbruck (Alto-Gruppe) konnte nach Pumpversuchsauswertungen mittels Dupuit-Thiem für die Transmissivität ein Mittelwert von  $1,6 \cdot 10^{-3}$  m/s und  $5,5 \cdot 10^{-3}$  m/s für den zweiten Hauptgrundwasserleiter bestimmt werden (Schuler und Gödecke, 1995). Die spezifische Ergiebigkeit liegt zwischen  $1$  l/(s\*m) bis  $3$  l/(s\*m) für den ersten Hauptgrundwasserleiter und zwischen  $1$  l/(s\*m) und  $2$  l/(s\*m) für den zweiten Hauptgrundwasserleiter.

#### 4.5.2 Datengrundlage und Berechnung der Durchlässigkeitsbeiwerte

Aufgrund der intensiven Nutzung durch Trink- und Brauchwasserentnahmen oder geothermische Nutzungen hat sich in den Archiven der Wasserwirtschaftsämter München, Weilheim und Rosenheim eine große Anzahl an dokumentierten Pumpversuchen angesammelt, welche nun erstmals aufbereitet und ganzheitlich ausgewertet wurden. In den Jahren 2012 bis 2016 lag der Fokus auf dem Quartär, ab 2016 bis 2019 wurden die Recherchen und Auswertungen, die sich nun auf die Obere Süßwassermolasse konzentrierten, fortgesetzt. Jedoch konnten viele Pumpversuchsdatenblätter, insbesondere von tertiären Grundwassernutzungen, aufgrund mangelnder Qualität oder schlechter Dokumentation nicht für eine Auswertung genutzt werden. Schließlich erwiesen sich insg. 464 Pumpversuchsdatenblätter als geeignet, um je nach Datengrundlage mit verschiedenen Verfahren und jede einzelne Pumpstufe ausgewertet zu werden, so dass insgesamt 1.565  $k_f$ -Werte für die drei hydrogeologischen Großeinheiten erhoben werden konnten. Für die OSM konnten insg. 212 Pumpversuchsdatenblätter aus sechs Landkreisen (Dachau, Freising, Erding, München Stadt, München, Fürstenfeldbruck) ausgewertet werden.

Um die Vergleichbarkeit der erhobenen Durchlässigkeitsbeiwerte zu garantieren, wurde ein einheitliches Auswerte- und Bewertungsverfahren verwendet. Zu jedem Pumpversuch wurde, wenn nötig und möglich, Lage des Objekts, sowie Ausbau- und Schichtdaten recherchiert. Die Auswertung der Wasserspiegeländerung erfolgte mit der Software Hydrotec®. Hierfür sollten, wenn es die Datengrundlage zulässt, die Absenkkurve (aller Pumpstufen), der stationäre Zustand der letzten Pumpstufe, sowie der Wiederanstieg ausgewertet werden (Tab. 22). Fehlte für die Auswertung des stationären Zustandes eine Beobachtungsmessstelle, wurde die Distanz des Absenktrichters nach Sichardt berechnet (Langguth und Voigt, 2013).

Tab. 22: Verwendete Auswerteverfahren zur Berechnung der Transmissivität

	Freier Grundwasserleiter	Gespannter Grundwasserleiter
Absenkung	Theis (mit Jacob-Korrektur)	Theis
Wiederanstieg	Theis-Jacob	-
Stationärer Zustand	Dupuit-Thiem	Thiem

Zur Abschätzung der Verlässlichkeit der berechneten  $k_f$ -Werte wurde ein Güteklassensystem angewendet. Dieses wurde für die Münchner Schotterebene entwickelt, konnte aber auch auf Pumpversuche in den anderen hydrogeologischen Großeinheiten angewendet werden. Das verwendete Gütebeurteilungssystem wurde bereits in Kapitel 3.7.2 beschrieben. Es wurde versucht dieses System analog auch für die OSM anzuwenden.

Aufgrund veränderter hydrogeologischer Rahmenbedingungen in der OSM, traten einige neue Problemstellungen auf:

- **Unvollkommene Brunnen:** Brunnen, deren Ausbau nicht die geringleitende Grundwasserbasisfläche erreicht, werden als unvollkommene Brunnen bezeichnet. Diese wirken sich für die Auswertung zweifach negativ aus, da die vertikale Zustromkomponente, insbesondere in gering leitenden Grundwasserleitern, schwer abschätzbar ist. Zudem ist eine exakte Grundwasserleitermächtigkeit für die Umrechnung von Transmissivität in  $k_f$ -Wert nötig. Brunnen, bei denen die Grundwasserbasisfläche nicht aus Nachbarbohrung bestimmt werden konnte, wurden nicht ausgewertet. Pumpversuche, in denen die Grundwasserleitermächtigkeit aus benachbarten Bohrungen übertragen werden konnte, wurden ausgewertet und mit der niedrigsten Güteklasse (GK3) klassifiziert.

- **Mehrere Filterstrecken:** Insbesondere ältere, im Tertiär verfilterte Brunnen sind häufig mehrfach verfiltert. Dabei durchteufen die Brunnen verschieden mächtige, geringleitende Schichten, welche als hydraulisch unbedeutende Linsen oder flächige Grundwassergeringleiter interpretiert werden müssen und die Auswertung des Pumpversuchs entscheiden beeinflussen. Für die Bestimmung der Grundwasserleitermächtigkeit und Filterstrecke wurden jeweils die einzelnen Abschnitte aufaddiert. Eine gleiche Vorgehensweise ist beispielsweise in Hydroconsult GmbH (2016) zu finden.
- **Große Absenkungsrate:** Aufgrund von niedrigeren Grundwasserfließgeschwindigkeiten kommt es in der OSM bei Pumpversuchen zu prozentuell höheren Absenkungen. Damit sind bei einigen Pumpversuchen nicht mehr alle Voraussetzungen für die Auswertung nach Dupuit-Thiem erfüllt. Folglich können manche Pumpversuche nicht nach dieser Methode ausgewertet werden.

Neben der hydraulischen Durchlässigkeit wurde für jede Pumpstufe auch die spezifische Ergiebigkeit ermittelt. Die Ermittlung der spezifischen Ergiebigkeit erfolgt nach der unten genannten Formel (Langguth und Voigt, 2013). Die dargestellte Ergiebigkeit zeigen den Mittelwert aller Pumpstufen eines Pumpversuchs.

$$C = \frac{Q}{s}$$

C = spezifische Ergiebigkeit (l/s\*m); Q = Förderrate (l/s); s = Absenkung bei Beharrungszustand (m)

### 4.5.3 Beschreibung und Interpretation der hydraulischen Durchlässigkeit in der OSM

#### 4.5.3.1 Pumpversuchsauswertungen in der Oberen Süßwassermolasse

Für die Grundwasserleiter der Oberen Süßwassermolasse konnten insgesamt 212 Pumpversuche ausgewertet werden. Aufgrund der nach Süden immer mächtiger werdenden Überlagerung und die damit zunehmende Bedeutung des quartären Grundwasserleiters für die Wasserwirtschaft, nimmt die Datengrundlage in den südlichen Landkreisen für die OSM stark ab. In den südlichen Landkreisen Starnberg, Landsberg am Lech, sowie in Ebersberg konnten keine qualitativ ausreichenden Pumpversuchsdokumentationen recherchiert werden, die in die Auswertung einbezogen werden konnten.

Die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte in der Oberen Süßwassermolasse besitzen ein geometrisches Mittel von  $9,32 \cdot 10^{-5}$  m/s. Der Wertebereich der ausgewerteten  $k_f$ -Werte liegt hierbei zwischen  $2,56 \cdot 10^{-5}$  m/s (10 %-Quantil) und  $4,72 \cdot 10^{-4}$  m/s (90 %-Quantil). Die spezifische Ergiebigkeit in der OSM weist ein Wertintervall von  $0,24$  l/(s\*m) bis  $8,79$  l/(s\*m) und einen mittleren Wert von  $7,60$  l/(s\*m). Vereinzelt Höchstwerte von über  $100$  l/(s\*m) (Maximalwert:  $322,93$  l/(s\*m)) wurden in den Landkreisen Dachau, Freising und Erding errechnet. Gründe für diese hohen, berechneten Werte der spezifischen Ergiebigkeit konnten nicht gefunden werden (Abb. 85).

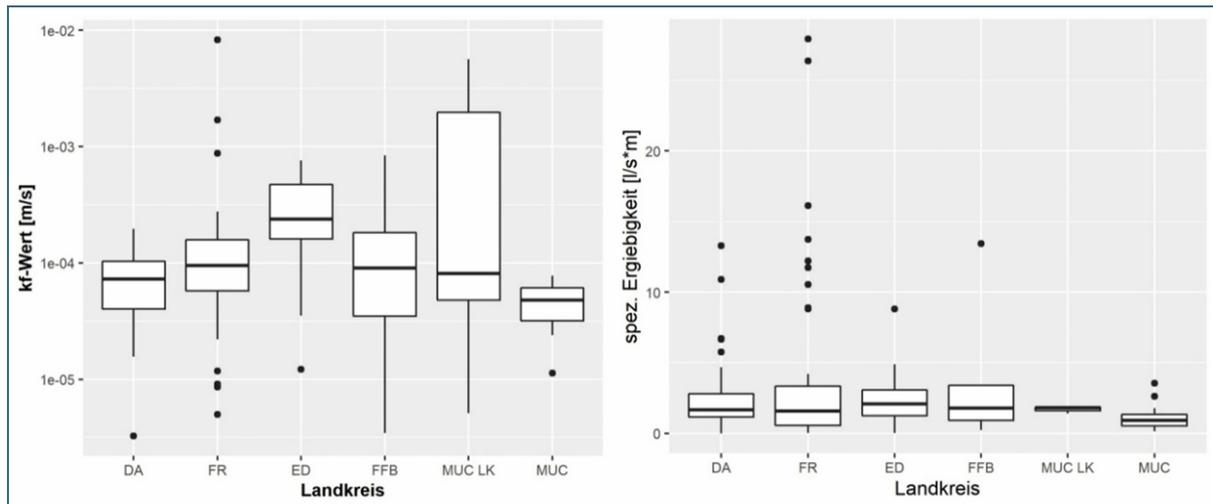


Abb. 85: Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte und der spezifischen Ergiebigkeit der Oberen Süßwassermolasse nach Landkreisen. Zur besseren Übersicht wurden im Boxplot zur spezifischen Ergiebigkeit die Werte über 100 l/(s\*m) nicht dargestellt.

#### 4.5.3.2 Regionale Verteilung der ermittelten hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) in der OSM

Um die räumliche Verteilung der  $k_f$ -Werte besser zu bestimmen, wurden diese in zwei Gruppen gegliedert. Die nördliche Gruppe umfasst die Landkreise, die Teile des Tertiären Hügellandes beinhalten (Fürstfeldbruck, Dachau, Erding und Freising). Die südliche Gruppe fasst Bereiche mit stark überdecktem Grundwasserleiter der OSM, die Landkreise München und die Stadt München, zusammen. Hierbei zeigen sich höhere  $k_f$ -Werte der nördlichen Gruppe (geom. Mittel:  $1,0 \cdot 10^{-4}$  m/s) im Vergleich zu der südlichen Gruppe (geom. Mittel:  $6,1 \cdot 10^{-5}$  m/s). Zudem ist auffallend, dass die Werte der hydraulischen Durchlässigkeit einem leichten Ost-West Trend unterliegt. Entsprechend der westwärts gerichteten, fluvialen Schüttungsrichtung der Sedimente aus der OSM und der damit nach Westen beobachtbareren Korngrößenabnahme (Doppler et al., 2005), lässt sich ein leichter Trend zu niedrigeren  $k_f$ -Werten im Westen des Arbeitsgebietes erkennen (Abb. 86).

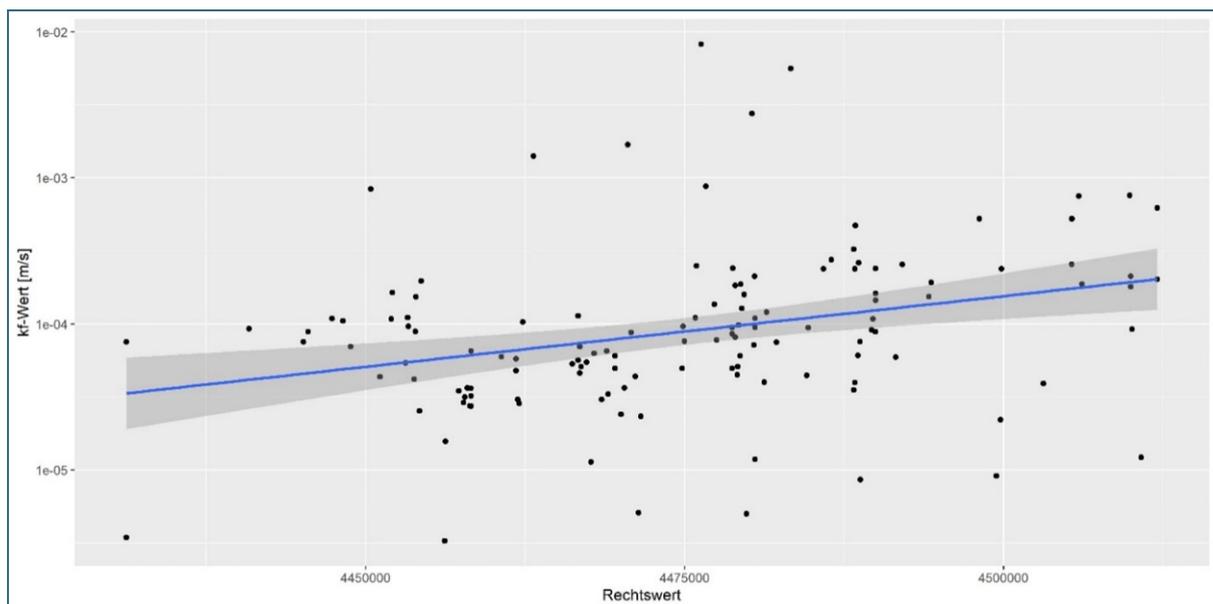


Abb. 86: Darstellung der  $k_f$ -Werte in der OSM gegen den Rechtswert geplottet. Ein leicht westwärts gerichteter Trend zu niedrigeren  $k_f$ -Werten ist erkennbar.

Tiefenaufgelöst lässt sich aus den  $k_f$ -Werten keine Aussage treffen. Die meisten Brunnen, an den Pumpversuche in der OSM durchgeführt wurden, sind mischverfiltert und somit mit mehreren Grundwasserleitern in hydraulischem Kontakt. Die geringe Anzahl der ausgewerteten Pumpversuche, die an nicht mischverfilterten Brunnen ausgewertet wurden, zeigen keine klaren tiefenaufgelösten Trends.

Im Stadtgebiet konnten elf Pumpversuche der Horizontklassifizierung aus der 3D-Modellierung unterworfen werden. Für den Horizont T1A wurden zwei Pumpversuche ausgewertet (geom. Mittel:  $5,35 \cdot 10^{-5}$  m/s). Für den Horizont T1D ergab sich aus fünf Pumpversuchen ein geometrischer Mittelwert von  $3,52 \cdot 10^{-5}$  m/s. Für den Horizont T2 ergaben zwei Pumpversuch ein geometrisches Mittel von  $4,99 \cdot 10^{-5}$  m/s, und ein Pumpversuch der in einem lokalen Mischhorizont zwischen T2 und T3 verfiltert ist, weist eine hydraulische Permeabilität von  $2,9 \cdot 10^{-5}$  m/s auf. Ein Wert für die hydraulische Permeabilität von  $5,09 \cdot 10^{-5}$  m/s wurde für den Horizont T4 ermittelt.

#### 4.5.3.3 Ermittelte hydraulische Durchlässigkeitsbeiwerte ( $k_f$ -Werte) der OSM nach Landkreisen

In Tab. 23 sind die gemittelten  $k_f$ -Werte und die spezifische Ergiebigkeit für die jeweiligen hydrogeologischen Großeinheiten in den verschiedenen Landkreisen zusammengefasst. Die Großeinheiten des Quartärs werden in Kapitel 3.7.3.3 beschrieben.

Tab. 23: Zusammenfassung der Ergebnisse der Pumpversuchsauswertung nach Landkreis für die hydrogeologische Großeinheit OSM. „ $k_f\_all$ “ beschreibt den geometrische gemittelten  $k_f$ -Wert aller Güteklassen, „ $k_f\_GK\_1\_2$ “ den geometrisch gemittelten  $k_f$ -Werte der Güteklasse 1 und 2 und „spezErg“ gibt den arithmetisch gemittelten  $k_f$ -Wert der spezifischen Ergiebigkeit an.

Landkreis	Geologische Einheit	Anzahl	$k_f\_all$ (m/s)	$k_f\_GK1\_2$ (m/s)	spezErg (l/s*m)
Dachau	OSM	60	4,90E-05	5,84E-05	6,3
Erding	OSM	38	2,26E-04	1,98E-04	2,3
Freising	OSM	69	1,71E-04	9,52E-05	3,5
Fürstenfeldbruck	OSM	7	8,98E-05	6,97E-05	23,2
München	OSM	7	2,07E-04	2,14E-04	45,4
München Stadt	OSM	31	3,77E-05	4,23E-05	12,1

#### 4.5.3.4 Ausblick

Die hydraulische Permeabilität wird in der Oberen Süßwassermolasse bisher meist über Pumpversuche ermittelt (Hydroconsult GmbH, 2016; Egger, 1978, Burger, 1993). Die Durchführung von Pumpversuchen ist meist zeitlich aufwendig und je nach Eigenschaft des Grundwasserleiters räumlich sehr begrenzt korrelierbar. Zudem schränken in den Grundwasserleitern der Oberen Süßwassermolasse mischverfilterte und unvollkommene Brunnen die Aussagekraft über den Grundwasserleiterparameter ein. Zu einer genaueren Auflösung der hydraulischen Permeabilität würden Verfahren, wie Multilevel-Slug-Tests oder Flowmetermessungen (Brauchler et al., 2012), Direct-Push-Verfahren (Leven et al., 2011) und Lockergesteinssonden führen (Brauchler et al., 2012).

Um weitreichende räumliche Aussagen zu treffen, ist eine Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit aufgrund der aus den Schichtdaten errechneten Kornsummen (siehe Kapitel 4.2 3D-Modell) ein vielversprechender Ansatz. In Kapitel 4.5.2 wird erläutert, nach welchen Verfahren die hydraulische Durchlässigkeit berechnet wurde. Im Folgenden wurde ein Abgleich aus dem mittleren berechneten  $k_f$ -Wert aus den Schichtdaten und aus den erhobenen  $k_f$ -Werten aus den Pumpversuchsauswertungen, anhand von 73 in der Oberen Süßwassermolasse verfilterten Brunnen durchgeführt.

Für die Bestimmung des mittleren  $k_f$ -Wertes eines Brunnens, aus den Schichtdaten und über Kornsummenkurven-Verfahren, wurden jene ausgewählt, die im Bereich der Filterstrecke des Brunnenausbaus liegen. Filterstrecken, die von einem Ummantelungsrohr umgeben sind, und nicht in Kontakt zu den umgebenden Sedimenten stehen, wurden nicht berücksichtigt. Ebenso wurden geringleitenden Schichten (Hauptbestandteil: Ton oder Schluff) nicht berücksichtigt. Für jeden Brunnen wurde die Gesamttransmissivität aus der Summe der Transmissivitäten der einzelnen Schichten errechnet. Besaßen für den  $k_f$ -Wert einer Schicht mehrere Berechnungsverfahren Gültigkeit, wurde je nach Bodenart auf ein bestimmtes Verfahren zurückgegriffen (Tab. 24). Für die Ermittlung des mittleren  $k_f$ -Wertes eines Brunnens wurde die Gesamttransmissivität durch die aufsummierte Mächtigkeit der Schichten geteilt.

Tab. 24: Entscheidungskriterien für die Berechnung des  $k_f$ -Wertes aus den erzeugten Kornsummen. Spalte 2 und 3 stellen die Kriterien da, welche zur Auswahl des jeweiligen Verfahrens führen.

Bezeichnung des Bodens(*)	Massenanteile des Bodens (*)	Interpretierte Lithofaziestypen (1=Ton/Schluff, 2=Sand, 3=Kies)	Ausgewähltes Verfahren
Feinkörniger Boden	Massenanteil < 0,063 mm: > 40 %	d5=1, d10=1, d20=1, d30=1, d40=1	Seelheim
Gemischtkörniger Boden	Massenanteil < 0,063 mm: ≤ 40 % und ≥ 5 %	d5=1, d50>1, d60>1, d70>1, d80>1, d90>1	USBSC
Grobkörniger Boden	Massenanteil < 0,063 mm: < 5 %	d5 bis d90 >1	Beyer

Der Vergleich zwischen den berechneten  $k_f$ -Werten aus den Bohrprofilen und den aus den Pumpversuchen erhobenen  $k_f$ -Werten ist in Abb. 87 dargestellt.

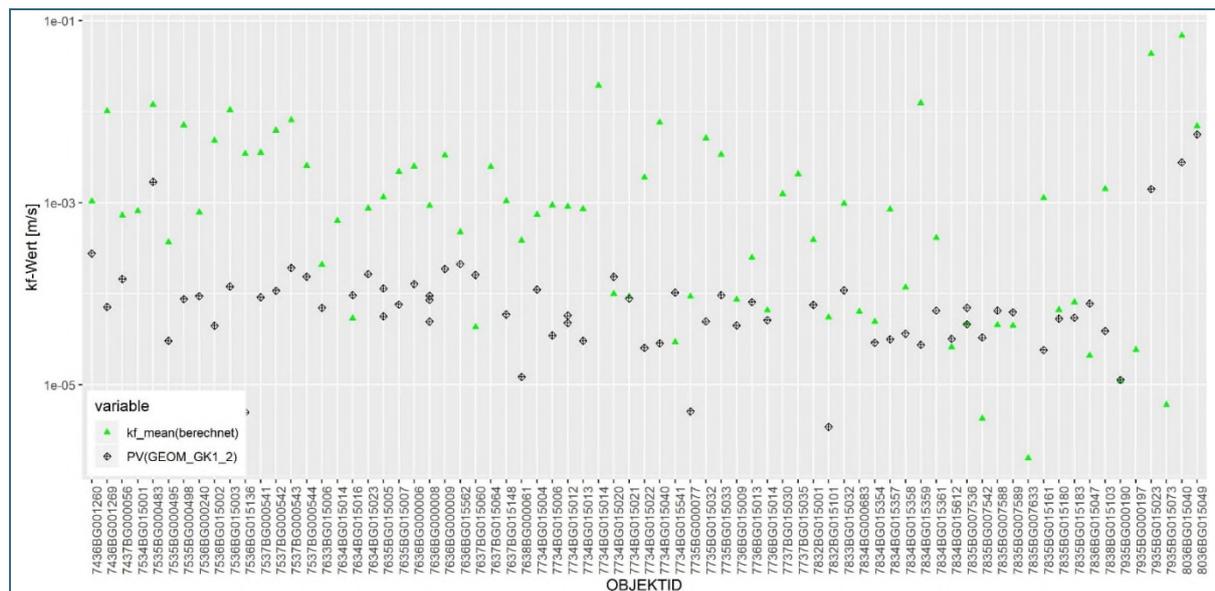


Abb. 87: Gegenüberstellung der aus den Schichtdaten berechnete mittlere  $k_f$ -Wert ( $k_f\_mean(berechnet)$ ) und den aus dem Pumpversuchen gewonnenen  $k_f$ -Werten ( $PV(GEOM\_GK1\_2)$ ) der Güteklasse 1 und 2 aus 73 tiefen Brunnen der OSM.

Die mittlere Standardabweichung, zwischen den aus den Schichtdaten berechneten und den aus den Pumpversuchen ermittelten  $k_f$ -Werten, beträgt  $9,97 \cdot 10^{-4}$  m/s. Die Abweichungen streuen dabei eher zufällig um den  $k_f$ -Wert aus dem Pumpversuch. In den Brunnen, die im berechneten „ $k_f\_mean$ “ eine positive Abweichung zum  $k_f$ -Wert aus den Pumpversuchen aufzeigen, wurden immer wieder kiesige Schichten angetroffen. In Brunnen, die eine negative Abweichung aufweisen, wurden sehr bindige Schichten (teils geologisch fragliche: T,g,s) in den Filterstrecken angesprochen. Dieser Abgleich zeigt auf, welche Schwierigkeit bei einer solchen Übersetzung auftreten, bei der mit Unsicherheiten in der Bohrsprache, Unsicherheiten bei der Wahl der  $k_f$ -Wert-Berechnung, sowie dem räumlichen Zusammenhängen der Sedimentverteilung Rechnung getragen werden muss.

## 5 Betrachtung der dynamischen Grundwasserverhältnisse des quartären und oberflächennahen, tertiären Hauptgrundwasserleiters (OSM)

Das folgende Kapitel beschreibt die Betrachtung der dynamischen Grundwasserverhältnisse und der Interaktion des quartären und oberflächennahen, tertiären Hauptgrundwasserleiters (OSM) und basiert auf den Ergebnissen die in den Projekten GEPO und GeoPot erzielt wurden. Zur Beschreibung der hydrodynamischen zeitabhängigen Verhältnisse sowie von Interaktionsbereichen zwischen dem quartären Hauptgrundwasserleiter und den unterlagernden oberflächennahen Grundwasserleitern der OSM wurden flächenverteilt und horizontbezogen Grundwasserganglinien aus den verschiedenen Grundwasserhorizonten ausgewertet.

### 5.1 Überblick

Im Zuge der Interpretation der hydrodynamischen Gegebenheiten und der Grundwasserdynamik im quartären und tertiären Untergrund des Großraumes München, wurden Grundwasserganglinien von Messstellen, die hydrogeologisch dem Quartär oder der Oberen Süßwassermolasse (OSM) zugeordnet sind, recherchiert. Um zu überprüfen, ob sich die verschiedenen, quartären und tertiären Grundwasserhorizonte hydrodynamisch charakterisieren und unterscheiden lassen, wurde eine Clusteranalyse durchgeführt. Aufgrund der Datendichte und der Zuordnungsmöglichkeit der Horizonte durch das 3D-Modell (Kapitel 4.2), wurde diese beispielhaft für das Stadtgebiet Münchens durchgeführt. Repräsentative Grundwasserganglinien der oberflächennahen tertiären Grundwasserleiter können beim Vergleich mit Grundwasserganglinien des quartären Grundwasserleiters zur Verifizierung von hydraulischen Kontaktzonen zwischen den Grundwasserleitern hilfreich sein (siehe Kapitel 4.2.4).

### 5.2 Datengrundlage und Auswertung der Grundwasserganglinien

#### 5.2.1 Datengrundlage

Die Datengrundlage bildeten zum einen Grundwasserganglinien schon bestehender Messnetze (z. B. Messnetz der Stadt München). Zum anderen wurden Grundwassermessstellen im Großraum München mit weiteren Drucksonden, zur Aufzeichnung der Temperatur- und Wasserdruckspiegelveränderungen, ausgestattet. Eine tabellarische Übersicht der Messstellen, für die langfristige Grundwasserganglinien im aktiven Messnetz vorlagen, ist in Tab. 25 gegeben.

Tab. 25: Grundwassermessstellen (zum Teil nicht mehr existent) mit verfügbaren Grundwasserganglinien (in Klammer)

Betreiber	Messstellen gesamt	Messstellen OSM
Stadt München – Baureferat	2.152 (1.763)	272 (180)
Stadt München – Referat für Gesundheit und Umwelt	960 (886)	21 (13)
Stadt München - Münchner Stadtentwässerung	1.377 (1.192)	182 (170)
Deutsche Bahn 2. S-Bahn-Stammstrecke	127 (121)	108 (104)
Technische Universität München	35 (35)	30 (30)
Niedrigwasserinformationssystem Bayern*	314 (312)	45 (45)
Sonstige und unbekannt	10.472 (6.100)	2.883 (604)

Um zu überprüfen, ob sich einzelne Grundwasserhorizonte hydrodynamisch eindeutig charakterisieren lassen, sich diese Horizonte ggf. in ihrer Hydrodynamik signifikant unterscheiden und um mögliche Interaktionen zwischen den Grundwasserleitern zu beurteilen, wurde eine Clusteranalyse und eine Trendanalyse durchgeführt. Die Datengrundlage für diese exemplarische Analyse bildete folgender Datensatz für das Stadtgebiet München:

- Datenbank der Stadt München mit folgenden Institutionen (Stand: 03/2019; Daten von 1960 bis 2019):
  - Baureferat der Stadt München
  - Referat für Gesundheit und Umwelt (RGU, jetzt Referat für Klimaschutz und Umwelt, RKU)
  - Münchner Stadtentwässerung (MSE)
- Deutsche Bahn: Abteilung 2. S-Bahn-Stammstrecke (Stand: 2018)
- Datenlogger der Technischen Universität München (TUM)
- Landesmessnetz des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU)

Für die Trendanalyse wurden alle Grundwasserganglinien von im Quartär und im Tertiär verfilterten Messstellen herangezogen. Für die Clusteranalyse wurden die Daten allein auf die im Tertiär (OSM) verfilterten Messstellen beschränkt. Für beide Auswertungen musste der Datensatz zur Durchführung der Zeitreihenanalysen homogenisiert werden. Hierzu wurden ein Tiefpassfilter (14-Tagemittelwerte) angewendet, wobei eine Mindestanzahl an Daten für die Mittelwertbildung mit mehr als einem Messwert für den jeweiligen Zeitraum vorausgesetzt ist, mit dem das arithmetische Mittel gebildet wurde. Ein Überblick über die Anzahl an Grundwasserganglinien der Messstellen im Tertiär, für verschiedene Zeiträume, ist in Abb. 88 dargestellt. Die Gesamtzahl der Ganglinien ist mit den im Quartär verfilterten Messstellen deutlich höher (Abb. 89).

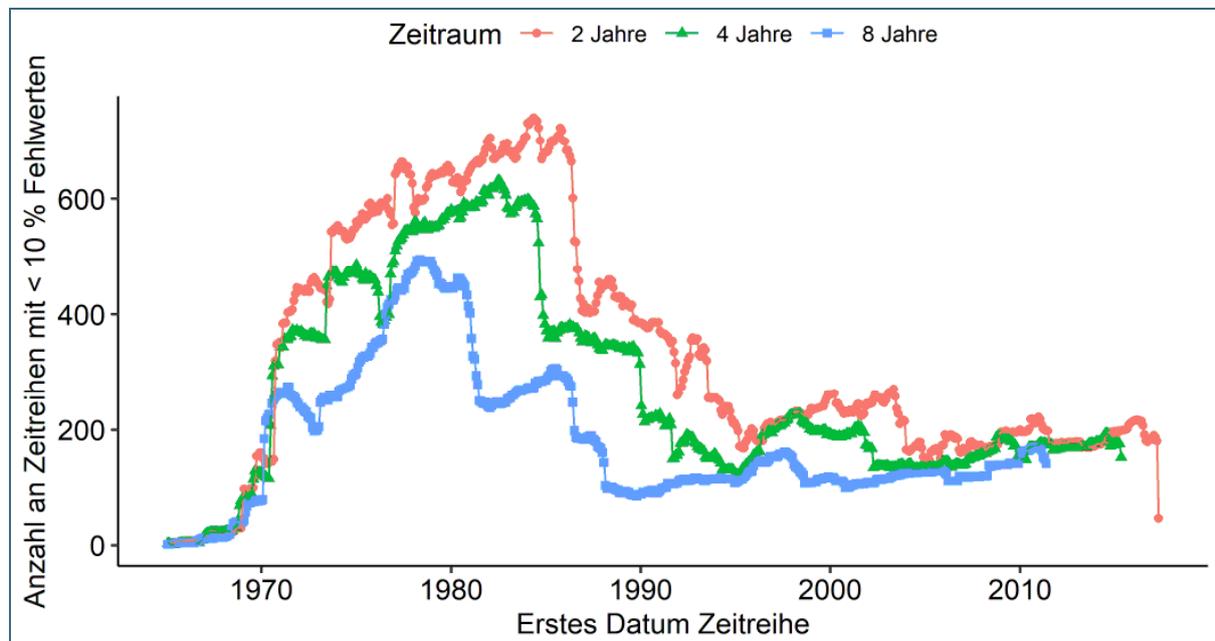


Abb. 88: Übersicht der Grundwasserganglinien an im Tertiär (OSM) verfilterten Messstellen mit weniger als 10 % Fehlern bei 14-Tagesmittelwerten

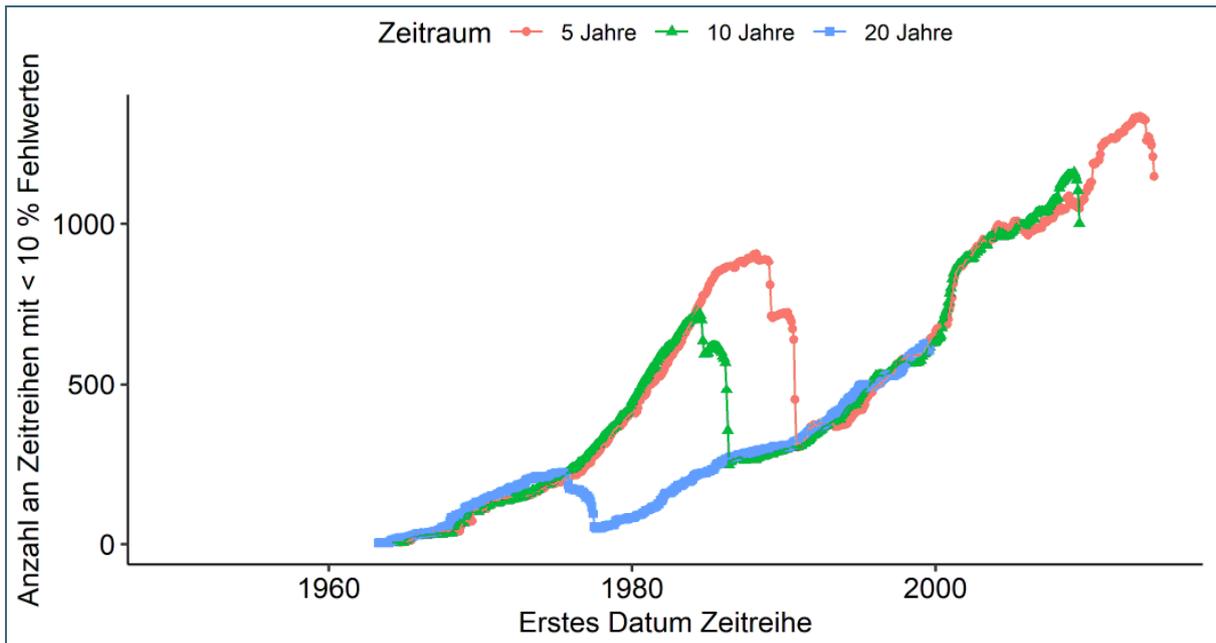


Abb. 89: Übersicht der Grundwasserganglinien an im Tertiär (OSM) und Quartär verfilterten Messstellen, mit weniger als 10 % Fehlwerten bei 14-Tagesmittelwerten

Um einen möglichst umfangreichen Datensatz zu bearbeiten, wurden Zeitreihen, bei denen weniger als 10 % der Messwerte im Untersuchungszeitraum fehlen, durch einen Trend und Saisonalität berücksichtigendes, strukturelles Zeitreihen-Modell mit Kalman Filter (Harvey und Shephard, 1993) ergänzt. Ein Beispiel für geschätzte Fehlwerte ist in Abb. 90 gegeben.

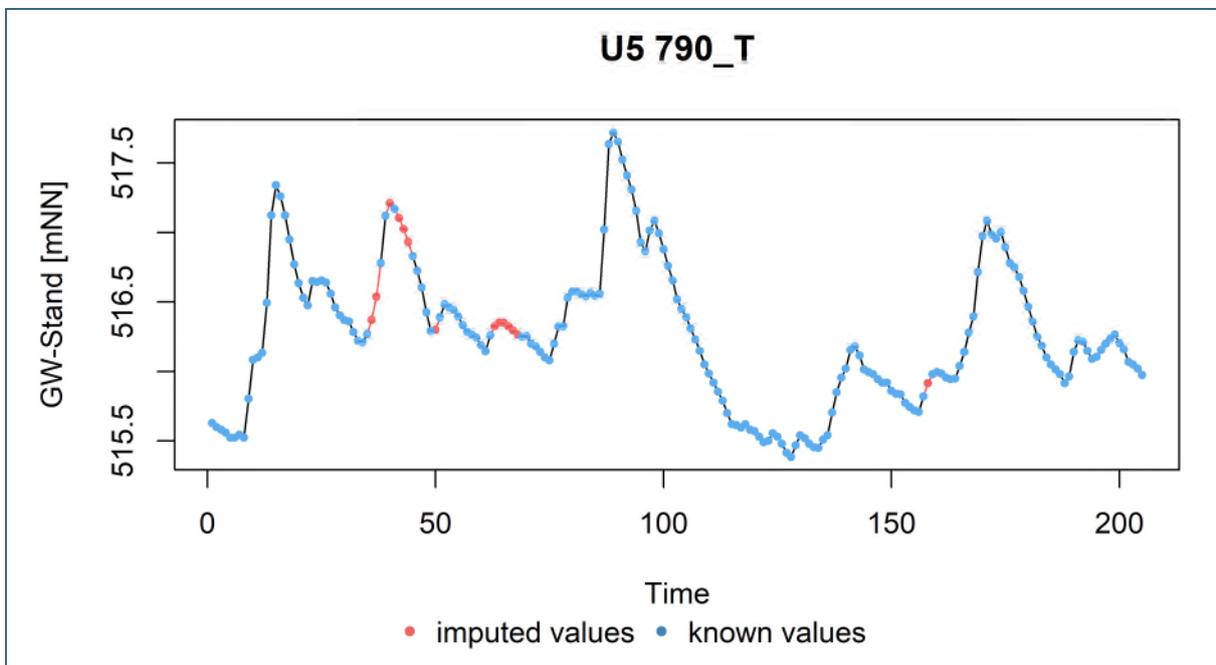


Abb. 90: Beispiel für eine Ergänzung von Datenlücken basierend auf einem strukturellen Zeitreihenmodell mit Kalman Filter

## 5.2.2 Methodik der Clusteranalyse

Für die Clusteranalyse wurde die Form-basierte „Dynamic Time Warping (DTW)“ Distanz (Berndt und Clifford, 1994) als Unähnlichkeitsmaß genutzt. Die Berechnung der DTW-Distanz beinhaltet einen dynamischen Programmieralgorithmus, der versucht, den optimalen Verzugsweg zwischen zwei Serien unter bestimmten Bedingungen zu finden (z. B. Aghabozorgi et al., 2015). Die Clusteranalyse wurde mit verschiedenen Methoden und Vorverarbeitungsschritten (z. B. Normalisierung, Autokorrelation, etc.) durchgeführt und miteinander verglichen. Die finale Einteilung erfolgte mittels „fuzzy clustering“ mit c-medoids, das es erlaubt, die Zugehörigkeit der Zeitreihe anteilig auf die Cluster zu verteilen (Izakian et al., 2015). Dabei wird für jede Zeitreihe der Gesamtwert von 1 anteilig auf die Cluster entsprechend des Zugehörigkeitsmaßes verteilt. Bei einem „fuzzy clustering“ muss die Anzahl der Cluster im Vorfeld der Analyse vorgegeben werden. Die Qualität und Gültigkeit der Clusteranalyse kann basierend auf verschiedenen Cluster-Gültigkeitsindices beurteilt und dadurch die Anzahl an Cluster bestimmt werden (Wang und Zhang, 2007). Daher wurde die Clusteranalyse für 4 bis 14 Cluster durchgeführt und die Clusteranzahl basierend auf Cluster-Gültigkeitsindex von Kwon (1998) ausgewählt.

## 5.2.3 Methodik der Trendanalyse

Die Trendanalyse wurde für einen 10-Jahres Zeitraum (Mai 2008 bis April 2018) und für insgesamt 1.130 Ganglinien durchgeführt. Die Datenbasis bildete hier, wie auch bei der Clusteranalyse, der statistisch ergänzte Datensatz der 14-Tagesmittelwerte. Eine Übersicht über die Anzahl an Ganglinien pro Horizont ist in Tab. 26 dargestellt. Die hier verwendete Untergliederung der Grundwasserhorizonte ist in Kapitel 4.2 (3D-Modell) dargelegt.

Tab. 26: Anzahl an Ganglinien, für die eine Trendanalyse durchgeführt wurde. Aufteilung in die jeweiligen Grundwasser-Horizonte für den Zeitraum Mai 2008 bis April 2018. „Q\_Q“ steht dabei für Messstellen, deren Filterstrecke ausschließlich in quartären Sedimenten liegt. Q\_T bezeichnet Messstellen, bei denen mindestens ein Teil einer Filterstrecke in tertiären, als auch in quartären Sedimenten liegt. T1A bis Tx (unklare Zuordnung) bezeichnen die tertiären Unterhorizonte (siehe Kapitel 4.2 (3D-Modell)).

Q_Q	Q_T	T1A	T1B	T1BC	T1C	T1CD	T1D	T2	Tx
304	734	21	27	2	5	10	1	1	25

In einem ersten Schritt wurde jede Ganglinie auf mögliche Umkehrpunkte („change points“) untersucht. Diese können eine Veränderung des Trends innerhalb der Zeitreihe anzeigen. Wurde ein signifikanter Umkehrpunkt festgestellt, erfolgte dort eine Teilung der Zeitreihe der Grundwasserganglinie. Es wurden insgesamt drei Trends für eine solche Zeitreihe berechnet (Beginn bis Umkehrpunkt; Umkehrpunkt bis Ende; ganze Zeitreihe). Für die Bestimmung von möglichen Umkehrpunkten wurden die folgenden Tests angewendet:

- Buishand-Range Test (Buishand, 1982)
- Buishand U Test (Buishand, 1984)
- Lanzante test (Lanzante, 1996)
- Pettitt test (Pettitt, 1979; Verstraeten et al., 2006)
- Standard Normal Homogeneity test (Alexandersson, 1986; Khaliq und Ouarda, 2007)

Im nächsten Schritt wurden nicht signifikante Werte für Umkehrpunkte ( $p\text{-value} > 0,05$ ) aussortiert. In den meisten Fällen lieferten die Tests sehr ähnliche Ergebnisse. Lagen unterschiedliche Werte vor, wurde der von den Tests am häufigsten vorgeschlagene Zeitpunkt als Umkehrpunkte gewählt.

Im dritten Schritt erfolgte dann die Trendanalyse. Wurde ein signifikanter Umkehrpunkt festgestellt, wurde die Trendanalyse zusätzlich zur gesamten Zeitreihe auch für die geteilten Zeitreihen vorgenommen. Grundwasserganglinien weisen häufig eine deutliche Autokorrelation auf. Wird diese bei der

Trendanalyse nicht beachtet, kann das zu einer massiven Überschätzung der Signifikanz der beobachteten Trends führen (Lischeid et al., 2012). Um dieser Problematik beizukommen (Khaliq et al., 2009; Mudelsee, 2019), wurde ein Mann-Kendall Trend Test mit einer Trendbereinigung, durch den Sen Slopes Test, auf eine „prewhitened“ Zeitreihe angewendet (nach Yue et al., 2002). Damit lassen sich die Grundwasserganglinien in die Kategorien, positiv (steigend), negativ (fallend) und „kein signifikanter Trend“ ( $p$ -Value  $> 0.1$ ) einteilen.

#### 5.2.4 Methodik zur Analyse der Grundwasserspiegelschwankungen

Die Analyse zur Bestimmung der Grundwasserspiegelschwankungen wurde für den selben Datensatz wie für die Trendanalyse durchgeführt (2008 bis 2018; 1.130 Grundwasserganglinien im quartären und den tertiären Grundwasserleitern). Wurden in den Ganglinien relevante Umkehrpunkte festgestellt, ist diese Ganglinie geteilt worden. Anschließend wurden die im folgenden beschriebenen Analysen für beide Teile durchgeführt und der Mittelwert der Ergebnisse wurde für die beiden Abschnitte der Ganglinie gebildet.

Um eine Einschätzung über den mittleren jährlichen Schwankungsbereich der Grundwasserstände für die einzelnen Messstellen zu erlangen, sind die folgenden zwei Verfahren für jede Grundwasserganglinie des Datensatzes angewendet worden:

Im ersten Ansatz wurden die 25 % und 75 % Quartile für jede Ganglinie berechnet und die Differenz daraus als mittlere Schwankungshöhe angesetzt. Ein ähnlicher Ansatz wurde beispielsweise von Blumstock et al. (2016) zur Charakterisierung der Grundwasserdynamik angesetzt. Ein Beispiel hierfür ist in Abb. 91 gegeben.

Für das zweite Verfahren wurden für jeden Monat eines jeden Jahres die mittleren (arithmetisches Mittel) Grundwasserstände gebildet. Dann wurde für jedes Jahr die maximale Differenz der Monatsmittel bestimmt und der Median aus den 10 Jahresmonatsdifferenzen gebildet (Abb. 91).

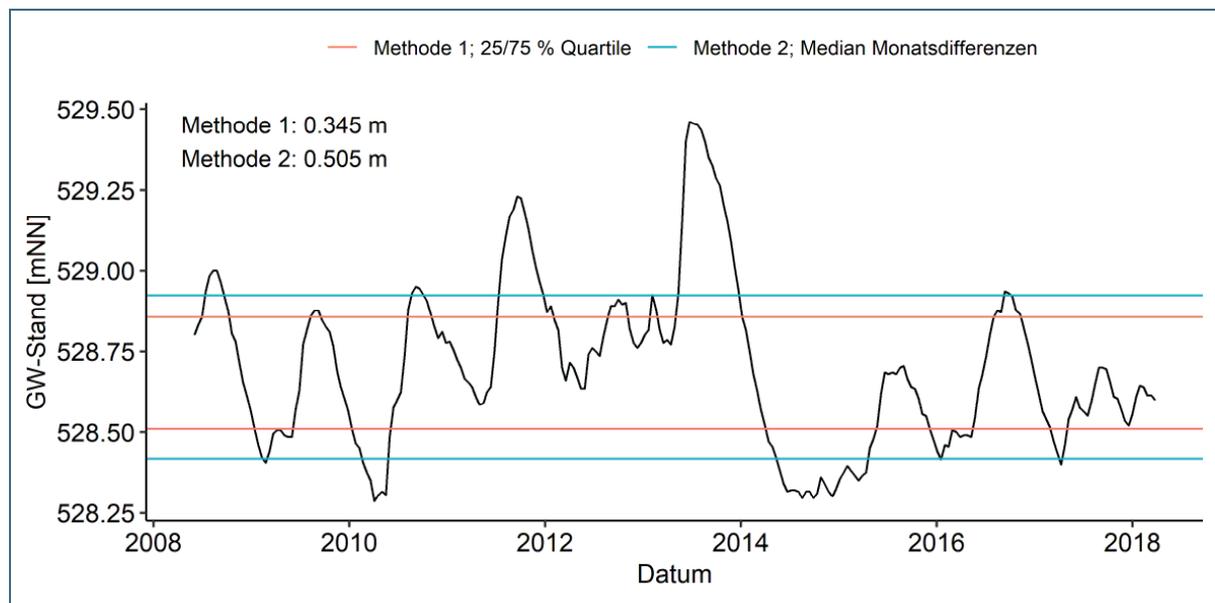


Abb. 91: Beispiel für die angewendete Methodik zur Bestimmung der mittleren Grundwasserschwankungen

## 5.3 Beschreibung und Interpretation der Grundwasserganglinien

### 5.3.1 Ergebnisse der Clusteranalyse

Die Cluster-Analyse wurde für verschiedene Zeiträume und Zeitspannen durchgeführt. Im Folgenden sind beispielhaft die Ergebnisse eines 4-Jahreszeitraumes zwischen 2014 bis 2018 mit einem Datensatz von circa 200 Ganglinien dargestellt. Die Ergebnisse für die anderen Zeitspannen unterscheiden sich nicht wesentlich davon. Fast alle der im oberflächennahen Tertiär verfilterten Messstellen, für die Grundwasserganglinien vorhanden sind, liegen im ersten, oberflächennahen Horizont der OSM (T1A-T1D, Tab. 26). Die Grundwasserganglinien wurden vor der Clusteranalyse über eine Z-Normalisierung standardisiert. Um einen Vergleich mit quartären Grundwasserganglinien zu ermöglichen und die hydrodynamische Kopplung zwischen quartärem und tertiärem Grundwasserleiter beurteilen zu können, wurden zusätzlich mehrere, in den quartären Kiesen verfilterte Messstellen in die Clusteranalyse mit aufgenommen. Diese sind in den folgenden Abbildungen als Q\_Q gekennzeichnet und von Messstellen abzugrenzen, die zwar nach der Geologie in Interaktionsbereichen ohne hydraulische Trennschicht liegen, deren Filterstrecke aber in den Sedimenten der OSM liegt. Diese werden im Folgenden als Q\_T bezeichnet.

Die Clusteranalyse ergab eine Verteilung der Ganglinien auf fünf Cluster. Eine Übersicht über die Zuordnung ist in Abb. 92 dargestellt. Für jede Ganglinie wurde dabei ein Hauptcluster (höchste Zugehörigkeit) ausgewählt. Die räumliche Verteilung und Clusterzuordnung ist in Abb. 93 dargestellt.

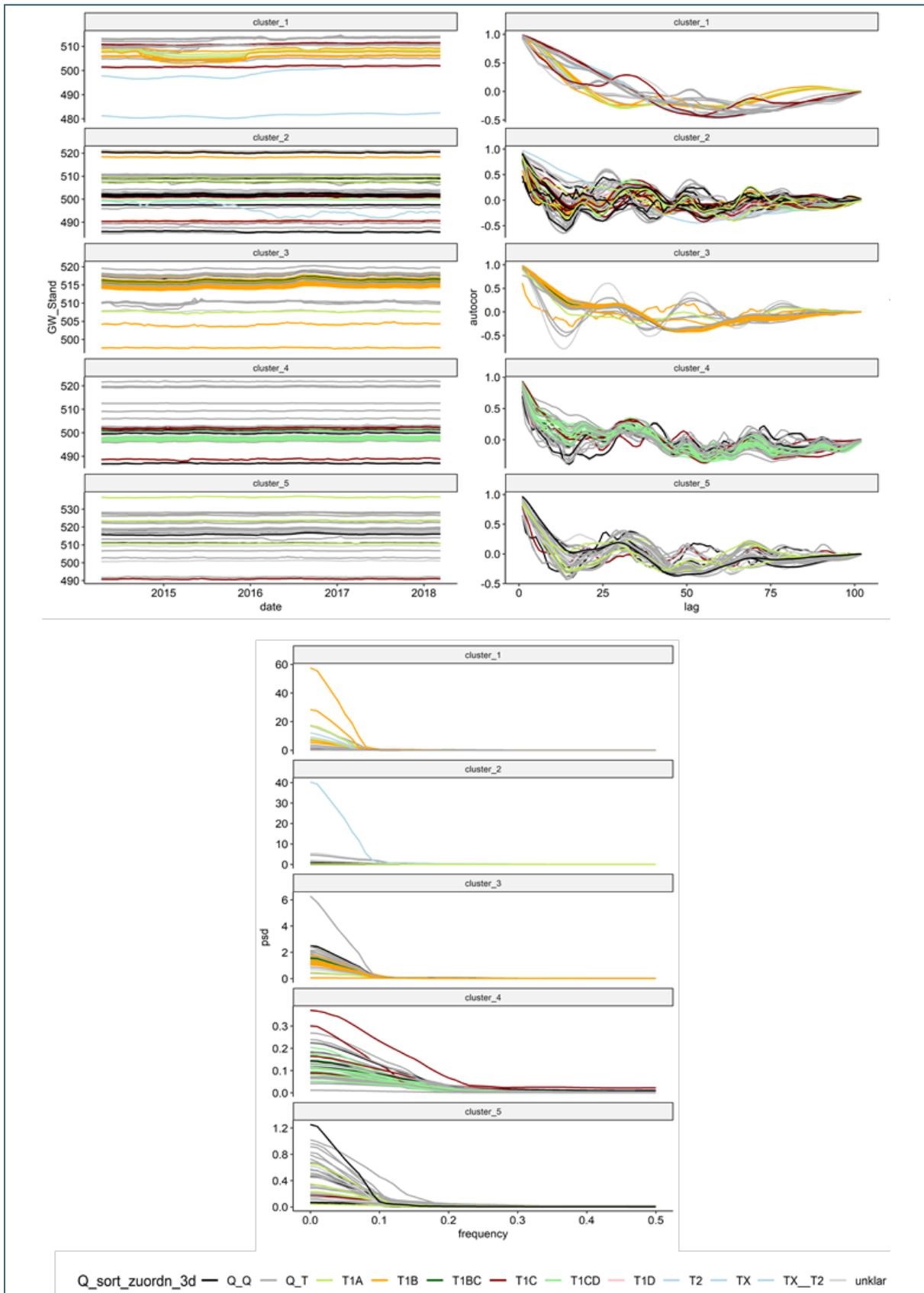


Abb. 92: Übersicht über die Zuordnung der Ganglinien zu den einzelnen Clustern. Die Graphik oben links zeigt die tatsächlichen Ganglinien, die Farben zeigen die Zuordnung mittels 3D-Modell zu den Horizonten der OSM. Die Graphik oben rechts zeigt die Autokorrelation und die untere Graphik die spektrale Leistungsdichte der Ganglinien, beides kann zur Charakterisierung einer Zeitreihe herangezogen werden.

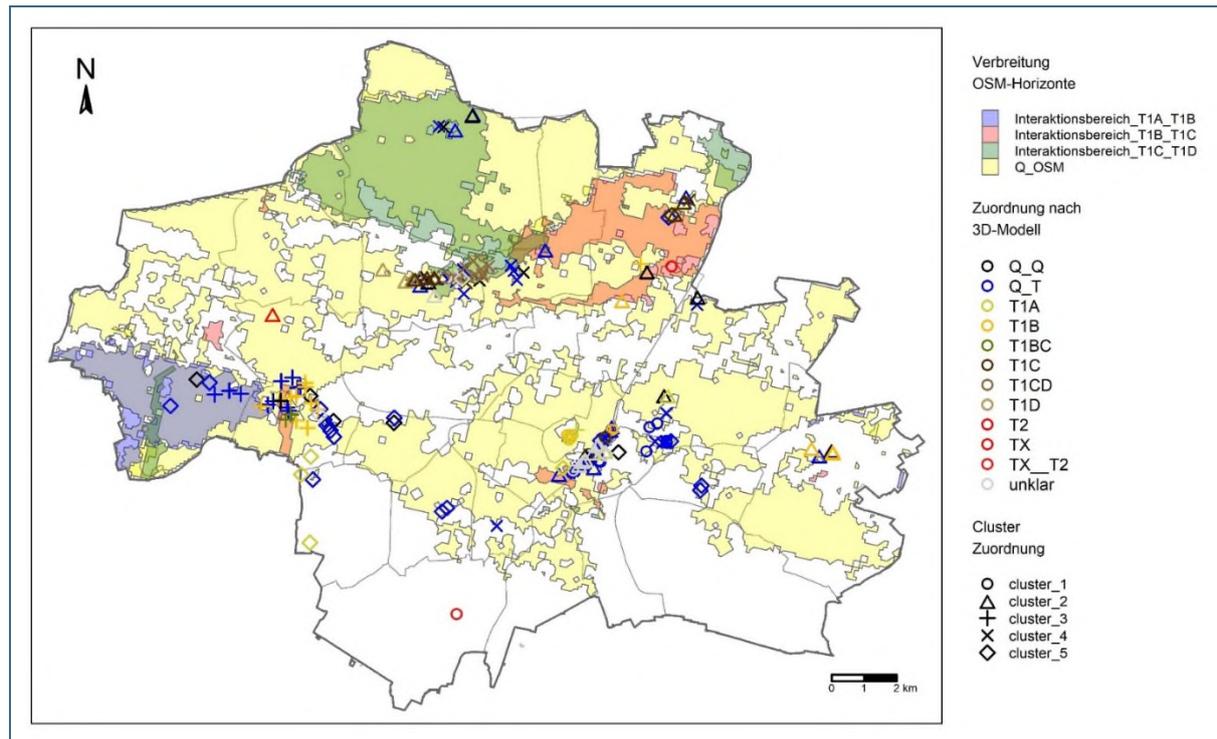


Abb. 93: Räumliche Verteilung der Cluster und Interaktionsbereiche der tertiären Horizonte. Es gibt eine deutliche räumliche Konzentration der Cluster. Q\_Q und Q\_T Messstellen in Interaktionsbereichen sind meist dem gleichen Cluster zugeordnet. Einzelne Horizonte der OSM zeigen keine signifikante Dynamik, die zu einer Clusterzuordnung unabhängig von der räumlichen Verortung führen würde.

Q\_Q und Q\_T Messstellen kommen in allen Clustern vor, es konnten keine Cluster mit rein tertiären Messstellen gebildet werden. Räumlich nah zusammenliegende Messstellen, die im jeweiligen ersten OSM-Horizont in einem Interaktionsbereich verfiltert sind, sind meist dem gleichen Cluster wie die im Quartär verfiltrierten Messstellen zugeordnet. Dies deutet auf eine deutliche hydraulische Kopplung zwischen quartärem und tertiärem Grundwasserleiter hin. Einzelne Horizonte der OSM zeigen keine signifikante Dynamik, die zu einer Clusterzuordnung, unabhängig von der räumlichen Verortung, führen würde. In Bereichen, in denen sich Interaktionsbereiche zwischen den OSM Horizonten (z. B. T1A - T1B) und Interaktionsbereiche zwischen Quartär und OSM überlappen (z. B. Pasing und Moosach), sind die meisten Ganglinien den gleichen Clustern zugeordnet. Das deutet darauf hin, dass in diesen Bereichen eine deutliche hydrodynamische Interaktion zwischen den Horizonten stattfindet. Im Zentrum in Nähe der Isar gibt es auf engem Raum eine deutlichere hydrodynamische Varianz, die in verschiedenen Clusterzuordnungen resultiert. In diesem Bereich gibt es zum Teil eine Interaktion zwischen OSM und Quartär, dagegen ist eine Interaktion zwischen den rein tertiären Horizonten, nach dem 3D-Modell, nicht zu erwarten. Die tieferen Horizonte T2 bis Tx heben sich meist deutlich von den anderen Ganglinien im Cluster ab, zum Beispiel durch eine deutlich höhere spektrale Leistungsdichte und anderen Autokorrelationslängen. Das deutet darauf hin, dass die Interaktion zwischen dem T1-Horizont und den tieferen Horizonten T2 bis Tx deutlich schwächer ausgeprägt bzw. nicht vorhanden ist, als bei T1 und dem Quartär.

Zusammenfassend lässt sich daraus ableiten, dass eine eindeutige hydrodynamische Charakterisierung einzelner Horizonte (T1A bis T1D) des T1-Grundwasserkörpers, zum Beispiel durch typische Autokorrelationslängen, mit dem vorhandenen Datensatz (obwohl dieser sehr umfangreich ist) nicht möglich ist. Durch die zahlreichen Interaktionsbereiche zwischen den Horizonten sind diese eher durch die lokale Dynamik geprägt. Diese räumliche Konzentration der Cluster stimmt häufig mit den durch das 3D-Modell vorgegebenen Interaktionsbereichen überein. Aber auch außerhalb der unmittel-

baren Interaktionsbereiche können Ganglinien verschiedener Horizonte größere Ähnlichkeiten aufweisen, z. B. im Bereich Trudering-Riem. Eingeschränkt ist zu erwähnen, dass diese Dynamik auch durch lang andauernde anthropogene Eingriffe in die Grundwasserdynamik, wie etwa großflächige Bauvorhaben erzeugt werden könnte. In Bereichen, in denen wenig hydraulischer Kontakt besteht, können sich aber auch räumlich begrenzt Unterschiede zwischen den Horizonten zeigen. Diese sind jedoch nicht über weitere Bereiche auszuhalten.

### 5.3.2 Ergebnisse Trendanalyse

In Abb. 94 sind die Ganglinien gemäß der Horizontzuordnung durch das 3D-Modell geordnet und klassifiziert nach negativem (fallendem), positiven (steigendem) und ohne signifikantem Trend, dargestellt. Eine tabellarische Übersicht bietet Tab. 27, eine räumliche Übersicht bietet Abb. 95. Generell zeigen eine Mehrheit der Ganglinien im untersuchten 10-Jahres Zeitraum 2008 bis 2018 einen positiven (steigenden) Trend. Gerade Messstellen, die in den quartären Kiesen oder in einem Bereich ohne Trennschicht zum Quartär verfiltert sind, zeigen überwiegend steigende Trends. Auch bei den Horizonten des ersten tertiären Grundwasserleiters T1 (T1A bis T1D) gibt es überwiegend steigende Grundwasserspiegel. Die sehr deutlichen Veränderungen in sehr kurzer Zeit über mehrere Meter, die in diesen Ganglinien auftreten (Abb. 94), deuten auf anthropogenen Einfluss hin. Insgesamt sind steigende oder fallende Trends häufig räumlich geclustert (Abb. 94). Beispielweise zeigen im zentralen Bereich Bogenhausens nahezu alle Messstellen den gleichen Trend.

Tab. 27: Anzahl an Ganglinien, die einen positiven, negativen oder keinen signifikanten Trend zeigen, sowie die Anzahl an Ganglinien mit und ohne „change point“. Wenn die „change point“ Analyse einen signifikanten Umkehrpunkt detektiert hat, wurde die Ganglinie in zwei Zeitreihen geteilt und für jeden Teil ein eigener Trend bestimmt. Dadurch ergibt sich die insgesamt höhere Gesamtzahl an Ganglinien in dieser Tabelle.

Horizontzuordnung gemäß 3D-Modell	Anzahl Ganglinien mit positivem Trend	Anzahl Ganglinien mit negativem Trend	Anzahl an Ganglinien ohne signifikanten Trend	Anzahl an Ganglinien mit Umkehrpunkt	Anzahl an Ganglinien ohne Umkehrpunkt
Q_Q	487	88	69	112	420
Q_T	430	102	90	116	390
T1A	12	9	12	12	9
T1B	23	7	4	7	20
T1BC	2	0	0	0	2
T1C	4	2	1	2	3
T1CD	9	2	0	1	9
T1D	1	1	0	1	0
T2	0	1	1	1	0
TX_T2	1	1	0	1	0
unklar	19	9	9	13	11

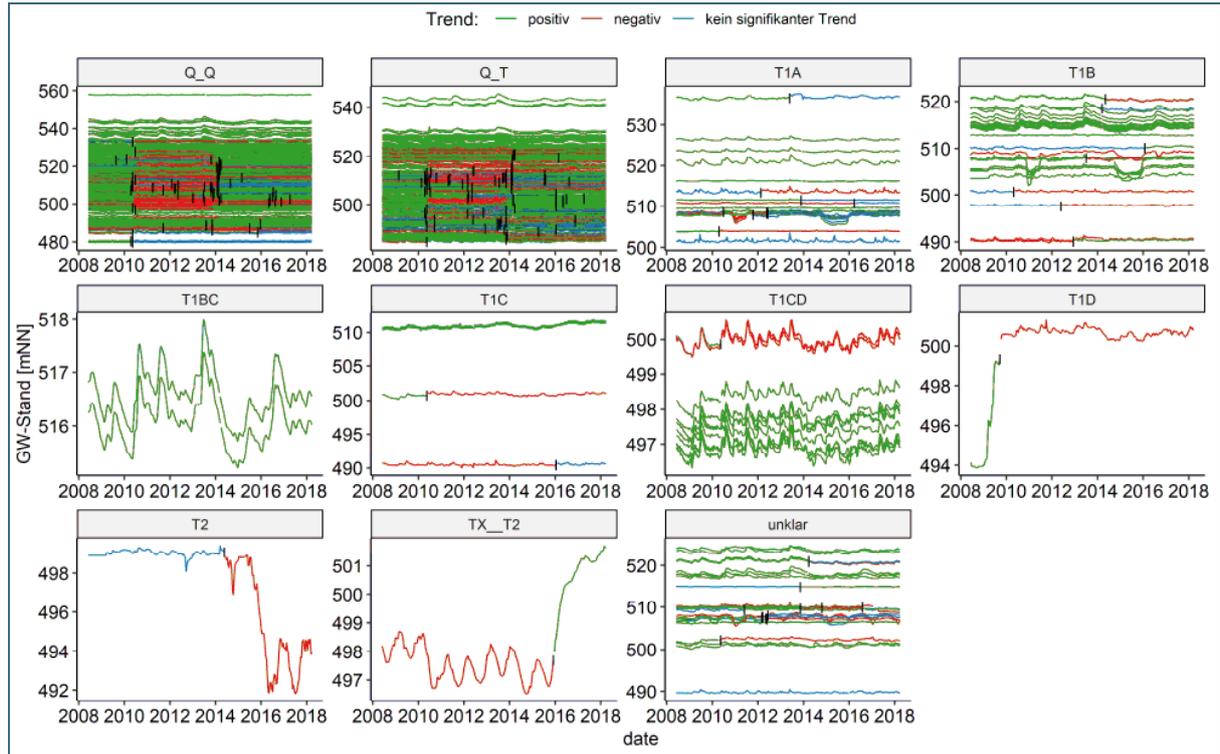


Abb. 94: Ganglinien gemäß der Horizontzuordnung durch das 3D-Modell geordnet und klassifiziert nach negativem (fallendem), positiven (steigendem) und ohne signifikantem Trend. Der Trend wurde mit dem „prewhitened“ Mann Kendall Test nach Yue et al. (2002) durchgeführt. Wurden in einer Ganglinie signifikante „change points“ (schwarze Balken) ermittelt wurde die Ganglinie geteilt und die Trendanalyse für beide Teile durchgeführt.

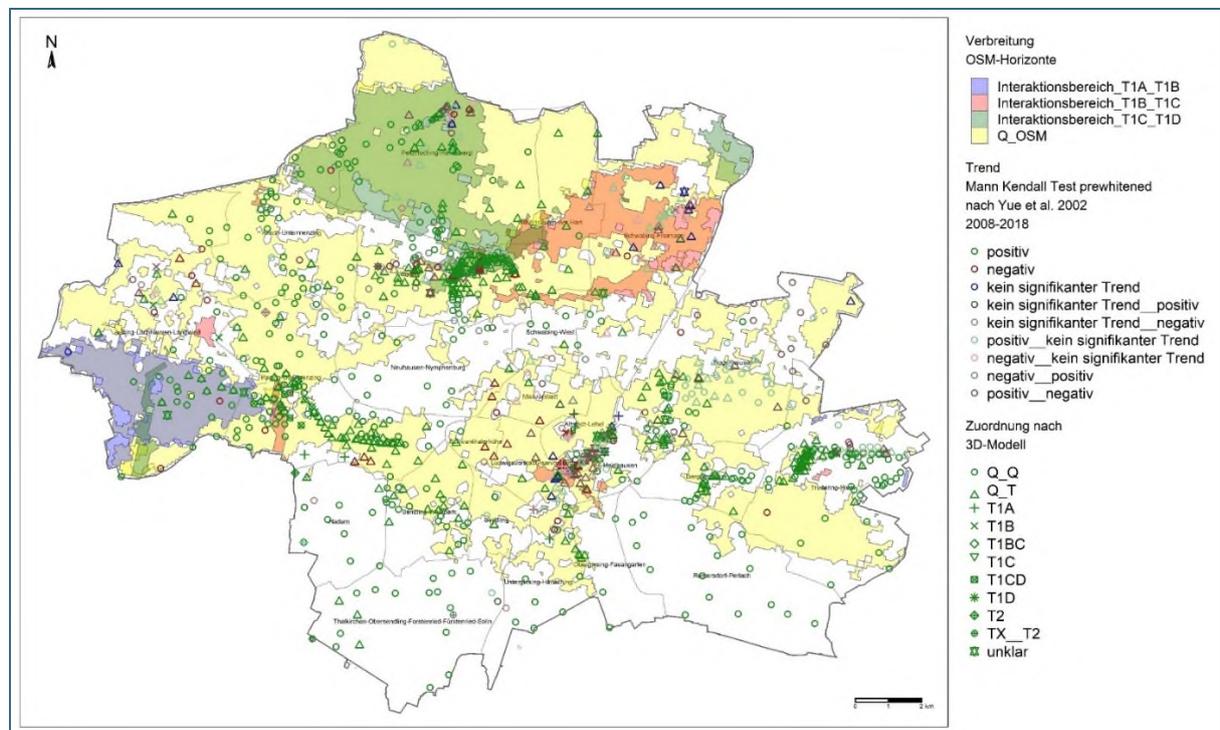


Abb. 95: Ganglinien gemäß der Horizontzuordnung durch das 3D-Modell geordnet und klassifiziert nach negativem (fallendem), positiven (steigendem) und ohne signifikantem Trend und entsprechende Kombinationen, falls die Ganglinie aufgrund des Vorhandenseins eines „change points“ geteilt wurde.

### 5.3.3 Ergebnisse der Analyse der Grundwasserspiegelschwankungen

Eine Übersicht über die mittleren Schwankungen des Grundwasserstandes im untersuchten 10-Jahres Zeitraum (2008 bis 2018), geordnet nach der Horizontzuweisung durch das 3D-Modell, ist in Tab. 28 und Abb. 96 dargestellt. Tendenziell ergibt Methode 2 (Median der Monatsdifferenzen) höhere Grundwasserschwankungen als Methode 1 (25-/75 %-Quantil). Die Schwankungshöhen unterscheiden sich dabei nicht wesentlich zwischen den im Quartär verfilterten Messstellen (Q\_Q) und den Messstellen des T1-Horizontes die in Bereichen ohne Trennschicht zu den quartären Kiesen liegen (Q\_T). Auch die oberen Horizonte T1A und T1B liegen in diesem Bereich. Da für die tieferen Horizonte nur vereinzelte Ganglinien zur Verfügung stehen, ist hier eine generelle Aussage schwierig. Eine räumliche Übersicht über die Verteilung der Schwankungshöhen ist in den Abb. 97 und Abb. 98 für Methode 2 dargestellt. Für Methode 1 ergibt sich eine sehr ähnliche räumliche Verteilung der Schwankungen des Grundwassers.

Tab. 28: Mittlere Schwankungen des Grundwasserspiegels für die einzelnen Horizonte des 3D-Modells

Horizontzuordnung gemäß 3D-Modell (Anzahl Ganglinien)	Arithmetisches Mittel (m)		Median (m)		Standardabweichung (m)		25 %-Quantil (m)		75 %-Quantil (m)	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Methode	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Q_Q (531)	0,35	0,61	0,32	0,55	0,17	0,27	0,22	0,42	0,45	0,79
Q_T (506)	0,28	0,51	0,24	0,47	0,14	0,25	0,18	0,33	0,35	0,65
T1A (21)	0,29	0,47	0,25	0,46	0,21	0,29	0,20	0,35	0,35	0,59
T1B (27)	0,33	0,56	0,37	0,58	0,13	0,19	0,26	0,46	0,44	0,69
T1BC (2)	0,47	0,75	-	-	-	-	-	-	-	-
T1C (5)	0,27	0,38	0,24	0,35	0,11	0,08	0,20	0,33	0,36	0,38
T1CD (10)	0,23	0,48	0,23	0,48	0,03	0,06	0,21	0,45	0,24	0,53
T1D (1)	0,29	0,46	-	-	-	-	-	-	-	-
T2 (1)	0,19	0,23	-	-	-	-	-	-	-	-
TX_T2 (1)	0,86	1,1	-	-	-	-	-	-	-	-
Unklar (24)	0,34	0,58	0,31	0,55	0,19	0,32	0,23	0,43	0,43	0,70

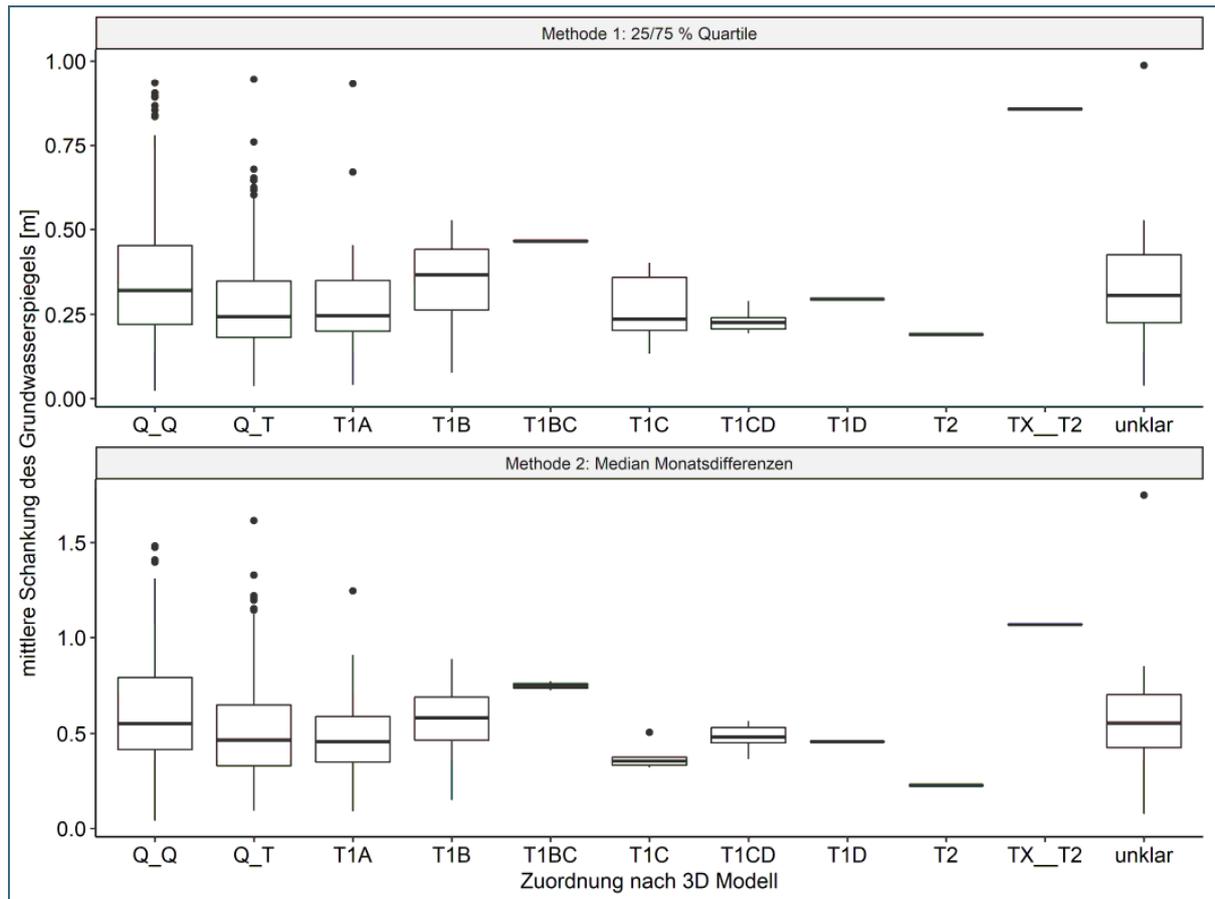


Abb. 96: Übersicht über die mittlere Schwankung des Grundwasserstandes für die ausgewiesenen Horizonte des 3D-Modells

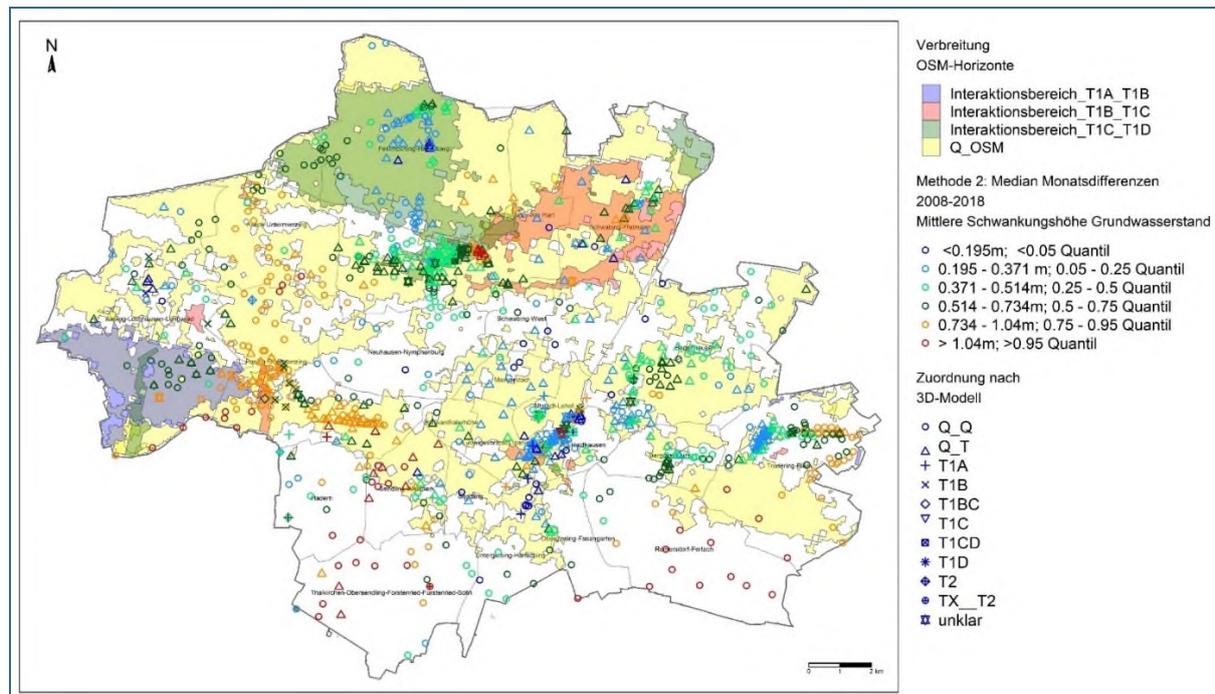


Abb. 97: Kategorisierte, mittlere Schwankungshöhen der Grundwasserstände für die verschiedenen Horizonte des 3D-Modells. Im Hintergrund sind die hydraulischen Interaktionsbereiche dargestellt.

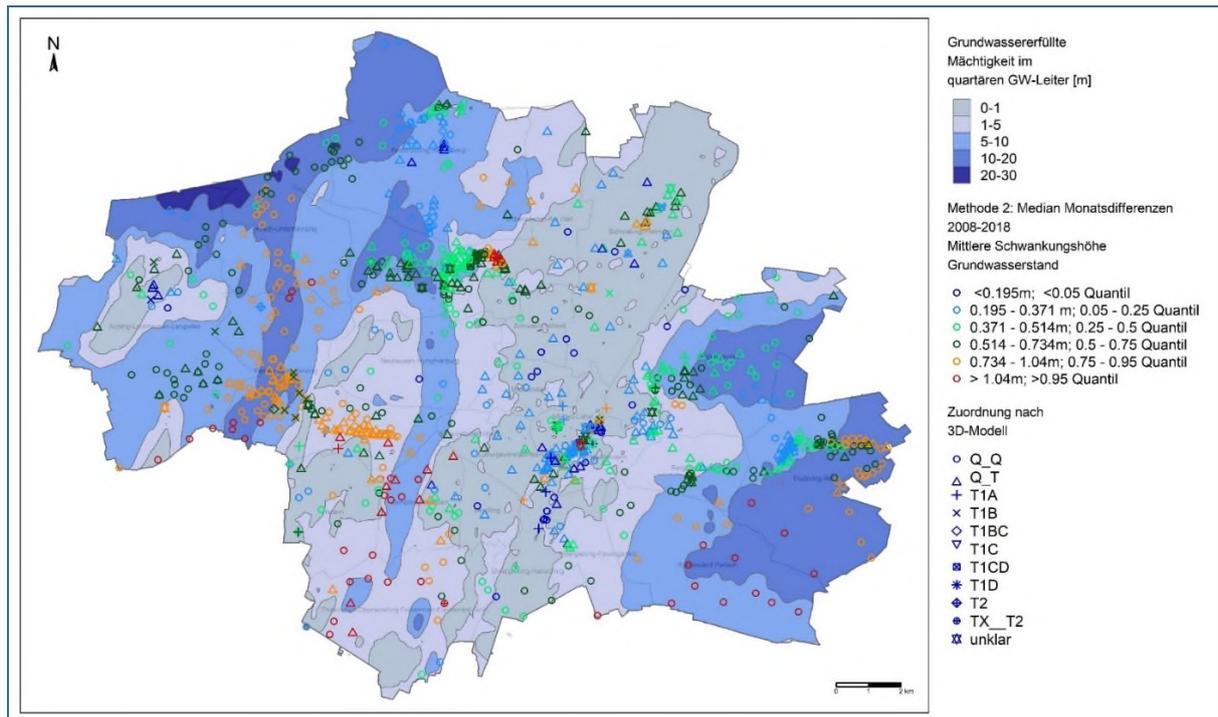


Abb. 98: Kategorisierte, mittlere Schwankungshöhen der Grundwasserstände für die verschiedenen Horizonte des 3D-Modells. Im Hintergrund ist die grundwassererfüllte Aquifermächtigkeit dargestellt.

## 6 Schlussfolgerung und Ausblick

Mehrere umfangreiche Messkampagnen, sowie intensive Datenrecherchen, Datenerhebungen und qualitativ hochwertige Aufarbeitungen ermöglichten einen hohen Detaillierungsgrad in der Darstellung der hydrogeologischen Situation im quartären, sowie in den tertiären Grundwasserleitern im Großraum München. Besonders für das Münchner Stadtgebiet und das nähere Umland konnten ein deutlicher Zugewinn an Detailinformationen verzeichnet werden, um die hydrogeologische Situation zu beschreiben.

Die vorliegende Publikation bietet eine konzentrierte Darstellung der Ergebnisse zu den oberflächennahen hydraulischen Verhältnisse im Großraum München aus den Projekte GEPO und GeoPot (2012 bis 2019). Die Projekte bearbeiteten neben den vorgestellten hydrogeologischen Fragestellungen, auch noch weitere Anliegen, wie zum Beispiel die Ermittlung geothermischer Parameter, die Hydrochemie der OSM, sowie erste Abschätzungen zum geothermischen Potential des quartären Hauptgrundwasserleiters.

Die Arbeiten und deren Grundlagenbereitung dienen einer optimierten Abschätzung der Nutzungsbedingungen geothermischer Anlagen zu Heiz- und Kühlzwecken, die Erhöhung ihrer Effizienz und die Vermeidung gegenseitiger Beeinflussung. Grundlagen für ein Untergrundmanagement, sowie Einfluss auf die zukünftige Energiewende im Raum München wurden erarbeitet und durch weitere Projekte am Lehrstuhl für Hydrogeologie der TUM weiterentwickelt.

Ein detaillierter und neu entwickelter, automatisierter Aufbau komplexer 3D-Lithofaziesmodelle bietet einen erstmaligen und umfassenden Einblick in den Untergrund Münchens, sowie eine Fülle von praxisorientierten Anwendungsmöglichkeiten für die Zukunft. Ein ähnliches Projekt für den Großraum Augsburg ist bereits in Bearbeitung (Projekt GeoSPOT-Augsburg: 2020 bis 2023).

Weiterhin existieren neue Herausforderungen, wie beispielsweise unklarer Genehmigungsgrundlagen oder ökologische Fragestellungen. Für eine Weiterentwicklung der oberflächennahen Geothermie in Stadtgebieten, eine fortwährende Optimierung und ein Ausbau alternativer und regenerativer Energien hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Reduktion und des fortschreitenden Klimawandels bedarf es Klärung und Diskussion über die Nutzung des Untergrundes, für die, durch die durchgeführten Arbeiten, wichtige Diskussionsgrundlagen erhoben wurden.

## 7 Kontakt, Datenbezug und Danksagung

Die Abschlussberichte, Anlagen und digitalen Daten der Projekte GEPO (Zosseder 2015) und GeoPot (Zosseder 2019) sind über die Datenstelle des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) zu beziehen. Die Abschlussberichte enthalten zum Teil detailliertere Informationen zu den einzelnen Themengebieten, sowie zusätzliche Kapitel und Forschungsergebnisse, die in dieser Publikation nicht angesprochen werden.

Die Datenstelle des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU) erreichen Sie unter folgender URL:

[www.lfu.bayern.de/umweltdaten/datenstelle](http://www.lfu.bayern.de/umweltdaten/datenstelle)

Ansprechpartner für Rückfragen und die Produkte des GEPO und des GeoPot-Projekts sind:

**Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU):**

Dr. T. Spörlein

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Hans-Högn-Straße 12

95030 Hof

[www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

**TU München – Lehrstuhl für Hydrogeologie:**

Projektleitung:

Dr. K. Zosseder

Lehrstuhl für Hydrogeologie

Arcisstr. 21

80333 München

[www.hydro.geo.tum.de](http://www.hydro.geo.tum.de)

## Danksagung

Folgende Personen und Institutionen waren maßgeblich an der Bearbeitung der Projekte GEPO und GeoPot beteiligt und trugen somit zur Veröffentlichung dieser Publikation im Rahmen der Geologica Bavarica bei.

Lehrstuhl für Hydrogeologie der TU München

- Projektleitung: Dr. K. Zosseder
- Projektmanagement: Dr. L. Chavez-Kus, M. Kerl
- Projektmitarbeiter/-innen GEPO: P. Kotyla, G. Somogyi, K. Albert, A. Albarrán-Ordás, K. Beichel
- Projektmitarbeiter/-innen GeoPot: A. Albarrán-Ordás, Dr. M. Gossler, M. Theel, J. Huch, Dr. A. Kiecak, F. Shajari
- Zudem danken wir den zahlreichen Studenten/-innen die uns in den letzten Jahren durch Ihre Abschlussarbeiten am Lehrstuhl teils tatkräftig bei den durchzuführenden Arbeiten unterstützt haben.

Folgende Institutionen trugen durch Ihre Mitarbeit und / oder Ihren Datenaustausch zum Gelingen der Projekte GEPO und GeoPot bei:

- Referat für Gesundheit und Umwelt der Stadt München
- Münchner Stadtentwässerung
- Stadt München Baureferat
- Stadtwerke München
- Wasserwirtschaftsamt München, Rosenheim, Weilheim, Donauwörth
- Flughafen München
- Deutsche Bahn – 2. S-Bahn-Stammstrecke
- Autobahndirektion Südbayern
- E.ON Deutschland

## 8 Literaturverzeichnis

- Aghabozorgi, S., A. Seyed Shirkorshidi und T. Ying Wah (2015): Time-series clustering - A decade review. In: *Information Systems* 53: 16–38.
- Akin, H. und H. Siemes (1988): *Praktische Geostatistik. Eine Einführung für den Bergbau und die Geowissenschaften.* Hochschultext. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Albarrán-Ordás, A. & Zosseder, K. (2019): Bericht zum geologischen 3D-Modell: Faziesmodell Stadtgebiet München. Lehrstuhl für Hydrogeologie, München.
- Albarrán-Ordás, A. & Zosseder, K. (2020): Geostatistische Reliefmodellierung der quartären Grundwasserleiterbasis in der Münchener Schotterebene unter Verwendung von Massendaten [Geostatistical relief modelling of the Quaternary aquifer basis in the Munich Gravel Plain with the use of big datasets]. *Journal of Applied and Regional Geology ZDGG*, 171 (1): 1–19. doi: 10.1127/zdgg/2020/0206.
- Albarrán-Ordás, A. & Zosseder, K. (2022): The Di models Method: Geological 3-D modeling of detrital systems consisting of varying grain fractions to predict the relative lithological variability for a multipurpose usability. In: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 81, 34. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02538-2>.
- Alexandersson, H. (1986): A homogeneity test applied to precipitation data. In: *Journal of Climatology* 6 (6): 661–675.
- Bauer, M., Neumann, P., Scholz, M. & Thuro, K. (2005): *Die Geologie des Münchner Untergrundes und seine Bedeutung für die Baugrundmodellbildung in städtischen Gebieten.*
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (1983): *Grundwassertemperaturen München.* Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft. Informationsberichte des Byer. Landesamtes für Wasserwirtschaft. 26 S.; München.
- Berndt, D. J. und J. Clifford (1994): Using Dynamic Time Warping to Find Patterns in Time Series. In: *KDD-94 Workshop on Knowledge Discovery in Databases* 398: 359–370.
- Blasy, L. (1974): *Die Grundwasserverhältnisse in der Münchner Schotterebene westlich der Isar.* Dissertation. Fakultät für Allgemeine Wissenschaften, Technische Universität München, München.
- Blasy & Mader (2007): *Hydrogeologisches Gutachten: Kiesabbau Firma Hörgstetter, Flurstück 727 und 729, Forstinning, Landkreis Ebersberg. – Gutachten der Fa. Ingenieurbüro Blasy & Mader GmbH im Auftrag der Fa. Hörgstetter.*
- Blasy – Øverland, DR. (2007): *Fortschreibung des Hydrogeologischen Modells und des Numerischen Modells. – Vorhaben im Auftrag des Flughafens München GmbH (unveröff.).*
- Blumstock, M., D. Tetzlaff, J. J. Dick, G. Nuetzmann und C. Soulsby (2016): Spatial organization of groundwater dynamics and streamflow response from different hydrogeological units in a montane catchment. In: *Hydrological Processes* 30 (21): 3735–3753.
- Brauchler, R., R. Hu, L. Hu und T. Ptak (2012): Bestimmung von hydraulischen Parametern in Lockergesteinen. Ein Vergleich unterschiedlicher Feldmethoden. In: *Grundwasser* 17 (2): 57–67.
- Buishand, T.A. (1982): Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. In: *Journal of Hydrology* 58: 11–27.
- Buishand, T.A. (1984): Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. In: *Journal of Hydrology* 73: 51–69.

- Burger, M. (1993): Sickerwasserneubildung und Sickerwasserbewegung in fein- und grobkörnigen Lockergesteinen aus dem Tertiärhügelland nördlich von München/Obb. GSF Bericht Nr. 38. Institut für Hydrologie, München.
- Doben, K., Doppler, G., Freudenberger, W., Jerz, H., Meyer, R.K.F., Mielke, H., Ott, W.-D., Rohrmüller, J., Schmidt-Kaler, H., Schwerd, K. & Unger, J.H. (1996): Geologische Karte von Bayern 1 : 500 000. – 4. Aufl., München (Bayer. Geol. Landesamt).
- Dohr, F. (1989): Die Grundwassertemperatur in dem oberflächennahen Grundwasserstockwerk des Stadtgebietes München. Dissertation. Institut für Allgemeine und Angewandte Geologie, Ludwig-Maximilians Universität, München.
- Dohr, F. (1995): Geologische und Hydrologische Beschaffenheit. – In: Spieker, H. (Hrsg.): Der Münchner Untergrund, 1-10.
- Dohr, F. (2011): Grundwassertemperaturen München. Messungen 2009–2010. Referat für Gesundheit und Umwelt.
- Dohr, F. und W. Gruban (1999): Grundwasser-Überwachungssystem der Landeshauptstadt München. Abschlussbericht. Referat für Gesundheit und Umwelt.
- Doppler, G., K. Heissig und B. Reichenbacher (2005): Die Gliederung des Tertiärs im süddeutschen Molassebecken. In: Newsletters on Stratigraphy 41 (1): 359–375.
- DIN 18130-1 (1998): Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben. Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts. Teil 1: Laborversuche. Beuth, Berlin.
- Egger, R. (1978): Das Grundwasser in der Oberen Süßwassermolasse im Raum München und Augsburg.
- Egger, R., L. Eichinger, W. Rauert und W. Stichler (1983): Isotopenhydrologische Untersuchungen des Tiefengrundwassers im südbayerischen Jungtertiär. In: Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft 134: 985–997.
- Entenmann, W. (1992): Das hydrogeologische Beweissicherungsverfahren für Hausmülldeponien. – Band 1: Verfahren, Fallbeispiele, Erkundung und Erfassung hydraulischer Daten. – Clausthaler Geol. Abh., 49: 164 S., Köln.
- Esri (o.J.): Funktionsweise von "Darcy-Strömung" und "Darcy-Geschwindigkeit" [online]. <https://desktop.arcgis.com/de/desktop/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-darcy-flow-and-darcy-velocity-work.htm> (abgerufen am 22.11.2021).
- Exler, H. J. (1967): Hydrogeologische Profile der U-Bahn-Trasse zwischen Haupt- und Ostbahnhof der Landeshauptstadt München. In: Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 1967 (Sonderheft), S. 101–111.
- Freudenberger, W. und Schwerd, K. (1996): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000. 329 S., Bayerisches Geologisches Landesamt München. München.
- Gebhardt, P. (1968): Die geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse beim Münchner U-Bahn-Bau. 144 S.; Diss., Hohe Naturwiss. Fak., LMU München, München.
- Grottenthaler, W. (1980): Geologische Karte von Bayern 1:25 000. Erläuterungen zum Blatt Nr.7833 Fürstfeldbruck. München.
- Hafen, U. und K. Eckenberger (1992): Hydrogeologische Systemanalyse Tertiäre Grundwasservorkommen im Raum Ober-/ Unterschleissheim. Projekt Nr. 5820.90. WATEC, Ingenieurgesellschaft für Hydrogeologie und Hydrochemie mbH, Markt Schwaben.

- Harvey, A. und N. Shephard (1993): Structural time series models. In: Maddala, G. S., C. R. Rao und H.D. Vinod (Hrsg.): Handbook of Statistics. Elsevier B.V: 23–49.
- Hölting, B. und W. G. Coldewey (2013): Hydrogeologie. Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- HydroConsult GmbH (2011): Gewinnungsgebiet „Maiszagl“ – Hydrogeologisches Modell und Ermittlung des Grundwassereinzugsgebietes. – Gutachten der Fa. HydroConsult GmbH im Auftrag der Verwaltungsgemeinschaft Hörlkofen (unveröff.). Afragässchen 7, 86150 Augsburg.
- HydroConsult GmbH (2016): Hydrogeologische Studie zum Tertiärgrundwasser in Bayrisch-Schwaben. PN 16-301. Afragässchen 7, 86150 Augsburg.
- Isaaks, E. H. & Srivastava, R. M. (1989): An introduction to applied geostatistics: 561 S.; New York (Oxford Univ. Pr.).
- Izakian, H., W. Pedrycz und I. Jamal (2015): Fuzzy clustering of time series data using dynamic time warping distance. In: Engineering Applications of Artificial Intelligence 39: 235–244.
- Jerz, H. (1987): Geologische Karte von Bayern 1 : 25 000. Erläuterungen zum Blatt Nr. 7934 Starnberg Nord: 128 S.; München (Bayer. Geol. Landesamt).
- Khaliq, M. N., T. B.M.J. Ouarda, P. Gachon, L. Sushama und A. St-Hilaire 2009): Identification of hydrological trends in the presence of serial and cross correlations: A review of selected methods and their application to annual flow regimes of Canadian rivers. In: Journal of Hydrology 368 (1-4): 117–130.
- Khaliq, M. N. und T.B.M.J. Ouarda (2007): On the critical values of the standard normal homogeneity test (SNHT). In: International Journal of Climatology 27: 681–687.
- Kisskalt, K. (1940): Quantitative Bestimmung bei Untersuchungen über die Strömung des Grundwassermittels Färbung und Salzung. – Archiv für Hygiene und Bakteriologie 125 (1): S.29–38.
- Kitanidis, P. K. (1997): Introduction to Geostatistics. Applications in Hydrogeology: 271 S. Cambridge (Cambridge University Press).
- Krause, K.-H. (2001): Die geologisch-hydrogeologische Situation im Jung-und Altmoränengebiet des Andechser Höhenrückens zwischen Ammer-und Würmsee und in der nördlich angrenzenden Wurzelzone der westlichen Münchner Schotterebene (Oberbayern). Dissertation. Fakultät für Chemie, Technische Universität München, München.
- Künhardt, M. & Niessner, R. (1995): Untersuchungen zum Ausbreitungsverhalten von PAHs in einem variablen Modellaquifer. Z. dt. geol. Ges. 146 (1), 30–38.
- Kwon, S. H. (1998): Cluster validity index for fuzzy clustering. In: Electronics Letters 34 (22): 2176–2177.
- Lang, U., S. Mirbach, M. Morio und A. Kissinger (2019): ReWaM - Verbundprojekt SEEZEICHEN: Tracer-Methoden zur Identifizierung von Grundwasser- und Zufluss-Einschichtungen und deren Einfluss auf Wasserqualität und Trinkwassergewinnung am Beispiel des Bodensees, Teilprojekt 4. Abschlussbericht. Ingenieurgesellschaft Pro. Kobus und Partner GmbH, Stuttgart.
- Langguth, H.-R. und R. Voigt (2013): Hydrogeologische Methoden. Springer, Berlin.
- Lanzante, J. R.. (1996): Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: Theory and examples, including applications to historical radiosonde station data. In: International Journal of Climatology 16 (11): 1197–1226.
- Leven, C., H. Weiß, T. Vienken und P. Dietrich (2011): Direct-Push-Technologien – Effiziente Untersuchungsmethoden für die Untergrunderkundung. In: Grundwasser 16 (4): 221–234.

- Lischeid, G., J. Steidl und C. Merz (2012): Funktionalanalyse versus Trendanalyse zur Abschätzung anthropogener Einflüsse auf Grundwasserganglinien. In: *Grundwasser* 17 (2): 79–89.
- Mudelsee, M. (2019): Trend analysis of climate time series: A review of methods. In: *Earth-Science Reviews* 190 (June 2018): 310–322.
- Müller, J. (1952): Bedeutsame Feststellungen bei Grundwasserverunreinigungen durch Benzin. *GWF* 93 (8), 205–209.
- München (2022): *Wikipedia*, [online]. <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=M%C3%BCnchen&ol-did=219588300#Klima> (abgerufen am 27.01.2022)
- Münchsdorfer, F. (1922): Das Geologische Querprofil von München.
- Pettitt, A. N. (1979): A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem Published. In: *Journal of the Royal Statistical Society. Series C* 28 (2): 126–135.
- Pike, R. J., Evans, I.S. & Hengl, T. (2008): Geomorphometry: A brief guide. – In: Hengl, T. & Reuter, H.I. (Hg.): *Geomorphometry: Concepts, software, applications. – Developments in Soil Science*, 33: 1–28; Amsterdam (Elsevier).
- Procher, M. (1985): Die Grundwasserdüker- und Überleitungsanlagen der U-Bahnlinie U 8/1 mit einer Beurteilung ihrer hydraulischen Wirksamkeit und rechnerischen Bemessung. Dissertation. Technische Universität München, München.
- Prösl, k. H. und Anders (2011): Bilanzierung der Grundwasservorkommen innerhalb der Gesteine der tertiären Oberen Süßwassermolasse im Großraum München.
- Salameh, E. (1974): Hydrogeologie und Hydrochemie des nordwestlichen Bereiches der Münchner Schotterebene und des angrenzenden Tertiärs zwischen Isar und Paar/vorgelegt von Elias Salameh. Allgemeine Wissenschaften, Technische Universität München, München.
- Schirm, E. (1968): Die hydrogeologischen Verhältnisse der Münchner Schotterebene östlich der Isar. Beitrag zur hydrologischen Dekade der UNESCO. 139 S.; Bayer. Landesstelle für Gewässerkunde, München.
- Schuler und Gödecke (1995): Hydrogeologisches Gutachten zur Erkundung des Tertiären Grundwassers für den Zweckverband zur Wasserversorgung (ZVzWV) der Alto-Gruppe. (Markt Altomünster - Markt Indersdorf - Röhrmoos - Vierkirchen - Weichs). Projekt-Nr.: H 401.0564. Geotechnische Nüro Prof. Schuler - Dr.Ing. Gödecke, Augsburg.
- Seiler, K.-P. (1979): Durchlässigkeiten und Porosität von Lockergesteinen in Oberbayern. *Mitt. Ing.- u. Hydrogeol.* 9, 105–126.
- Storz, K., H. Steger, V. Wagner, P. Bayer und P. Blum (2017): Methodenvergleich zur Bestimmung der hydraulischen Durchlässigkeit. In: *Grundwasser* 22 (2): 103–111.
- Unger, H. J. (1983): Versuch einer Neugliederung der Oberen Süßwassermolasse. In: *Geologisches Jahrbuch Reihe A Heft 67 (67):* 5–35.
- Verstraeten, G., J. Poesen, G. Demarée und C. Salles (2006): Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): Implications for assessing soil erosion rates. In: *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 111 (22): 1–11.
- Vogt, N. (2006): Raumordnungsunterlagen 3. Start- und Landebahn. Wasserwirtschaft. Ingenieurgesellschaft Blasy - Schlegel. München, Eching am Ammersee.
- Wang, W. und Y. Zhang (2007): On fuzzy cluster validity indices. In: *Fuzzy Sets and Systems* 158 (19): 2095–2117.

Yue, S., P. Pilon, B. Phinney und G. Cavadias (2002): The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. In: Hydrological Processes 16 (9): 1807–1829.

Zimniok, K. (1967): Die Grundwasserverhältnisse beim U-Bahn-Bau in München. Dt. Gewässerkundl. Mitt. Sonderheft, 94–100.

Zosseder, K. (2007): Heterogenitäten von PAK-Kontaminationen im Grundwasser. Bochumer Geowissenschaftliche Arbeiten Heft 12, 236.

Zosseder, K. (2015): GEPO Münchner Schotterebene. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben "Erstellung einer Datengrundlage für die Abschätzung des geothermischen Potenzials im oberflächennahen Untergrund des quartären Grundwasserleiters des Großraum Münchens. Lehrstuhl für Hydrogeologie, München.

Zosseder, K. (2019): GeoPot Tertiäruntergrund Großraum München - Parameterbestimmung für die Abschätzung der geologischen Nutzungspotenziale in der Planungsregion 14 und im tertiären Untergrund des Großraums München. Lehrstuhl für Hydrogeologie, München.



Eine Behörde im Geschäftsbereich  
Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Verbraucherschutz

