

**11485/341b Tunnel Starnberg****Hydrogeologischer Bericht - Teil 1**

Allgemeine Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse

Auftraggeber: Staatliches Bauamt Weilheim  
Münchener Str. 39  
82362 Weilheim  
Tel.: 0881 9901160  
Fax: 0881 99011-00  
Herr Ludwig, Herr Zeindl

Planungsbüro: Ingenieurbüro EDR GmbH  
Dillwächterstraße 5  
80686 München  
Tel.: 089 547112-26  
Fax: 089 547112-826  
Herr Eger, Herr Hotop

Bezug: Auftragsnummer: 18 S 0082 vom 19.12.2018

Textseiten: 36  
Anlagen: 1 bis 7 379 Seiten  
Verteiler: 2-fache Ausfertigung an Auftraggeber  
Textfile: 11485-341b GA-Hydrogeologischer Bericht Teil 1-  
FB\_Wy\_Cu\_Ly.docx

Bearbeiter: Andreas Witty, M.Sc. Tel.: 089 / 289 27146  
Johannes Jessen, M.Sc. Tel.: 089 / 289 27140  
Dr.-Ing. Benedikt Lypp Tel.: 089 / 289 27190  
Prof. Dr.-Ing. habil. Jochen Fillibeck Tel.: 089 / 289 27142

Zeichen: Wy/Je/Fb/Ly/Cu

Ort, Datum: München, 21.09.2023

## 1 Allgemeines

### 1.1 Allgemeine Projektbeschreibung

Das Staatliche Bauamt Weilheim plant den Bau eines Tunnels zur Verkehrsentlastung der Stadt Starnberg. Die Trasse beginnt von Süden her kommend in der Weilheimer Straße, etwa 75 m westlich der Franz-Heidinger-Straße mit einem Rampenbauwerk, gefolgt von einem Tunnelabschnitt in offener Bauweise mit dem Anschlag für den bergmännischen Tunnelvortrieb. Der bergmännische Tunnelabschnitt unterquert den Almeidaberg, den Schlossberg und den Georgenbach. Im Anschluss folgen ein Abschnitt in offener Bauweise und das nördliche Rampenbauwerk, welches etwa 25 m westlich der Bahnlinie München – Garmisch endet.

### 1.2 Aufgabenstellung und Gliederung

In den hydrogeologischen Gutachten des Zentrum Geotechnik der TU München werden die hydrogeologischen Verhältnisse im Bereich des Tunnels Starnberg beschrieben sowie die Auswirkungen der Bauwerke auf die hydrogeologischen Verhältnisse behandelt. Hierfür werden die Ergebnisse des aktuellen 5. Erkundungsprogramms sowie der vorangegangenen Erkundungsprogramme berücksichtigt. Im Teil 1 des hydrogeologischen Berichts werden die Grundwasserverhältnisse allgemein und im Teil 2 Empfehlungen für die Bemessungswasserstände sowie Angaben zum Erfordernis von Grundwasserumleitungsmaßnahmen zusammengestellt. Die Beschreibung der Baugrundverhältnisse sowie die Folgerungen für die Bauwerke enthalten die Teile 1 und 2 des geotechnischen Berichts.

Die Leistungen des Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München umfassen das Erstellen und Abstimmen der geotechnischen Untersuchungsprogramme, die fachtechnische Betreuung der Aufschlussarbeiten, das Erstellen und Durchführen der bodenmechanischen und hydrogeologischen Untersuchungsprogramme sowie die Auswertung und Beschreibung der Untersuchungsergebnisse.

Durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Cudmani – und in Zusammenarbeit mit ihm durch wissenschaftliche Mitarbeiter des Prüfamts – wird die geotechnische Beratung im Zuge der Vorplanung wahrgenommen. Die Bearbeitungsschwerpunkte der Gutachten ergeben sich aus den Erfordernissen zur Ausschreibung.

Im nachfolgenden hydrogeologischen Bericht – Teil 1 zur Ausschreibung werden die Grundwasserverhältnisse im Einflussbereich des Tunnels dargestellt.

### 1.3 Unterlagen

Zur Erarbeitung des hydrogeologischen Berichts - Teil 1 standen folgende Unterlagen zur Verfügung:

- [U1] Geologische Karte von Bayern 1:25.000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 7934 Starnberg Nord; H.JERZ; Bayerisches Geologisches Landesamt München 1987
- [U2] Geologische Karte von Bayern 1:25.000, Erläuterungen zum Blatt Nr. 8034 Starnberg Süd; H.JERZ; Bayerisches Geologisches Landesamt München 1987
- [U3] „Wanderungen in die Erdgeschichte (8). Auf den Spuren der Eiszeit südlich von München - östlicher Teil - “; MAYER & SCHMIDT-KALER; Verlag Dr. Friedrich Pfeil München 1997
- [U4] „Wanderungen in die Erdgeschichte (9). Auf den Spuren der Eiszeit südlich von München - westlicher Teil - “; MAYER & SCHMIDT-KALER; Verlag Dr. Friedrich Pfeil München 1997
- [U5] Geotechnisches Gutachten vom 23.10.1990, Projekt Nr.: 4972, Obermeyer Planen + Beraten, mit den darin genannten Unterlagen
- [U6] Ergebnisse aus Aufschlussbohrungen, Ausführungszeitraum April bis September 2009, Fa. Abt GmbH
- [U7] Ergebnisse aus Pumpversuchen und Kurzpumpversuchen im Feld von der Fa. Harress Pickel Consult AG (HPC)
- [U8] Ergebnisse aus geophysikalischen Versuchen in Grundwassermessstellen von der Fa. BLM - Gesellschaft für Bohrlochmessungen mbH
- [U9] Abschlussdokumentation des 4. Erkundungsprogramms in den Jahren 2018 bis 2020, Fa. Baugrund Süd.
- [U10] Abschlussdokumentation des 5. Erkundungsprogramms in den Jahren 2022 bis 2023, Fa. Baugrund Süd.
- [U11] Planunterlagen des Ingenieurbüro EDR zum Tunnel Starnberg
  - a) Lagepläne mit Trassenlage, Stand März 2019
  - b) Höhenpläne mit Gradienten und GOK, Stand März 2019
- [U12] Grundwasserstände der Stichtagsmessung vom 26 und 27.02.2019 sowie weiterer Messtermine
- [U13] [www.hnd.bayern.de](http://www.hnd.bayern.de), Hochwassernachrichtendienst des Bayerischen Landesamts für Umwelt, Messstellennummer 16663002
- [U14] Geotechnischer Bericht Teil 1 zum Tunnel Starnberg, Proj.-Nr. 11485/340b (in Bearbeitung), Prof. Dr.-Ing. R. Cudmani, Zentrum Geotechnik TU München mit den darin angegebenen Unterlagen

## 2 Lage und Projektbeschreibung

Zur Verkehrsentlastung der Stadt Starnberg wird ein Tunnel geplant, durch den die Bundesstraße B2 führen soll.

Die Trasse beginnt in der Weilheimer Straße (Bundesstraße 2) etwa 75 m westlich der Franz-Heidinger-Straße mit einem 150 m langen Rampenbauwerk, gefolgt von einem 115 m langen

Tunnelabschnitt in offener Bauweise. Der bergmännische Tunnelabschnitt verläuft zuerst unter der Weilheimer Straße und ab Bau-km 0+850 östlich davon, wobei der Almeidaberg mit einer maximalen Überdeckung von etwa 31 m unterquert wird. Anschließend wird das Gebäude Weilheimer Str. 7 mit einem Abstand von 10,8 m unterfahren, gefolgt vom Schlossberg, bei dem die Überdeckung auf maximal etwa 47,5 m ansteigt. Im beschriebenen Bereich fällt der Tunnel mit 4,2 % und erreicht bei Bau-km 1+734 seinen Tiefpunkt. Anschließend steigt die Trasse mit 4,5 % auf, unterquert den Georgenbach und einige Bauwerke mit einer Überdeckung von minimal 8,6 m (Münchner Str. 1) und folgt ab etwa Bau-km 2+100 wieder dem Straßenverlauf der Bundesstraße 2 (hier Münchner Straße). Der bergmännische Tunnelabschnitt endet nach 1.787 m. Im Anschluss daran wird der Tunnel über 192 m in offener Bauweise erstellt. Über die nördliche Rampe bindet die Trasse etwa 25 m westlich der Bahnlinie München-Garmisch an die bestehende Bundesstraße 2 an.

Die Trassenlage und die Gradienten sind in den Anlagen 1 und 2 des vorliegenden Berichts dargestellt.

Außer der Tunnelröhre und den Rampen sind insgesamt eine doppelseitige und zwei halbseitige Querschnittsaufweitungen für Pannenbuchten sowie sechs Notausstiege/-gänge und ein Lüftungsbauwerk mit Anbindungen an den Tunnel zu erstellen.

Im Laufe der Planung des Tunnels Starnberg wurden insgesamt fünf geotechnische Erkundungsprogramme durchgeführt, wobei das letzte vom Jahr 2022 bis 2023 ausgeführt wurde. Im nachfolgenden Bericht werden die Erkundungsergebnisse aus allen fünf Bohrprogrammen berücksichtigt.

### **3 Erkundungsergebnisse**

#### **3.1 Bohrungen nach DIN 4021 bzw. nach DIN 22475-1**

Im Zeitraum April bis September 2009 wurden von der Fa. Abt GmbH 49 Aufschlussbohrungen nach DIN 4021 im Rammkern- bzw. Rotationskernbohrverfahren mit Bohrdurchmessern von 146 mm bis 419 mm und Tiefen von 12 m bis 62 m unter Ansatzpunkt abgeteuft. Davon wurden 35 Bohrungen als Einfach- bis Dreifachgrundwassermessstellen (GWM) ausgebaut.

Im Zeitraum von November 2009 bis März 2010 wurden von der Fa. Abt GmbH zehn weitere Aufschlussbohrungen nach DIN EN ISO 22475-1 im Rammkern- bzw. Rotationskernbohrverfahren mit Bohrdurchmessern von 146 mm bis 419 mm und Tiefen von 20 m bis 73 m unter Ansatzpunkt abgeteuft. Sieben Bohrungen davon wurden als Einfach- oder Zweifachgrundwassermessstellen (GWM) ausgebaut.

Von September bis einschließlich Dezember 2018 wurde das vierte Erkundungsprogramm durchgeführt. Insgesamt wurden 26 Bohrungen nach DIN EN ISO 22475-1 im Rammkern- bzw. Seilkernbohrverfahren von der Fa. Baugrund Süd abgeteuft, wovon 22 Bohrungen als Grundwasser-

messstellen mit insgesamt 26 Einzelstandrohren ausgebaut wurden (siehe Tab. 3.1). Die Bohrdurchmesser reichten von 146 mm bis 419 mm und die Tiefen von 15 m bis 70 m unter Ansatzpunkt.

Von November 2022 bis Januar 2023 wurde das fünfte Erkundungsprogramm mit insgesamt 14 Aufschlussbohrungen nach DIN EN ISO 22475-1 im Rammkern- bzw. Seilkernbohrverfahren mit Bohrdurchmessern von 146 mm bis 324 mm von der Fa. Baugrund Süd abgeteuft, wovon 13 Bohrungen als Grundwassermessstellen ausgebaut wurden. Die Endteufen der Bohrungen lagen zwischen 6 m und 35 m unter der Geländeoberfläche.

Neben diesen Aufschlüssen standen noch Bohrungen aus früheren Erkundungen sowie aus Fremdprojekten zur Verfügung. Die Lage aller Aufschlüsse ist aus Anlage 1 ersichtlich. Die einzelnen Bohrprofile sind in der Anlage des geologischen Berichts enthalten und größtenteils in die Schnitte der Anlagen 2 und 3 des vorliegenden Berichts übernommen.

Die bei den Bohrungen angetroffenen Bohrlochwasserstände wurden gemessen und in den Bohrprofilen dokumentiert. Aufgrund des Bohrverfahrens entsprechen diese Wasserstände teils nicht den unbeeinflussten Grundwasserständen der jeweils angetroffenen Schichten.

Bei einer Stichtagsmessung am 26. und 27.02.2019 wurden die bis dato vorhandenen Grundwassermessstellen gemessen. Die Grundwasserstände dieser Stichtagsmessung sind in nachfolgender Tab. 3.1 wiedergegeben. Messungen der erst im Jahr 2020 hergestellten Grundwassermessstellen sind in Tab. 3.2 aufgelistet. Alle Grundwassermessstellen sind in den Schnitten in Anlage 2 und 3 dargestellt.

Alle Grundwassermessstellen wurden seit ihrer Herstellung in der Regel mindestens einmal monatlich gemessen. Zum Teil wurden in den Grundwassermessstellen auch Datenlogger eingebaut, so dass zudem kontinuierlich aufgezeichnete Messdaten aus den letzten zehn Jahren vorliegen. Diese so erhaltenen Grundwasserganglinien bilden die Grundlage für die Beschreibung der hydrogeologischen Verhältnisse im Einflussbereich des geplanten Tunnels Starnberg.

11485/341b B2 – Tunnel Starnberg  
Hydrogeologischer Bericht - Teil 1

Zentrum  
Geotechnik

Tab. 3.1: Ergebnisse der Stichtagsmessung vom 26. und 27.02.2019

Bohrung		Lage			Filterrohr im Aquifer		GW-Stand	
Bezeichnung	Aus- bau Ø	ca.	links (l) / rechts (r) der Trasse	GOK	Tiefe von	bis	Eintrag in An- lage 2 und 3	Messung vom
	[mm]	[Bau- km]	[m]	[müNN]	[m]	[m]	[müNN]	
GWM 303	125	0+343	17 (r)	622,90	5,20	15,20	615,08	27.02.2019
GWM 305	125	0+367	225 (r)	634,05	24,60	26,60	615,05	27.02.2019
GWM 306	125	0+447	99 (l)	616,41	13,35	15,35	615,01	27.02.2019
GWM 307-f	125	0+481	20 (l)	622,90	9,50	12,90	614,16	27.02.2019
GWM 307-t	65	0+481	20 (l)	622,90	18,20	20,20	614,12	27.02.2019
GWM 308	125	0+553	11 (l)	626,38	11,30	20,30	614,16	27.02.2019
GWM 309	125	0+584	231 (l)	620,83	20,10	21,10	610,07	26.02.2019
GWM 310-f	125	0+666	11 (r)	625,45	12,60	18,60	613,43	27.02.2019
GWM 310-t	65	0+666	11 (r)	625,45	28,65	30,65	607,49	27.02.2019
GWM 311	125	0+670	113 (r)	634,47	21,60	27,60	614,05	27.02.2019
GWM 312	125	0+917	115 (l)	612,44	6,15	7,15	-	-
GWM 314-f	65	1+007	15 (l)	627,55	10,60	12,60	618,19	27.02.2019
GWM 314-m	65	1+007	15 (l)	627,55	17,35	18,35	614,58	27.02.2019
GWM 314-t	125	1+007	15 (l)	627,55	40,40	43,40	600,77	27.02.2019
GWM 315-f	65	0+964	13 (r)	628,42	10,30	13,30	618,77	27.02.2019
GWM 315-t	125	0+964	13 (r)	628,42	21,50	23,50	615,73	27.02.2019
GWM 317	125	1+127	27 (l)	620,70	28,30	36,30	593,99	27.02.2019
GWM 318	125	1+139	37 (r)	623,07	34,60	40,60	590,80	27.02.2019
GWM 319-f	65	1+238	10 (r)	606,74	15,10	16,10	593,85	27.02.2019
GWM 319-t	125	1+238	10 (r)	606,74	21,65	24,65	594,04	27.02.2019
GWM 320	125	1+311	19 (l)	610,27	17,10	23,10	593,95	26.02.2019
GWM 321	125	1+477	20 (r)	613,51	25,30	26,30	592,05	26.02.2019
GWM 322	125	1+619	1 (r)	619,62	38,30	39,30	591,34	26.02.2019
GWM 324	125	1+678	15 (l)	620,14	34,30	35,30	591,27	26.02.2019
GWM 326-f	65	1+746	13 (r)	610,85	21,00	23,00	588,66	26.02.2019
GWM 326-t	125	1+746	13 (r)	610,85	29,40	30,40	588,88	26.02.2019
GWM 327	125	1+800	12 (l)	609,77	24,00	26,00	590,26	26.02.2019
GWM 329-f	65	1+850	187 (r)	589,18	3,00	5,00	584,82	26.02.2019
GWM 329-t	125	1+850	187 (r)	589,18	13,55	14,55	585,19	26.02.2019
GWM 330-f	65	1+873	27 (l)	593,33	8,10	9,10	588,17	26.02.2019
GWM 330-t	125	1+873	27 (l)	593,33	15,20	20,20	588,25	26.02.2019
GWM 331	125	1+960	211 (l)	594,48	14,00	19,00	-	-
GWM 332	125	1+944	29 (l)	590,64	18,60	24,60	-	-
GWM 333	125	2+131	237 (r)	588,83	8,30	14,30	584,77	26.02.2019
GWM 334	125	2+153	22 (r)	589,26	6,00	22,00	585,05	26.02.2019
GWM 336	125	2+295	9 (r)	588,63	4,20	6,20	584,66	26.02.2019
GWM 337	125	2+263	16 (l)	588,95	5,60	11,60	584,93	26.02.2019

11485/341b

B2 – Tunnel Starnberg  
Hydrogeologischer Bericht - Teil 1

Zentrum  
Geotechnik

Bohrung		Lage			Filterrohr im Aquifer		GW-Stand	
Bezeichnung	Aus- bau Ø	ca.	links (l) / rechts (r) der Trasse	GOK	Tiefe von	bis	Eintrag in An- lage 2 und 3	Messung vom
	[mm]	[Bau- km]	[m]	[müNN]	[m]	[m]	[müNN]	
GWM 338	125	2+345	19 (l)	588,52	4,60	11,60	584,92	26.02.2019
GWM 339	125	2+417	18 (r)	587,36	3,60	7,00	584,69	26.02.2019
GWM 345	125	1+649	29 (r)	605,15	16,10	19,10	589,44	26.02.2019
GWM 348	125	0+591	98 (l)	623,60	11,30	16,30	-	Fremdmessung
GWM 350-f	125	2+030	19 (r)	590,54	6,60	9,60	584,83	26.02.2019
GWM 350-t	65	2+030	19 (r)	590,54	25,35	35,35	587,97	26.02.2019
GWM 351-f	65	1+013	11 (r)	630,70	18,60	19,60	615,26	27.02.2019
GWM 351-m	65	1+013	11 (r)	630,70	22,15	23,15	613,66	27.02.2019
GWM 351-t	125	1+013	11 (r)	630,70	41,40	42,40	590,77	27.02.2019
GWM 352	125	1+020	44 (l)	620,80	20,60	21,60	-	-
GWM 354	125	1+240	81 (r)	599,40	16,30	20,30	590,78	27.02.2019
GWM 355	125	1+191	104 (l)	601,84	8,90	10,90	594,02	26.02.2019
GWM 357 (15° geneigt)	125	1+613	35 (l)	617,82	37,80	39,80	592,04	26.02.2019
GWM 359	125	1+645	13 (l)	606,85	27,60	30,60	591,25	26.02.2019
GWM 360-f	65	1+776	2 (l)	609,65	25,15	26,15	590,32	26.02.2019
GWM 360-t	125	1+776	2 (l)	609,65	57,00	60,20	575,15	26.02.2019
GWM 361	125	1+857	2 (r)	624,56	24,80	26,80	611,58	27.02.2019
GWM 362-f	65	1+067	47 (r)	623,19	12,30	13,30	611,08	27.02.2019
GWM 362-t	125	1+067	47 (r)	623,19	32,55	43,55	590,78	27.02.2019
GWM 402	319	0+516	197 (r)	641,32	26,00	34,00	614,42	27.02.2019
GWM 403	324	0+653	188 (r)	637,99	23,20	31,20	614,20	27.02.2019
GWM 404	324	0+606	8 (l)	625,96	11,30	19,30	613,50	27.02.2019
GWM 406-f	420	0+928	16 (l)	623,66	9,00	12,00	-	-
GWM 406-m	255	0+928	16 (l)	623,66	31,00	35,00	-	-
GWM 406-t	255	0+928	16 (l)	623,66	52,00	55,00	-	-
GWM 407	324	0+986	225 (l)	621,18	10,80	11,80	611,29	26.02.2019
GWM 408-f	324	0+998	10 (l)	627,69	28,00	31,00	599,92	27.02.2019
GWM 408-t	324	0+998	10 (l)	627,69	38,90	39,90	598,75	27.02.2019
GWM 409	324	0+988	221 (r)	590,24	3,00	5,00	587,39	27.02.2019
GWM 410	324	1+122	28 (l)	621,15	19,00	34,00	594,07	27.02.2019
GWM 411	324	1+102	44 (r)	622,70	30,00	42,00	590,68	27.02.2019
GWM 412	324	1+156	199 (l)	610,26	18,00	21,00	600,82	26.02.2019
GWM 413-f	419	1+221	14 (l)	611,13	13,00	20,00	593,95	27.02.2019
GWM 413-t	324	1+221	14 (l)	611,13	33,50	34,50	594,18	27.02.2019
GWM 414	324	1+190	30 (r)	613,46	25,80	32,80	594,00	27.02.2019

11485/341b

B2 – Tunnel Starnberg  
Hydrogeologischer Bericht - Teil 1

Zentrum  
Geotechnik

Bohrung		Lage			Filterrohr im Aquifer		GW-Stand	
Bezeichnung	Aus- bau Ø	ca.	links (l) / rechts (r) der Trasse	GOK	Tiefe von	bis	Eintrag in An- lage 2 und 3	Messung vom
	[mm]	[Bau- km]	[m]	[müNN]	[m]	[m]	[müNN]	
GWM 416	324	1+191	151 (r)	595,81	10,00	16,00	587,81	27.02.2019
GWM 417 (27° geneigt)	219	1+313	15 (l)	610,19	18,30	23,30	593,89	26.02.2019
GWM 419	419	1+444	11 (l)	612,86	8,00	24,00	592,83	26.02.2019
GWM 420	324	1+497	134 (r)	592,63	14,00	18,00	588,95	27.02.2019
GWM 421	324	1+647	15 (r)	605,31	23,50	24,50	591,17	26.02.2019
GWM 422	324	2+226	8 (l)	589,40	34,50	35,50	586,82	26.02.2019
GWM 423	324	1+027	14 (l)	627,12	25,50	33,50	593,10	27.02.2019
GWM 424	219	2+204	6 (l)	589,39	25,60	30,60	586,91	26.02.2019
GWM 427	219	2+320	11 (r)	588,48	21,00	23,00	584,96	26.02.2019
GWM 428	324	0+695	64 (l)	622,66	10,00	16,00	611,88	26.02.2019
BR 11	51	1+925	69 (r)	590,93	3,00	16,00	588,09	26.02.2019
BR 12	51	1+493	322 (r)	586,29	-	-	-	-
B 102	51	2+192	8 (l)	589,65	3,20	7,20	584,99	26.02.2019
B 104	102	1+988	13 (l)	590,62	2,65	12,65	588,17	26.02.2019
B 105A	102	1+961	23 (r)	591,26	7,70	11,70	-	zugeparkt
B 107	51	0+823	10 (r)	624,99	10,80	20,80	613,93	27.02.2019
B 111	102	0+741	2 (l)	625,11	10,70	18,70	612,54	27.02.2019
B 121	51	2+055	7 (r)	590,81	6,00	10,00	584,95	26.02.2019
B 122	102	1+989	24 (r)	590,84	8,00	18,00	588,06	26.02.2019
B 123	152	1+949	26 (l)	590,73	5,00	18,00	588,25	26.02.2019
B 125	50,8	1+621	24 (l)	618,47	28,00	33,00	591,64	26.02.2019
B 130	102	0+779	66 (l)	623,50	10,00	20,00	611,59	26.02.2019
B 131	152	0+709	4 (l)	625,11	10,00	20,00	613,06	27.02.2019
B 133	102	0+654	20 (l)	624,78	10,00	20,00	613,39	27.02.2019
B 134	51	0+423	13 (r)	622,98	5,00	16,00	614,66	27.02.2019



**Tab. 3.2: Grundwasserstände der 2020 abgeteufte Bohrungen und Grundwassermessstellen im Bereich der Pannenbucht 3 und 4 und der 2022/2023 abgeteufte Bohrungen und Grundwassermessstellen des 5. Erkundungsprogramms**

Bohrung		Lage			Filterrohr im Aquifer		GW-Stand	
Bezeichnung	Aus- bau Ø	ca.	links (l) / rechts (r) der Trasse	GOK	Tiefe von	bis	Eintrag in An- lage 2 und 3	Messung vom
	[mm]	[Bau- km]	[m]	[müNN]	[m]	[m]	[müNN]	
B 429	-	1+014	82 (l)	608,03	-	-	601,83	19.03.2020
GWM 430	80	1+589	34 (l)	617,46	56,00	60,00	590,83	10.04.2020
GWM 431	80	1+618	11 (l)	619,59	51,50	53,50	589,27	10.04.2020
GWM 432 (15° Nei- gung)	80	1+645	21 (r)	605,44	55,50	58,50	590,77	10.04.2020
GWM 433 (10° Nei- gung)	80	1+580	23 (l)	617,33	56,50	58,5	592,01	10.04.2020
GWM 434 (10° Nei- gung)	80	1+589	24 (l)	617,46	56,50	58,5	588,88	10.04.2020
GWM 436	125	0+829	53 (l)	623,68	10,70	17,70	605,48	03.04.2020
GWM 437	125	0+756	3 (l)	625,01	11,00	19,00	612,44	10.04.2020
GWM 501	150	0+030	25 (l)	631,10	16,40	24,40		
GWM 502	150	0+066	71 (r)	622,94	9,90	15,90		
GWM 503	150	0+115	207 (r)	638,49	25,20	31,20		
GWM 504	150	0+267	286 (r)	632,99	18,80	24,80		
GWM 505	150	0+354	441 (r)	635,34	17,00	27,00		
GWM 506	150	0+319	128 (r)	633,73	19,70	25,70		
GWM 507	150	0+215	17 (l)	624,10	10,90	16,90		
GWM 508	150	0+470	109 (r)	630,95	15,50	24,50		
GWM 509	150	0+691	13 (r)	624,37	10,70	17,70		
GWM 510	150	0+773	101 (r)	631,82	16,00	24,00		
GWM 511	150	0+783	65 (l)	623,39	10,00	16,00		
GWM 512	150	0+937	167 (l)	608,29	3,20	5,20		
B 513	-	0+216	62 (l)	622,46	-	-		
GWM 514	150	0+603	50 (r)	627,00	13,90	20,90		

### 3.2 Durchlässigkeitsversuche in Anlehnung an DIN 18130-2

Im Zuge des 3. Erkundungsprogramms wurden für den Tunnel Starnberg in grundwasserführenden Schichten 53 Pumpversuche (PV) bzw. Einschwingversuche (EV) von der Fa. Harress Pickel Consult AG (HPC) zur Ermittlung der k-Werte in den ausgebauten Grundwassermessstellen durchgeführt.

Im Rahmen des 4. Erkundungsprogramms wurden in den Jahren 2018 bis 2020 ergänzend 32 Pump- und Einschwingversuche ausgeführt.

Im Zuge des 5. Erkundungsprogramms wurden zwischen November 2022 und Februar 2023 13 weitere Pumpversuche durchgeführt.

In Tab. 3.3 sind die Ergebnisse der Pump- und Einschwingversuche des 3., 4. und 5. Erkundungsprogramms zusammengestellt. Die Auswertung der Versuche des 3. Erkundungsprogramms ist im Bericht von HPC [U7] sowie Anlage 5 wiedergegeben, wobei sich im Zuge der Nachrechnung seitens TUM-ZG geringfügige Unterschiede bei der k-Wert-Ermittlung ergeben haben, die in Tab. 3.3 berücksichtigt wurden. Die Versuchsauswertung des 4. Erkundungsprogramms ist in Anlage 6 zusammengestellt, die des 5. Erkundungsprogramms in Anlage 7.

**Tab. 3.3: Ergebnisse der Durchlässigkeitsversuche**

Bezeichnung	GOK	Filterbereich		Versuchsart	gemittelte Durchlässigkeit k	Besonderheiten bei der Auswertung durch Fa. HPC / TUM-ZG
		von	bis			
	[müNN]	[m]	[m]		[m/s]	
GWM 303	622,90	5,20	15,20	PV	$5 \cdot 10^{-3}$	
GWM 305	634,05	24,60	26,60	PV	$8 \cdot 10^{-4}$	
GWM 306	616,41	13,35	15,35	EV	$3 \cdot 10^{-7}$	
GWM 307-f	622,90	9,50	12,90	PV	$4 \cdot 10^{-3}$	
GWM 307-t	622,90	18,20	20,20	PV, EV	$9 \cdot 10^{-6}$	Inhomogene Aquiferdurchlässigkeit
GWM 308	626,38	11,30	20,30	PV	$3 \cdot 10^{-3}$	
GWM 310-f	625,45	12,60	18,60	PV	$6 \cdot 10^{-3}$	
GWM 310-t	625,45	28,65	30,65	EV	$3 \cdot 10^{-6}$	
GWM 311	634,47	21,60	27,60	PV	$5 \cdot 10^{-3}$	
GWM 312	612,44	6,15	7,15	PV, EV	$9 \cdot 10^{-4}$	
GWM 314-m	627,45	17,35	18,35	EV	$1 \cdot 10^{-6}$	
GWM 314-t	627,45	40,40	43,40	EV	$4 \cdot 10^{-7}$	
GWM 315-t	628,42	21,50	23,50	PV	$2 \cdot 10^{-5}$	
GWM 317	620,70	28,30	36,30	PV	$4 \cdot 10^{-3}$	Inhomogene Aquiferdurchlässigkeit
GWM 318	623,07	34,60	40,60	PV	$2 \cdot 10^{-3}$	
GWM 319-f	606,74	15,10	16,10	PV	$1 \cdot 10^{-4}$	
GWM 319-t	606,74	21,65	24,65	PV	$9 \cdot 10^{-4}$	
GWM 320	610,27	17,10	23,10	PV	$4 \cdot 10^{-3}$	Inhomogene Aquiferdurchlässigkeit
GWM 321	613,51	25,30	26,30	PV	$6 \cdot 10^{-7}$	
GWM 322	619,54	38,30	39,30	PV	$2 \cdot 10^{-6}$	
GWM 324	620,14	34,30	35,30	PV	$2 \cdot 10^{-4}$	
GWM 326-f	610,85	21,00	23,00	PV	$1 \cdot 10^{-6}$	
GWM 326-t	610,85	29,40	30,40	PV	$5 \cdot 10^{-9}$	
GWM 327	609,77	24,00	26,00	PV, EV	$4 \cdot 10^{-4}$	
GWM 329-t	589,18	13,55	14,55	PV	$1 \cdot 10^{-5}$	
GWM 330-f	593,33	8,10	9,10	PV	$3 \cdot 10^{-3}$	

11485/341b

B2 – Tunnel Starnberg  
Hydrogeologischer Bericht - Teil 1

Zentrum  
Geotechnik

Bezeichnung	GOK	Filterbereich		Versuchsart	gemittelte Durchlässigkeit k	Besonderheiten bei der Auswertung durch Fa. HPC / TUM-ZG
		von	bis			
	[müNN]	[m]	[m]		[m/s]	
GWM 330-t	593,33	15,20	20,20	PV	$1 \cdot 10^{-3}$	
GWM 331	594,48	14,00	19,00	PV	$3 \cdot 10^{-4}$	Inhomogene Aquifer-durchlässigkeit
GWM 332	590,64	18,60	24,60	PV	$1 \cdot 10^{-4}$	
GWM 334	589,26	6,00	22,00	PV	$6 \cdot 10^{-3}$	
GWM 336	588,63	4,20	6,20	PV	$6 \cdot 10^{-5}$	
GWM 337	588,80	5,60	11,60	PV	$8 \cdot 10^{-5}$	
GWM 338	588,52	4,60	11,60	PV	$6 \cdot 10^{-5}$	
GWM 339	587,36	3,60	7,00	PV	$4 \cdot 10^{-3}$	
GWM 345	605,15	16,10	19,10	PV	$7 \cdot 10^{-5}$	
GWM 348	623,60	11,30	16,30	PV	$3 \cdot 10^{-4}$	Inhomogene Aquifer-durchlässigkeit
GWM 350-f	590,54	6,60	9,60	PV	$2 \cdot 10^{-3}$	
GWM 350-t	590,54	25,35	35,35	PV	$5 \cdot 10^{-5}$	
GWM 351-m	630,70	22,15	23,15	EV	$1 \cdot 10^{-6}$	
GWM 351-t	630,70	41,40	42,40	PV	$3 \cdot 10^{-3}$	
GWM 352	630,70	20,60	21,60	PV	$1 \cdot 10^{-3}$	
GWM 354	599,40	16,30	20,30	PV	$9 \cdot 10^{-5}$	
GWM 355	601,84	8,90	10,90	PV	$1 \cdot 10^{-3}$	
GWM 357	617,82	37,80	39,80	PV	$2 \cdot 10^{-8}$	
GWM 359	606,85	27,60	30,60	PV	$2 \cdot 10^{-5}$	
GWM 360-f	609,65	25,15	26,15	PV	$5 \cdot 10^{-5}$	
GWM 360-t	609,65	57,00	60,20	PV	$3 \cdot 10^{-5}$	
GWM 362-t	623,19	32,55	43,55	PV	$2 \cdot 10^{-2}$	
GWM 402	641,32	26,00	34,00	PV	$3 \cdot 10^{-3}$	
GWM 403	637,99	23,20	31,20	PV	$2 \cdot 10^{-4}$	
GWM 404	625,96	11,30	19,30	PV	$8 \cdot 10^{-5}$	
GWM 406-f	623,66	9,00	12,00	PV	$7 \cdot 10^{-6}$	
GWM 406-m	623,66	31,00	35,00	PV	$2 \cdot 10^{-6}$	
GWM 406-t	623,66	52,00	55,00	PV	$3 \cdot 10^{-7}$	
GWM 407	621,18	10,80	11,80	PV	-	Auswertung nicht möglich
GWM 408-t	627,69	38,90	39,90	PV	$7 \cdot 10^{-7}$	
GWM 409	590,24	3,00	5,00	PV	$1 \cdot 10^{-4}$	
GWM 410	621,15	19,00	34,00	PV	$1 \cdot 10^{-2}$	
GWM 411	622,70	30,00	42,00	PV	$7 \cdot 10^{-3}$	
GWM 412	610,26	18,00	21,00	PV	$1 \cdot 10^{-5}$	
GWM 413-f	611,13	13,00	20,00	PV	$2 \cdot 10^{-3}$	
GWM 413-t	611,13	33,50	34,50	PV	$4 \cdot 10^{-7}$	
GWM 414	613,46	25,80	32,80	PV	$2 \cdot 10^{-3}$	

11485/341b

B2 – Tunnel Starnberg  
Hydrogeologischer Bericht - Teil 1

Zentrum  
Geotechnik

Bezeichnung	GOK	Filterbereich		Versuchsart	gemittelte Durchlässigkeit k	Besonderheiten bei der Auswertung durch Fa. HPC / TUM-ZG
		von	bis			
	[müNN]	[m]	[m]		[m/s]	
GWM 416	595,81	10,00	16,00	PV	$8 \cdot 10^{-4}$	
GWM 417	610,19	18,30	23,30	PV	$7 \cdot 10^{-3}$	
GWM 419	612,86	8,00	24,00	PV	$1 \cdot 10^{-3}$	
GWM 420	592,63	14,00	18,00	PV	$3 \cdot 10^{-4}$	
GWM 421	605,31	23,50	24,50	PV, EV	$2 \cdot 10^{-6}$	
GWM422	589,40	34,50	35,50	PV, EV	$7 \cdot 10^{-4}$	
GWM 424	589,39	25,60	30,60	PV, EV	$1 \cdot 10^{-4}$	
GWM 428	622,66	10,00	16,00	PV	$9 \cdot 10^{-4}$	
B 429	608,03	-	-	-	-	-
GWM 430	617,46	56,00	60,00	PV	$6 \cdot 10^{-8}$	
GWM 431	619,59	51,50	53,50	PV	$1 \cdot 10^{-3}$	
GWM 432 (15° Neigung)	605,44	55,50	58,50	PV	$5 \cdot 10^{-8}$	Inhomogene Aquifer- durchlässigkeit
GWM 433 (10° Neigung)	617,33	56,50	58,5	PV	$4 \cdot 10^{-7}$	
GWM 434 (10° Neigung)	617,46	56,50	58,5	PV	$3 \cdot 10^{-7}$	Inhomogene Aquifer- durchlässigkeit
GWM 436	623,68	10,70	17,70	PV	$1 \cdot 10^{-3}$	
GWM 437	625,01	11,00	19,00	PV	$3 \cdot 10^{-4}$	
GWM 501	631,10	16,40	24,40	PV	$5 \cdot 10^{-4}$	
GWM 502	622,94	9,90	15,90	PV	$3 \cdot 10^{-4}$	
GWM 503	638,49	25,20	31,20	PV	$5 \cdot 10^{-4}$	
GWM 504	632,99	18,80	24,80	PV	$1 \cdot 10^{-3}$	
GWM 505	635,34	17,00	27,00	PV	$5 \cdot 10^{-5}$	
GWM 506	633,73	19,70	25,70	PV	$6 \cdot 10^{-4}$	
GWM 507	624,10	10,90	16,90	PV	$7 \cdot 10^{-5}$	
GWM 508	630,95	15,50	24,50	PV	$3 \cdot 10^{-3}$	
GWM 509	624,37	10,70	17,70	PV	$8 \cdot 10^{-4}$	
GWM 510	631,82	16,00	24,00	PV	$8 \cdot 10^{-5}$	
GWM 511	623,39	10,00	16,00	PV	$1 \cdot 10^{-3}$	
GWM 512	608,29	3,20	5,20	PV	$6 \cdot 10^{-6}$	
GWM 514	627,00	13,90	20,90	PV	$4 \cdot 10^{-3}$	
B 122	590,84	8,00	18,00	PV	$7 \cdot 10^{-4}$	
B 123	590,73	5,00	18,00	PV	$1 \cdot 10^{-3}$	

### 3.3 Geophysikalische Bohrlochversuche

In ausgewählten Grundwassermessstellen wurden im Rahmen des 3. Erkundungsprogramms im Zeitraum von Juli bis September 2009 von der Fa. BLM - Gesellschaft für Bohrlochmessungen mbH geophysikalische Versuche zur Ermittlung der Fließgeschwindigkeit und Fließrichtung des Grundwassers durchgeführt.

Es handelte sich dabei um Einbohrlochversuche, die in der ausgewählten Grundwassermessstelle ohne Beobachtung der umliegenden Messstellen ausgeführt werden.

In einem ersten Schritt wird ein Leitfähigkeitstracer (NaCl) in die Messstelle eingebracht und dessen Verdünnung entlang der Filterstrecke über die Zeit beobachtet. Daraus lassen sich die horizontalen Fließgeschwindigkeiten in der Messstelle  $v_f$  errechnen.

Anschließend wird im Bereich der größten Fließgeschwindigkeit (Ort der größten Verdünnung) die Fließrichtung durch fotometrische Auswertung der Bewegung eines eingebrachten Lebensmittelfarbstoffs (EC 133 Brillant Blue) ermittelt.

Grundsätzlich ist bei Einbohrlochversuchen zu beachten, dass deren Ergebnisse nicht zwangsläufig die großräumigen Verhältnisse wiedergeben, sondern von diesen durch örtlich begrenzte Einflüsse abweichen können. Eine Überprüfung auf Plausibilität, beispielsweise durch Auswertung einer Stichtagsmessung, ist daher erforderlich.

Zusätzlich gibt es verschiedene Einflüsse, die die Messungen stören können:

Die Ermittlung der Fließgeschwindigkeit ist nicht möglich, wenn in der Messstelle vertikale Strömungen vorhanden sind, die beispielsweise durch einen Kurzschluss zweier Grundwasserstockwerke entstehen können. In diesem Fall erfolgt die Verdünnung des Tracers auch in vertikaler Richtung und die Fließgeschwindigkeit in horizontaler Richtung ist nicht eindeutig bestimmbar. Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde dieser Effekt nicht beobachtet und es konnte in allen Messstellen die Fließgeschwindigkeit bestimmt werden.

Weiterhin kann die fotometrische Ermittlung der Fließrichtung durch eine natürlich vorhandene Trübung des Grundwassers behindert werden und ist bei sehr kleinen Fließgeschwindigkeiten (etwa  $v_f < 10^{-3}$  m/d) nicht mehr möglich. Die durchgeführten Messungen waren teilweise durch Trübe beeinflusst. In diesen Fällen war zwar eine Auswertung grundsätzlich möglich, es konnten aber für die Fließrichtung auf Grund größerer Schwankungsbreiten nur Mittelwerte angegeben werden.

Die Ergebnisse der geophysikalischen Versuche sind in Tab. 3.4 dargestellt, die Einzelauswertungen sowie eine ausführliche Beschreibung der angewandten Messverfahren sind in den von der Fa. Abt zusammengestellten Ergebnisunterlagen des 3. Erkundungsprogramms enthalten (Untersuchungsberichte der Fa. BLM). Die ermittelten Fließrichtungen sind im Lageplan in Anlage 1 wiedergegeben.

Bei den ermittelten Fließgeschwindigkeiten  $v_f$  handelt es sich um die Filtergeschwindigkeit, bei welcher die Durchflussmenge auf den gesamten Querschnitt (Porenanteil und Feststoffanteil) bezogen wird. Im Aquifer wird allerdings nur der Porenanteil  $n$  durchströmt, wodurch dort höhere

mittlere Fließgeschwindigkeiten  $v_a$  (Abstandsgeschwindigkeit) entsprechend Gleichung 1 vorliegen:

$$\text{Gleichung 1: } v_a = \frac{v_f}{n}$$

In Tab. 3.4 ist neben der Filtergeschwindigkeit auch die Abstandsgeschwindigkeit für einen angenommenen durchflusswirksamen Porenanteil von  $n = 0,30$  angegeben.

**Tab. 3.4: Ergebnisse der geophysikalischen Versuche**

Bezeichnung	Pegeloberkante (POK)	auswertbarer Messabschnitt (bezogen auf POK)		Filtergeschwindigkeit $v_f$	Abstandsgeschwindigkeit $v_a$ (für $n = 0,3$ )	Teufe für die Ermittlung der Fließrichtung (bezogen auf POK)	Fließrichtung (bezogen auf Norden)	Bemerkung
		von	bis					
	[müNN]	[m]	[m]	[m/d]	[m/d]	[m]	[°]	
GWM 307	623,98	11,4	12,5	1,21	4,03	12,0	20	Fließrichtung weitgehend eindeutig
GWM 308	626,31	14,1	19,6	0,95	3,17	18,5	10	Fließrichtung eindeutig
GWM 310	625,30	14,0	14,9	0,78	2,60	-	-	
GWM 310	625,30	14,9	17,4	0,43	1,43	16,5	30	Fließrichtung eindeutig
GWM 318	622,99	34,6	40,6	3,54	11,80	38,0	100	Fließrichtung weitgehend eindeutig
GWM 320	610,12	18,0	21,3	0,47	1,57	21,5	140	Fließrichtung gemittelt
GWM 332	590,51	18,6	24,6	0,52	1,73	21,5	170	Fließrichtung gemittelt
GWM 334	589,34	7,7	17,5	0,95	3,17	14,0	50	Fließrichtung weitgehend eindeutig
B 122	590,71	8,0	12,3	0,35	1,17	9,0	35	Fließrichtung eindeutig <sup>1</sup>
B 122	590,71	12,3	16,0	0,43	1,43	-	-	<sup>1</sup>
B 123	590,53	8,7	14,7	1,12	3,73	11,00	75	Fließgeschwindigkeit und Fließrichtung gemittelt

<sup>1</sup> In B 122 wurden anhand unterschiedlicher Leitfähigkeit bei der Nullmessung 2 verschiedene Aquifere von 8,0 m bis 12,3 m und von 12,3 m bis 16,0 m unter POK identifiziert.

### 3.4 Grundwasseruntersuchungen nach DIN 4030

Aus fertig gestellten Grundwassermessstellen wurden im Bereich grundwasserführender Schichten, die im Einflussbereich der Tunnelbauwerke liegen, gleichmäßig über die gesamte Trasse verteilt insgesamt 14 Grundwasserproben zur Untersuchung hinsichtlich Betonaggressivität nach DIN 4030 (Beurteilung betonangreifender Wässer, Böden und Gase) entnommen und im Labor untersucht (Tab. 3.5).

Die Protokolle der chemischen Laboruntersuchungen nach DIN 4030 liegen den Dokumentationsunterlagen der Fa. Abt sowie Baugrund Süd bei ([U6], [U9]).

**Tab. 3.5: Beurteilung der Betonaggressivität von Wasser nach DIN 4030 Teil 1 ([U6],[U9])**

Entnahmeort	pH-Wert	Magnesium (Mg++) mg/L	Ammonium (NH <sub>4</sub> <sup>*</sup> ) mg/L	Sulfat (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) mg/L	Kohlendi-oxid* mg/L CO <sub>2</sub>	Angriffsgrad
GWM 123	7,86	26	0,015	15	6,6	nicht angreifend
GWM 303	7,29	28	0,029	14	8,6	nicht angreifend
GWM 308	7,51	29	0,014	14	15	XA1, schwach angreifend
GWM 315-t	7,56	23	0,012	25	6,8	nicht angreifend
GWM 319-f	7,54	26	0,069	18	u.d.B.	nicht angreifend
GWM 319-t	7,33	27	u.d.B.	15	1,5	nicht angreifend
GWM 321	7,49	4,1	0,025	4,4	34	XA1, schwach angreifend
GWM 326-t	7,86	19	0,070	14	1,5	nicht angreifend
GWM 332	7,52	28	<0,01	14	19	XA1, schwach angreifend
GWM 337	7,34	25	0,016	16	<0,5	nicht angreifend
GWM 404	7,5	27	<0,03	15	<1	nicht angreifend
GWM 413-f	7,9	17	0,08	10	29	XA1, schwach angreifend
GWM 413-t	7,4	23	<0,03	11	<1	nicht angreifend
GWM 417	7,5	20	<0,03	12	<1	nicht angreifend

\* CO<sub>2</sub> kalklösend = aggressive Kohlensäure

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die überwiegende Mehrheit der Wasserproben gemäß DIN 4030 nicht betonangreifend, und nur vereinzelte Wasserproben schwach betonangreifend waren.

### 3.5 Beschreibung der geologischen Verhältnisse und der Topographie

Der für das geplante Tunnelbauwerk in Starnberg relevante oberflächennahe geologische Bau und die vielfältigen geomorphologischen Formen im Bereich des geplanten Baufelds sind das Ergebnis von Ablagerungen, Abtragungen, Umlagerungen und Überformungen der jüngeren Tertiär- und der gesamten Quartärzeit.

Vor ca. 18 Millionen Jahren kam es nach dem endgültigen Rückzug des sog. Molassemeeres zu terrestrischen und limnischen Ablagerungen der Oberen Süßwassermolasse. Das Molassematerial, überwiegend Sande und Tone (Mergel), seltener auch Kiese, besteht überwiegend aus dem Abtragungsschutt des sich im Tertiär heraushebenden Alpengebirges. Es wurde durch Flüsse in ein sich stetig absenkendes Vorlandbecken des Gebirges verfrachtet. Die jüngeren pliozänen Sedimentserien der Oberen Süßwassermolasse sind erodiert, so dass zwischen den verbliebenen jüngsten Molasseschichten und den quartären eiszeitlichen Ablagerungen eine Schichtlücke von mehreren Millionen Jahren besteht.

Im Quartär, beginnend vor ca. 2,4 Millionen Jahren, führten tiefgreifende Klimaänderungen zu längeren Kaltzeiten mit Eiszeiten, in denen wiederholt Gletscher aus dem Alpenraum bis weit in

das Vorland vorstießen und weite Teile des Alpenvorlands mit Gletschereis bedeckten. Die Jahresmitteltemperaturen lagen in etwa 10°C unter den heutigen Werten, bei ca. -2°C. In den mindestens sechs Vorlandvergletscherungen im Verlauf des Quartärs, der Würm-, Riß-, Mindel-, Günz-, Donau- und Bieber-Kaltzeit, stießen der Isargletscher rd. 45 km und der Loisachgletscher bis rd. 70 km weit vom Alpenrand nach Norden vor, zuletzt vor ca. 18.000 Jahren. Im Gebiet der Stadt Starnberg gestaltete der Isarvorlandgletscher die tertiäre Landoberfläche neu. Er räumte in weiten Bereichen die weichen Molasseschichten aus und schüttete an deren Stellen großflächig Moränen und Glazialschotter auf.

Die Kaltzeiten waren wiederholt von kürzeren und längeren Warmzeiten unterbrochen. In den längeren Warmzeiten zwischen den Kaltzeiten der Vergletscherungen, den Interglazialen, war das Klima ähnlich wie das heutige, zeitweise auch etwas wärmer. Als Zeugen dieser Warmzeiten finden sich vielfach unter jüngeren Ablagerungen begrabene fossile Böden und organische Bildungen wie z.B. Torfe.

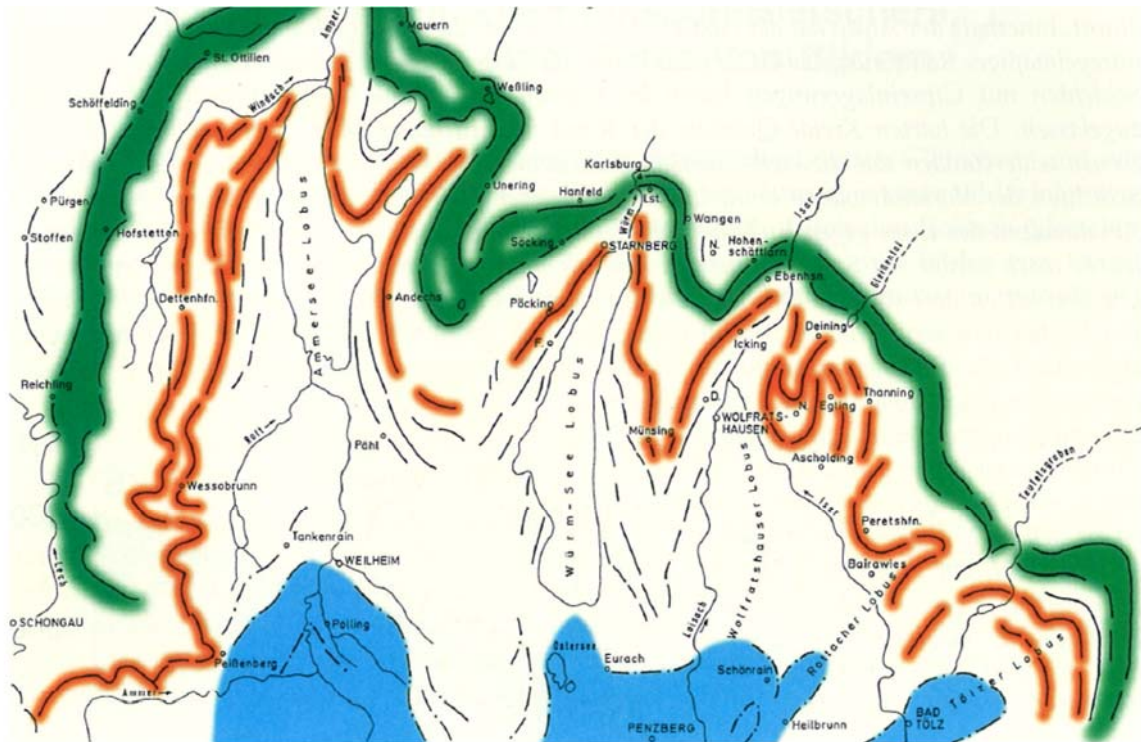
Vor ca. 25.000 Jahren baute sich ein zusammenhängendes Eisstromnetz auf und es rückten die Gletscher aus dem Alpenraum in das Vorland vor. Vor etwa 20.000 Jahren, im Hochglazial erreichten die Vorlandgletscher ihre maximalen Randlagen, der Isarvorlandgletscher nur wenige Kilometer vor München. Während der hochglazialen Phase wurden Isar- und Loisachgletscher vom Inngletscher mit zentralalpines Material gespeist (nach JERZ, 1987, [U1] und [U2]).

Am Austritt vor den Alpentoren verbreiterten sich die Gletscherströme zu großen Gletscherkuchen mit anschließenden Gletscherzungen. Die vom Eisstrom ausgearbeiteten Zungenbecken waren in diesen Bereichen etwas flacher als innerhalb der Alpen. Der Starnberger See entstand aus einem dieser aus der tertiären Molasse ausgearbeiteten Zungenbecken mit ca. 150 m Tiefe.

Am abschmelzenden Ende des Gletscherstroms wurde der mittransportierte Gesteinsschutt abgelagert. Die hier teilweise in so genannten Gletschertoren austretenden Schmelzwässer verfrachteten Kiese und Sande und lagerten sie in Sanderflächen (z.B. Münchener Schotterebene) ab. Bei stärkerem Abschmelzen des Gletschereises blieb sein gesamter Gesteinsschutt am Boden liegen und bildete die mergelreiche Grundmoräne.

Das Abschmelzen des Gletschereises, beginnend vor mehr als 15.000 Jahren zum Ende der letzten Eiszeit (Würm Eiszeit), erfolgte in sog. Rückzugsphasen (siehe Abb. 1). Bei längeren Stillstandsphasen kam es dabei zur Bildung von Endmoränenwällen halbkreisförmig um die Zungenbecken. Bei kürzeren Stillständen bildeten sich weitere meist kleinere Rückzugsmoränenwälle. Dadurch entstand das komplexe Bild der Moränenwälle, die sich girlandenartig um die Zungenbeckenseen, wie auch dem heutigen Starnberger See anordneten (nach MEYER & SCHMIDT-KALER, 1997, [U3] und [U4]). Die Moränenwälle am Nordende des Starnberger Sees gehören zur 2. Rückzugsphase des Isar-Loisach Gletschers (rot in Abb. 1). Die Rückzugsmoränen können bedingt durch Ihre Lage zur Gletscherzunge als End- oder Seitenmoränen bezeichnet werden. Im Stadtgebiet von Starnberg und in der nordwestlichen Fortsetzung finden sich mehrere mehr oder weniger parallel verlaufende Seitenmoränenwälle. Sie werden als das Ergebnis eines verstärkten Eisrückzugs aus nordwestlicher Richtung interpretiert. Die Moränen bestehen aus unsortierten Geschieben und großen Blöcken in mergeliger Grundmasse. Schrammen auf der Oberfläche der Geschiebe zeugen vom schiebenden Transport durch das Eis.





**Abb. 1: Maximale Eisrandlagen und Rückzugsstadien des Isar-Loisach-Gletschers**

Innerhalb der Moränenwälle kam es durch das schrittweise Zurückschmelzen des Gletschereises zur Ausbildung von peripheren Abflussrinnen. Auch bei Starnberg sind die Wallzüge von einer ganzen Reihe dieser Schmelzwasserrinnen begleitet und sicherlich auch von diesen (seewärts) durchbrochen. Sie sind durch Kies und Sandablagerungen gekennzeichnet. Diese sind zum Teil sehr gut sortiert. Es kam zur Ausbildung so genannter Rollkieslagen.

Am Nordende des Starnberger Sees sind im Stadtgebiet von Starnberg Schotterterrassen ausgebildet, die sich an die Innenflanken der Starnberger Moränenphase anlehnen und ca. 4 m bis 5 m über dem heutigen mittleren Seespiegel (ca. 584 müNN) liegen. Die Terrassen entstanden im frühen Spätglazial, zu einer Zeit, als das Würmseebecken (Starnberger See) noch vom verbliebenen Gletschereis erfüllt war. Die zwischen dem Toteis und den ansteigenden Moränenwällen abgelagerten Schotter wurden von Schmelzwässern vom damaligen Eisrand zugeführt. Nachfolgend hat fließendes Wasser des heutigen Georgenbachs zum Einschnitt in die eiszeitlichen Randterrassen geführt (nach JERZ, 1987, [U1] und [U2]). Ähnliche Bildungs- und Ablagerungsformen von Kies- und Schotterterrassen finden sich entlang der heutigen Moränenwälle, aber auch aus Warmphasen oder Warmzeiten innerhalb der Moränenablagerungen. Weitere Kiesablagerungen, vor allem auch oberflächennah, sind das Ergebnis postglazialer fluvialer Erosion und Akkumulation. Im Ergebnis von Kalksinterbildungen aus stark kalkhaltigen Wässern sind vor allem in diesen kiesigen Ablagerungen Verfestigungen, die Bildung des so genannten Nagelfluh, häufig zu finden. Sie kann vereinzelt vorkommen oder schichtweise bänderhaft ausgebildet sein und so genannte Nagelfluhbänke bilden

Mit dem Rückzug des Gletschers wurden die Zungen- und Stammbecken schrittweise von Norden nach Süden eisfrei und füllten sich mit Schmelzwasser. Zum Teil blieben auch einzelne größere Eismassen zurück, das so genannte Toteis. Aus größeren Toteisgebieten entstanden ausgedehnte Seenlandschaften. In den Seen lagerte sich tonige Gletschertrübe als Seeton ab. Erhielten sich nach dem Zurückschmelzen des Gletschers Zuflüsse, wurden die Seen durch Seeton und Delta-schotter schnell wieder aufgefüllt und es blieben nur Teile erhalten. Das Becken des gesamten Starnberger Sees war auch mit Toteis gefüllt. Ohne nennenswerten Zulauf, blieb er bis heute fast vollständig erhalten. In seinem Beckenbereich sedimentierten weitläufig Seetone und Feinsandlagen. Die Ablagerungen reichen bis in das Stadtgebiet von Starnberg. Seetonablagerungen früherer Rückzugsphasen in Warmphasen oder Warmzeiten finden sich auch innerhalb der Moränenablagerungen in den Moränenwällen.

Die erkundeten geologischen Verhältnisse sind in Abb. 2 sowie in Anlage 4 im Überblick dargestellt. Abb. 2 stellt einen stark vereinfachten geologischen Überblick über die erkundeten geologischen Verhältnisse im Bereich der Tunneltrasse dar. Das Gelände verläuft im südlichen Tunnelbereich bis etwa Bau-km 0+900 weitgehend eben. Ausgehend von der Startbaugrube verläuft der in bergmännischer Bauweise erstellte Tunnel zunächst überwiegend in nichtbindiger Moräne. Zu Beginn dieses Abschnitts werden im Firstbereich fluviatile Kiese und ausgedehnte Nagelfluhbänke erwartet. Nach Norden taucht der Tunnel in das überwiegend feinkörnige Tertiär ab. Zwischen etwa Bau-km 0+900 und Bau-km 1+250 wird der „Almeidaberg“ unterfahren, dem ein Einschnitt bis etwa Bau-km 1+400 folgt. Der Tunnel befindet sich in diesem Abschnitt zunächst überwiegend in der bindigen Moräne, ab Bau-km 1+000 dann überwiegend in nichtbindiger Moräne und taucht schließlich wieder in bindige Moräne sowie die tertiären Schichten ab.

11485/341b

B2 – Tunnel Starnberg  
Hydrogeologischer Bericht - Teil 1

Zentrum  
Geotechnik

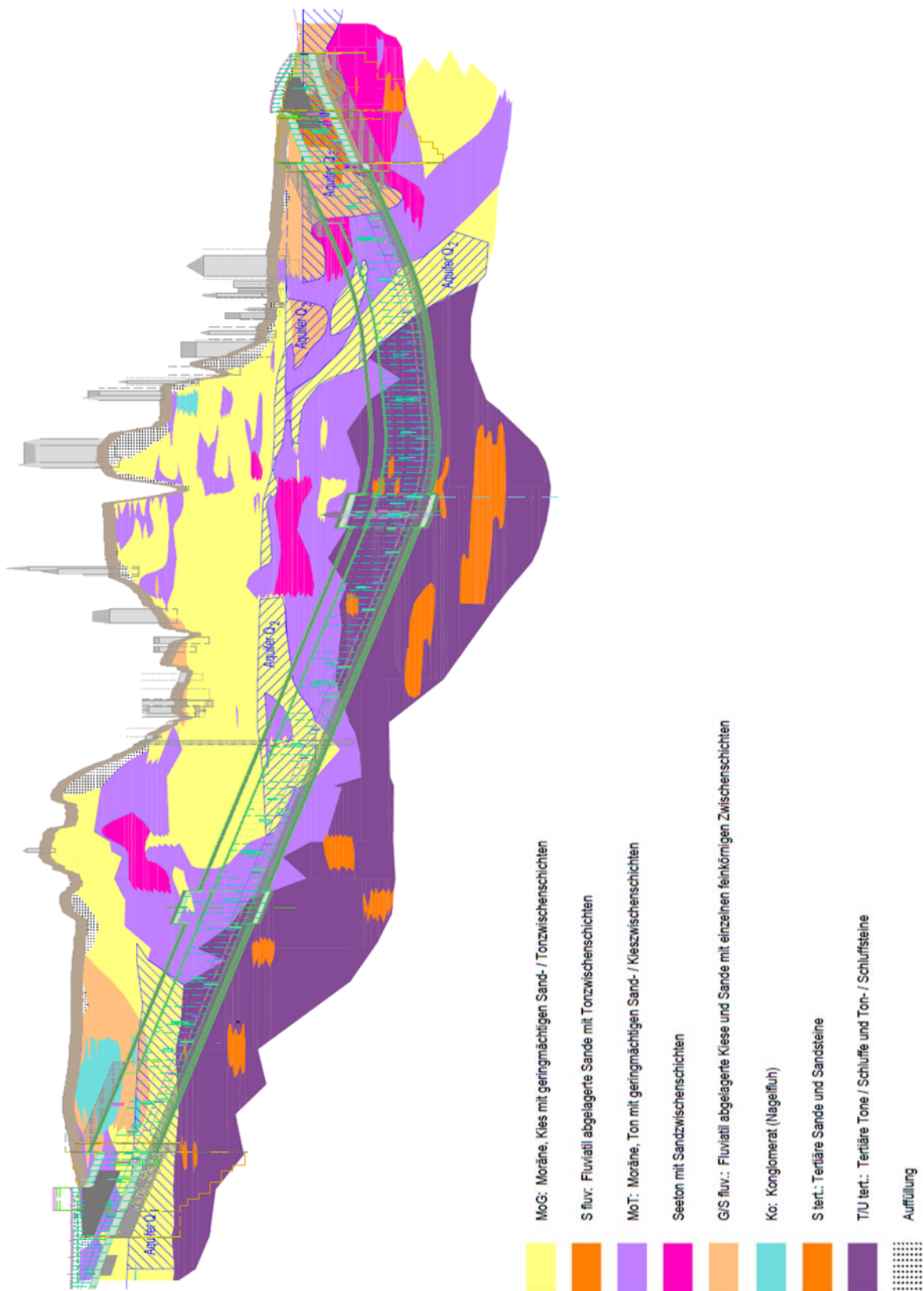


Abb. 2: Schematischer geologischer Längsschnitt mit Eintragung der Aquifere Q<sub>1</sub> bis Q<sub>3</sub>

Anschließend unterquert der Tunnel den „Schlossberg“ der etwa bei Bau-km 1+650 von einem schmalen Einschnitt in zwei Abschnitte unterteilt wird und bis etwa Bau-km 1+900 reicht. Der Tunnel liegt zunächst noch in diesem Abschnitt in der bindigen Moräne, taucht jedoch mit zunehmender Tiefe immer weiter in das überwiegend feinkörnige Tertiär ab.

Im nördlichen Tunnelabschnitt ist das Gelände wieder weitgehend eben. Die Untergrundverhältnisse, in denen der Tunnel zu liegen kommt, sind hier sehr heterogen. Ab der Tieflage im Tertiär werden zunächst wechselnde Abschnitte aus nichtbindiger und bindiger Moräne durchfahren. Im Firstbereich stehen bereichsweise Seetone an. Anschließend durchfährt der Tunnel bis zur Zielbaugrube fluvial abgelagerte Sande und Kiese mit Seetonen im Sohlbereich.

Abgesehen von den zwei als „Almeidaberg“ und „Schlossberg“ bezeichneten Seitenmoränenwällen ist im Trassenbereich an der Geländeoberfläche ein Gefälle von Südwesten nach Nordosten und in Richtung Südosten zum Starnberger See vorhanden. Dieses Gefälle ist allerdings nicht gleichmäßig ausgebildet, sondern das Gelände fällt terrassenförmig mit einem Wechsel aus weitgehend ebenen Abschnitten und Abschnitten mit höherem Gefälle entlang der Trasse ab.

## 4 Hydrologie und Hydrogeologie

### 4.1 Oberflächengewässer

Der Tunnel Starnberg unterquert bei ca. Bau-km 1+965 den in diesem Bereich unterirdisch verlaufenden Georgenbach mit einer Überdeckung von ca. 13,0 m. Der Georgenbach fließt dort in einer Betonrinne, die als weitgehend dicht angenommen werden kann, da Grundwassermessstellen in unmittelbarer Umgebung gegenüber dem Bachwasserspiegel niedrigere Wasserstände anzeigen. Weitere Oberflächengewässer werden nicht unterfahren.

Allerdings befindet sich von ca. Bau-km 0+600 bis 0+900 etwa 150 m nordwestlich des Tunnels das Institut für Fischerei der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. Die dortigen Fischzuchtbecken werden von sieben Quellen gespeist. Der Abfluss aus den Fischzuchtbecken erfolgt über den Siebenquellenbach, der in den Georgenbach mündet.

Der Georgenbach mündet in den Starnberger See, dessen Ufer südöstlich der Trasse mit einem minimalen Abstand von etwa 300 m verläuft. Für den Starnberger See wird vom Bayerischen Landesamt für Umwelt [U13] ein mittlerer Seepiegel von 584,22 müNN angegeben. Der höchste bzw. niedrigste gemessene Wasserstand beträgt 585,12 müNN bzw. 583,82 müNN (Messreihe 1908 bis 2016).

### 4.2 Wasserschutzgebiete

Etwa 300 m nordwestlich des südlichen Rampenbauwerks (Bau-km 0+225) liegt die Grenze eines Wasserschutzgebiets - Zone III. Wasserschutzgebiete der Zone II und I folgen in einem Abstand von etwa 500 m bzw. 675 m zum Rampenbauwerk (siehe Abb. 3).

Aufgrund der nachfolgend ermittelten Fließrichtungen im Bauwerksbereich, die zwischen Norden, Osten und Süden liegen, ist eine Beeinflussung der Wasserschutzgebiete durch den Tunnel Starnberg nicht zu erwarten.

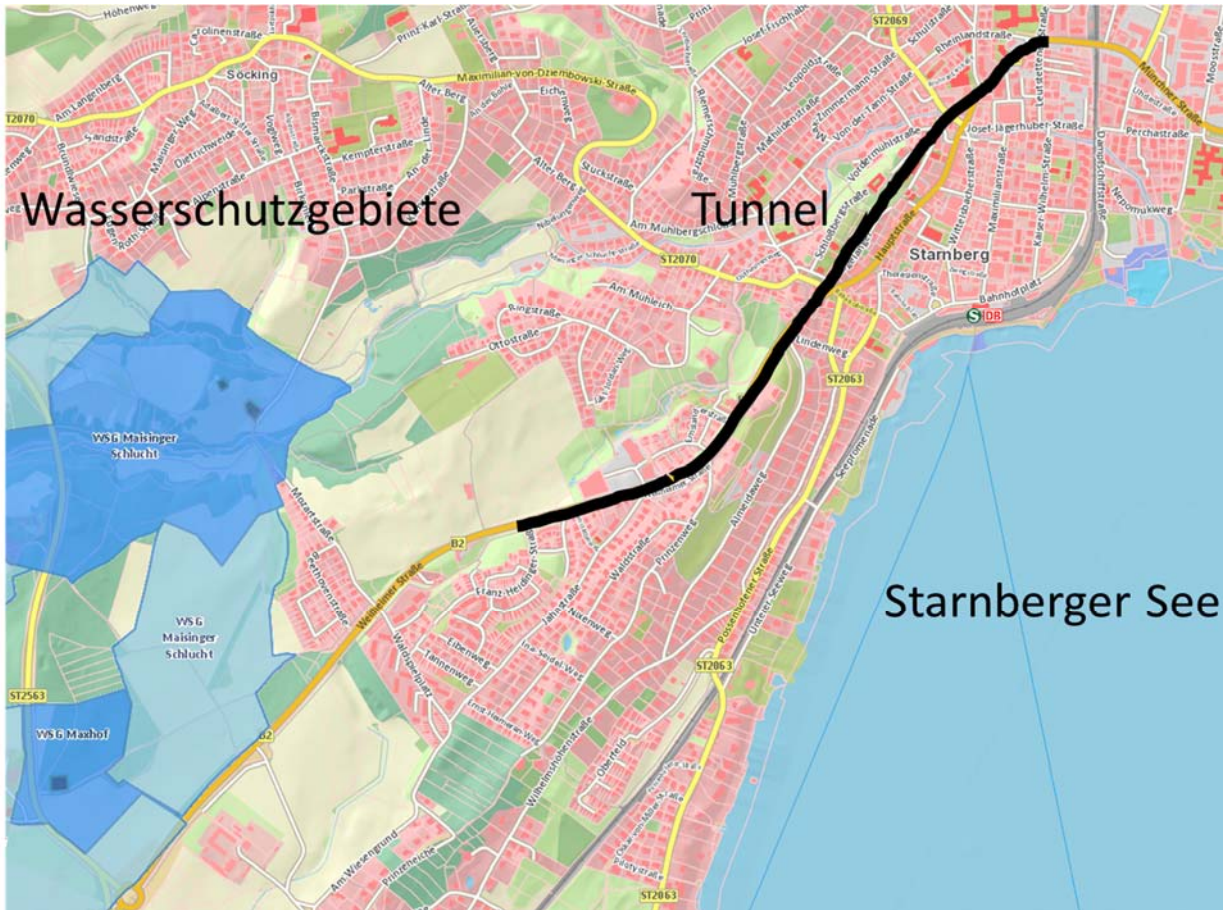


Abb. 3: Übersichtslageplan mit Darstellung der angrenzenden Wasserschutzgebiete

### 4.3 Grundwasserverhältnisse

#### 4.3.1 Allgemeines

Nachfolgend werden anhand der Bohrungen und Feldversuche die Grundwasserverhältnisse allgemein mit einem Grundwassermodell beschrieben. Dieses Grundwassermodell besitzt aus nachfolgenden Gründen gewisse Unschärfen:

- Die Grundwasserverhältnisse beim Tunnel Starnberg sind sehr komplex. Dies ergibt sich aus der extremen Heterogenität des Untergrunds sowie der Wechselhaftigkeit der Topographie.
- Es liegen mehrheitlich Bohrungen entlang des Tunnels vor, die Grundwasserströmung verläuft teilweise jedoch auch senkrecht zum Tunnel.
- Aufgrund der geologischen Entstehung des Baugrunds ist zu erwarten, dass die durchlässigen Schichten nicht homogen durchflossen werden, sondern dass es Bereiche gibt,

die bevorzugt und mit entsprechend größerer Fließgeschwindigkeit bzw. Wassermenge durchflossen werden. Derartig bevorzugt durchflossene Bereiche besitzen keine einheitliche Strömungsrichtung und können sich verzweigen und wieder zusammenlaufen.

Dem Grundwassermodell liegt jedoch eine Vielzahl von Informationen zugrunde, so dass trotz der heterogenen Verhältnisse insgesamt eine fundierte Aussage hinsichtlich der hydrogeologischen Verhältnisse getroffen werden kann.

#### 4.3.2 Verteilung der Grundwasseraquifere und Grundwasserhemmer

Nach der Auswertung der Ergebnisse des 3., 4. und 5. Erkundungsprogramms ist in den quartären durchlässigen Schichten entlang der Tunneltrasse keine einheitliche Grundwasseroberfläche vorhanden, sondern es gibt drei, nachfolgend als Grundwasserabschnitte GWA<sub>1</sub> bis GWA<sub>3</sub> bezeichnete Bereiche, die durch vertikale oder schräge Barrieren voneinander getrennt sind. Diese Barrieren befinden sich südlich von Notausstieg 2 sowie nördlich der Hanfelder Straße. Die Grundwasserabschnitte zwischen diesen Barrieren zeigen zum Teil deutlich unterschiedliche Grundwasserniveaus, wobei teilweise ein Gefälle von Süden nach Nordwesten und teilweise in Richtung Starnberger See, also nach Osten vorhanden ist. Die Fließrichtung wechselt also zwischen den Grundwasserabschnitten, ist aber auch innerhalb der Grundwasserabschnitte nicht einheitlich. Sie ist nicht zwangsläufig mit dem Verlauf der Geländeoberfläche identisch.

Zusätzlich liegen horizontale Barrieren aus bindigen Böden vor, so dass sich auch in unterschiedlicher Tiefe verschiedene Aquifere mit unterschiedlichen Druckhöhen ausgebildet haben.

In vertikaler Richtung sind je nach Grundwasserabschnitt bis zu drei Aquifere zu unterscheiden:

##### Schichtwasseraquifer:

In verschiedenen Aufschlüssen wurde Grundwasser über grundwasserstauenden Schichten in sehr unterschiedlicher Höhenlage (siehe Anlage 2) angetroffen. Aufgrund der geologischen Randbedingungen und der Ergebnisse von Durchlässigkeitsversuchen wurde dieses Grundwasser als in Linsen eingeschlossenes Grundwasser oder Schichtwasser – sogenanntes „schwebendes Grundwasser“ – eingestuft. Die Mächtigkeit und die Ergiebigkeit dieser Aquifere ist mit großer Wahrscheinlichkeit gering. Unter den stauenden Schichten dieser Aquifere folgen teils Kiese, die nicht grundwasserführend sind bzw. einen freien Grundwasserspiegel aufweisen (z.B. GWM 314, GWM 351).

##### Quartäraquifer (quartärer Hauptgrundwasserleiter):

In durchlässigen Moränenkiesen oder fluviatil abgelagerten Kiesen und seltener auch Sanden haben sich – getrennt durch die oben beschriebenen bindigen Barrieren – drei quartäre Hauptgrundwasserleiter ausgebildet, die jeweils eine geschlossene Grundwasseroberfläche aufweisen und nachfolgend mit Q<sub>1</sub> bis Q<sub>3</sub> bezeichnet werden (siehe Abb. 2).

##### Tertiäraquifer:

Wasserführende Tertiärsande wurden vereinzelt erkundet. In allen Aufschlüssen ist das tertiäre Grundwasser gespannt und erreicht vereinzelt Druckhöhen (siehe GWM 314) über denen des

Quartäraquifers. Ob es sich um einen durchgängigen Tertiäraquifer handelt, kann anhand der wenigen vorhandenen Aufschlüsse nicht belegt werden.

Für das nachfolgende Grundwassermodell werden vorwiegend die Quartäraquifere näher betrachtet. Diese werden in größerem Umfang vom geplanten Tunnel beeinflusst und wurden daher auch am häufigsten durch Grundwassermessstellen aufgeschlossen.

Schichtwasseraquifere sind immer zu erwarten, wenn Wechsellagerungen zwischen bindigen und nichtbindigen Schichten auftreten. Über die Wasserspiegelmhöhen können keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden. Im Teil 2 des hydrogeologischen Gutachtens werden soweit möglich Angaben zu erwartenden Schichtwasserspiegelmhöhen für räumlich eng begrenzte Bauwerke (Schächte und Stollen) gemacht.

#### 4.3.3 Grundwasserabschnitt 1 (GWA<sub>1</sub>)

Der GWA<sub>1</sub> befindet sich im südlichen Tunnelabschnitt bis ca. Bau-km 0+900 (siehe Anlage 1, Anlage 2 sowie Abb. 4). Der Aquifer Q<sub>1</sub> des GWA<sub>1</sub> wird im Nordwesten durch überwiegend bindige Moränenablagerungen begrenzt, die durch die Bohrungen B 513, B 301, GWM 306 und GWM 309 belegt sind. Südöstlich fällt das Gelände zum Starnberger See hin ab, dessen Wasserstand deutlich unter dem Grundwasserniveau von Q<sub>1</sub> liegt. Da in diesem Bereich keine Quellaustritte bekannt sind, müssen auch hier wenig durchlässige Bodenschichten vorhanden sein. Im Osten sind wenig durchlässige Moränenablagerungen durch die Bohrungen B 313, GWM 315, B 405, GWM 361 und GWM 406, bzw. auch durch den um mehrere Meter niedrigeren Grundwasserstand in GWM 351 und GWM 352 belegt.

Unter Zugrundelegung dieser geologischen Begrenzungen und der daraus begründeten Annahme, dass die Quellen bei der Landesanstalt für Fischerei aus diesem Aquifer gespeist werden, ist eine Grundwasserströmung im GWA<sub>1</sub> in Richtung Nord-Nordost anzunehmen. Diese Annahme wird, wie man Abb. 4 entnehmen kann, durch die Auswertung der Stichtagsmessung vom 26. und 27.02.2019 von 17 Grundwassermessstellen in diesem Bereich, sowie durch drei Fließrichtungsmessungen bestätigt.

Für die Auswertung der Stichtagsmessung wurde ein Netz mit Dreiecksmaschen erzeugt, dessen Knoten die jeweils betrachteten Grundwassermessstellen bilden. Entlang der Kanten dieser Dreieckselemente können durch lineare Interpolation Punkte mit gleichem Wasserstand berechnet werden. Diese Punkte bilden die Stützstellen für die in Abb. 4 dargestellten Isohypsen (Grundwassergleichen), zu denen die Grundwasserströmung immer senkrecht erfolgt. Aus dem Abstand zweier Isohypsen und deren Wasserspiegeldifferenz lässt sich das hydraulische Gefälle berechnen.

Im Aquifer Q<sub>1</sub> ergibt sich aus den Wasserständen der Stichtagsmessung in der Hauptströmungsrichtung ein mittleres hydraulisches Gefälle von  $i = 1,4 \%$ . Hierbei wurden die Messstellen GWM 306 und B 107 nicht in die Ermittlung der Isohypsen mit einbezogen, da deren direkter Anschluss an Q<sub>1</sub> fraglich ist. Bei GWM 306 wurde nur eine 0,60 m mächtige Wechselfolge aus Ton und tonigem Sand bzw. eine 0,35 m mächtige tonige Feinsandschicht erbohrt und verfiltert.

11485/341b      B2 – Tunnel Starnberg  
Hydrogeologischer Bericht - Teil 1

Zentrum  
Geotechnik

Die Messstelle B 107 (1. Erkundungsprogramm) ist, wie mit einem Lot ermittelt wurde, von 12,7 m bis 21,9 m unter GOK verschlammt. Es können zwar noch Messungen mit einem Lichtlot durchgeführt werden, eine Pumpe zum Klarpumpen bzw. für Pumpversuche konnte aber aufgrund einer Verengung oder eines Knicks im Pegelrohr nicht eingeführt werden. Damit ist zu befürchten, dass die Grundwassermessstelle B 107 nicht mehr funktionsfähig ist.

Im Aquifer  $Q_1$  wurden bei Pumpversuchen k-Werte zwischen  $k = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s und  $k = 4 \cdot 10^{-3}$  m/s ermittelt.

Schichtwässer wurden in diesem Bereich nicht angetroffen, können aber über und in den bindigen Deckschichten nicht ausgeschlossen werden.

Der Tertiäraquifer wurde in den Messstellen GWM 307, GWM 310 und B 405 erschlossen. Bei GWM 307 entspricht der Tertiärwasserstand bei der Stichtagsmessung bis auf wenige Zentimeter dem des Aquifers  $Q_1$ . Vermutlich sind beide Aquifere in unmittelbarer Nähe direkt miteinander verbunden. Weiter nordöstlich bei GWM 310 fällt der Wasserdruck des Tertiäraquifers ab und liegt mehr als 5,5 m unter dem des Aquifers  $Q_1$ .



11485/341b

B2 – Tunnel Starnberg  
Hydrogeologischer Bericht - Teil 1

Zentrum  
Geotechnik

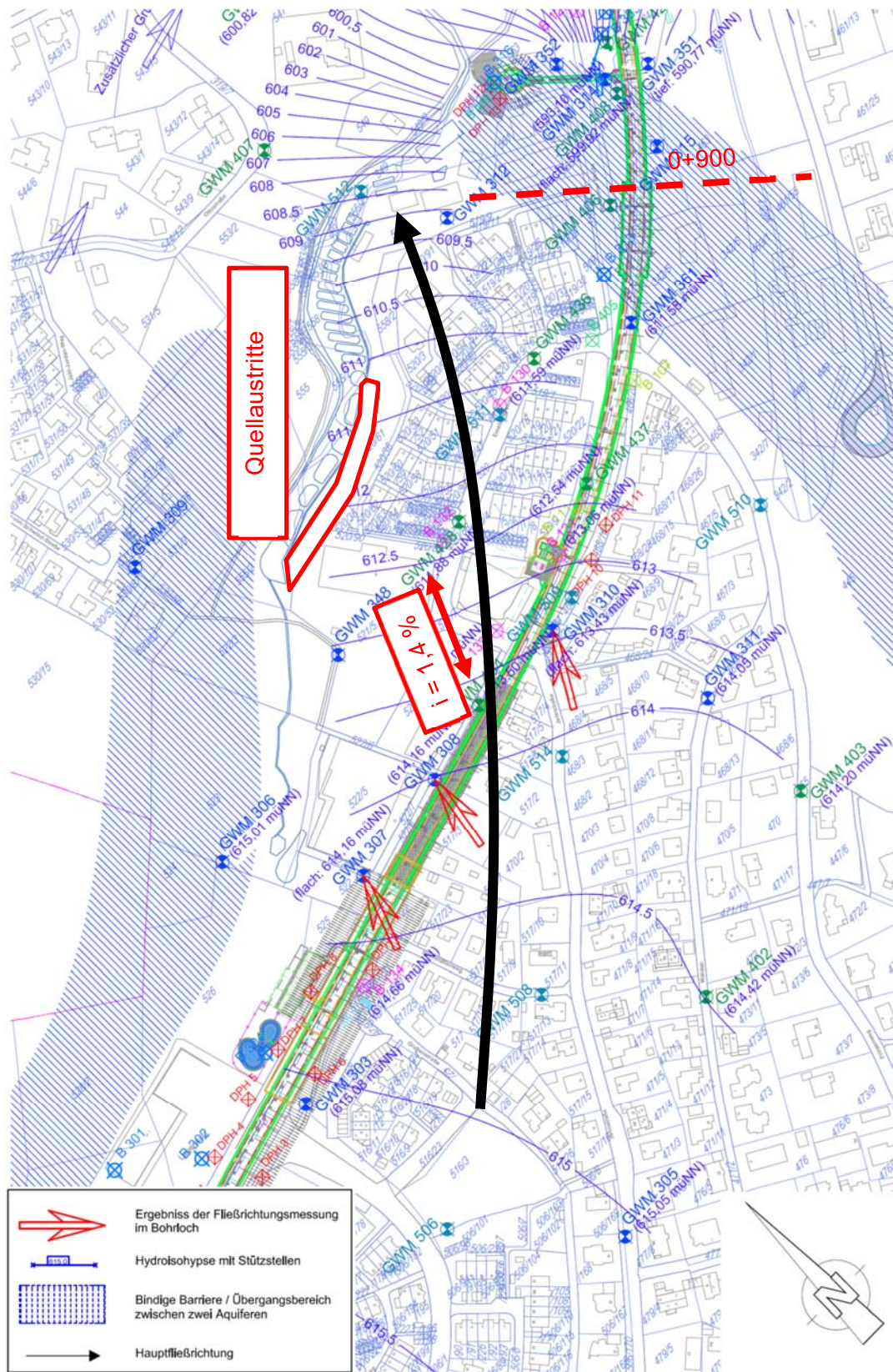


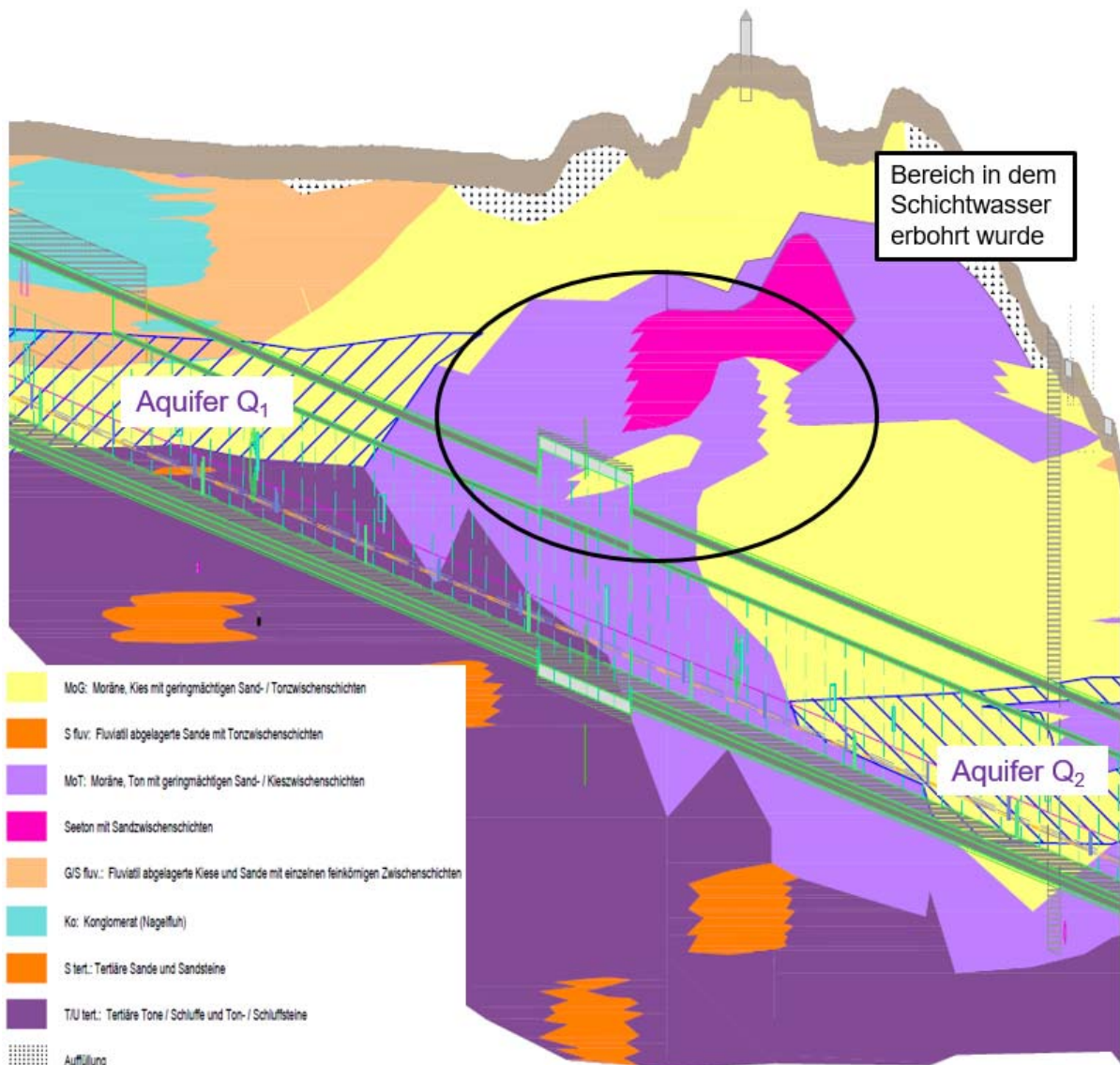
Abb. 4: Isohypsen und Ergebnisse der Fließrichtungsmessung des Aquifers Q<sub>1</sub> im GWA<sub>1</sub>

#### 4.3.4 Übergangsbereich von Grundwasserabschnitt 1 zu Grundwasserabschnitt 2

Wie man Anlage 2 und Abb. 5 entnehmen kann, fällt der Grundwasserspiegel zwischen Bau-km 0+900 und Bau-km 1+000 um mehr als 20 m. Dieser Sprung im Grundwasserniveau wird durch die in Abschnitt 4.3.2 beschriebene und in Abb. 5 schematisch dargestellte bindige Barriere verursacht. Eingelagert in diese feinkörnigen Bodenschichten wurden teilweise geringmächtige und wenig durchlässige wasserführende Schichten erkundet (B 313, GWM 314, GWM 315, B 343, GWM 351, B 405 und GWM 406). Diese Schichten wurden aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit von  $k = 8 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$  bis  $k = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  und den teilweise in tieferen Schichten anstehenden trockenen Kiese als Schichtwasseraquifer eingestuft. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass diese Schichten teilweise mit dem Aquifer  $Q_1$  in Verbindung stehen.

Im Bereich des Siebenquellenbachtals (siehe Abb. 4) wurden in B 316 Kiesschichten von 4,4 m Mächtigkeit aufgeschlossen, die einen Wasserstand zwischen den Niveaus von  $Q_1$  und  $Q_2$  aufweisen. Daraus lässt sich schließen, dass das Grundwasser aus  $Q_1$ , soweit es nicht an den Quellen an der Landesanstalt für Fischerei austritt, die bindige Barriere im Einschnitt des Siebenquellenbaches überwindet, seine Fließrichtung ändert und - wie nachfolgend gezeigt wird - Richtung Starnberger See strömt.

11485/341b

B2 – Tunnel Starnberg  
Hydrogeologischer Bericht - Teil 1Zentrum  
Geotechnik

**Abb. 5: Übergangsbereich von GWA<sub>1</sub> zu GWA<sub>2</sub>**

#### 4.3.5 Grundwasserabschnitt 2 (GWA<sub>2</sub>)

Der Aquifer GWA<sub>2</sub> befindet sich zwischen Bau-km 1+000 und Bau-km 2+000. Die Mächtigkeit und Durchlässigkeit der wasserführenden Schichten des Aquifers Q<sub>2</sub> im GWA<sub>2</sub> variiert stark. Es wird nachfolgend zwischen drei Bereichen, dem Bereich zwischen Bau-km 1+000 und Bau-km 1+450, zwischen Bau-km 1+450 und Bau-km 1+800 und zwischen Bau-km 1+800 und Bau-km 2+000 unterschieden.

Zwischen Bau-km 1+000 und Bau-km 1+450 sind großteils Kiese mit einer Durchlässigkeit zwischen  $k = 1 \cdot 10^{-2}$  m/s und  $k = 7 \cdot 10^{-3}$  m/s vorhanden.

Bei GWM 319 wurde eine horizontale Trennung von Q<sub>2</sub> aufgeschlossen. Im oberen Grundwasserstockwerk wurde durch Pumpversuche die Durchlässigkeit  $k = 1 \cdot 10^{-4}$  m/s und im unteren

Grundwasserstockwerk  $k = 9 \cdot 10^{-4}$  m/s ermittelt. Der Wasserdruck beider Grundwasserstockwerke unterscheidet sich bei der Stichtagsmessung um etwa 0,25 m. Wie diese Trennung zustande kommt, ist aus den umliegenden Aufschlüssen nicht klar ersichtlich. Denkbar wäre es, dass es sich beim unteren Stockwerk um eine getrennte Schicht handelt, die ihren höheren Wasserdruck aus einer Verbindung zu Q<sub>2</sub> weiter stromaufwärts erhält (siehe auch GWM 318 zwischen 43,7 m und 45,2 m unter GOK). Vereinfachend wurde für die Ermittlung der Isohypsen nur der höhere Wasserstand des unteren Stockwerks berücksichtigt, wobei es aufgrund der vorhandenen hohen hydraulischen Gefälle nicht maßgeblich ist, welcher der beiden Wasserspiegel berücksichtigt wird.

Die ermittelten Fließrichtungen aus der Auswertung der Stichtagsmessung vom 26. und 27.02.2019, des Seewasserspiegels sowie der Fließrichtungsmessungen in zwei Messstellen zeigen eine Strömung in Richtung Südosten zum Starnberger See (siehe Abb. 6).

Das maximale hydraulische Gefälle ergibt sich aus der Stichtagsmessung in diesem Bereich zu  $i = 6,7$  %. Zur Kontrolle wurde eine von der Betrachtung der Stichtagsmessung unabhängige Berechnung des hydraulischen Gefälles aus der Fließgeschwindigkeit und der Durchlässigkeit bei der GWM 318 durchgeführt. Demnach ergibt sich ein hydraulisches Gefälle von  $i = 2,05$  %. Beide ermittelten hydraulischen Gefälle wurden zunächst als ungewöhnlich hoch erachtet. Zur Überprüfung wurde die sich daraus ergebende erforderliche Durchflussmenge für den Bereich zwischen GWM 351 und GWM 319 ermittelt. Bei einer Durchlässigkeit von  $k = 2 \cdot 10^{-3}$  m/s (GWM 318) und einem angenommenen durchflossenen Querschnitt von etwa 1240 m<sup>2</sup> (im Mittel 5,5 m Aquifermächtigkeit, 225 m breiter Bereich) ergibt sich je nach zu Grunde gelegtem hydraulischem Gefälle ein Durchfluss von 51 l/s bis 166 l/s. Es ist nachvollziehbar, dass derartige Wassermengen aus dem Grundwasserabschnitt GWA<sub>1</sub> und dem westlichen anschließenden Bereich dem Grundwasseraquifer GWA<sub>2</sub> zufließen.

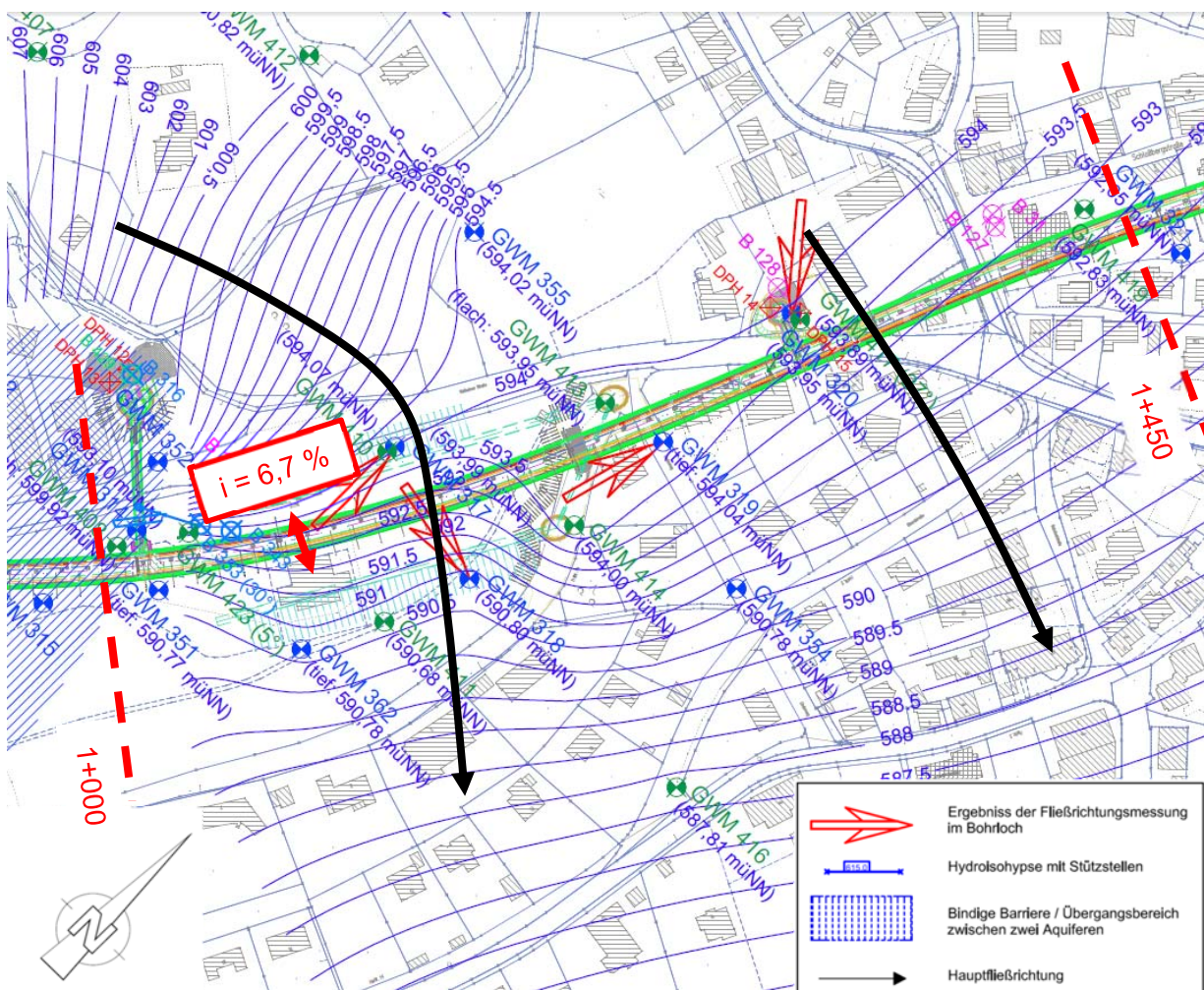
Auch die ermittelten Fließrichtungen sind plausibel, wenn man die Topographie berücksichtigt. An der Geländeoberfläche ist ein Einschnitt zwischen dem Almeidaberg und dem Schlossberg sichtbar, der seinen Tiefpunkt etwa bei der GWM 319 hat. Im Untergrund ist dieser Einschnitt in die bindige Moräne – etwas nach Südwesten unter den Almeidaberg verschoben – ebenfalls vorhanden. In dieser flachen Kiesrinne etwa zwischen der GWM 351 und der GWM 319 strömt das Grundwasser aus dem Siebenquellenbachtal im Südwesten und dem Hanfelder Hang im Nordwesten in Richtung Starnberger See. Die hohen hydraulischen Gefälle ergeben sich aus dem Höhenunterschied, der bis zum See überwunden werden muss.

Weiter nördlich zwischen der GWM 319 und Bau-km 1+450 ist im Längsschnitt eine ähnliche Rinnenform sichtbar. Allerdings wurden in dieser Messstelle deutlich niedrigere Fließgeschwindigkeiten als in der GWM 318 gemessen (siehe Tab. 3.4). Daraus lässt sich schließen, dass in diesem Bereich keine durchgängige Rinne mit einer hohen Durchlässigkeit, wie bei GWM 318 ( $k = 2 \cdot 10^{-3}$  m/s), vorhanden ist.

Wie bereits in Abschnitt 4.3.4 beschrieben, wurden in der GWM 314, GWM 351, B 343, GWM 408 und GWM 423 geringmächtige wasserführende Schichten angetroffen, die als Schicht-

wasser eingestuft wurden. Weitere Schichtwasseraquifere können aufgrund der Wechsellagerung zwischen bindigen und nichtbindigen Schichten in diesem Bereich nicht ausgeschlossen werden.

Der Tertiäraquifer wurde in der Messstelle GWM 314 in einer Sandschicht zwischen 40,4 m und 43,4 m unter GOK erschlossen. Der gemessene Druckwasserspiegel reicht etwa 9,5 m über den freien Wasserspiegel des Aquifers Q<sub>2</sub>. Es ist durchaus möglich, dass diese Sandschicht indirekt und eventuell auch über längere Fließwege mit dem Tertiäraquifer des GWA<sub>1</sub> verbunden ist, der Druckwasserspiegel ist allerdings um ca. 7,0 m geringer als in der GWM 310.



**Abb. 6: Isohypsen und Ergebnisse der Fließrichtungsmessung des Aquifers Q<sub>2</sub> von Bau-km 1+000 bis Bau-km 1+450 (GWA<sub>2</sub>)**

Zwischen Bau-km 1+450 und Bau-km 1+800 wurde der Aquifer Q<sub>2</sub> nur in geringmächtigen, durchlässigen Zwischenschichten angetroffen, die in die bindige Moräne eingelagert sind (siehe Anlage 2.2). Die Durchlässigkeiten wurden zwischen  $k = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s und  $k = 2 \cdot 10^{-4}$  m/s (bei sehr geringer Schichtmächtigkeit) ermittelt. Da nach dem Durchlässigkeitsversuch in der durch GWM 326-t aufgeschlossenen Kiesschicht ( $k = 5 \cdot 10^{-9}$  m/s) davon ausgegangen werden kann, dass der Anschluss dieses Kiesel an den Aquifer, wenn überhaupt, dann nur bedingt vorhanden

ist, wurde der Wasserstand in dieser Grundwassermessstelle nicht bei der Ermittlung der Isohypsen berücksichtigt.

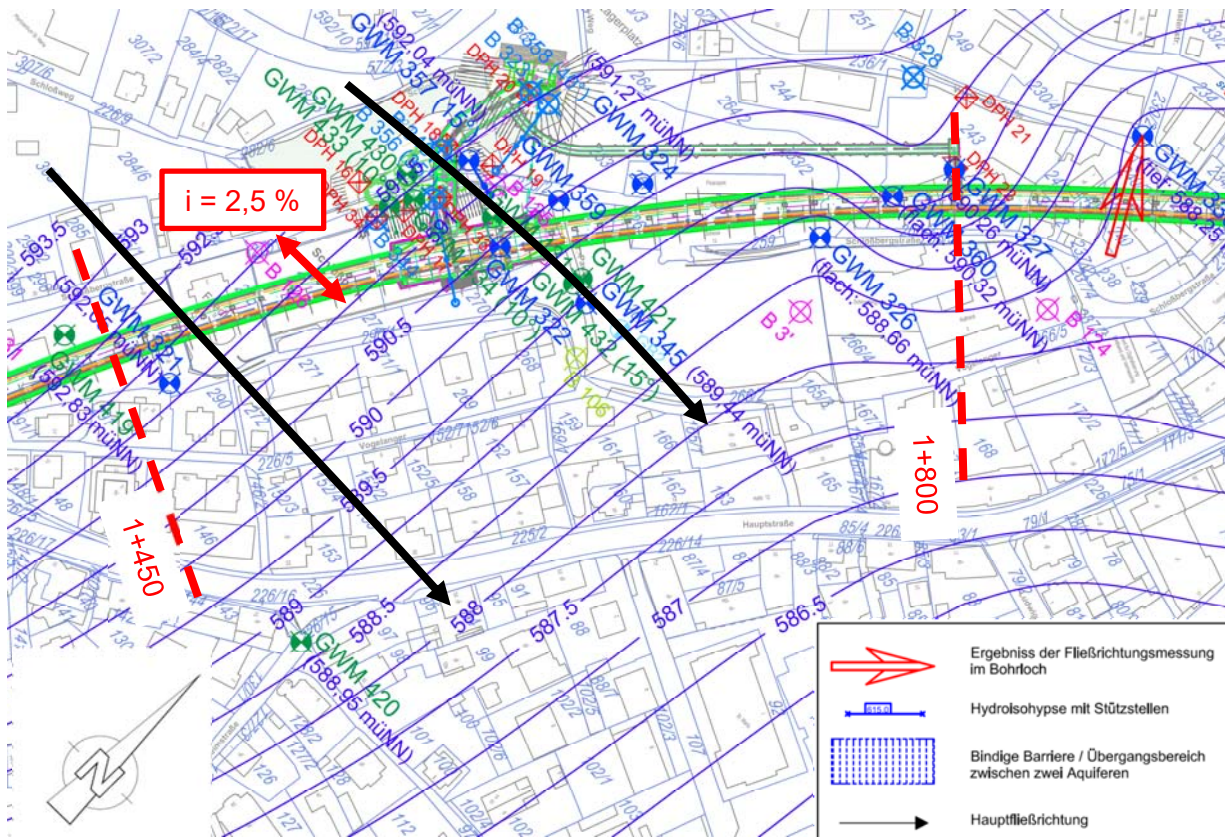
Gemäß der Auswertung der Stichtagsmessung vom 26. und 27.02.2019 von acht Grundwassermessstellen strömt in diesem Abschnitt des Aquifers Q<sub>2</sub> das Grundwasser mit einem hydraulischen Gefälle von  $i = 2,5 \%$  nach Osten zum Starnberger See.

Grundsätzlich ist aufgrund der Topographie auch die ermittelte Fließrichtung vom Hanfelder Hang im Nordwesten in Richtung Starnberger See plausibel. Da in diesem Bereich aber nur geringmächtige grundwasserführende Schichten anstehen, deren Teufe in den einzelnen Bohrungen variiert, ist die Durchgängigkeit des Aquifers in diesem Bereich nicht eindeutig belegt. Die beim Pumpversuch ermittelten geringen Durchlässigkeiten in Kiesen, die aufgrund der Korngrößenverteilung als stark durchlässig beurteilt wurden, lassen vermuten, dass die Strömungsgeschwindigkeit von weniger durchlässigen Bereichen begrenzt ist und eventuell auch die Strömungsrichtung variiert.

Schichtwässer wurden in diesem Bereich über dem Aquifer Q<sub>2</sub> nicht angetroffen, können aber bei den vorhandenen Wechsellagen von bindigen und nichtbindigen Schichten nicht ausgeschlossen werden.

In den angetroffenen tertiären Sanden konnte kein Druckwasserspiegel ermittelt werden. Vermutlich wurde der tertiäre Wasserdruckspiegel aufgrund des Bohrverfahrens (Rotationskernbohrung mit Spülung) nicht erkannt. Es ist aber davon auszugehen, dass die tertiären Sandschichten einen Wasserdruckspiegel aufweisen, der etwa dem Niveau des Tertiäraquifers im zuvor beschriebenen Abschnitt entspricht.

Zu beachten ist, dass nordwestlich der Tunneltrasse in einem Abstand von etwa 100 m bis 200 m in den Aufschlüssen B 325, GWM 331, B 135 und B 136 artesisch gespanntes Grundwasser erbohrt wurde. Der Wasserdruck reicht dort bis etwa 4 m über GOK und damit mehrere Meter über das Grundwasserniveau des Aquifer Q<sub>2</sub>. In sämtlichen Aufschlüssen entlang des Tunnels wurde dieses artesisch gespannte Grundwasser nicht angetroffen. Wahrscheinlich befindet sich unmittelbar westlich der geplanten Trasse eine weitere vertikale Barriere, die das vom Hanfelder Hang unter hohem hydraulischem Gefälle zufließende Wasser am Hangfuß artesisch aufstaut. Aufgrund des geringen Abstands und der Heterogenität des Untergrunds kann es jedoch nicht mit absoluter Sicherheit ausgeschlossen werden, dass beim Tunnelvortrieb eine wasserführende Schicht mit diesem Druckniveau angetroffen wird. Es ist auch durchaus möglich, dass keine vollkommene Absperrung vorhanden ist und Wasser aus diesem artesisch gespannten Aquifer durch wenig durchlässige Schichten dem Aquifer Q<sub>2</sub> zuströmt.



**Abb. 7: Isohypsen und Ergebnisse der Fließrichtungsmessung des Aquifers Q<sub>2</sub> von Bau-km 1+450 bis Bau-km 1+800 (GWA<sub>2</sub>)**

Ab Bau-km 1+800 bis Bau-km 2+000 sind wieder mächtigere Kiesschichten vorhanden, an denen Durchlässigkeiten zwischen  $k = 5 \cdot 10^{-5}$  m/s und  $k = 3 \cdot 10^{-3}$  m/s ermittelt wurden. Zusätzlich ist in einzelnen Bohrungen eine Trennung des Aquifers Q<sub>2</sub> in zwei Grundwasserstockwerke abgeschlossen, wobei sich in diesem Bereich die Wasserstände der beiden Grundwasserstockwerke nur bei GWM 330 geringfügig um 0,08 m unterscheiden (siehe Anlage 2.3). Zur Ermittlung der Isohypsen wurden die Wasserstände des unteren Grundwasserstockwerks von GWM 330 herangezogen, da dieses die größere Mächtigkeit aufweist und der direkte Anschluss an Q<sub>2</sub> wahrscheinlicher ist.

Die Fließrichtungen sind in diesem Bereich des Aquifers Q<sub>2</sub> weniger eindeutig. Ab etwa GWM 327 erhält die bisher nach Osten weisende Fließrichtung, wie man Abb. 8 entnehmen kann, auch Komponenten nach Süd- und Nordosten. Damit verlaufen die Isohypsen in ähnlicher Form wie die Höhenlinien des Moränenrückens (Schlossberg), der in diesem Bereich endet. Sobald das Grundwasser den durchlässigeren und mächtigeren Aquiferbereich um den Tutzing-Hof-Platz erreicht, verringert sich das hydraulische Gefälle (anfänglich  $i = 2,9$  %) deutlich.

Die Wasserspiegeldifferenzen der Messstellen (GWM 330-t, GWM 350-t, B 104, B 122, B 123, BR 11) in diesem Bereich betragen nur einige Zentimeter bis Dezimeter. Die ermittelte Fließrich-

tung aus der Auswertung der Stichtagsmessung vom 26. und 27.02.2019 von sechs Grundwassermessstellen und von drei Fließrichtungsmessungen zeigt keine eindeutige Richtung, sondern einen Richtungsbereich zwischen Südosten und Nordosten (siehe Abb. 8).

Mit Schichtwässern ist nicht oder nur in sehr geringem Umfang zu rechnen, da über dem Grundwasserspiegel überwiegend durchlässige Schichten erbohrt wurden.

In den angetroffenen tertiären Sanden konnte kein Druckwasserspiegel ermittelt werden. Vermutlich wurde der tertiäre Wasserdruckspiegel aufgrund des Bohrverfahrens (Rotationskernbohrung mit Spülung) nicht erkannt. Es ist aber davon auszugehen, dass die tertiären Sandschichten einen Wasserdruckspiegel aufweisen, der etwa dem Niveau des Aquifers Q<sub>2</sub> entspricht.

Auch in diesem Bereich kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass der im vorherigen Abschnitt beschriebene artesisch gespannte Aquifer westlich des Tunnels, dessen Grundwasserniveau mehrere Meter über dem des Aquifers Q<sub>2</sub> liegt, beim Tunnelvortrieb angetroffen wird.

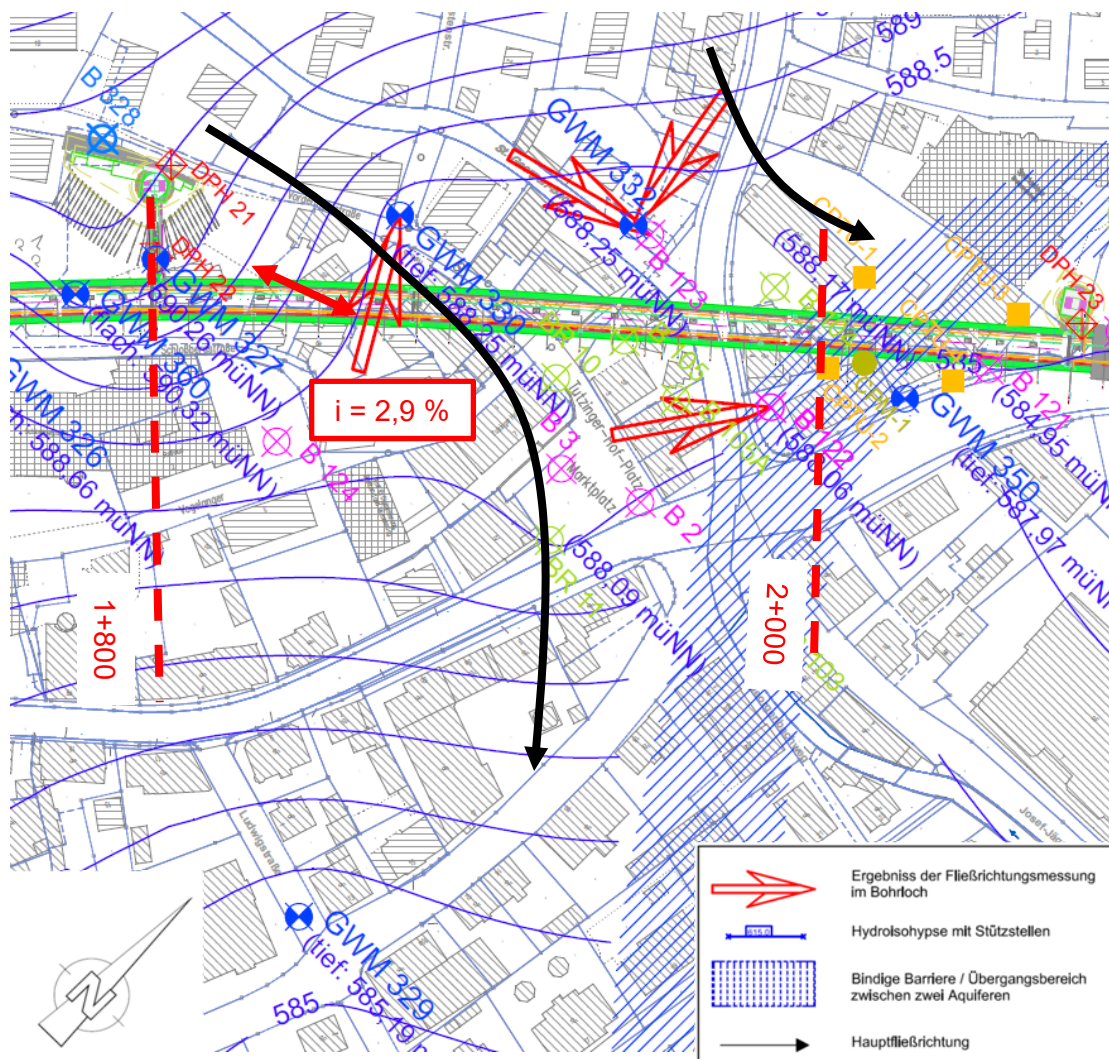


Abb. 8: Isohypsen und Ergebnisse der Fließrichtungsmessung des Aquifers Q<sub>2</sub> von Bau-km 1+800 bis Bau-km 2+000 (GWA<sub>2</sub>)



#### 4.3.6 Übergangsbereich von Grundwasserabschnitt 2 zu Grundwasserabschnitt 3

Wie man Abb. 9 entnehmen kann, ist zwischen dem GWA<sub>2</sub> und dem GWA<sub>3</sub> eine bindige Barriere vorhanden, die einen Sprung im Grundwasserniveau des quartären Hauptgrundwasserleiters von etwa 3 m verursacht.

Anders als im Übergangsbereich von GWA<sub>1</sub> zu GWA<sub>2</sub> überlappen sich in diesem Bereich die Aquifere Q<sub>2</sub> und Q<sub>3</sub>. Sie sind gemäß GWM 350 durch einen schräg verlaufenden Stauer getrennt (siehe Anlage 2.3). Die ab 22,5 m unter GOK anstehenden durchlässigen Schichten zeigen einen Wasserdruck auf dem Niveau von Q<sub>2</sub>. Der Wasserstand in den hoch liegenden durchlässigen Schichten bis 9,9 m unter GOK ist um etwa 3 m niedriger und liegt auf dem Niveau des nachfolgend beschriebenen Aquifers Q<sub>3</sub>. Es ist davon auszugehen, dass sich Q<sub>2</sub>, getrennt durch feinkörnige Schichten, noch weiter unter Q<sub>3</sub> fortsetzt. Dies lassen auch die Bohrungen GWM 422 und GWM 424 vermuten (siehe hierzu nachfolgenden Abschnitt).

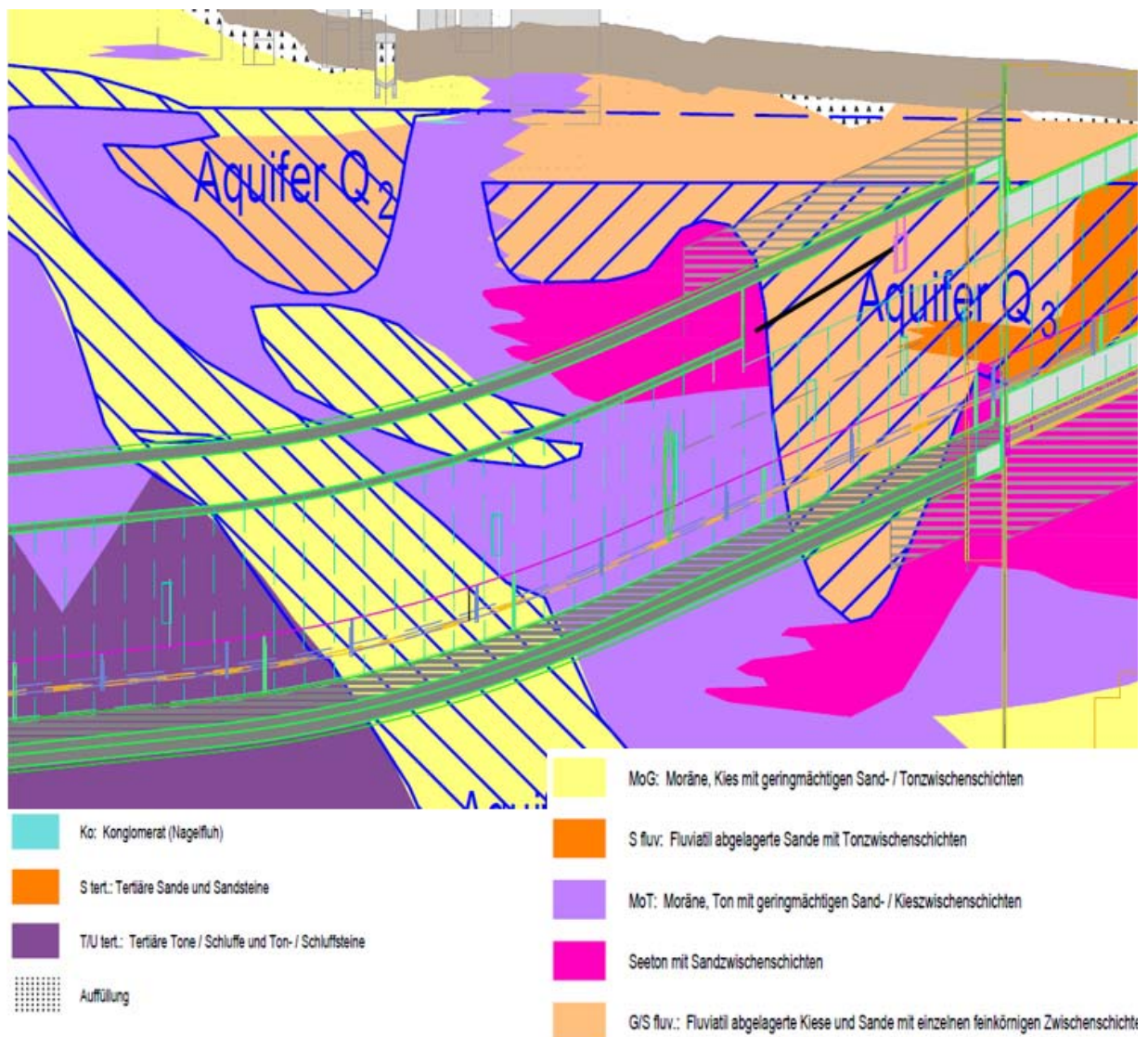


Abb. 9: Übergangsbereich von GWA<sub>2</sub> zu GWA<sub>3</sub>

#### 4.3.7 Grundwasserabschnitt 3 (GWA<sub>3</sub>)

Der Aquifer Q<sub>3</sub> befindet sich im nördlichen Tunnelabschnitt ab Bau-km 2+040. Die ermittelten Durchlässigkeiten von Q<sub>3</sub> variieren stark zwischen  $k = 6 \cdot 10^{-5}$  m/s in weniger durchlässigen Bereichen und  $k = 6 \cdot 10^{-3}$  m/s in sehr durchlässigen, mächtigen Kiesen.

Wie man Abb. 10 entnehmen kann, zeigt bei der Stichtagsmessung am 26. und 27.02.2019 die GWM 334 im Aquifer Q<sub>3</sub> den höchsten Wasserstand von insgesamt 13 Grundwassermessstellen. Grund hierfür ist vermutlich, dass im Bereich der GWM 334 ein Zufluss vom Hanfelder Hang und/oder vom Georgenbachtal erfolgt. Als Folge kommt es zu den in Abb. 10 dargestellten halb-kreisförmigen Isohypsen und den sich daraus ergebenden radial nach außen zeigenden Fließrichtungen zwischen Norden, Osten und Süden. Die Fließrichtungsmessung in GWM 334 zeigt eine Strömung in Richtung Nordost.

Das hydraulische Gefälle ist in diesem Bereich im Vergleich zu GWA<sub>1</sub> und GWA<sub>2</sub> deutlich geringer und beträgt maximal etwa  $i = 0,3 \%$  zwischen Bau-km 2+345 und Bau-km 2+375.

Da das Grundwasserniveau des Aquifers Q<sub>3</sub> in der Regel einige Dezimeter über dem Wasserspiegel des Starnberger Sees liegt, ist die ermittelte Strömung Richtung Starnberger See bzw. dessen Ablauf, der Würm, plausibel. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass bei Hochwasser der Seepegel auch über den Grundwasserstand ansteigen kann und sich daher die Fließrichtungen zumindest in Teilbereichen umkehren können.

Mit Schichtwässern ist nicht oder nur in sehr geringem Umfang zu rechnen, da über dem Grundwasserspiegel überwiegend durchlässige Schichten erbohrt wurden.

Das Tertiär wurde im hier betrachteten Bereich nicht mehr erbohrt und ist für das Tunnelbauwerk nicht mehr relevant.

Auch in diesem Bereich kann nicht vollständig ausgeschlossen werden, dass der im vorherigen Abschnitt beschriebene artesisch gespannte Aquifer westlich des Tunnels beim Tunnelvortrieb angetroffen wird. Ein geringer Grundwasserzustrom aus dem artesisch gespannten Aquifer in den Aquifer Q<sub>3</sub> über wenig durchlässige Schichten ist, wie zuvor beschrieben, sogar wahrscheinlich.

Mit den Grundwassermessstellen GWM 424 und GWM 422 wurden in der bindigen Moräne durchlässige Kiesschichten erbohrt, deren Druckwasserspiegel ca. 2 m über dem Grundwasserspiegel des Aquifer Q<sub>3</sub> liegen. Es ist möglich, dass in diesem Bereich noch der Aquifer Q<sub>3</sub> durch den Aquifer Q<sub>2</sub> unterlagert wird oder aber der höhere Druckwasserspiegel infolge einer Verbindung zum zuvor genannten artesisch gespannten Druckwasserspiegel besteht. Diese erhöhten Grundwasserstände können dementsprechend nur in der Moräne auftreten.

11485/341b

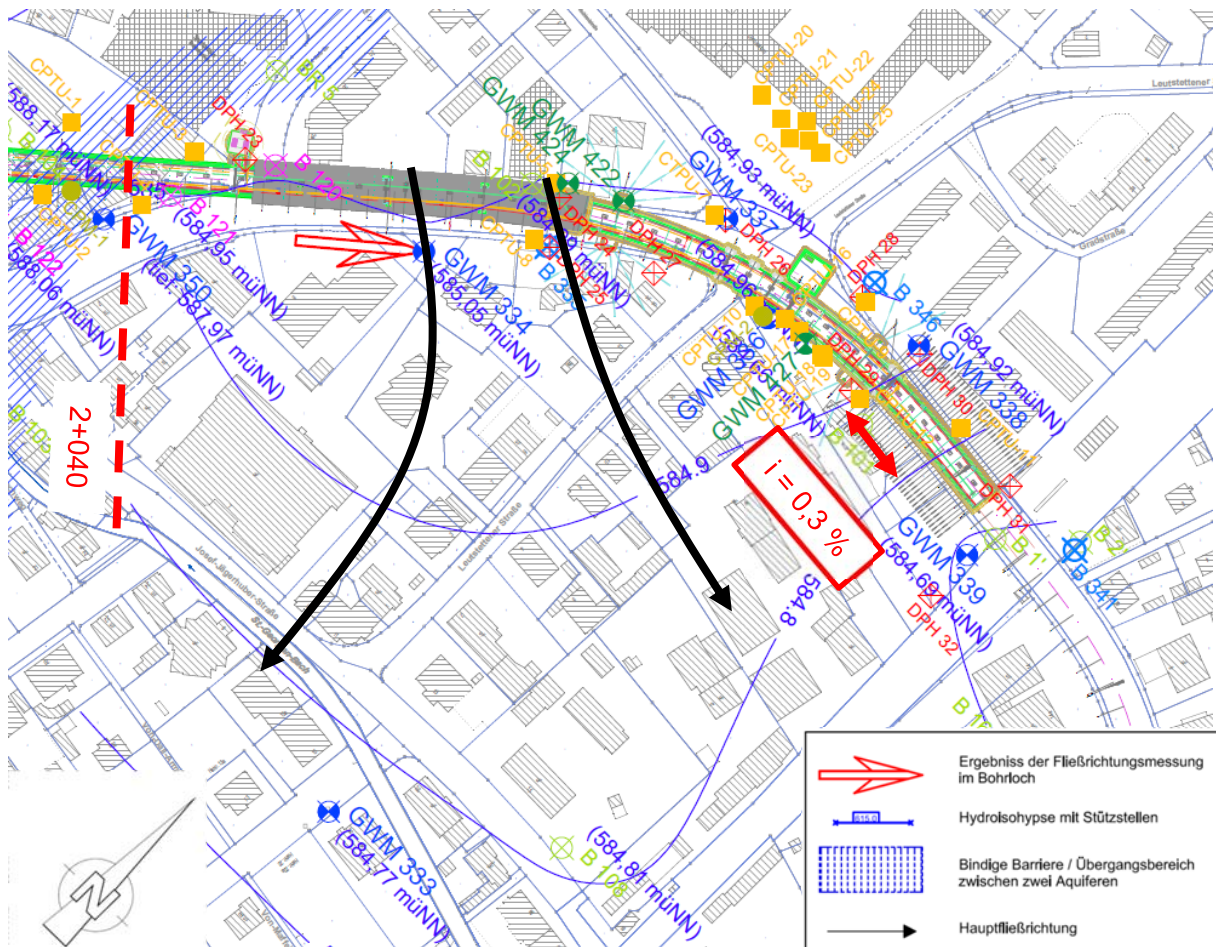
B2 – Tunnel Starnberg  
Hydrogeologischer Bericht - Teil 1Zentrum  
Geotechnik

Abb. 10: Isohyphen und Ergebnisse der Fließrichtungsmessung des Aquifers Q<sub>3</sub> (GWA<sub>3</sub>)

## 5 Ergänzende Hinweise

Wie bereits in Abschnitt 4.3.1 erläutert, wird nochmals darauf hingewiesen, dass das beschriebene Grundwassermodell aufgrund der Komplexität der Verhältnisse im Detail Abweichungen von der Realität aufweisen kann. Auf die Folgerungen hinsichtlich der anzusetzenden Grundwasserstände und der erforderlichen Grundwasserumleitungsmaßnahmen (Düker) wird in Teil 2 dieses Berichts eingegangen.

*R. Cudmani*

Prof. Dr.-Ing. R. Cudmani

11485/341b      B2 – Tunnel Starnberg  
Hydrogeologischer Bericht - Teil 1

**Zentrum  
Geotechnik**

### Anlagenübersicht

Anlage	1			Lageplan mit Grundwasserisohypsen
	2	Blatt	1-6	Geotechnische Längsschnitte
	3	Blatt	1-9	Geotechnische Querschnitte
	4			Schematischer geologischer Längsschnitt
	5	Blatt	1-302	Pump- und Einschwingversuche 3. Erkundungsprogramm
	6	Blatt	1-31	Pump- und Einschwingversuche 4. Erkundungsprogramm
	7	Blatt	1-29	Pumpversuche 5. Erkundungsprogramm