

Verlängerung U4 – Bockenheimer Warte
nach Ginnheim (Stadtbahnstrecke D,
Teilabschnitt 2) in Frankfurt am Main

Hydrogeologische Vorerkundung

12. Juli 2024

AUFTRAGGEBER:

**Stadtbahn Entwicklung und
Verkehrsinfrastrukturprojekte
Frankfurt GmbH**

Mainzer Landstraße 191
60 327 Frankfurt am Main
M: 0171 4853412
T: +49 160 97878095
F: +49 521 2997-253
info@bgu-geoservice.de
www.bgu-geoservice.de



AUFTRAGNEHMER:

Büro für Geohydrologie und Umweltinformationssysteme
Dr. Brehm & Grünz GbR | Diplom Geologen
Dr. Dirk R. Brehm | Diplom Geologe BDG

Von der Industrie- und Handelskammer Ostwestfalen zu Bielefeld
öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für
Grundwasser und Geothermie
Thomas Grünz | Diplom Geologe

Technologiezentrum Bielefeld
Meisenstraße 96, 33 607 Bielefeld

M: +49 171 4853412 | +49 160 97878095
T: +49 521 2997-250 | F: +49 521 2997-253
info@bgu-geoservice.de | www.bgu-geoservice.de

Inhaltsverzeichnis

1 Vorgang und Aufgabenstellung	12
2 Bewertungsgrundlagen	15
2.1 Bestandsunterlagen	15
2.2 Randbedingungen der Trassenvariante 1a	18
2.3 Randbedingungen der Trassenvariante 1d	19
2.4 Randbedingungen der Trassenvariante 3i.....	20
3 Erkundungsmaßnahmen	22
4 Untersuchungsgebiet	27
4.1 Lage und Morphologie des Untersuchungsgebietes	27
4.2 Vorfluter.....	27
4.3 Historische Entwicklung	28
5 Geologische und hydrogeologische Situation.....	31
5.1 Geologischer Überblick	31
5.2 Hydrogeologischer Überblick	34
5.3 Aquiferzuordnung der Grundwassermessstellen.....	37
5.4 Untergrundverhältnisse im Trassenbereich	38
5.4.1 Variante 1a	38
5.4.2 Variante 1d	39
5.4.3 Variante 3i.....	39
5.5 Niederschlagsentwicklung.....	40
5.6 Grundwasserstandsentwicklung.....	41
5.7 Grundwassergleichenpläne und Flurabstände	43
5.7.1 Quartär und Pliozän – GWL1.....	43
5.7.2 Basalt- und Staden-Formation.....	44
5.7.3 Niederrad- und Frankfurt-Formation	45
5.8 Bemessung der hydraulischen Kenndaten.....	46
5.8.1 Auswertung der Pumptests.....	46
5.8.2 Hydraulische Kenndaten.....	48
5.8.3 Verbreitung und Tiefenlagen der tertiären Schichten im Untersuchungsgebiet.....	49
5.9 Grundlagen des Grundwassereinflusses auf Grünflächen und Bäume	49
5.10 Bodenverhältnisse und maßgebliche Flurabstände der Grünflächen	52
5.11 Grundwasserneubildung	53

6 Hydrochemische Situation	55
6.1 Altablagerungen, Altstandorte und Grundwasserverunreinigungen	55
6.2 Ergebnisse der hydrochemischen Erkundung.....	56
7 Grundwassermodell.....	58
7.1 Abgrenzung des Modellgebietes und Randbedingungen	58
7.1.1 Modellgebiet und Randbedingungen	58
7.1.2 Formationsparameter	59
7.1.3 Vorfluter und Gewässer	59
7.1.4 Kanalnetz.....	59
7.1.5 Bestandstunnel.....	60
7.1.6 Weitere Randbedingungen	60
7.1.7 Modellnetz	60
7.2 Durchführung und Ergebnis der Kalibrierung	62
7.2.1 Darstellung der Kalibrierergebnisse – Quartär.....	63
7.2.2 Darstellung der Kalibrierergebnisse – Tiefenlage 110 mNHN	64
7.2.3 Darstellung der Kalibrierergebnisse – Tiefenlage 95 - 100 mNHN	64
7.2.4 Darstellung der Kalibrierergebnisse – Tiefenlage 80 mNHN	65
8 Simulation der hydraulischen Auswirkungen	66
8.1 Übersicht der Simulationsläufe und der betrachteten Differenzen.....	66
8.2 Nullzustand, Modelllauf A00	67
8.3 Bauzeitiger und permanenter hydraulischer Eingriff.....	67
8.4 Randbedingungen der Baumaßnahmen und Bauwerke.....	68
8.4.1 Bauzeitige hydraulische Eingriffe.....	68
8.4.2 Permanente hydraulische Eingriffe	69
8.5 Prognose der Grundwasserstandsänderungen Variante 1a.....	70
8.5.1 Modelllauf A01 – Situation in der Bauzeit	70
8.5.2 Modelllauf A02 – Permanente Situation nach Fertigstellung	71
8.6 Prognose der Grundwasserstandsänderungen Variante 1d.....	72
8.6.1 Modelllauf A03 – Situation in der Bauzeit	72
8.6.2 Modelllauf A04 – Permanente Situation nach Fertigstellung	72
8.7 Prognose der Grundwasserstandsänderungen Variante 3i.....	73
8.7.1 Modelllauf A05 – Situation in der Bauzeit	73
8.7.2 Modelllauf A06 – Permanente Situation nach Fertigstellung	73
8.8 Permanente Einwirkung von Wärme auf den Untergrund	74

9	Potenzielle Auswirkungen der bauzeitigen Grundwasserentnahmen und permanenten Wirkungen der Bauwerke	75
9.1	Auswirkungen auf das Schutzgut Grundwasser	75
9.2	Bemessung der voraussichtlichen Grundwasserentnahmen.....	76
9.3	Hydrochemische Auswirkungen auf das Grundwasser durch Baustoffe	77
9.4	Bauzeitige Auswirkungen auf oberflächennahe Grundwasservorkommen.....	78
9.5	Auswirkungen auf Oberflächengewässer	78
9.6	Auswirkungen auf Biotope und Naturschutzgebiete	79
9.7	Auswirkungen auf Gehölze und Baumbestände	79
9.8	Auswirkungen auf externe Grundwassernutzungen	81
9.9	Auswirkungen auf Gebäude	83
9.10	Auswirkungen auf die Grundwassersituation von Altlasten	84
9.11	Verbleib und Behandlung des gefördert Grundwassers	85
10	Vergleichende Bewertung der Varianten (Hydrogeologie).....	86
11	Quellenverzeichnis	92

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Gesamtübersicht der Streckenvarianten der Grundstrecke D2 – Bockenheimer Warte – Ginnheim (Planungsstand 2021)	13
Abb. 2: Übersicht der zu bewertenden Trassenvarianten 1a, 1d und 3i. Fehler! Textmarke nicht definiert.	
Abb. 3: Flurkartenausschnitt Mitte 19. Jahrhundert (aus /3/), Leonhardsbrunnen im Nordwestteil	29
Abb. 4: Monatliche Niederschläge Station Frankfurt-Westend 2014 - 2023	41
Abb. 5: Abhängigkeit des landwirtschaftlichen Ertrags vom Grundwasserflurabstand (aus /11/).....	50
Abb. 6: Betriebsbrunnen im Untersuchungsgebiet	82

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Geologische und hydrogeologische Einheiten des Untersuchungsgebietes.....	35
Tab. 2: Geologische Zuordnung der 2022 errichteten GW-Messstellen	37
Tab. 3: Ergebnisse des Klarpumpens an GW-Messstellen, k_f -Werte in m/s	47
Tab. 4: Pumpversuche 2022, Ermittlung von k_f -Werten in m/s	47
Tab. 5: Romberg (2001): Ermittlung von k_f -Werten in m/s, Grundstrecke D II	48
Tab. 6: Mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte im Untersuchungsgebiet (Modellansatz).....	49
Tab. 7: Übersicht der Modellschichten und Knotenlagen.....	61
Tab. 8: Soll-Ist-Vergleich Niederrad-Formation (95 – 100 mNHN) an Bauwerken	65
Tab. 9: Übersicht der Modellläufe	66
Tab. 10: Bemessung der Gesamtentnahmen der Trassenvarianten	76
Tab. 11: Zusammenfassende Bewertung der Trassenvarianten	86

Anhangverzeichnis

Anhang 1 Pläne

- Blatt 1* *Übersichtskarte Untersuchungsgebiet – Maßstab 1: 25.000*
- Blatt 2* *Übersichtskarte Untersuchungsgebiet mit bestehenden Tunneln und versuche – Maßstab 1: 6.000*
- Blatt 3* *Grundwassermessstellen im Trassenumfeld (Gesamtbestand) – Maßstab 1: 6.000*
- Blatt 4* *Monitoringprogramm Grundwasserstand – Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 5* *Kanalnetz im Modellgebiet – Maßstab 1: 15.000*
- Blatt 6* *Geologische Übersicht: Tertiär (Quartär abgedeckt) – Maßstab 1: 15.000*
- Blatt 7* *Geologischer Schnitt 1 (Nord – Süd, Var. 1a) - Maßstab 1: 300 / 1: 4.860*
- Blatt 8* *Geologischer Schnitt 2 (West - Ost, Var. 3i) - Maßstab 1: 300 / 1: 3.600*
- Blatt 9* *Geologischer Schnitt 3 (Nord – Süd, Var. 3i) - Maßstab 1: 300 / 1: 4.120*
- Blatt 10* *Basis der quartären Deckschichten – Maßstab 1: 6.000*
- Blatt 11* *Verbreitung und Mächtigkeit des Pliozäns – Maßstab 1: 15.000*
- Blatt 12* *Verbreitung und Mächtigkeit der Untermain-Basalt-Formation – Maßstab 1: 10.000*
- Blatt 13* *Verbreitung und Mächtigkeit der Staden-Formation (Congerien-Schichten) – Maßstab 1: 10.000*
- Blatt 14* *Grundwassergleichenplan Quartär/Pliozän November 2023 – Maßstab 1: 10.000*
- Blatt 15* *Grundwassererfüllte Mächtigkeit Quartär/Pliozän November 2023 – Maßstab 1: 10.000*
- Blatt 16* *Gesamtmächtigkeit der quartären Deckschichten – Maßstab 1: 10.000*
- Blatt 17* *Grundwassergleichenplan Basalt-/Staden- Formation (Congerien-Schichten) November 2023 – Maßstab 1: 10.000*
- Blatt 18* *Grundwassererfüllte Mächtigkeit Basalt-/Staden-Formation (Congerien-Schichten) November 2023 – Maßstab 1: 10.000*
- Blatt 19* *Grundwasserpotenziale Niederrad-/Frankfurt-Formation November 2023 – Maßstab 1: 10.000*

- Blatt 20 Grundwasserpotenziale Niederrad-/Frankfurt-Formation November 2023 (zentral) – Maßstab 1: 6.000
- Blatt 21 Grundwasserflurabstand Quartär/Pliozän November 2023 – Maßstab 1: 10.000
- Blatt 22 Grundwasserflurabstand Basalt-/Staden- Formation November 2023 – Maßstab 1: 6.000
- Blatt 23 Grundwasserflurabstand der Potenziale in der Niederrad-/Frankfurt-Formation November 2023 – Maßstab 1: 6.000
- Blatt 24 Bodenübersichtskarte 1:50.000: Bodenhauptgruppen – Maßstab 1: 8.000
- Blatt 25 Bodenübersichtskarte 1:50.000: Nutzbare Feldkapazität – Maßstab 1: 7.500
- Blatt 26 Bodenübersichtskarte 1:50.000: Standorttypisierung Biotopentwicklung – Maßstab 1: 8.000
- Blatt 27 Mittlere Grundwasserneubildungsrate (1981 – 2010) – Maßstab 1: 17.000
- Blatt 28 Baumkataster August 2023 (Ausschnitt) – Maßstab 1: 3.500
- Blatt 29 Vegetationsrelevante Flurabstände November 2023 – Maßstab 1: 6.000
- Blatt 30 Auszug Altlastenkataster – Maßstab 1: 10.000
- Blatt 31 Schichtverteilung der Modellebenen, Tiefenlage 110 mNHN – Maßstab 1: 17.000
- Blatt 32 Schichtverteilung der Modellebenen, Tiefenlage 105 mNHN – Maßstab 1: 17.000
- Blatt 33 Schichtverteilung der Modellebenen, Tiefenlage 100 mNHN – Maßstab 1: 17.000
- Blatt 34 Schichtverteilung der Modellebenen, Tiefenlage 95 mNHN – Maßstab 1: 17.000
- Blatt 35 Schichtverteilung der Modellebenen, Tiefenlage 90 mNHN – Maßstab 1: 17.000
- Blatt 36 Schichtverteilung der Modellebenen, Tiefenlage 85 mNHN – Maßstab 1: 17.000
- Blatt 37 Schichtverteilung der Modellebenen, Tiefenlage 80 mNHN – Maßstab 1: 17.000
- Blatt 38 Schichtverteilung der Modellebenen, Tiefenlage 75 mNHN – Maßstab 1: 17.000
- Blatt 39 Grundwassermodell: Übersicht Randbedingungen und Modellnetz – Maßstab 1: 17.000

- Blatt 40 Grundwassermodell: Ausschnitt Modellnetz – Maßstab 1: 6.000
- Blatt 41 Modelllauf: A00 – Isolinien Kalibriersituation (Ausgangszustand) und Soll-Ist-Vergleich Quartär – Maßstab 1: 15.000
- Blatt 42 Modelllauf: A00 – Isolinien Kalibriersituation (Ausgangszustand) und Soll-Ist-Vergleich Quartär – Maßstab 1: 7.500
- Blatt 43 Modelllauf: A00 – Isolinien Kalibriersituation (Ausgangszustand) und Soll-Ist-Vergleich Tiefenlage 110 mNHN – Maßstab 1: 7.500
- Blatt 44 Modelllauf: A00 – Isolinien Kalibriersituation (Ausgangszustand) und Soll-Ist-Vergleich Tiefenlage 95-100 mNHN – Maßstab 1: 15.000
- Blatt 45 Modelllauf: A00 – Isolinien Kalibriersituation (Ausgangszustand) und Soll-Ist-Vergleich Tiefenlage 95-100 mNHN – Maßstab 1: 7.500
- Blatt 46 Modelllauf: A00 – Isolinien Kalibriersituation (Ausgangszustand) und Soll-Ist-Vergleich Tiefenlage 80 mNHN – Maßstab 1: 15.000
- Blatt 47 Modelllauf: A00 – Isolinien Kalibriersituation (Ausgangszustand) und Soll-Ist-Vergleich Tiefenlage 80 mNHN – Maßstab 1: 7.500
- Blatt 48 Absenkbeträge der Entspannungsbrunnen, Variante 1a – Maßstab 1: 6.000
- Blatt 49 Absenkbeträge der Entspannungsbrunnen, Variante 1d – Maßstab 1: 6.000
- Blatt 50 Absenkbeträge der Entspannungsbrunnen, Variante 3i – Maßstab 1: 6.000
- Blatt 51 Modelllauf A01: GW-Isolinien Variante 1a in der Bauzeit, Quartär in mNHN – Maßstab 1: 6.000
- Blatt 52 Modelllauf A01: Differenz zu A00, Variante 1a in der Bauzeit, Quartär Maßstab 1: 7.500
- Blatt 53 Modelllauf A01: GW-Isolinien Variante 1a in der Bauzeit, Tiefenlage 100 mNHN – Maßstab 1: 7.500
- Blatt 54 Modelllauf A01: Differenz zu A00, Variante 1a in der Bauzeit, Tiefenlage 100 mNHN - Maßstab 1: 7.500
- Blatt 55 Modelllauf A01: GW-Isolinien Variante 1a in der Bauzeit, Tiefenlage 85 mNHN – Maßstab 1: 10.000
- Blatt 56 Modelllauf A01: Differenz zu A00, Variante 1a in der Bauzeit, Tiefenlage 85 mNHN - Maßstab 1: 10.000
- Blatt 57 Modelllauf A02: GW-Isolinien Variante 1a permanent, Quartär in mNHN – Maßstab 1: 7.500

- Blatt 58 *Modelllauf A02: Differenz zu A00, Variante 1a permanent, Quartär - Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 59 *Modelllauf A02: Differenz zu A00, Variante 1a permanent, Tiefenlage 100 mNHN - Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 60 *Modelllauf A02: Differenz zu A00, Variante 1a permanent, Tiefenlage 85 mNHN - Maßstab 1: 10.000*
- Blatt 61 *Modelllauf A03: GW-Isolinien Variante 1d in der Bauzeit, Quartär in mNHN – Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 62 *Modelllauf A03: Differenz zu A00, Variante 1d in der Bauzeit, Quartär Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 63 *Modelllauf A03: GW-Isolinien Variante 1d in der Bauzeit, Tiefenlage 100 mNHN – Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 64 *Modelllauf A03: Differenz zu A00, Variante 1d in der Bauzeit, Tiefenlage 100 mNHN - Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 65 *Modelllauf A03: GW-Isolinien Variante 1d in der Bauzeit, Tiefenlage 85 mNHN – Maßstab 1: 10.000*
- Blatt 66 *Modelllauf A03: Differenz zu A00, Variante 1d in der Bauzeit, Tiefenlage 85 mNHN - Maßstab 1: 10.000*
- Blatt 67 *Modelllauf A04: Differenz zu A00, Variante 1d permanent, Quartär - Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 68 *Modelllauf A04: Differenz zu A00, Variante 1d permanent, Tiefenlage 100 mNHN - Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 69 *Modelllauf A04: Differenz zu A00, Variante 1d permanent, Tiefenlage 85 mNHN - Maßstab 1: 10.000*
- Blatt 70 *Modelllauf A05: GW-Isolinien Variante 3i in der Bauzeit, Quartär in mNHN – Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 71 *Modelllauf A05: Differenz zu A00, Variante 3i in der Bauzeit, Quartär Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 72 *Modelllauf A05: Differenz zu A00, Variante 3i in der Bauzeit, Tiefenlage 115 mNHN - Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 73 *Modelllauf A05: GW-Isolinien Variante 3i in der Bauzeit, Tiefenlage 100 mNHN – Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 74 *Modelllauf A05: Differenz zu A00, Variante 3i in der Bauzeit, Tiefenlage 100 mNHN - Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 75 *Modelllauf A05: GW-Isolinien Variante 3i in der Bauzeit, Tiefenlage 85 mNHN – Maßstab 1: 10.000*

- Blatt 76* *Modelllauf A05: Differenz zu A00, Variante 3i in der Bauzeit, Tiefenlage 85 mNHN - Maßstab 1: 10.000*
- Blatt 77* *Modelllauf A06: Differenz zu A00, Variante 3i permanent, Quartär - Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 78* *Modelllauf A06: Differenz zu A00, Variante 3i permanent, Tiefenlage 115 mNHN - Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 79* *Modelllauf A06: Differenz zu A00, Variante 3i permanent, Tiefenlage 100 mNHN - Maßstab 1: 7.500*
- Blatt 80* *Modelllauf A06: Differenz zu A00, Variante 3i permanent, Tiefenlage 85 mNHN - Maßstab 1: 10.000*
-
- Anhang 2** **Übersichtslagepläne und Gradienten der Varianten, Planungsstand 12.03.2024 (VGF / Schüßler Plan)**
- Anhang 3** **Stammdaten der Grundwassermessstellen im Modellgebiet**
- Anhang 4** **Schichtprofile und Ausbauezeichnungen der neu errichteten GW-Messstellen (BGU)**
- Anhang 5** **Grundwasserganglinien**
- Anhang 6** **Hydrochemische Untersuchungen, Tabelle**
- Anhang 7** **Auswertung der Pumpversuche an GW-Messstellen, Geotechnik Lehr**
- Anhang 8** **Modellbewertung gemäß Fachsektion Hydrogeologie e.V.**
- Anhang 9** **Schichtenverzeichnisse, Ausbauezeichnungen und Fotodokumentation Kernkisten, Terrasond GmbH**
- Anhang 10** **Klarpumpprotokolle, Terrasond GmbH, mit Ergebnistabelle**
- Anhang 11** **Probenahmeprotokolle (Dr. Hug Geoconsult) und Laborberichte (Chemlab GmbH)**
- Anhang 12** **Dokumentation Grundwassermessnetz (Altbestand)**

Verzeichnis der Abkürzungen

BAB	Bundesautobahn
BBodSchG	Bundes-Bodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundes-Bodenschutzverordnung
BG	Baugrube
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BGU	Büro für Geohydrologie und Umweltinformationssysteme Dr. Brehm & Grünz GbR
DGM1	digitales Geländemodell, Rasterauflösung 1 Meter
dm	Dezimeter
DN	Diameter nominal, Internationale Bezeichnung für Nennweite (NW) / Normdurchmesser
DVWK	Deutschen Verbands für Wasserwirtschaft und Kulturbau
GIS	Geografisches Informationssystem
GOK	Geländeoberkante
GW	Grundwasser
GWL	Grundwasserleiter
GWM	Grundwassermessstelle
GWS-VwV	Verwaltungsvorschrift zur Erfassung, Bewertung und Sanierung von Grundwasserverunreinigungen vom 18. Juli 2021
H ₂ S	Schwefelwasserstoff
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
k _f -Wert	Durchlässigkeitsbeiwert (m/s)
kg	Kilogramm
L	Liter
LCKW	leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe
l. fr.	leicht freisetzbar
m	Meter
m ³ /d	Kubikmeter pro Tag
mg	Milligramm
mm	Millimeter
mNHN	Meter über Normalhöhennull des Deutschen Haupthöhennetzes (DHHN2016)
Mod	Modellauf des Grundwasserströmungsmodells mit individuellen Randbedingungen
OK	Oberkante
pH	negativer dekadischer Logarithmus der Aktivität der Oxoniumionen
RPDA	Regierungspräsidium Darmstadt
SBEV	Stadtbahn Entwicklung und Verkehrsinfrastrukturprojekte Frankfurt GmbH
SEF	Stadtentwässerung Frankfurt a. M.
T	Transmissivität
TBM	Tunnelbohrmaschine / -vortriebsmaschine
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
Tunnel oB	in offener Bauweise errichteter Tunnel. Hier wird zunächst eine offene Baugrube errichtet und die Tunnelabdeckung nachträglich aufgebracht
µg	Mikrogramm
u. GOK	unter Geländeoberkante
UK	(Schicht-)Unterkante
Var.	Trassenvariante
VGf	Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
Wst.	(Grund-)Wasserstand
WSG	Wasserschutzgebiet
z.T.	zum Teil

1 Vorgang und Aufgabenstellung

Die Stadtbahn Entwicklung und Verkehrsinfrastrukturprojekte Frankfurt GmbH (SBEV) plant im Auftrag der Stadtwerke Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main mbH (VGF) – und damit im Ergebnis für die Stadt Frankfurt am Main – den Bau einer Stadtbahnverbindung zwischen den Stationen Bockenheimer Warte und Ginnheim. Im Rahmen einer Variantenuntersuchung wurden verschiedene Trassenverläufe der Grundstrecke D2 untersucht und bewertet, Abb. 1. Drei Untervarianten (1a, 1d, 3i) werden weiterverfolgt und tiefer untersucht¹.

Folgende Varianten sind gemäß dem aktuellen Sachstand in der engeren Auswahl:

- Variante 1a: Die Strecke führt von dem unterirdischen Anschlussbauwerk an der Bockenheimer Warte über die Zeppelinallee und Miquelallee zunächst westlich um den Palmengarten herum. An der Westseite des Botanischen Gartens ist ein Rampenbauwerk erforderlich. Eine Station „Botanischer Garten“ ist oberirdisch an dessen Westseite vorgesehen, der Knoten Miquelallee wird partiell umgestaltet. Die BAB 66 wird unterquert und der weitere Verlauf verbleibt an der Ostseite der L 3004. Der Ausbau erfolgt im südlichen Abschnitt bis zum Botanischen Garten als in offener Bauweise errichteter Tunnel (Tunnel oB).
- Variante 1d: Abweichend von der Variante 1a wird der Abschnitt zwischen Botanischem Garten und der Bockenheimer Warte in geschlossener Bauweise mit einer Tunnelbohrmaschine hergestellt. Dazu wird an der Westseite des Botanischen Gartens ein Rampenbauwerk erforderlich. Der Tunnel unterquert mit zwei Röhren den nördlichen Palmengarten.
- Variante 3i: Ein maschinell aufgefahrener Tunnel führt mit zwei Röhren von der Bockenheimer Warte über eine weitläufige Rechtskurve unter dem nördlichen Palmengarten sowie den südlichen Grüneburgpark hindurch nach Osten zum Campus Westend der Goethe-Universität. Nordwestlich des Theodor-W.-Adorno-Platzes ist eine unterirdische Station „Campus Westend“ vorgesehen. Der Tunnel führt von dort weiter nach Norden und unterquert im Bereich der Philipp-Holzmann-Schule die Miquelallee. Westlich der Miquelanlage entsteht ein Rampenbauwerk.

¹ <https://www.vgf-ffm.de/de/aktuelles/bauvorhaben/verlaengerungu4>, abgerufen 27.06.2024

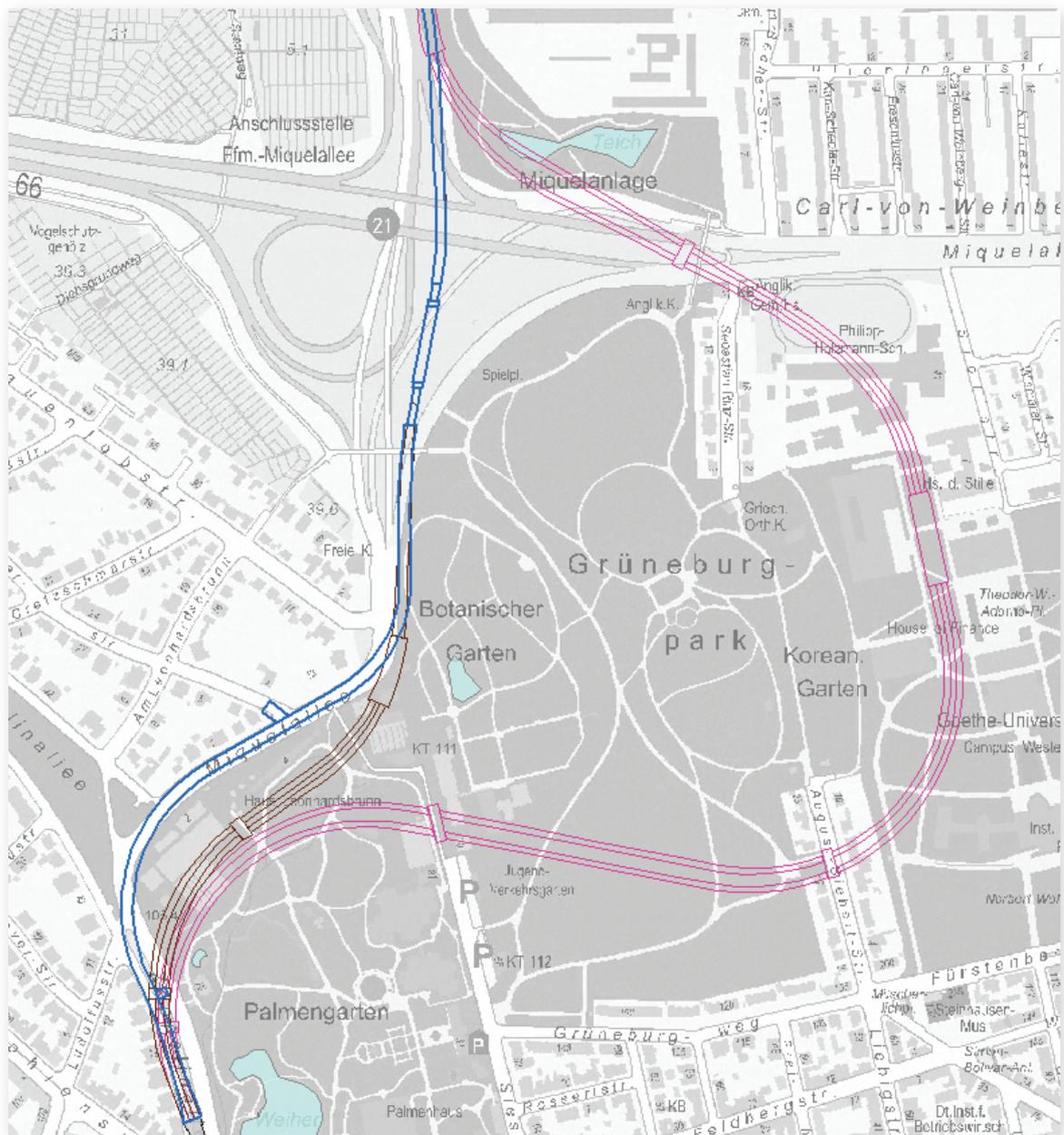


Abb. 1: Übersicht der zu bewertenden Trassenvarianten 1a, 1d und 3i

Westlich des Areals der Deutschen Bundesbank resultiert in den Varianten ein übereinstimmender, oberirdischer Verlauf zur geplanten Station „Bundesbank“, welche in Hochlage die Wilhelm-Epstein-Straße überspannt. Der Bau der an der Ostseite der L 3004 gelegenen Station „Platensiedlung“ erfolgt oberirdisch. Der Anschluss an die Bestandsstrecke erfolgt nördlich der bisherigen Endhaltestelle „Ginnheim“, welche in den nördlichen Teil der L 3004 verlegt wird.

Frankfurt mbH (VGF) mit einer hydrogeologischen Bewertung der beschriebenen Trassen beauftragt. Seit Herbst 2023 erfolgt die Projektplanung und -koordination durch die Stadtbahn Entwicklung und Verkehrsinfrastrukturprojekte Frankfurt GmbH (SBEV).

Folgende hydrogeologischen Fragestellungen sind für die Variantenbetrachtung relevant:

- Bewertung der geologischen und hydrogeologischen Gegebenheiten der Trassen: hydraulische Eigenschaften der im Trassenbereich anstehenden Gesteine (Kluft- und Porengrundwasserleiter). Die geologischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet werden durch Verwerfungen geprägt, welche mit einem Höhenversatz der Schichten einhergehen können.
- Erkundung der Grundwasserverhältnisse in den durch die Bauwerke gequerten geologischen Formationen. Lokal war mit dem Auftreten mehrerer Grundwasserstockwerke zu rechnen, deren Grundwasserpotenziale (Druckspiegel und freie Grundwasseroberfläche) sich voneinander unterscheiden können. Die Grundwasserflurabstände des Untersuchungsgebietes sind im Hinblick auf die durchwurzelte Bodenschicht zu bewerten.
- Bewertung der von den geplanten Bauwerken und den hydraulischen Veränderungen ausgehenden Risiken für den Baumbestand und die betrachteten Grünflächen. Hierbei ist zwischen den bauzeitigen und permanenten Auswirkungen zu unterscheiden. Generell kann es im Zuge von Wasserhaltungsmaßnahmen zu einer Grundwasserabsenkung in den oberflächennahen Schichten kommen. Permanente Auswirkungen können durch die Barrierewirkung der Bauwerke entstehen.
- Ebenso sind Auswirkungen der von den Tunneln ausgehenden Wärme auf den Bodenwasserhaushalt zu beurteilen.
- Bewertung von Risiken für andere Grundwassernutzungen wie Grundwassergewinnungsanlagen, z.B. den Betriebsbrunnen des Palmengartens und der Universität, sowie ggf. Anlagen zur Nutzung geothermischer Energie.

2 Bewertungsgrundlagen

Nachfolgend werden die Bewertungsgrundlagen vorgestellt und die Ergebnisse der weiteren Untersuchungen dargestellt, welche für die Erreichung der vorgenannten Schritte und Ziele erforderlich werden.

2.1 Bestandsunterlagen

Als Grundlage für die Bewertung dient ein großräumiges hydrogeologisches Strukturmodell, welches zu einem Grundwasserströmungsmodell weiterentwickelt worden ist. Für die Untersuchung wurden durch den Auftraggeber, die ausführenden Projektplaner sowie die Fachbehörden folgende Grundlagen zur Verfügung gestellt:

- Entwürfe der zu untersuchenden Trassen in Form von Bauzeichnungen (Grundrisse, Schnitte mit Gradienten). Diese wurden durch das Büro Schüßler-Plan Ingenieurgesellschaft mbH, Büro Frankfurt am Main übermittelt. Aus den Unterlagen gehen Abmessungen und Tiefenlagen (Gradienten) der geplanten Bauwerke zum Planungsstand 03/2024 hervor. Die Lage der zu bewertenden Trassenvarianten ist in den Plänen in Blatt 61 dargestellt.
- Auszug des Bohrkatasters des Hessischen Landesamtes für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG), Wiesbaden. Seitens des HLNUG liegen die Stammdaten von etwa 800 Bohrungen des Modellgebietes vor.
- Schichtenverzeichnisse zusätzlicher Aufschlussbohrungen und Grundwassermessstellen. Dem unterzeichnenden Büro liegen für das Modellgebiet mittlerweile über rd. 520 Schichtprofile von Bohrungen vor. Annähernd 300 Grundwassermessstellen bilden den aktuellen Bestand für eine hydrogeologische Bewertung des Gebietes. Neben den älteren Vorerkundungen der U-Bahn-Trassen der Strecken A, C und D liegen umfangreiche geologische Voruntersuchungen aus dem Bau der BAB 66 sowie der Anschlussstelle Miquelallee vor. Hinzu kommen geotechnische Erkundungsmaßnahmen einiger Bauprojekte. Blatt 12 vermittelt einen Überblick über den Bohrungsbestand des Gebietes.
- Angaben zur Geologie und hydrogeologischen Situation der Erläuterungen zu den geologischen Karten von Hessen 1:25.000 Blatt 5817 Frankfurt am Main (West), 5818 Frankfurt am Main (Ost), /2/, /3/.
- Die Untersuchungen zur ingenieurgeologischen Vorerkundung der Grundstecke C sind 1978 durch das Ingenieurbüro Breth & Romberg erfolgt, /1/. Für die damals geplante Grundstecke D2 wurde in 2001 seitens des Büros Prof. Romberg ein geotechnisches Gutachten erstellt, welches auch zahlreiche Bohrungen und Angaben zu Grundwassermessstellen beinhaltet. Die damals geplante, vorwiegend unterirdische Trasse führte

von der Bockenheimer Warte über die Franz-Rücker-Allee nach Norden, /3/. Die Erkenntnisse aus den damaligen Erkundungsmaßnahmen wurden in die Modellerstellung integriert.

- Die Stadtentwässerung Frankfurt a. M. (SEF) hat Bestandspläne des Kanalnetzes im Untersuchungsgebiet übermittelt. Ergänzend wurde der Kanalbestand des Palmengartens sowie des Campus-Geländes durch den Betreiber beigesteuert. Die größeren Kanäle und Hauptsammler wurden aufgrund ihres potenziellen Einflusses auf die Grundwasserverhältnisse mit Sohlhöhen in das Modell integriert.
- Angaben zu Altlasten und Grundwasserverunreinigungen wurden durch das Regierungspräsidium Darmstadt, Abteilung Umwelt Frankfurt (RPDA) zur Verfügung gestellt. Einen Überblick der Altstandorte, Verdachtsflächen und bereits sanierten Standorte vermittelt Blatt 30 in Anhang 1.
- Die für die Modellkalibrierung erforderliche mittlere Grundwasserneubildungsrate wurde für den Zeitraum 1981 - 2020 durch das HLNUG übermittelt.
- Angaben zu den bestehenden U-Bahn-Tunneln sowie den Stationsbauwerken wurden aus Archivbeständen der VGF zusammengestellt. Grundlage für die Bemessung ist die in den Unterlagen zur damaligen Planfeststellung dokumentierte Bauwerksgeometrie. Die Lage der Bauwerke geht in der Übersicht aus Blatt 2 in Anhang 1 hervor. Die Tunnel bewirken in der Regel eine Verringerung der Transmissivität der betroffenen Schichten und können damit Einfluss auf das lokale Grundwasserfließregime ausüben. Für die bestehenden Stationsbauwerke wurde eine Ausführung bis zur Geländeoberfläche angenommen, während bei den Tunnelbauwerken meist eine Überströmung möglich erscheint. Aus der Verengung der Aquifere erwächst unter bestimmten Voraussetzungen ein Grundwasseraufstau im Zustrom sowie eine Grundwasserabsenkung im Abstrom. Für die Bestandsgleise an der Stirnwand am Nordende der Bockenheimer Warte wird eine Höhenlage (Gradiente) von 85,70 mNHN angegeben, was einer Tiefe von rd. 16,8 m unter Geländeoberkante (GOK) entspricht. Für die Bauphase der Bestandstunnel sind teilweise auch die Fördermengen überliefert. Diese können wertvolle Hinweise auf die Transmissivität der durchörterten Schichtenfolge liefern.
- Im weiteren Umfeld der Baumaßnahme U5 Europaviertel mit der geplanten Station Güterplatz erfolgt bereits seit einigen Jahren ein hydrogeologisches Monitoring. Dieses umfasste auch die Einrichtung eines Grundwasserströmungsmodells, welches den hier betrachteten Bereich teilweise abdeckt, /7/, /9/, /10/. Das für die Bewertung herangezogene Grundwassermessnetz erstreckt sich im Norden bis etwa zur Miquelallee, sodass örtlich auch Erkenntnisse über eine mehrjährige Wasserstandsentwicklung vorliegen, /11/. Die gewonnenen Daten wurden in den vorliegenden Bericht integriert.

- Seitens der Ingenieursozietät Prof. Dr.-Ing. Katzenbach GmbH, Darmstadt, wurden Schichtprofile und Ausbauzeichnungen sowie Grundwasserstandsdaten von Messstellen des Areals der Deutschen Bundesbank zur Verfügung gestellt. Die Untersuchungen umfassen sechs Doppelmessstellen (BK 1/17 Q+T – BK 6/17 Q+T). Die Wasserstandsdaten umfassen den Zeitraum 06/2020 – 12/2023 ff.
- Durch den Palmengarten der Stadt Frankfurt wird ein Schachtbrunnen zur Bewässerung der Grünflächen und zur Stützung der Teichwasserstände betrieben. Durch den Betreiber wurden die wasserwirtschaftlichen Jahresberichte mit Wasserstandsdaten und Fördermengen zur Verfügung gestellt.
- Aus den Vorjahren liegen auch Betriebsdaten eines zur Betriebswasserversorgung genutzten Brunnens auf dem Areal des Uni-Campus West vor. Da die Förderung nach Angabe des Betreibers, der Goethe-Universität Frankfurt, Bereich Immobilienmanagement, mittlerweile unter 2.000 m³/a gefallen ist, wurde das Monitoring 2023 eingestellt.
- WebMapService (WMS) der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation: Topografische Kartengrundlagen, Liegenschaftskarte, Luftbilder/Orthofotos
- Stadtkarte (2012) 1:10.000 sowie die Stadtgrundkarte (Stand 2022) des Stadtvermessungsamtes der Stadt Frankfurt am Main
- Historische Topografische Karten 1:25.000 (TK25) der Hessischen Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation, welche einen Zeitraum ab Anfang des 19. Jahrhunderts abdecken. Diese ermöglichen eine Rekonstruktion eines hydrologischen Ausgangszustands und der Vorflutersituation vor Bebauung des Untersuchungsraumes sowie von Eingriffen in den Untergrund (Tongruben, Ziegeleien und Basaltabbau).
- Der Baumbestand der öffentlichen Flächen ist Teil des Baumkatasters des Grünflächenamtes der Stadt Frankfurt. Ein beispielhafter Auszug des Katasters mit den jeweiligen Pflanzjahren geht aus Blatt 28 hervor. Neben den Bäumen der Parks und sonstigen öffentlichen Flächen liegen auch Baumbestände auf Privatflächen sowie dem Campus-Areal vor, welche nicht durch das Grünflächenamt erfasst sind. Hierzu erfolgt eine externe Erfassung und Bewertung durch das Grünflächenamt.

2.2 Randbedingungen der Trassenvariante 1a

Gemäß dem aktuellen Planungsstand des Büros Schüßler-Plan, vgl. Übersichtslageplan in Blatt 61, werden für die Bewertung folgende Randbedingungen zugrunde gelegt:

Ausgehend von dem Bestandsbauwerk Bockenheimer Warte erfolgt der Bau als in offener Bauweise errichteter Tunnel (oB), welcher beide Gleise aufnimmt. Bei früheren Bauprojekten der Frankfurter U-Bahn, zuletzt (1994-1998) beim Bau der Grundstecke D1 aus südlicher Richtung zur Bockenheimer Warte, erfolgte der Bau mittels einer offenen Wasserhaltung. Dabei wurden Förderbrunnen beiderseits neben dem offenen Verbau errichtet und das Grundwasser bis zur Basis der Baugrube abgesenkt. Eine solche offene Wasserhaltung wird aufgrund der großen erwarteten Mengen – allein im Abschnitt der Station bis zum nördlichen Tunnelende der Bockenheimer Warte (Bauabschnitte 73 und 74) erfolgte eine Gesamtförderung von rd. 1,09 Mio. m³, /5/ - als nicht mehr genehmigungsfähig bewertet. Ferner waren seinerzeit aufgrund der Druckentlastung setzungsbedingte Schäden an der umliegenden Gebäudesubstanz eingetreten.

Zur Realisierung einer grundwasserschonenden Bauweise wird der Grundwasserzustrom mittels einer seitlichen Baugrubenabdichtung minimiert. Diese besteht aus einer Bohrpfahl- oder Schlitzwand, welche üblicherweise bis einige Meter unter die Baugrubensohle in den Untergrund eingebaut wird. Bei diesem Verfahren kann die Grundwasserförderung auf eine Sohlentspannung mittels Entspannungsbrunnen in der Baugrubensohle begrenzt werden. In erster Näherung wird ein Abstand der Brunnen zueinander von 12,5 m angenommen. Weitere Randbedingungen der Verbauwände und Entspannungsbrunnen werden in Kap. 8.4 erläutert.

Je Baugrube für die Notausstiege werden im Bedarfsfall zwei zusätzliche Brunnen eingesetzt. An den Brückenfundamenten der Station „Botanischer Garten“ – diese überbrückt den Abzweig der Miquelanlage im Bereich der BAB 66 – werden für den Fall einer erforderlichen Grundwasserabsenkung auf der Ost- und Westseite je ein Brunnen platziert. Alternativ wäre hier auch eine Gründung mittels Bohrpfählen (ohne Wasserhaltung) möglich. Die Gesamtdauer der Wasserhaltung wird mit fünf Jahren kalkuliert.

Nach Bauende verbleiben die seitlichen Verbauwände üblicherweise im Untergrund und bilden gemeinsam mit dem Tunnelbauwerk eine hydraulische Barriere.

Für den Tunnel oB lassen sich folgende Maße angeben:

- Breite außen 12,6 m (Außenkante Bohrpfahl-/Dichtwand)
- Tunnelsohle unter Gleisgradienten 1,95 m
- Tunnelhöhe außen 7,5 m
- Wandstärke (Dicht-/Bohrpfahlwand) 1,2 m

Nach der Errichtung wird der Tunnel oB mit einer Betondecke versehen und diese mit Boden bei einer nach Süden zunehmenden Überdeckung überschüttet. Durch die zusätzliche Auflast kann die Wasserhaltung nach dem Erreichen der Auftriebssicherheit eingestellt werden.

Es sind zwei Notausstiege vorgesehen: im Bereich der Zeppelinallee auf der Ostseite des Tunnels oB sowie auf der Westseite an der Ditmarstraße. Für diese wird ebenfalls eine bauzeitige Grundwasserentnahme (Sohlentspannung) erforderlich.

An der Westseite des Botanischen Gartens wird auf einer Länge von 140 m ein Trog-Rampenbauwerk errichtet. Für dieses ist wie für den Tunnel oB eine Sohlentspannung erforderlich. Der weitere Verlauf zur Station „Botanischer Garten“ erfolgt oberirdisch. Ein Eingriff in den Untergrund erfolgt im Bereich der Station sowie der Überbrückung der BAB 66-Zubringer mittels der erforderlichen Brückenpfeiler. Deren Position wurde bei einer angenommenen Einbindetiefe von 3 m näherungsweise berücksichtigt. Nördlich der Brücke muss zur Unterquerung der BAB 66 – diese verläuft hier in Hochlage – über einen rd. 100 m langen Abschnitt wieder in den Untergrund eingeschnitten werden (Tunnel oB).

2.3 Randbedingungen der Trassenvariante 1d

Abweichend von der Variante 1a wird eine Rampe östlich der Miquelallee auf Höhe der Frauenlobstraße errichtet. Von dort erfolgt der maschinelle Tunnelbau mit zwei etwa 600 m langen Röhren mit einem Außendurchmesser von 7,15 m. Die Gradienten fällt bei km 0+472 auf einen Tiefpunkt von 74,4 mNHN, um im Süden wieder bis zum Bestandsbauwerk auf 85,7 mNHN anzusteigen. Die Tunnelröhren werden mittels Tunnelbohrmaschine (TBM) vorgetrieben. Die TBM ist in der Lage, einen Gegendruck zum anstehenden Erd- und Wasserdruck zu erzeugen, sodass keine Wasserhaltung erforderlich wird. Die Grundwasserentnahme beschränkt sich somit auf das Lenzwasser. Die Tunnelröhren werden als vollständig dicht angenommen, sodass lediglich die Außenwandung für die hydraulische Bemessung relevant ist.

Allein im Rampenbereich und im Bereich der Startbaugrube der TBM kann bei einem tiefsten Bauwerkseinschnitt von 94,2 mNHN – die Baugrubensohle liegt 4 m unter der Gleisgradienten – eine Sohlentspannung erforderlich werden. Die Dauer der Wasserhaltung wird für dieses Bauwerk mit 36 Monaten kalkuliert. Die Grundwasserentnahme erfolgt wiederum

über Entspannungsbrunnen, welche in einem Abstand von 12,5 m zueinander eingerichtet werden. Für die Verbauwände gilt eine einheitliche Wandstärke von 1,2 m.

Notausstiege mit Anschluss an beide Tunnelröhren werden an der Zeppelinallee (km 0+155) sowie innerhalb des Palmengartens (km 0+370) platziert.

In den übrigen Abschnitten gelten die Randbedingungen der Variante 1a.

2.4 Randbedingungen der Trassenvariante 3i

Die Station „Campus Westend“ (km 0+546 - 0+681) wird in der Variante 3i nordwestlich des Theodor-W.-Adorno-Platzes und damit östlich des Grüneburgparks platziert. Die Ausführung erfolgt mit einer Tiefenlage der Gradiente von etwa 110,5 mNHN und somit 11,1 – 11,8 m unter der heutigen Geländeoberfläche.

Vor dem Bau der Station werden die beiden rund 2.220 m langen Tunnelröhren ausgehend vom Rampenbauwerk an der Westseite des Bundesbank-Areals nach Süden vorgetrieben. Wie in Variante 1d verfügen die Röhren über einen Außendurchmesser von 7,15 m. Die Gradiente erreicht sowohl zwischen der Rampe und der Station als auch zwischen Station und Bockenheimer Warte jeweils einen Tiefpunkt. Dieser liegt im nördlichen Abschnitt unter der BAB 66 auf einer Höhe von 95,39 mNHN (km 1+991) sowie im südlichen Abschnitt unter dem Palmengarten bei km 0+472 auf einen Tiefpunkt von 74,4 mNHN und damit rd. 29,3 m unter GOK.

Der Abstand der beiden Achsen der Tunnelröhren beträgt im südlichen Abschnitt etwa 14 – 23 m zueinander. Unter dem Palmengarten verschwenkt der Tunnel nach Süden und schließt unter der Zeppelinallee an den Bestandstunnel der Grundstrecke D an.

Zwischen der Station Campus und der Bestandsstrecke in der Zeppelinallee werden neben der Bebauung an der August-Siebert-Straße vorwiegend die Grünanlagen des südlichen Grüneburgparks sowie des nördlichen Abschnittes des Palmengartens mit teils älteren und wertvollen Baumbeständen unterquert.

Für den Bau der maschinell aufzufahrenden Tunnel mittels TBM wird wie in der Variante 1d keine Wasserhaltung erforderlich. Die Entnahme beschränkt sich daher auf das im Tunnelbereich vorhandene Lenzwasser. Durch den erhöhten Betriebsdruck kann es in der Vortriebsphase allenfalls zu einem kurzzeitigen Anstieg der Druckpotenziale des durchörterten Kluftaquifers kommen.

Bei der Errichtung der Station „Campus Westend“ wird eine Entspannung des unter der Baugrubensohle vorhandenen Kluftgrundwassers erforderlich, während ein seitlicher Zu-

strom über die dichten Verbauwände verhindert wird. Für die Verbauwände wird eine Einbindetiefe von 22 m bei einer Gesamttiefe der Baugrube von rd. 14 m zugrunde gelegt. Die Stärke wird wiederum mit 1,2 m kalkuliert. Für die Gewährleistung einer Auftriebssicherheit werden die Entspannungsbrunnen maximal 30 m unter Gelände (somit 16 m unter die Baugrubensohle) eingebaut. Es wird ein Abstand der Brunnen zueinander von 12,5 m angesetzt. Für die Wasserhaltung wird eine Dauer von vier Jahren kalkuliert. Ein Aushub für den Stationsbau erfolgt hier erst nach dem Durchfahren der TBM. Die provisorisch eingebauten Tübbingröhren müssen dazu wieder abgebrochen werden. Dies entspricht dem Vorgehen beim Bau der U5-Station Güterplatz im Europaviertel.

Aufgrund der geringen Überdeckung im Bereich der Station Campus kann für den Bau der Tunnelröhren als Schutz gegen einen plötzlich auftretenden Druckverlust der TBM („Ausbläser“) eine Injektion des Deckgebirges erforderlich werden. Da dieser Bereich mit dem Stationsbau wieder rückgebaut wird, ist dies für die hydrogeologische Bewertung jedoch nicht relevant.

Im Bereich der Rampe und der Startbaugrube für die TBM wird wiederum ein wasserdichter Verbau der Baugrubenwände sowie eine Entspannung der Schichten unterhalb der Baugrubensohle zum Ansatz gebracht. Die Dauer der Wasserhaltung ist aufgrund der größeren Tunnellänge mit fünf Jahren anzusetzen.

Nördlich davon wird mit Ausnahme von Brückenfundamenten im Bereich der Station „Bundesbank“ voraussichtlich kein (grundwasserrelevanter) Eingriff in den Untergrund erforderlich.

Es werden vier Notausstiege geplant:

- Zeppelinallee (km 0+115)
- Siesmayerstraße (km 0+570)
- August-Siebert-Straße (km 1+040)
- Miquelallee (km 1+980)

An diese werden jeweils beide Tunnelröhren angeschlossen. Aufgrund der großen Tiefenlage wird für die Notausstiege (einschließlich des Notausstiegs der Variante 1d) voraussichtlich keine Wasserhaltung durch Entspannungsbrunnen zum Ansatz gebracht, sondern ein Grundwasserzutritt wird durch andere technische Verfahren verhindert (z.B. Vereisung oder Druckluft).

Eine Verlegung von Straßen beschränkt sich wie in den übrigen Varianten auf eine Umgestaltung des Knotens L 3004 – Wilhelm-Epstein-Straße. Hier werden eine Zu- und Abfahrt verfüllt sowie eine neue Abfahrt zur L 3004 bis zu 4,7 m Tiefe in den Untergrund eingeschnitten.

3 Erkundungsmaßnahmen

Zielsetzung der Untersuchung ist eine belastbare Prognose des bauzeitigen hydraulischen Eingriffs sowie der permanenten Auswirkungen der Bauwerke auf die Grundwasserströmung. Aus diesen können dann mögliche Auswirkungen auf die Vegetation abgeleitet werden. Außerdem ist für eine Bewertung der Wirkungen auf den Baumbestand eine Einschätzung der durchwurzelten Tiefenzone und eines kapillaren Aufstiegs aus der gesättigten Zone erforderlich. Eine Wirkung kann zusätzlich aus der Erwärmung im Bereich von Tunnelröhren resultieren, welche zu einer Veränderung des Wasserhaushalts beitragen kann.

Die Einrichtung und Kalibrierung eines numerischen Grundwasserströmungsmodells setzt eine möglichst detaillierte Datengrundlage voraus. Nach einer Auswertung der vorhandenen Daten sowie auf Grundlage der vorliegenden Angaben zu geologischen und hydrogeologischen Strukturen wurde in 2020 eine Vervollständigung der Bewertungsgrundlage mittels technischer Untersuchungen geplant. Folgende Maßnahmen wurden umgesetzt:

- a) Übertragung der für die Modellierung relevanten Bauwerksabmessungen in ein Geografisches Informationssystem (GIS). Wasserrechtlich relevant sind die Kontaktflächen der seitlichen Abdichtungen zum Gebirge, Unterkanten der Bauwerkssohlen, Oberkanten der Tunnel. Für die Bemessung der bauzeitigen Auswirkungen sind die Absenkziele der Wasserhaltung den jeweiligen Bauwerksabschnitten zuzuordnen. Die Bauwerksgeometrie entspricht dem Planungsstand 03/2024.
- b) Auswahl und Auswertung von Bohraufschlüssen des HLNUG-Bohrarchivs. Die Auswertung umfasst eine geologische Zuordnung der einzelnen erbohrten Schichten und eine hydrogeologische Einstufung.
- c) Auswertung vorhandener Baugrunduntersuchungen aus dem Bereich des Campus-Areals sowie des um 1970 erfolgten Ausbaus der BAB 66 / Miquelallee (Nordtangente). Angaben zum Bau und Wasserhaltung der Grundstrecke D im Bereich Bockenheimer Warte aus den 1990er Jahren liegen der VGF vor. Eine umfangreiche Auswertung liegt für die westlich verlaufende, frühere Trassenplanung der Grundstrecke D II vor.
- d) Auf Grundlage der Bohrdaten erfolgte eine Konstruktion der Unterkanten der für das Strukturmodell relevanten Schichten, vgl. Kap. 0. Die tertiäre Schichtenfolge ist durch Verwerfungen in Blöcke untergliedert, welche auch Einfluss auf die hydraulischen Gegebenheiten ausüben können.
- e) Recherche und Bewertung der verfügbaren Grundwassermessstellen im weiteren Projektumfeld. Die Messstellen wurden anhand der Ausbauezeichnungen, soweit verfügbar, den jeweiligen Grundwasserleitern zugeordnet. In vielen Fällen liegt eine stockwerksübergreifende Verfilterung vor, sodass die ermittelten Wasserstände nur eingeschränkt

interpretierbar sind („Mischpotenziale durch Umläufigkeiten“). Einen Einblick in das Bestandsmessnetz vermittelt die Stammdatentabelle in Anhang 3. Die Schichtprofile und Ausbauzeichnungen der in das Grundwassermonitoring übernommenen Bestandsmessstellen wurden in Anhang 12 zusammengestellt.

- f) Recherche der langjährigen Grundwasserstandsdaten. Seitens des Hochbauamtes der Stadt Frankfurt erfolgte eine meist lückenhafte Aufzeichnung von Wasserstanddaten, meist in analoger Form. Ergänzend erfolgt seit 2016 eine monatliche Erfassung eines größeren Grundwassermessnetzes im westlichen Frankfurter Stadtgebiet durch die SBEV. Ergänzend liegen für den Betriebsbrunnen im Palmengarten monatliche Lotungen für einen mehrjährigen Zeitraum vor. Zu Beginn der Untersuchung zeichnete sich bereits ab, dass für den Vorhabensbereich kein ausreichendes Messnetz vorhanden ist, welches eine Bewertung der hydraulischen und hydrochemischen Situation zulässt, so dass ein umfassendes Bohrprogramm erforderlich wurde.
- g) Die Bohrpunkte für die Errichtung von Grundwassermessstellen wurden in zwei Ortsterminen unter Beteiligung der VGF, des beauftragten Bohrunternehmens, des Grünflächenamtes der Stadt Frankfurt, des Amtes für Straßenbau und Erschließung (ASE) sowie der jeweiligen Grundstückseigentümer am 20.08.2021 und 22.02.2022 festgelegt. Seitens des Regierungspräsidiums Darmstadt wurde der Erkundung mit Bescheid vom 24.05.2022 (Az. RPDA-Dez. IV/F 41.1-79e 10.12/9/2020/5) zugestimmt. Die Lage der Messstellen wurde so gewählt, dass diese auch für eine geotechnische Erkundung geeignet sind und in der Bauphase erhalten bleiben können. Eine Beeinträchtigung der Vegetation durch die Bohrmaßnahmen wurde durch Vorgaben des Grünflächenamtes sowie des RPDA vermieden. Soweit eine Befahrung von Grünflächen nicht vermieden werden konnte, wurden Spurrinnen durch die Auslegung von Baggermatten verhindert. Bei der Wahl der Bohrpunkte war zudem der Bestand an Leitungen und Kanälen zu berücksichtigen. Bestandspläne wurden im Vorfeld seitens der Betreiber zur Verfügung gestellt. Ebenso war eine systematische Vorerkundung auf Kampfmittel erforderlich.
- h) Errichtung von Grundwassermessstellen an insgesamt 35 Standorten. Die Messstellen müssen eine eindeutige Zuordnung zu den von der Baumaßnahme betroffenen Grundwasserleiter – Niederrad-Formation, Staden-Formation, Basalt-Formation und Deckschichten des Quartärs – gewährleisten. Die Tiefe der Messstellen wurde daher individuell an die hydrogeologischen Gegebenheiten und die geplante Trassentiefe angepasst. Sofern an einer Lokation mehrere Grundwasserstockwerke angetroffen wurden, wurde jeweils eine Doppelmessstelle errichtet. Die Ausführung der Bohrungen erfolgte im Zeitraum April 2022 – Februar 2023 durch das Bohrunternehmen Terrasond GmbH & Co. KG, Günzburg-Delfingen. Die Bohrungen wurden im Trockenbohrverfahren ausgeführt bei einem Bohrendurchmesser von in der Regel 273 mm mit durchgehender

Gewinnung gekernter Proben. Der Ausbau zu Grundwassermessstellen erfolgte auf Grundlage der erbohrten Schichtprofile gemäß der Vorgabe durch BGU. Es wurde für die tiefen Messstellen zumeist ein Ausbaudurchmesser DN115 gewählt, während für die flachen Messstellen ein Durchmesser von DN50 ausreichte. Doppelmessstellen wurden in der Regel mittels zweier benachbarter Bohrungen errichtet. Ausnahmen bilden die Messstellen VGF_F+T09/22, VGF_F+T24/22 und VGF_F+T34/22², bei denen der zwischen den Filterstrecken liegende Ringraum ausreichend mit Quellton abgedichtet werden konnte und somit eine sichere hydraulische Trennung der Aquifere ermöglicht wurde. Die Messstellenabschlüsse wurden überwiegend unterflur unter Verwendung von Colshorn®-Verschlusskappen einbaut. Die vollständige Dokumentation des Bohrunternehmens mit Angaben zum Bohrverfahren, den Schichtenverzeichnissen und Ausbauangaben geht aus Anhang 9 hervor. Die Zusammenstellung enthält auch Angaben der angebohrten Grundwasserstände sowie eine Fotodokumentation der in Kernkisten entnommenen Bodenproben. Die Messstellen wurden nach Fertigstellung durch das Bohrunternehmen klargepumpt, die Protokolle sind in Anhang 10 zusammengestellt. Die dabei gemessene Grundwasserabsenkung gibt ergänzende Hinweise auf die Durchlässigkeit der erschlossenen Schichten.

- i) Die gewonnenen Bohrkerne wurden im Anschluss durch BGU geologisch angesprochen. Die dadurch teilweise modifizierten Ausbau- und Schichtenprofile sind in Anhang 4 zusammengestellt.
- j) Die neu errichteten Grundwassermessstellen wurden im Zeitraum August 2022 bis Februar 2023 nach Lage und Höhe durch das Ingenieurbüro für Vermessung geoplan, Stockstadt am Rhein, eingemessen. Die Lage- und Höhenangaben wurden in die Stammdaten übernommen, Anhang 3.
- k) An 7 Grundwassermessstellen wurden im August/September 2023 durch das Büro Geotechnik Lehr, Bad Nauheim, Pumptestes ausgeführt. Diese erfolgten bei einer konstanten, in Abhängigkeit der Messstelle unterschiedlichen Förderrate von 0,3 - 4,0 m³/h über einen Zeitraum von jeweils etwa drei Stunden, vgl. Anhang 7. Die Versuche dienen der orientierenden Ermittlung der hydraulischen Kenndaten der tertiären Schichtenfolge. Nach Beendigung wurde der Wiederanstieg gemessen und ebenfalls in die Auswertung einbezogen. Die Auswahl der Messstellen erfolgt nach Lage in Bezug auf die geplanten Grundwasserentnahmen und der belastbaren Zuordnung des jeweils erschlossenen Aquifers. Die ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerte dienen als Grundlage für die Modellkalibrierung.

² F = flach, oberer Grundwasserleiter, T = tief, nächst tieferer Grundwasserleiter

- l) An 25 Grundwassermessstellen erfolgte im Zeitraum Juli – September 2023 eine Probenahme und hydrochemische Untersuchung auf ein umfangreiches Parameterpaket, welches neben den Hauptbestandteilen auch anthropogene Schadstoffe umfasste. Die Probenahme wurde durch das Büro Dr. Hug Geoconsult, Oberursel, ausgeführt, die Laboruntersuchungen durch die Chemlab GmbH, Bensheim. Die Probenahmeprotokolle und Laborberichte sind in Anhang 11 zusammengestellt, die Analysebefunde gehen tabellarisch aus Anhang 6 hervor. Die Lage der für Pumptests und hydrochemische Untersuchungen ausgewählten Messstellen ist in Blatt 2 dargestellt.
- m) Mit Fertigstellung der Grundwassermessstellen wurde ab Mitte 2022 ein Grundwasserstandsmonitoring begonnen. In dieses wurden auch die geeigneten Bestandsmessstellen des weiteren Umfelds einbezogen. Mit der Fertigstellung der neuen Messstellen umfasst das Messnetz rd. 120 Messstellen (Doppelmessstellen werden als zwei einzelne gezählt). Ein Teil der Messstellen ist mit Datenloggern ausgerüstet, welche eine stündliche Datenerfassung erlauben. Bei den übrigen Messstellen erfolgt eine monatliche, teils 14-tägige Messung. Blatt 4 vermittelt einen Überblick über das genutzte Messnetz. Die bislang gewonnenen Wasserstandsdaten wurden zusammen mit den zuvor (extern) gemessenen Werten in Grundwasserganglinien dargestellt, Anhang 5.
- n) Als Grundlage für die Erstellung von Grundwassergleichenkarten für die quartären sowie tertiären Grundwasserleiter ist eine Stichtagsmessung der Grundwasserstände erforderlich. Aufgrund der guten Datengrundlage wurde eine im November 2023 durchgeführte Stichtagsmessung zugrunde gelegt. Die Daten wurden in Form von Grundwassergleichenkarten ausgewertet. Durch eine Verschneidung mit dem digitalen Geländemodell mit einer Rasterauflösung von einem Meter (DGM1) lassen sich Flurabstände berechnen, welche als Grundlage für eine Bemessung der Grundwasseranbindung der Vegetation herangezogen werden können.
- o) Recherche aktueller Wasserhaltungen und Grundwassersanierungen, die einen Einfluss auf die Grundwasserströmungssituation des gewählten Stichtages nehmen können. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass von Grundwasserabsenkungen auch nach Einstellung der Förderung noch eine Wirkung ausgehen kann. Diese ist ggf. bei der Konstruktion der Grundwassergleichenkarten zu berücksichtigen. Für die Stichtagssituation sind keine Wasserhaltungsmaßnahmen im Projektumfeld dokumentiert.
- p) Für eine Bewertung der Grundwasserverunreinigungen im Projektumfeld wurde auf Grundlage der durch das Regierungspräsidium Darmstadt (RPDA) übermittelten Daten eine Voreinschätzung möglicher Auswirkungen auf das Bauvorhaben sowie potenzieller Veränderungen im Bereich möglicher Grundwasserverunreinigungen vorgenommen. Diese betreffen im Wesentlichen eine Veränderung der Grundwasserfließrichtung in der Bauzeit.

Auf Grundlage einer Vorab-Ermittlung der Einzugsgebiete der bauzeitigen Wasserhaltungsmaßnahmen werden zudem die darin enthaltenen Grundwasserverunreinigungen benannt und bewertet. Diese sind hinsichtlich der potenziell am Bauvorhaben eintreffenden Verunreinigungen und für das Monitoring relevant.

- q) Feststellung der bauzeitigen wasserrechtlichen Relevanz der einzelnen Bauabschnitte und Bauwerke. Hierzu werden zunächst die geplanten Zielniveaus geplanter Grundwasserhaltungen zusammengestellt und mit dem bauzeitigen Bemessungsgrundwasserstand abgeglichen. Modelltechnisch relevant sind alle Bauwerksteile, die in Tiefen unterhalb des Grundwasserstandes eingebracht werden.
- r) Auswertung der Sohl-tiefen der vorhandenen Kanalnetze im Projektumfeld. Aufgrund von Undichtigkeiten von Regen- und Schmutzwasserkanälen ist im Regelfall bei Grundwasserständen oberhalb der Kanalsohlen eine Aufnahme von Grundwasser (Fremdwasser) gegeben, das somit nicht wesentlich über das Niveau der Kanäle ansteigen kann. Das im Modellgebiet vorhandene Netz der relevanten größeren Kanäle ist mit den Sohlhöhen in Blatt 5 dargestellt.
- s) Der Baumbestand wird seitens des Grünflächenamts hinsichtlich der Baumart, Alter und potenzieller Wurzeltiefe individuell bewertet. Für den jeweiligen Standort ist zudem eine Einschätzung des Grundwasserflurabstandes sowie der Bodenbeschaffenheit (kapillarer Aufstieg, Feldkapazität) erforderlich. Hierzu erfolgte eine Auswertung der Bodenübersichtskarte 1:50.000 des HLNUG, vgl. Blatt 23 - Blatt 26, sowie der berechneten Grundwasserflurabstände.
- t) Umsetzung des hydrogeologischen Strukturmodells in ein numerisches Grundwasserströmungsmodell. Das Grundwasserströmungsmodell wird auf die gemessenen Grundwasserniveaus kalibriert. Dazu werden die Durchlässigkeitsbeiwerte der untersuchten Teilschichten im Rahmen zulässiger Spannbreiten variiert. Ziel der Kalibrierung ist eine Justierung des Modells auf den gemessenen Zustand unter Beachtung realistischer Annahmen für die Wasserbilanz.
- u) Simulation und Bewertung der von den Bauwerken ausgehenden hydraulischen Veränderungen. Dabei ist zwischen bauzeitigen Beeinflussungen (Wasserhaltung bzw. Grundwasserentspannung) beim Bau der Stationen, der in offener Bauweise errichteten Tunneln und Rampen sowie den permanenten Beeinflussungen (Aufstau / Sunk aufgrund der Barrierewirkung der Bauwerke) zu unterscheiden.

4 Untersuchungsgebiet

4.1 Lage und Morphologie des Untersuchungsgebietes

Eine Übersicht des Untersuchungsgebietes vermitteln die Übersichtskarten in Anhang 1. Das betrachtete Gebiet reicht vom Frankfurter Ortsteil Bockenheim im Südwesten bis zum Hauptfriedhof im Nordosten. Im Norden wird die südliche Ortslage Ginnheim mit der bestehenden U-Bahnstrecke einbezogen. Das westliche Gebiet zählt mit dem Volkspark Niddatal zur tiefliegenden Talau der Nidda, welche durch Geländehöhen von 97 - 98 mNHN geprägt wird. Östlich der Ginnheimer Landstraße steigt das Gelände sukzessive auf Höhen über 115 mNHN an. Der Bereich des Palmengartens sowie des Botanischen Gartens bildet eine natürliche Senke mit Höhen von 100 - 110 mNHN. Im nordöstlichen Grüneburgpark sowie dem Campus Westend erfolgt schließlich ein Anstieg auf >120 mNHN, welcher sich nach Nordosten zum Hauptfriedhof mit Höhen von bis zu 148 mNHN fortsetzt. Die morphologische Situation wird in Blatt 10 dargestellt, ergänzend wird die Morphologie in einer Schummerungsdarstellung visualisiert, Blatt 11.

Im Bereich der BAB 66 mit der Anschlussstelle Miquelallee bilden die Abfahrten teils tiefe Einschnitte in den Untergrund, sodass hier örtlich Böschungshöhen von 10 m erreicht werden.

4.2 Vorfluter

Gewässer finden sich im Palmengarten mit einem im südwestlichen Bereich gelegenen Teich sowie einem kleineren Weiher im Botanischen Garten. In der Miquelanlage südlich der Deutschen Bundesbank-Zentrale liegt zudem ein künstlich angelegter Teich. Größere Vorfluter sind im Gebiet nicht vorhanden. Einzig westlich der Ginnheimer Straße tritt auf einem kurzen Abschnitt der Ochsengraben in Randlage zur Niddaaue zutage. Dieser bildet den Überrest eines einst weitverzweigten Grabennetzes der Aue, welches durch die Begradigung der Nidda sowie die Veränderung der Flächennutzung stark an Bedeutung verloren hat³. Aufgrund der größeren Tiefenlage der Kanäle und der Lage abseits des Vorhabensbereiches bleibt der Bachabschnitt im Modell unberücksichtigt.

³ <https://frankfurt.de/themen/umwelt-und-gruen/orte/stadtgewaesser/baeche-und-graeben/wooggraben-und-ochsengraben>, abgerufen 26.03.2024

4.3 Historische Entwicklung

Die Historie ist für die vorliegende Bewertung insbesondere hinsichtlich früherer Vorflutssysteme von Interesse. In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts zeigt sich im Bereich des heutigen Palmengartens ein kleinerer, nach Süden zur Bockenheimer Warte entwässernder Graben, welcher im Bereich der Bebauung entlang der Bockenheimer Landstraße endet bzw. verrohrt geführt wird. Gemäß einer älteren Flurkarte verschwenkte dieser dort ursprünglich nach Südwesten zur Bockenheimer Warte, Abb. 3. Weiter im Süden findet sich bei den Kettenhöfen ein weiterer, nach Westen zur Messe führender Graben, welcher bis Ende des 19. Jahrhunderts vollständig verschwindet. Im nördlichen Palmengarten wird ein Leonhardsbrunnen erwähnt, dessen Position ursprünglich einem heute dort vorhandenen kleinen Teich entspricht. Dieser stellte offenbar einen Quellbereich dar, welcher den nach Süden führenden Graben speiste. Mit dem Bau eines größeren Kanals 1904, welcher den Palmengarten von Ost nach West durchquert, wurde der Grundwasserstand offenbar permanent abgesenkt, /3/. Es bleibt unklar, ob auch der Quellbereich des Leonhardsbrunnens in jener Zeit trockenfiel, doch wirkt sich der Bau der umliegenden Kanalisation aufgrund der Aufnahme von Fremdwasser erfahrungsgemäß limitierend auf den Grundwasserstand aus. Der Kanalbau war für die Wasserversorgung des Parks prägend. SCHOSER (1995) führt hierzu aus, /3/:

„Die Sorge um das Wasser durchzieht die ganze Palmengartengeschichte. Der heutige Standort des Palmengartens wurde ungeachtet der minderwertigen Bodenverhältnisse wegen des „in 3 Fuß Tiefe anstehenden Grundwassers“ gewählt. Vielerlei Eingriffe in die Bodenstrukturen haben im Laufe der Zeit den Grundwasserspiegel und die Wasserhaltung lebenswichtig bedroht. Ein Engpaß folgte auf den anderen. Die Verlegung von Abwässerkanälen, erst in der Siesmayerstraße, dann in der Viktoria-Allee (Miquelallee) zwangen die Gartengestalter schon in der Gründerzeit die Sohlen der Weiher zu betonieren, um das Auslaufen der Becken zu verhindern. Besonders gravierend haben sich die Eingriffe beim Bau der beiden den Garten querenden Abwasserkanäle, die 1904/05 und 1941/42 gebaut wurden, ausgewirkt. Zwar kompensierte die Stadt immer wieder die finanziellen Ausfälle durch Lieferung von Quellwasser, später durch „Mainwasser“ (bis 1974). Auch Anfang der 70er Jahre war die Wassersituation erneut sehr schwierig, da im Garten nur Stadtwasser (= Trinkwasser) verwendet wurde, nachdem das „kostengünstige“ Mainwasser versiegt war. Einerseits mußte fast regelmäßig im Nachtragshaushalt Geld für Wasser und Kohle beantragt und begründet werden. Andererseits konnte der Bedarf, der sich aus dem Verlauf der Witterung ergab, nicht im voraus richtig eingeschätzt werden.

Glücklicherweise hat der Bau des U- Bahntunnels in der Bockenheimer Landstraße sich nicht so negativ ausgewirkt, wie zu befürchten war. Ein gewisser Rückstau des Grundwassers hat eher zur Anhebung des Grundwasserspiegels im Garten beigetragen. Aus dieser Not heraus wurde betriebsintern begonnen, alle vorhandenen Möglichkeiten der Wasserspeicherung in Weihern, Zisternen und Auffangbecken auszunutzen. Zusätzlich stellte man Tanks auf, wo eine „Quelle“ sprudelte. Es wurde alles Regenwasser von den Dächern und den befestigten Oberflächen gesammelt. Nach gründlichen Reinigungen wurden die Weiher zu den größten Sammelbecken. Zug um Zug wurden Kanäle und Leitungen saniert und neu verlegt. Jahrelang war der Garten aufgewühlt. Das Regenwasser wird jetzt in getrennten Leitungen geführt. Die Tiefbrunnen, einer bei Haus Rosenbrunn, ein anderer im Bereich der Gärtnerei (ehemals

Leonhardsbrunnen), wurden gereinigt und wieder in Betrieb genommen. Alles Brunnenwasser fließt in die Weiher. Die Brunnen haben eine Tiefe von 12-14 m. Da das Brunnenwasser leider hohe temporäre Wasserhärte hat, ist die Vermischung mit Regenwasser unerlässlich; denn dieses Wasser wäre unverschnitten verwendet als Gießwasser selbst für die Freilandkulturen nicht zu gebrauchen. Durch die „Mischung“ hat dieses „Eigenwasser“, wie es genannt wird, etwa 10°dH (deutsche Härte). Die Brunnen liefern täglich rund 600-800 cbm Wasser. Bei der Entnahme von Wasser aus den Weihern werden aber genau festgelegte Pegelstände eingehalten.“

Im späteren Botanischen Garten (westlich der „Grüneburg“) ist ebenfalls ein kurzer, nach Süden führender Grabenabschnitt zu ersehen, Blatt 3. Im Bereich der heutigen Sportplätze an der Wilhelm-Epstein-Straße fließt der Marbach (Bezeichnung 1926) in einer schmalen Talaue nach Westen.

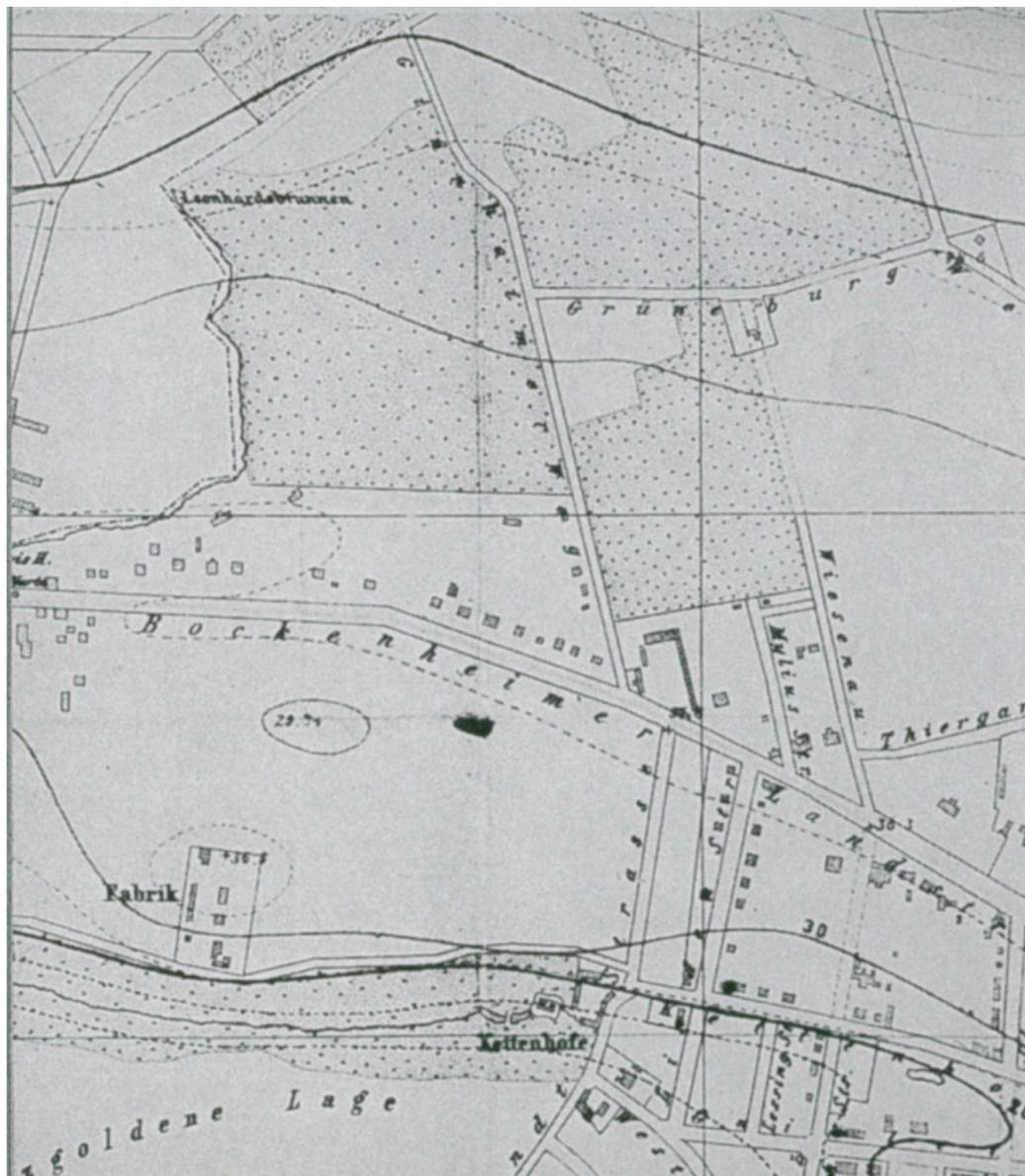


Abb. 2: Flurkartenausschnitt Mitte 19. Jahrhundert (aus /3/), Leonhardsbrunnen im Nordwestteil

Im Nordwesten zeugt eine „Backsteinhütte“ und im Nordosten eine Backsteinfabrik von der beginnenden Tongewinnung für die Ziegelproduktion, Blatt 3. Auch in Bockenheim finden sich kleinere Abgrabungen. Die Tongruben gewinnen in den nachfolgenden Jahrzehnten zunehmend an Bedeutung, jedoch scheint der Trassenbereich nicht betroffen zu sein. Allein nordöstlich der Trasse 3i findet sich eine Ziegelei, doch geben die Höhendarstellungen keine Hinweise auf einen zugehörigen Geländeeinschnitt. Nördlich der Ortslage Bockenheim befindet sich ein Basaltsteinbruch, Blatt 4 – Blatt 6.

Mit der Eröffnung des Palmengartens 1871 wird das Areal grundlegend umgestaltet, /3/. Der Weiher im Palmengarten tritt in der Karte von 1906 noch nicht in Erscheinung, war in den 1870er Jahren jedoch bereits angelegt, /3/. Der Graben wird 1926 nicht mehr dargestellt, Blatt 7.

Der Graben im Botanischen Garten ist im 20. Jahrhundert noch vorhanden, jedoch offenbar nur periodisch wasserführend. Der Marbach im Norden nahm in der Talau der Nidda eine südliche Richtung und ging in den heutigen Ochsengraben über. Im Westen wird die Talau zudem vom Wooggraben gequert.

Im Bereich der Miquelanlage ist 1960 noch ein Sportplatz verzeichnet, Blatt 9. Der dort heute vorhandene Teich tritt erstmals 1975 in Erscheinung und wurde somit in einer künstlich geschaffenen Senke angelegt. Der Bau der BAB 66 geht in den 1970er Jahren zudem mit einem bedeutenden Eingriff in den Bereich der Ginnheimer Höhe einher, welche bis dahin vorwiegend als Kleingärten genutzt wurden. Der frühere Diebsgrundweg wurde im Zuge dessen über einen längeren Abschnitt rückgebaut.

5 Geologische und hydrogeologische Situation

5.1 Geologischer Überblick

Geologisch betrachtet liegt das Erkundungsgebiet am Nordrand des Oberrheintalgrabens und östlich von dessen nördlichem Ausläufer, dem Nidda-Graben. Im Zuge des Gebirgsbildungsprozesses wurde das Gebiet zumeist in Nord-Süd-orientierte Gräben und Horste untergliedert, sodass entlang von Verwerfungen tertiäre Schichten unterschiedlichen Alters aneinander angrenzen können. Das Tertiär wird häufig von einer geringmächtigen Deckschicht von Sedimenten des Quartärs überlagert.

Bei einem allgemein nach Norden bis Nordwesten gerichteten Einfallen der tertiären Schichten von etwa 2 - 5° wird der Untersuchungsbereich durch Schichten des **Miozäns** tmi1 – tmi6 aufgebaut. Blatt 6 in Anhang 1 vermittelt einen Überblick über die Verbreitung der miozänen Schichten unterhalb der quartären Deckschichten (abgedeckt).

Die Miozänfolge beginnt an der Basis mit der **Hochheim-Formation** oder jüngeren Formationen der **Cerithien-Schichten** (tmi1). Diese werden von Kalkstein, Algenkalk, Mikrit, Oolith und Kalksandstein dominiert, /3/. Darüber folgt die ebenfalls miozäne **Rüssingen-Formation (Inflatenschichten, tmi2)**, die aus einer im Modellgebiet etwa 15 m mächtigen Folge aus Kalkstein, Mergelstein, Algenkalk und Mergel aufgebaut ist. Diese bilden über weite Abschnitte östlich des Modellgebietes auch die Kammlage zwischen Main und Nidda. Die Inflatenschichten gelangen mit dem südöstlichen Anstieg der Miozän-Formation im Bereich des Zoologischen Gartens bzw. in Sachsenhausen an die Oberfläche, /1/. Im Vorhabensbereich liegen diese Schichten bereits in einer Tiefe von über 100 m und sind damit für die Betrachtung nicht relevant.

Darüber folgen die jüngeren Schichtglieder des Miozäns mit der **Wiesbaden- und Frankfurt-Formation (Hydrobienschichten, tmi3)** sowie der **Niederrad-Formation (Landschneckenmergel, tmi4)**. Beide bestehen meist aus einer Wechselfolge von Tonen, Mergel, Schluff, Kalkstein, Dolomitstein, Kalksand sowie Algenkalken („Frankfurter Ton“) und verfügen damit über ähnliche hydraulische Eigenschaften.

Die Hydrobienschichten zeigten sich in den charakteristischen Bohrungen meist als Wechselfolge von schluffigem Ton mit geringmächtigen Zwischenschichten aus schluffig-tonigem Sand und wenigen Kalksteinbändern.

Die Niederrad-Formation (Landschneckenmergel) unterscheidet sich lithologisch kaum von der liegenden Formation. Die schluffigen Mergeltone sind etwas heller, graugrün bis dunkelgrau, die enthaltenen Dolomit- und Kalksteinbänke etwas dünnplattiger und bestehen oft

aus Ostracodenschill und feinem Detritus. Der höhere Abschnitt des Landschneckenmergels enthält zudem pfeilerartige Algenkalkstöcke aus Kalkfällungen durch Cyanobakterien. Dazwischen finden sich Mergel mit detritischem Kalksand, -schluff und Kalksplitt, /3/.

Die Niederrad-Formation (Landschneckenmergel) ist im nördlichen Stadtgebiet weitflächig verbreitet und bildet auch den tertiären Untergrund des Grüneburgparks und des Palmengartens. In der Bohrung WestendDuo_B3 (5818-5716) an der Südseite des Campus-Geländes wurde die Basis der vorwiegend tonigen Hydrobienschichten bei 125 m Tiefe angetroffen, was etwa der Gesamtmächtigkeit des „Frankfurter Tons“ in diesem Bereich entsprechen dürfte. Auf den Landschneckenmergel entfallen davon etwa 30 - 40 m Mächtigkeit. Entsprechend dem nordwestlichen Schichteinfallen geht die Schichtmächtigkeit in südöstlicher Richtung allmählich zurück, bis die Landschneckenmergel im Bereich der Feldbergstraße schließlich auskeilen. Südlich davon stehen somit die Hydrobienschichten unter einer geringmächtigen quartären Deckschicht an der Geländeoberfläche an.

Über der Niederrad-Formation folgt eine Wechselfolge aus Ton, Schluff, Braunkohle und Mergelton der **Praunheim-Formation (Prososthenien-Schichten, tmi5)**. Diese Folge erreicht eine Mächtigkeit von bis zu 15 m. Auf etwa 6 - 8 m mächtige Schluffe und schluffige Mergel folgen 0,5 - 2 m kalkfreie tonige Schluffe bis schluffige Tone. Darauf lagert die **Ginnheimer Braunkohle** als etwa 2 m, örtlich bis zu 3 - 4 m starkes Flöz, welches in Ginnheim im 19. Jahrhundert auch abgebaut wurde. In den Bohrungen des Trassenumfelds lag die Schichtstärke örtlich auch bei weniger als 2 m und die Braunkohle kann auch gänzlich auskeilen. Den Abschluss bildet ein geringmächtiger Ton, /3/. Die Schichten streichen im nördlichen Grüneburgpark oberflächennah aus. Bei Aufschlussbohrungen in der nördlichen August-Siebert-Straße wurden in 1953 abgeteuften Aufschlussbohrungen (5817-131 bis 5817-134) schwarzes „Moor“ mit Holzresten in einer Tiefe von etwa 8 - 10 m im Wechsel mit Ton und Feinsand erbohrt, welche vermutlich eine Braunkohlefolge darstellen. Westlich des Palmengartens wurden im Zuge der früheren Trassenerkundung kleinere Vorkommen erbohrt. Generell geht die Mächtigkeit im östlichen Untersuchungsgebiet bzw. auf dem Blatt Frankfurt a. M. Ost auf 8-11 m zurück, /1/. Die Prososthenien-Schichten bilden den Abschluss der karbonatischen Ablagerungen des Tertiärs.

Die **Staden-Formation (Congerien-Schichten, tmi6)** besteht aus Ton, Sand, Schluff und Kies in einer Mächtigkeit von bis zu 21 m. Die grauweißen, teilweise auch gelb bis orange gefärbten Sande sind vollständig karbonatfrei und häufig durch Schrägschichtung gekennzeichnet. Die enthaltenen Fein- und Mittelkieslagen enthalten bis zu 8 cm große Gerölle. Die zwischengeschalteten Tone und Schluffe zeigten braungraue bis grünliche Färbungen. Die Sedimente stehen in einem etwa 50 m breiten, Nord-Süd-verlaufenden Streifen östlich des Grüneburgparks oberflächennah an. Im Bereich der Anschlussstelle BAB 66 Miquelallee ist die Schicht weitflächig verbreitet, /3/. Bei einer rd. 100 m östlich der geplanten Station

gelegenen Bohrung (102.368, GWM2/18) wurden die Sande lediglich in geringer Mächtigkeit von etwa 1 m nachgewiesen, darunter folgen bereits sandige Schluffe und schluffige Tone. Eine größere Sandmächtigkeit wurde im Norden im Bereich des Bundesbank-Areals nachgewiesen. Auf Grundlage der neuen Bohraufschlüsse erfolgte eine Kartierung der Basis sowie der Mächtigkeit der Staden-Formation, vgl. Blatt 13.

Den Abschluss bildet ein meist zersetzter **Basalt der Untermain-Basalt-Formation** des Miozäns. Dieser ist im Campus-Areal sowie der geplanten Station Campus als graue, verwitterte Deckschicht verbreitet. In der vorgenannten Bohrung wurde die Basis bei 10,4 m erreicht. In unteren Abschnitt war der Basalt nur gering zersetzt, dunkelgrau und fest bis mittelhart. Auch an der August-Siebert-Straße wurde noch eine 2 - 4 m mächtige, teils verwitterte und verlehnte Basaltdecke nachgewiesen. Eine aktualisierte Darstellung der Mächtigkeit und Verbreitung geht aus Blatt 12 hervor.

Der Basalt ist aufgrund einer gleichbleibenden chemischen Beschaffenheit und weiten Verbreitung vermutlich in einem raschen, großflächigen Erguss dünnflüssiger Lava aus einem weiter entfernten Fördergebiet entstanden, /3/. Die Tiefenlage der Schichtunterkante wurde wie bei den tieferen Schichten des Miozäns durch Verwerfungen gestört. Oftmals haben Grabenbrüche eine Konservierung der Formation ermöglicht, während in den Horststrukturen der Basalt vollständig abgetragen wurde.

Jüngere Ablagerungen der **Bockenheim-Formation** des jüngeren Miozäns finden sich vereinzelt im westlichen Untersuchungsgebiet, sind für die vorliegende Untersuchung jedoch nicht mehr von Belang.

Die im Gebiet kartierten **Verwerfungen** gehen in der Übersicht aus Blatt 6 hervor. Generell dominieren NNW-SSO-verlaufende Hauptstörungen, welche das Gebiet in Horst- und Grabenstrukturen gliedern. Westlich von Bockenheim beginnt der Niddagraben, in welchem die Schichten des Miozäns um mehrere 10er Meter gegenüber dem östlich angrenzenden Bereich abgeschoben sind. Im Rahmen der Vorerkundung der westlich verlaufenden D II-Trasse wurde im Bereich der Franz-Rücker-Allee ein Verwerfungsbetrag von 20 - 25 m festgestellt, um die der Nidda-Graben gegenüber dem östlich angrenzenden Basalt-Plateau abgesunken ist, /4/.

Das Einfallen der Abschiebungen wird in den Plänen durch eine Dreieckssignatur symbolisiert. Markant ist eine Verwerfung an der Westseite des Palmengartens, welche sich in nördlicher Richtung möglicherweise verzweigt. Hier enden die westlich ausgebildeten Schichten der Staden- und Basalt-Formation, während östlich die Niederrad-Formation oberflächennah ansteht. Die jüngeren Schichten des Miozäns treten erst östlich der den Grüneburgpark querenden Verwerfungen wieder in Erscheinung. Eine grabenartige Struktur setzt sich vom

Campus Westend nach Norden bis zum Bundesbank-Areal fort, sodass dort größere Mächtigkeiten der Staden- und Basalt-Formation vorkommen. Einen Eindruck der tektonischen Strukturen vermitteln die geologischen Schnitte in Blatt 7 - Blatt 9.

Die teils mächtigen Sande, Schluffe und Tone des **Pliozäns** sind im Wesentlichen auf den Nidda-Graben beschränkt und beginnen damit erst über 1 km westlich des Bauvorhabens. Die Mächtigkeit und Verbreitung des Pliozäns sind in Blatt 11 dargestellt.

Den Abschluss bilden die Ablagerungen des **Quartärs**. Diese umfassen im Wesentlichen geringmächtige Deckschichten aus Verwitterungslehm, Lösslehm sowie älteren Terrassenablagerungen (t5) des Mains, welche aus Sand und Kies bestehen. Die Tiefenlage der Quartärbasis auf Grundlage des ausgewerteten Bohrungsbestandes geht aus Blatt 10, die Gesamtmächtigkeit der Schichten aus Blatt 16 hervor. Für die Modellierung werden aufgrund der ähnlichen hydraulischen Eigenschaften die Schichten des Pliozäns und Quartärs zusammengefasst.

5.2 Hydrogeologischer Überblick

Die oberflächennahen künstlichen Auffüllungen und lehmigen Deckschichten bilden meist eine ungesättigte Bodenzone. Mögliche Grundwasservorkommen in den höheren Terrassenablagerungen (Untere Mittelterrasse, t6) des Mains waren im Vorfeld kaum erkundet. Ein nennenswerter Porenaquifer findet sich erst westlich des Vorhabens mit den Sanden und Kiesen der Niederterrasse im Bereich des Niddagrabens. Die meist geringmächtigen quartären Deckschichten außerhalb der Talaue weisen nur örtlich und bei größerer Mächtigkeit eine Grundwasserführung auf. Hierbei sind die dominierenden Lössbildungen nur durch eine geringe Porendurchlässigkeit gekennzeichnet. Sofern die pliozänen Sande im westlichen Untersuchungsgebiet unmittelbar unterhalb der quartären Niederterrasse abgelagert sind, ist in der Regel keine relevante hydraulische Trennung vorhanden, sodass die Potenzialunterschiede nur gering ausfallen. In diesem Fall können beide Schichten zu einem oberen Grundwasserleiter (**GWL1**) zusammengefasst werden. Die Durchlässigkeit wird dabei jedoch maßgeblich von den quartären Kiesen dominiert, die allerdings bei geringer Tiefenlage örtlich trockenfallen können.

In der Frankfurt-Formation (Hydrobienschichten) sowie der Niederrad-Formation (Landschneckenmergel) des Miozäns beschränkt sich die Wasserwegsamkeit in der Regel auf die eingeschalteten Kalksande, Algenkalke und Kalksteinbänke. Generell ist die Zuordnung korrespondierender Schichten innerhalb des Miozäns jedoch problematisch, da einzelne Bänke oft nur eine geringe laterale Erstreckung erlangen und zudem aufgrund des generellen Schichteinfallens in verschiedenen Bohrungen in unterschiedlichen Teufen angebohrt

werden können. In einigen Fällen können mehrere von geringmächtigen Tonen unterbrochene Schichten hier zu einem Aquifer zusammengefasst werden, während vereinzelt Sand- und Kalkbänke ohne größere laterale Erstreckung durch umgebende Tone hydraulisch isoliert sind. Die Konstruktion zusammenhängender Aquifere innerhalb des Miozäns stellt demnach nur einen Behelf dar, der mittels einer Zuweisung ähnlicher Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) der Aquifere und Trennhorizonte ausgeglichen werden soll. Es zeigt sich zudem, dass die im Gebiet kartierten Verwerfungen aufgrund der Unterbrechung der wasserführenden Schichten häufig eine hydraulische Barriere darstellen, sodass hier größere Potenzialsprünge auftreten können.

Die jüngeren Schichten des Miozäns sind meist durch einen kleinräumigen Wechsel von Porengrundwasserleitern und Geringleitern gekennzeichnet. Die Braunkohlen und Tone der Praunheim-Formation stellen dabei einen relevanten Nichtleiter dar, wobei diese Schichten aufgrund des größeren Anteils an organischer Substanz empfindlich auf Wasserentzug reagieren können (Setzungsproblematik). Die Basalte der Untermain-Basalt-Formation stellen einen Kluftaquifer dar, wenngleich aufgrund der vergleichsweise geringen Mächtigkeit (max. 14 m) und der tonigen Zersetzung des Basaltkörpers die Transmissivität deutlich verringert sein kann.

Die Tab. 1 vermittelt einen Überblick über die Lithologie und hydrogeologischen Eigenschaften der im Untersuchungsgebiet vertretenen Schichtenfolge.

Tab. 1: Geologische und hydrogeologische Einheiten des Untersuchungsgebietes

Stratigraphische Gliederung	Lithologie	Hydraulische Funktion
Löss/Lösslehm (Holozän/Pleistozän)	Schluff, feinsandig	überwiegend ungesättigte Bodenzone, geringe Porendurchlässigkeit
Terrassensedimente Unteren Mittelterrasse des Mains (Quartär - Pleistozän)	Sand, kiesig oder Kies, sandig, teils verlehmt	guter Porengrundwasserleiter, in verlehnten Bereichen mäßig bis gering durchlässig
Limnisch-fluviatile Wechselfolge (Tertiär – Pliozän)	Wechselfolge aus Sand, Ton, Schluff, Kies, Braunkohle, Konglomerat	GW-Geringleiter bis sehr guter Porengrundwasserleiter (GWL1)
Bockenheimer-Formation (Bockenheimer Schichten) (Tertiär – Miozän)	Sand, Schluff, Ton, Kies	GW-Nichtleiter bis gut durchlässiger Porengrundwasserleiter
Untermain-Basalt-Formation (Tertiär – Miozän)	Tholeiitischer Basalt, Olivinbasalt	Gut durchlässiger Kluftgrundwasserleiter, im verwitterten Zustand gering durchlässig
Staden-Formation (Congerien-Schichten) (Tertiär – Miozän)	Ton, Sand, Schluff, Kies	GW-Geringleiter bis gut durchlässiger Porengrundwasserleiter

Stratigraphische Gliederung	Lithologie	Hydraulische Funktion
Praunheim-Formation (Prososthenien-Schichten) (Tertiär – Miozän)	Ton, Schluff, Braunkohle, Mergelton	GW-Geringleiter
Niederrad-Formation (Landschneckenmergel) (Tertiär – Miozän)	Wechselfolge aus Ton, Mergel, Schluff, Kalkstein, Dolomitstein und Kalksand	GW-Geringleiter bis guter Po- ren-/ Kluftgrundwasserleiter mit geringer Vertikaldurchlässigkeit
Frankfurt-Formation / Wiesbaden-Formation (Hydrobienschichten) (Tertiär - Miozän)	Wechselfolge aus Ton, Mergel, Schluff, Kalkstein, Dolomitstein und Kalksand	GW-Geringleiter bis guter Po- ren-/ Kluftgrundwasserleiter mit geringer Vertikaldurchlässigkeit
Inflatenschichten (Tertiär - Miozän)	Kalkstein, Mergelstein, Algenkalk und Mergel	guter bis sehr guter Kluftgrund- wasserleiter mit geringer Verti- kaldurchlässigkeit (GWL2)
Cerithienschichten (Tertiär – Oligozän/Miozän)	Kalkstein, Mergelstein, Algenkalk und Mergel	guter bis sehr guter Kluftgrund- wasserleiter mit geringer Verti- kaldurchlässigkeit (GWL2)

Im Vorhabensbereich wurden folgende Grundwasservorkommen identifiziert:

- Porengrundwasser der quartären Deckschichten. Deren Vorkommen hängt stark von der Mächtigkeit der Deckschichten ab. Bei einer Mächtigkeit <3 m fallen diese Schichten häufig trocken oder eine Wasserführung ist lediglich an der Basis in Phasen erhöhter Grundwasserneubildung nachweisbar.
- Kluftgrundwasser an der Basis des Basaltvorkommens. Aufgrund der geringen Mächtigkeit und der überwiegend durchlässigen Beschaffenheit der liegenden Staden-Formation ist in den Randlagen mit einer geringen grundwassererfüllten Mächtigkeit zu rechnen. In den zentralen Lagen – so an der vorgenannten Messstelle GWM2/18 – stellt bei einem Flurabstand von rd. 6 m der untere Teil des Vorkommens ein lokal begrenzt ergiebiges Grundwasservorkommen dar.
- Porengrundwasser in der Staden-Formation. Dieses kann mit dem überlagernden Kluftgrundwasser der Basalt-Deckschicht in hydraulischer Verbindung stehen.
- In der Niederrad-Formation sowie den Hydrobienschichten ist die Grundwasserführung auf die Kalkbänke, Algenkalke und Kalksande beschränkt. Dort können jedoch durchaus größere Grundwassermengen in Erscheinung treten. Eine erhöhte Durchlässigkeit ist insbesondere den verkarsteten Bereichen zuzuordnen.

5.3 Aquiferzuordnung der Grundwassermessstellen

Die Kenndaten der seit längerem bestehenden sowie der in 2022 neu errichteten Grundwassermessstellen gehen aus der Tabelle in Anhang 3, die Schichtprofile und Ausba Zeichnungen aus Anhang 4 hervor. Aufgrund der Stockwerksgliederung des Untergrundes wurden je Bohrlokation in der Regel zwei Grundwasserleiter durch Messstellen erschlossen. Dazu wurden unmittelbar nebeneinander zwei Bohrungen niedergebracht und mittels PVC-Filter und Vollrohren ausgebaut. Sofern der Schichtaufbau dies zuließ und eine ausreichende Strecke für eine Ringraumabdichtung zur Verfügung stand, wurden in Einzelfällen zwei Rohrtouren in einer Bohrung untergebracht. Eine Zuordnung der neuen Messstellen zu den jeweils erschlossenen Grundwasserleitern geht in der Übersicht aus Tab. 2 hervor.

Tab. 2: Geologische Zuordnung der 2022 errichteten GW-Messstellen

Name	Filter Oberkante [m u. GOK]	Filter Unterkante [m u. GOK]	GWL	Name	Filter Oberkante [m u. GOK]	Filter Unterkante [m u. GOK]	GWL
VGF F01/22	5,6	8,6	Quartär	VGF T01/22	19,7	30,7	Niederrad Formation
VGF F02/22	11,0	14,0	Staden-Formation	VGF T02/22	24,2	30,2	Niederrad Formation
VGF F03/22	7,6	18,6	Niederrad Formation	VGF T03/22	28,9	37,9	Niederrad Formation
VGF F04/22	2,5	4,5	Quartär	VGF T04/22	2,0	31,0	Niederrad Formation
VGF F05/22	2,5	6,5	Quartär/Niederrad-F.	VGF T05/22	2,2	31,2	Niederrad Formation
VGF F06/22	6,4	11,4	Niederrad Formation	VGF T06/22	16,1	18,1	Niederrad Formation
VGF F07/22	3,0	5,0	Staden-Formation	VGF T07/22	8,0	17,0	Niederrad Formation
VGF F08/22	5,8	9,8	Staden-Formation	VGF T08/22	13,4	15,4	Niederrad Formation
VGF F09/22	6,2	9,2	Basalt	VGF T09/22	15,2	23,2	Niederrad Formation
VGF F10/22	5,1	6,1	Staden-Formation	VGF T10/22	14,2	20,2	Niederrad Formation
VGF F11/22	3,1	6,1	Quartär/Basalt	VGF T11/22	13,1	18,1	Staden-Formation
VGF F12/22	5,0	10,0	Niederrad Formation	VGF T12/22	19,0	28,0	Niederrad Formation
VGF F13/22	3,0	6,0	Quartär	VGF T13/22	21,5	28,5	Niederrad Formation
VGF F14/22	4,1	6,1	Quartär	VGF T14/22	2,2	24,2	Niederrad Formation
VGF F15/22	3,8	7,8	Staden-Formation	VGF T15/22	17,6	27,6	Niederrad Formation
VGF F16/22	5,1	7,1	Staden-Formation	VGF T16/22	14,4	18,4	Niederrad Formation
VGF F18/22	2,8	4,8	Quartär	VGF T18/22	8,0	13,0	Staden-Formation
VGF F19/22	1,7	6,7	Quartär	VGF T19/22	9,2	15,2	Staden-Formation
VGF F20/22	4,6	7,6	Quartär	VGF T20/22	18,7	23,7	Niederrad Formation
VGF F21/22	5,5	8,5	Staden-Formation	VGF T21/22	14,0	17,0	Niederrad Formation
VGF F22/22	3,0	6,0	Quartär	VGF T22/22	26,0	38,0	Niederrad Formation
VGF F24/22	8,2	9,2	Staden-Formation	VGF T24/22	18,3	25,3	Niederrad Formation
				VGF T25/22	1,2	12,2	Staden-Formation
VGF F26/22	3,9	7,9	Basalt	VGF T26/22	13,6	17,6	Niederrad Formation
VGF F27/22	3,1	5,1	Quartär	VGF T27/22	11,5	21,5	Niederrad Formation
VGF F28/22	3,2	6,2	Niederrad Formation	VGF T28/22	9,6	19,6	Niederrad Formation
VGF F29/22	4,1	6,1	Niederrad Formation	VGF T29/22	16,7	23,7	Niederrad Formation
VGF F30/22	1,7	3,7	Quartär	VGF T30/22	11,2	18,2	Niederrad Formation
VGF F31/22	2,1	4,1	Quartär	VGF T31/22	13,1	18,1	Niederrad Formation
VGF F32/22	2,2	4,2	Quartär	VGF T32/22	12,0	18,0	Niederrad Formation
VGF F33/22	4,5	8,5	Staden-Formation	VGF T33/22	15,5	20,5	Niederrad Formation
VGF F34/22	2,5	4,5	Quartär	VGF T34/22	8,9	10,9	Staden-Formation
				VGF T35/22	16,0	18,0	Niederrad Formation
VGF F36/22	9,2	14,2	Staden-Formation	VGF T36/22	18,0	23,0	Niederrad Formation
VGF F37/22	2,1	3,1	Staden-Formation	VGF T37/22	11,2	20,2	Niederrad Formation

Q:\Projekte\Fm\Ginnheim_D2\excel\Variantenbetrachtung\Stamm_Messstellen_Ginnheim_Stamm_VGF.xlsx

Bei fünf Doppelmessstellen war keine wasserführende Deckschicht vorhanden, sodass die Filterstrecken in unterschiedlichen Tiefenlagen der Niederrad-Formation angeordnet wurden.

5.4 Untergrundverhältnisse im Trassenbereich

5.4.1 Variante 1a

Die Situation im Tunnelverlauf wird mittels eines geologischen Schnittes veranschaulicht, Blatt 7. Ausgehend von der Bockenheimer Warte reicht der Tunnel oB bis in die Schichten der Niederrad-Formation (Landschneckenmergel). Diese stellen an der Bohrung VGF_T01/22 eine mächtige Abfolge aus dunkelgrauen bis grüngrauen, kalkigen Tonen dar, welche nur vereinzelt Bänke aus grauem oder dunkelgrauem Mergel- oder Kalkstein aufweist. Das überlagernde Quartär ist im südlichen Abschnitt mit 6 - 8 m durch eine erhöhte Mächtigkeit und als sandig-steiniger Kies auch durch eine erhöhte Durchlässigkeit gekennzeichnet.

Im Bereich der Bohrung VGF_T02/22 unmittelbar westlich der Trasse wird eine Tiefscholle tangiert, in der oberflächennah noch stark zersetzte Reste einer Basaltdecke erbohrt wurden. Die Staden-Formation ist zunächst als feinsandiger Ton ausgebildet und geht erst in tieferen Abschnitten in einen schluffigen Sand über. In einer Tiefe von 14,5 - 16,5 m wurde schließlich Braunkohle der Praunheim-Formation angetroffen, gefolgt von zunehmend kalkigen Tonen und Mergeln. In nördlicher Richtung steigt die Schichtenfolge stufenweise an, sodass bei VGF_T27/22 die Basaltdeckschicht nicht mehr nachweisbar ist und bei VGF_T28/22 auch die Staden- und Praunheim-Formation vollständig fehlen. Auch die quartären Deckschichten treten im Bereich der Miquelallee nur noch als geringmächtige (<2 m) Wechselfolge aus Schluff und Sand, selten sandigem Kies in Erscheinung. Der allmählich ansteigende Tunnel verläuft somit nördlich der VGF_T27/22 vorwiegend in den Mergeln, Kalksanden und vereinzelt Kalksteinbänken der Niederrad-Formation. Im Bereich der Bohrung VGF_T33/22 stehen oberflächennah (bis rd. 8 m) wiederum schluffige Feinsande der Staden-Formation an, gefolgt von Braunkohle und Ton der Praunheim-Formation. Die Verbreitungsgrenze der Staden-Schichten ist unmittelbar südlich der oberirdischen Station „Botanischer Garten“ zu erwarten, vgl. Blatt 13.

Im Bereich der Anschlussstelle Miquelallee der BAB66 verbleibt die Gleisgradienten in geringer Tiefenlage und tangiert lediglich die quartären Deckschichten, welche bis rd. 4 m als sandiger und steiniger Kies und somit als gut durchlässiger Porengrundwasserleiter ausgebildet sind. Darunter folgen wiederum Schluffe und Feinsande der Staden Formation, welche im Umfeld der Bundesbank einen relevanten Grundwasserleiter bilden.

5.4.2 Variante 1d

Die zwei maschinell aufgefahrenen Tunnelröhren verbleiben wahrscheinlich knapp östlich der im Vorkapitel beschriebenen Tiefscholle, sodass die Deckschichten aus Basalt und Sanden der Staden-Formation nicht oder allenfalls randlich tangiert werden. Unterhalb des Palmengartens verlaufen die Tunnel in den Schichten der Niederrad-Formation. Diese werden bei Bohrung VGF_T13/22 bis rd. 23 m Tiefe durch geringdurchlässige dunkelgraue Tone und Mergel dominiert. Erst darunter folgen bei geringerem Verwitterungsgrad wasserführende Lagen aus Kalkstein sowie Kalkschill.

Im Bereich des geplanten Notausstiegs wurden bei VGF_T03/22 zunächst wasserführende Kalksande und Kalke erbohrt, welche einen Mix aus einem Poren- und Kluftgrundwasserleiter darstellen und mittels der flachen Messstelle VGF_F03/22 erschlossen wurden. Darunter dominieren graue Tone, welche von kleineren Kalkbänken unterbrochen werden. Im Bereich des geplanten Rampenbauwerks zeigt VGF_T31/22 oberflächennah eine Wechselfolge aus Algenkalk(grus), Schluff und Kalkstein, welche als charakteristisch für die Niederrad-Formation beschrieben werden können. Unterhalb von 20 m Tiefe nimmt der Anteil der Tone deutlich zu. Der weitere, nördliche Verlauf der Trasse entspricht der Variante 1a.

Quartäre Deckschichten spielen im Palmengarten eine eher geringe Rolle. So beschränken sich diese bei VGF_T03/22 auf eine künstliche Auffüllung von <2 m Mächtigkeit. Bei VGF_T30/22 wurde ein rd. 2 m mächtiger Lösslehm erbohrt, welcher keine Wasserführung aufwies.

5.4.3 Variante 3i

Wie in der Var. 1d verläuft der Tunnel bei einer fallenden Gradienten zunächst ausschließlich in den Schichten der Niederrad-Formation. Im nordöstlichen Verlauf tauchen die Tunnel in größere Tiefe ab, sodass möglicherweise auch die Schichten der Frankfurt-Formation (Hydrobion-Schichten) tangiert werden. Der Notausstieg an der Siesmayer-Straße liegt mit VGF_T04/22 in einem Bereich mit mächtigen grauen Tonen, welche erst unterhalb von 15 m Tiefe von Kalksteinen und Algenkalken unterbrochen werden. Auch die nördlich im Botanischen Garten liegende VGF_T12/22 wird durch dunkelgrüngraue Tone dominiert, welche in den kalkigen Zwischenlagen nur eine geringe Grundwasserführung zulassen.

Mit dem Anstieg der Tunnelgradienten im östlichen Grüneburgpark werden zunehmend höhere Schichten der Niederrad-Formation durchschnitten, Blatt 8. Diese sind bei VGF_T06/22 und VGF_T07/22 weiterhin durch kalkige, grüngraue Tone und Schluffe gekennzeichnet, welche nur vereinzelt von dünnen Sandlagen und Kalkbänken durchzogen

werden. Im Bereich der August-Siebert-Straße und östlich davon treten dann oberflächennah Deckschichten der Praunheim- und Staden-Formation in Erscheinung. Braunkohlen werden hier nur vereinzelt und in geringer Mächtigkeit nachgewiesen.

Im Bereich der Station „Campus Westend“ ist im Bereich einer tief eingesunkenen Scholle eine teils erhebliche Mächtigkeit der Basalte nachweisbar, Blatt 9. In VGF_T26/22 wurde von 2,6 - 7,7 m ein grusig verwitterter, braungrauer bis schwarzgrauer Basalt erbohrt. In der benachbarten VGF_T10/22 ist dieser nahezu vollständig zu einem schluffigen, braungrauen Ton zersetzt, während in der nördlich gelegenen VGF_T35/22 bei 1,6 - 9,7 m ein nahezu unverwitterter, grauer Basalt erbohrt wurde. Es ist nicht auszuschließen, dass sich die Bohrung VGF_T10/22 in einer Verwerfungszone befindet, in der die Schichtenfolge erheblich gestört ist. Eine Grundwasserführung beschränkt sich bei VGF_T35/22 auf die liegenden Fein- und Mittelsande der Staden-Formation, welche bei 18 m unmittelbar in eine 10 cm dünne Braunkohlelage und Tone der Praunheim-Formation übergehen. Die Stationsbau-grube verbleibt voraussichtlich knapp oberhalb der Niederrad-Formation.

Quartäre Deckschichten beschränken sich im Campus-Areal auf eine mit bis zu rd. 3 m eher geringmächtige, meist trockene Deckschicht aus künstlichen Auffüllungen sowie Schluffen und Sanden.

Bis zur Miquelallee tauchen die Tunnelröhren allmählich unter die Sande der Staden-Formation und das hier wieder etwas mächtigere Braunkohleflöz ab, Blatt 9. Erst unterhalb der Miquelanlage werden die Fein- und Mittelsande der Staden-Formation tangiert, welche hier den oberflächennahen Grundwasserleiter darstellen. Das Braunkohleflöz der Ginnheimer Braunkohle erreicht bei VGF_T19/22 im Bereich des geplanten Rampenbauwerks eine maximale Mächtigkeit von 1,8 m. In nordöstlicher Richtung ist die Verbreitung des Flözes begrenzt. So ist dieses bei VGF_T20/22 am Geldmuseum nicht mehr ausgebildet.

5.5 Niederschlagsentwicklung

Die Jahresniederschlagssumme der Messstation Frankfurt-Westend lag 2023 mit 791,8 mm deutlich über der langjährigen mittleren Jahresniederschlagssumme der Jahre 1991 - 2020 (644,2 mm). Auch die im Vorjahr registrierte Menge (578 mm) wurde deutlich übertroffen.

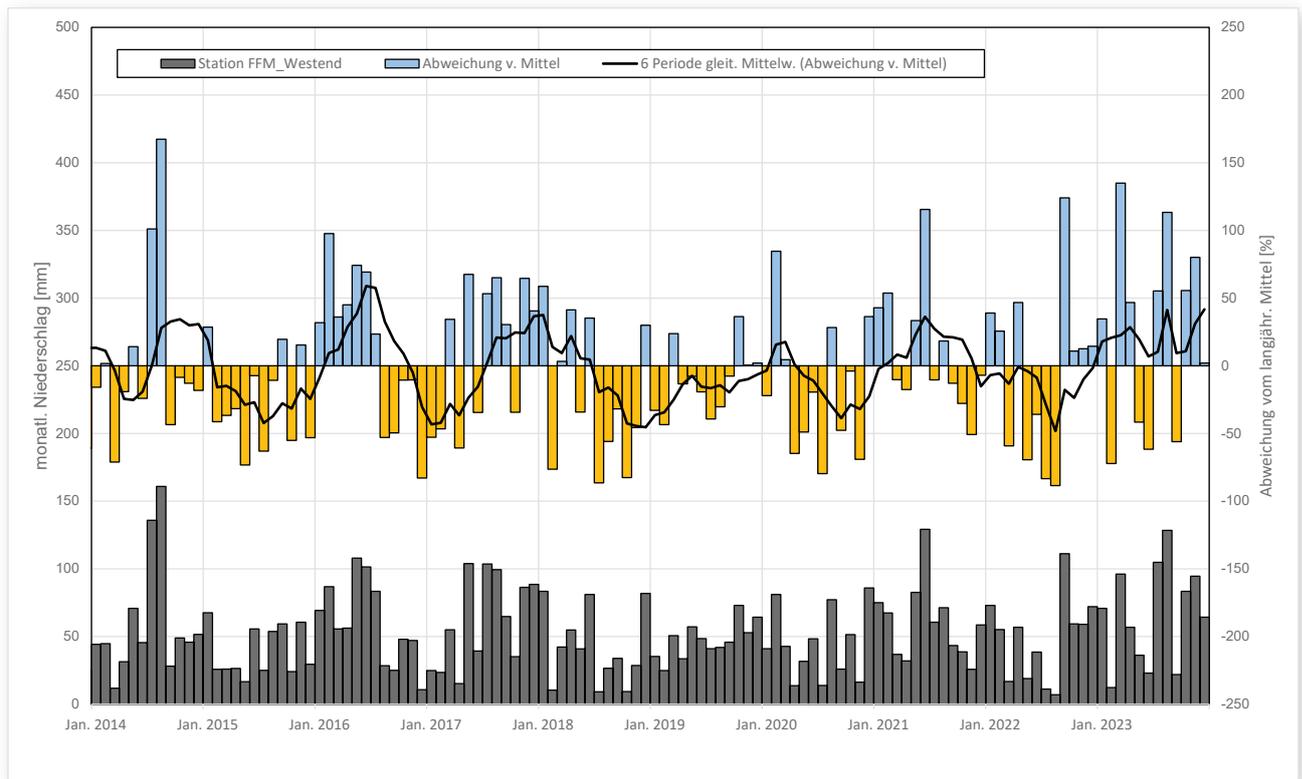


Abb. 3: Monatliche Niederschläge Station Frankfurt-Westend 2014–2023

Auch die Niederschlagssumme des Winterhalbjahres 2022/2023 lag mit 367 mm bereits über dem langjährigen Mittelwert (1991 - 2020: 291 mm), vgl. Abb. 4, sodass eine überdurchschnittliche Grundwasserneubildung zu erwarten war. Während Mai und Juni 2023 noch recht trocken ausfielen, waren die Monate Juli und August ausgesprochen nass ausgefallen. Allgemein tragen die Niederschlagsmengen des Sommerhalbjahres aufgrund der stärkeren Verdunstung bzw. Evapotranspiration sowie einem stärkeren Direktabfluss bei Starkregenereignissen (Gewitter) jedoch nur untergeordnet zur Grundwasserneubildung bei. Die anhaltenden ergiebigen Niederschläge führten spätestens ab November 2023 zu einem merklichen Anstieg der Grundwasserneubildung.

5.6 Grundwasserstandsentwicklung

Die seit Beginn des Grundwassermonitorings aufgezeichneten Grundwasserstände wurden in Form von Ganglinien dargestellt, Anhang 5. Für die langjährige Entwicklung vor 2022 wurden ergänzend die Daten von Bestandsmessstellen herangezogen.

Im südlichen Abschnitt der Zeppelinallee zeigte sich 2022 bis Herbst 2023 nur eine vergleichsweise geringe Potenzialschwankung in den Messstellen der Niederrad-Formation. Der im Frühjahr 2023 verzeichnete Anstieg beschränkte sich meist auf Beträge von bis zu

0,2 m. Erst die intensiven Niederschläge Ende 2023 bewirkten einen moderaten Anstieg von 0,2 - 0,4 m. Auch im Quartär, welches bei VGF_F01/22 in größerer Mächtigkeit vorkommt, war die Amplitude mit bis zu rd. 0,4 m vergleichsweise gering⁴.

Im Palmengarten zeigten die Tertiär-Messstellen VGF_T03/22 und VGF_T22/22 trotz der erhöhten Neubildung lediglich eine Amplitude von rd. +/- 0,2 m. Die quartären Deckschichten verfügen nur über eine geringe Mächtigkeit, sodass auch die Grundwasserstandsschwankung gering ausfällt und keinen ausgeprägten Jahresgang erkennen lässt.

Dies gilt auch für den südlichen Abschnitt der Miquelallee auf der Nordseite des Palmengartens bzw. an der Westflanke des Botanischen Gartens. Die vergleichsweise geringe Amplitude der in der Niederrad-Formation ausgebauten tiefen Messstellen steht wahrscheinlich mit einer guten hydraulischen Anbindung der gesamten Festgesteinsscholle nach Süden in Zusammenhang. Dementsprechend zeigen sich in diesem Umfeld recht tiefe Potenziale des Kluftaquifers. Die geringe Schwankung der geringmächtigen quartären Deckschichten hingegen beruhen vermutlich auf einer Anbindung an die örtlichen Vorflutverhältnisse. Örtlich sind die flachen Messstellen hier auch gänzlich trocken. Abweichend davon zeigt die Messstelle VGF_F05/22 mit über 3 m einen vergleichsweise großen Schwankungsbereich.

Im südlichen Grüneburgpark (VGF_T04/22, VGF_T06/22) ist der Anstieg im miozänen Festgestein im Frühjahr 2024 auf etwa 0,5 m begrenzt und auch in den geringmächtigen Deckschichten zeigt sich nur ein geringer bis moderater Anstieg.

Eine deutlich größere Amplitude mit einer jahreszeitlichen Schwankung von über +/- 1,5 m weist allein Messstelle VGF_F05/22 auf der Südseite des Botanischen Gartens auf. Sie ist bis zu einer Tiefe von 6,5 m in vorwiegend bindigen Deckschichten des miozänen Verwitterungshorizonts ausgebaut, welche durch eine geringe Transmissivität gekennzeichnet sind. Offenbar führt die verstärkte Grundwasserneubildung des Winterhalbjahrs 2023/2024 zu einer Vernässung des oberflächennahen Verwitterungshorizonts.

Eine stärkere Abhängigkeit von der Neubildung mit einer jahreszeitlich ausgeprägten Schwankung von über 1 m zeigen die im Südosten des Grüneburgparks gelegene Messstelle VGF_T07/22 und VGF_T08/22. Maßgeblich für die von den westlich positionierten Messstellen abweichende Entwicklung ist eine hydraulisch wirksame Verwerfung, welche das Gebiet südwestlich von VGF_T07/22 quert. Innerhalb der durch Verwerfungen gegliederten nordöstlichen Scholle zeigt sich hingegen ein recht gleichförmiger Ganglinienverlauf.

⁴ Hinweis: Im Zeitraum Dezember 2022 – Februar 2023 wurden teils um bis zu 3 m höhere Wasserstände gemessen. Diese erscheinen nicht plausibel und beruhen

An der Station „Campus-Westend“ ist die Entwicklung in der Niederrad-Formation mit etwas mehr als 1 m Potenzialschwankung recht einheitlich. Das deutlich höhere Grundwasserniveau der Basalt-Deckschicht ist durch heterogene Verhältnisse gekennzeichnet, welche auf einem unterschiedlichen Zersetzungsgrad beruhen dürften. So kann die Amplitude dort bei VGF_F09/22 mehr als +/- 1 m betragen, während bei VGF_F10/22 lediglich rd. +/- 0,5 m in Erscheinung treten. Kurzzeitige Veränderungen nach Regenfällen lassen auf eine recht geringe Transmissivität und ein geringes Speichervermögen der Basalte schließen.

In der Miquelanlage sind die Sande der Staden-Formation maßgeblicher Grundwasserleiter. Diese weisen im Ostteil bei einer Schwankung von etwa 1 m eine recht gleichförmige und zeitlich verzögerte Ganglinie auf. Die verzögerte Reaktion auf die Grundwasserneubildung weist auf eine langsamere Passage der Deckschichten hin. Im Westteil der Miquelanlage geht die Schwankungsbreite auf < 1 m zurück, was auf die teils tiefen Geländeeinschnitte im Bereich der Anschlussstelle der BAB 66 und ein generelles Auskeilen der Staden-Schichten zurückgeführt werden kann.

5.7 Grundwassergleichenpläne und Flurabstände

Für die Darstellung der Grundwasserpotenziale und der Strömungssituation wird auf die monatliche Stichtagsmessung vom 08./09.11.2023 zurückgegriffen. Ergänzt wurden die Daten durch externe Wasserstandsmessungen vom 27.10.2023 auf dem Areal der Deutschen Bundesbank.

5.7.1 Quartär und Pliozän – GWL1

In den quartären Deckschichten ist eine nachweisbare Grundwasserführung auf Bereiche größerer Mächtigkeit begrenzt. Der Grundwassergleichenplan in Blatt 14 zeigt im Palmengarten und im südlichen Grüneburgpark eine nach Süden gerichtete Fließrichtung, während der nördliche Park in den geringmächtigen Deckschichten überwiegend trocken erscheint. Eine enge Scharung der Isolinien in den Randlagen beruht dabei auf einer geringen Wasserführung, welche vorwiegend der Morphologie der Quartärbasis folgt. Im Gegensatz dazu ist im westlichen Untersuchungsgebiet mit dem Niddagraben eine deutlich größere Transmissivität vorhanden, welche sich in einem geringen hydraulischen Gradienten widerspiegelt. Kleinere Grundwasservorkommen finden sich in Ost-West-verlaufenden Rinnenstrukturen entlang der Miquelallee und Wilhelm-Epstein-Straße (ehemaliger Marbach), in denen das oberflächennahe Grundwasser offensichtlich durch die dort verlaufenden Hauptsammler gefasst wird.

Die grundwassererfüllte Mächtigkeit im quartären und pliozänen Porengrundwasserleiter wurde aus der Differenz zwischen Grundwasserstand und der Basis des Quartärs bzw. Pliozäns (im Westen) berechnet, Blatt 15. Es bestätigt sich eine geringe und lückenhafte Grundwasserführung südlich der Trassenvarianten. Erst südlich des Kettenhofwegs nimmt die Mächtigkeit allmählich auf >3 m zu, ebenso in der Nidda-Talau. Im Bereich der verschiedenen optionalen Baugruben der Trassenvarianten spielt das oberflächennahe Grundwasser des Quartärs kaum eine Rolle. Im Grüneburgpark beschränkt sich eine nennenswerte Wasserführung auf den Südteil, jedoch kann nördlich davon in lokalen Rinnen oder oberflächennah nach stärkeren Regenfällen Grundwasser auf der Oberfläche der tonigen Niederrad- und Praunheim-Formation in Erscheinung treten.

Der **Grundwasserflurabstand** ist die Differenz zwischen der Geländeoberfläche (Blatt 10) und dem Grundwasserstand im oberflächennahen Grundwasserleiter (GWL1, Blatt 14). Die Abbildung Blatt 21 zeigt einen mit <3 m geringen Flurabstand im nördlichen Palmengarten sowie im Umfeld des Weihers im Südwesten. Ebenso ist im Falle einer Wasserführung der quartären Deckschichten im südlichen Grüneburgpark ein geringer Flurabstand zu konstatieren. In den übrigen Bereichen dominieren Werte von 3 - 6 m. In den „trockenen“ Bereichen ist an der Basis der quartären Deckschichten in der Regel kein Grundwasser messbar.

5.7.2 Basalt- und Staden-Formation

Aufgrund der begrenzten Verbreitung und häufig auch der hydraulischen Wechselwirkung werden die jüngeren miozänen Schichten oberhalb des Stauhorizonts der Praunheim-Formation gemeinsam betrachtet. Der Grundwassergleichenplan lässt im Bereich des Campus Westend ein von einer Hochlage (117 mNHN) ausgehende Strömung nach Süden und Westen erkennen, Blatt 17. An den Verbreitungsgrenzen der Staden-Formation tritt das Grundwasser in die geringmächtigen quartären Deckschichten über oder wird über Kanäle gefasst.

In Bockenheim dominiert ebenfalls eine nach Südwesten bis Westen gerichtete Fließrichtung, wobei zwischen den Teilschichten auch größere Potenzialdifferenzen in Erscheinung treten können.

Die Plandarstellung der grundwassererfüllten Mächtigkeit zeigt auf, dass für die Trassenvariante 1a im Bereich der Zeppelinallee das Grundwasser der Staden-Formation auf einem kurzen Abschnitt tangiert wird, Blatt 18. In den nördlichen Abschnitten der Varianten 1a und 1d verbleibt die Untertunnelung der BAB 66 oberhalb des Grundwasserspiegels, vgl. Schnitt 1 Blatt 7. Im Gegensatz dazu verläuft der Tunnel der Variante 3i über größere Strecken im Verbreitungsgebiet der Staden- und Basalt-Formation. Die Baugrubensohle der Station „Campus Westend“ reicht partiell bis unter die Basis bzw. in die Praunheim-Formation, sodass das Grundwasservorkommen dort vollständig durchschnitten wird, vgl. Schnitt 3 Blatt 9.

Eine große grundwassererfüllte Mächtigkeit ist im Bereich Bockenheim (Franz-Rückert-Allee) sowie auf dem Areal der Deutschen Bundesbank mit jeweils mehr als 10 m zu ersehen, Blatt 18.

Der Grundwasserflurabstand in den jüngeren miozänen Schichten liegt meist bei über 5 m. Geringere Werte finden sich in den Randlagen des Vorkommens wie westlich der August-Siebert-Straße oder im Bereich der künstlich geschaffenen Senke des Teiches in der Miquelanlage. Im nördlichen Grüneburgpark geht der Flurabstand an der Messstelle VGF-F33/22 auf <4 m zurück, Blatt 22.

5.7.3 Niederrad- und Frankfurt-Formation

Im Gegensatz zu den jüngeren Schichten des Miozäns ist der Kluftgrundwasserleiter der Niederrad-Formation (Landschneckenmergel) und der Frankfurt-Formation (Hydrobienschichten) flächendeckend im Untersuchungsgebiet verbreitet. Das Grundwasser bewegt sich hier ausschließlich in den durchlässigen Kalksteinbänken, Riffkalken und Kalksandlagen. Das Grundwasser ist überwiegend gespannt, d.h. es werden die angebohrten Druckwasserstände (Standrohrspiegelhöhen) der wasserführenden Teilschichten dargestellt, welche deutlich höher sein können als die Schichtoberkanten.

Generell folgen die Grundwasserpotenziale der Geländemorphologie von Nordost nach Südwest. An den größeren Verwerfungen werden größere Potenziälsprünge ersichtlich, welche auf einer Unterbrechung der wasserführenden Kalkbänke und Kalksandlagen beruhen. Auch eine Entwässerung entlang einzelner NNW-SSE-verlaufender Verwerfungszonen ist vorstellbar. Besonders auffällig ist ein Potenziälsprung zwischen den Messstellen VGF_T35/22 mit 112,9 mNHN und VGF_T10/22 mit 104,5 mNHN nördlich der optionalen Station Campus-Westend, welche auf einer drainierenden Wirkung der dort verlaufenden Verwerfungszone beruhen könnte.

Im Grüneburgpark ist eine Differenz zwischen VGF_T07/22 (103,3 mNHN) und VGF_T06/22 (97,0 mNHN) augenfällig. Die Messstellen werden von einer Verwerfung gequert, welche offenbar den nordöstlichen Parkbereich vom südwestlichen hydraulisch trennt. Auf der Ostseite steigen die Potenziale von rd. 103,5 mNHN im Süden allmählich auf 106,9 mNHN im Bereich der Anschlussstelle Miquelallee an, Blatt 20.

Südwestlich der den Grüneburgpark querenden Störung bis zum Palmengarten sind die Druckpotenziale des Landschneckenmergels mit 97,4 - 97,7 mNHN vergleichsweise konstant, was auf wirksame hydraulische Verbindungen oder Karsthohlräume innerhalb der tektonischen Horststruktur schließen lassen. Erst am Nordrand des Palmengartens dominieren wieder etwas höhere Potenziale >100 mNHN. Auch westlich der Zeppelinallee sind die hyd-

raulischen Gradienten mit 96,3 - 96,9 mNHN sehr gering. Insgesamt bewirken die Verwerfungen einen treppenartigen Verlauf der generell von Nordost nach Südwest gerichteten Grundwasserströmung im miozänen Festgestein.

Die Flurabstände übersteigen überwiegend Werte von 5 m, vgl. Blatt 23. Geringere Werte zeigen sich in der Senke des Palmengarten-Weiher sowie in dem tiefen Einschnitt im Südosten der Anschlussstelle Miquelallee, welcher die Grundwasseroberfläche annähernd tangiert. In den morphologisch höheren Lagen unterhalb der Basaltdecken übersteigen die Flurabstände meist Werte von 10 m.

5.8 Bemessung der hydraulischen Kenndaten

5.8.1 Auswertung der Pumptests

In einem ersten Schritt erfolgte eine Auswertung der beim **Klarpumpen der neuen Messstellen** gewonnenen, zumeist instationären Werte. Diese können bei Angabe einer Förderrate und des abgesenkten Grundwasserstands zumindest orientierend herangezogen werden und liefern erste Erkenntnisse über die zu erwartende Förderleistung.

Ein Teil der Messstellen war zum Untersuchungszeitpunkt trocken oder wies beim Klarpumpen keinen für die Bemessung ausreichenden Grundwasserzutritt auf, sodass dort auf eine Bewertung verzichtet wurde. Die Berechnung der Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) erfolgte mittels des Näherungsverfahrens nach HÖLTING (1989)

$$k_f = \frac{Q}{M \cdot s} [m/s]$$

mit Q = Förderrate in m^3/s
 M = Mächtigkeit des erschlossenen Grundwasserleiters in m
 s = Absenkung der Standrohrspiegelhöhe gegenüber dem Ruheniveau in m

Eine Zusammenstellung der Ergebniswerte geht aus einer Tabelle in Anhang 10 sowie Tab. 3 hervor.

Tab. 3: Ergebnisse des Klarpumpens an GW-Messstellen, k_f -Werte in m/s

Formation	Anzahl Werte	Min-Wert	Max-Wert	Mittelwert
Quartär	5	5,8E-06	1,3E-03	4,2E-04
Basalt	2	7,2E-06	1,8E-05	1,3E-05
Staden-Formation	10	2,3E-05	1,1E-04	4,9E-05
Praunheim-Formation	0	GW-Stauer		
Niederrad-Formation (Landschneckenmergel)	31	4,1E-07	5,1E-04	7,1E-05

Dabei bleibt zu berücksichtigen, dass an einzelnen Messstellen die gewinnbaren Mengen nicht für eine Auswertung ausreichen und folglich die mittleren k_f -Werte etwas geringer ausfallen als dargestellt.

Für die Erkundung der Durchlässigkeit der für eine spätere Wasserhaltung sowie der Bewertung der Stauwirkung der Bauwerke maßgeblichen Schichten wurden **7 Pumpversuche** an Grundwassermessstellen ausgeführt. Eine Vorauswahl der Messstellen erfolgte auf Grundlage der Ergebnisse des Klarpumpens, Anhang 10. Die Versuche erfolgten im August/September 2023 jeweils über eine Dauer von drei Stunden mit anschließender Messung des Wiederanstiegs. Aufgrund der größeren Relevanz für die Modellierung erfolgten die Versuche vorwiegend in Messstellen, welche in der Niederrad-Formation verfiltert sind. Allein Messstelle VGF_T18/22 ist in den Sanden der Staden-Formation ausgebaut, welche den maßgeblichen Aquifer im Bereich der Miquelanlage darstellt. Die Auswertung der instationären Pumpversuchsdaten erfolgte durch das Büro Geotechnik Lehr mittels der Verfahren nach Boulton, Moench, Double Porosity und Theis. Die Randbedingungen und Ergebnisse sind in Anhang 7 zusammengestellt.

Tab. 4: Pumpversuche 2022, Ermittlung von k_f -Werten in m/s

Messstelle	Aquifer	Ruhe-Wst.	Wst.	mittl. Förderrate	kf nach	kf nach	kf nach	mittlerer kf-Wert	
		[m u. MP]	abgesenkt		Double Porosity	BOULTON	Moench Kluftaquifer		THEIS
VGF T18/22	Staden-F.	7,44	9,47	2,96	1,5E-04	1,5E-04	1,5E-04	1,5E-04	1,5E-04
VGF T03/22	Niederrad-F.	7,99	8,73	1,19	3,9E-04	3,9E-04	1,6E-04	3,9E-04	3,3E-04
VGF T04/22	Niederrad-F.	6,76	7,30	2,93	7,7E-04	8,8E-04	8,8E-04	8,8E-04	8,5E-04
VGF T16/22	Niederrad-F.	10,25	11,26	0,59	3,1E-05	5,0E-05	5,0E-05	5,0E-05	4,5E-05
VGF T26/22	Niederrad-F.	13,70	16,93	0,29	4,8E-06	5,2E-06	4,8E-06	5,3E-06	5,0E-06
VGF T28/22	Niederrad-F.	5,54	6,81	3,53	1,5E-04	1,5E-04	1,5E-04	1,5E-04	1,5E-04
VGF T31/22	Niederrad-F.	5,97	7,41	4,18	2,4E-04	2,4E-04	2,4E-04	2,4E-04	2,4E-04
Mittelwert	Niederrad-F.								2,7E-04

Es resultiert ein mittlerer Durchlässigkeitsbeiwert der Niederrad-Formation von $2,7 \times 10^{-4}$ m/s und somit ein höherer Wert als beim Klarpumpen ermittelt. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bei der Auswahl der Versuchsbrunnen bereits auf eine ausreichende hydraulische Anbindung der Messstellen geachtet wurde, während beim Klarpumpen auch Messstellen mit einer sehr geringen Leistung vorkamen.

Ergänzend werden die Ergebnisse aus Voruntersuchungen des Ingenieurbüros Romberg (2001) der ursprünglich weiter westlich geplanten Tunneltrasse einbezogen. Diese beruhen teils auf Pumpversuchen an Grundwassermessstellen, teils auf den Erfahrungen beim Bau des Tunnels im Bereich Bockenheimer Warte (Grundstrecke D, Los U74), /4/, vgl. Tab. 5.

Tab. 5: Romberg (2001): Ermittlung von k_f -Werten in m/s, Grundstrecke D II

Formation	k_f -Wert (m/s)
Quartäre Sande und Kiessande	7,5E-04 bis 2,0E-03
Pliozäne Sande	2,0E-04
Basalt und Basaltzersatz	2,0E-04 bis 5,0E-04
Staden-Formation (Congeriensande)	5,0E-05
Niederrad-Formation (Algenkalke, Landschneckenmergel)	5,0E-05 bis 1,0E-04

Hinsichtlich der quartären Deckschichten bleibt zu berücksichtigen, dass gut durchlässige Terrassenablagerungen der Nidda und des Mains nur lokal eine relevante Mächtigkeit erreichen, so in der südlichen Zeppelinallee. Die geringmächtigen Lockergesteinsauflagen hingegen sind durch Anteile von Löss, Lösslehm sowie glazial umgelagerte Schichten (Solifluktion) gekennzeichnet, welche aufgrund der bindigen Bestandteile über eine deutlich geringere Durchlässigkeit verfügen.

5.8.2 Hydraulische Kenndaten

Die vorgenannten Auswertungen betreffen im Wesentlichen die horizontale Durchlässigkeit der untersuchten Schichten. Aufgrund von bindigen Zwischenlagen sind die vertikalen k_f -Werte in der Regel deutlich geringer. Als Ausgangswert der vertikalen Durchlässigkeit im Modell wurden die in Tab. 6 aufgeführten k_f -Werte reduziert und dann im Rahmen der Kalibration modifiziert, Kap. 7.1.2.

Zusammenfassend werden für die im Untersuchungsgebiet vertretenen Schichten als Ausgangswerte der Modellkalibrierung folgende mittleren k_f -Werte zum Ansatz gebracht:

Tab. 6: Mittlere Durchlässigkeitsbeiwerte im Untersuchungsgebiet (Modellansatz)

Formation	Mittelwert
Quartäre Deckschichten und Pliozän	5,0E-04
Basalt	1,0E-05
Staden-Formation	6,0E-05
Praunheim-Formation	1,0E-07
Niederrad-Formation (Landschneckenmergel) und Frankfurt-Formation (Hydrobienschichten)	2,0E-04

5.8.3 Verbreitung und Tiefenlagen der tertiären Schichten im Untersuchungsgebiet

Aufgrund der starken tektonischen Überprägung des Modellgebietes sind die Schichten an den lokalisierten Verwerfungen um mehrere Meter bis mehrere 10er Meter gegeneinander versetzt. Gemäß den in den Bohrungen angetroffenen Schichtunterkanten (UK) erfolgte zunächst eine möglichst genaue Kartierung der einzelnen Schichtvorkommen.

Für eine tiefengetreue Abbildung der Schichtober- und -unterkanten im Modell wurde dieses in den Tiefenlagen des Miozäns zunächst in ebene 5 m-Tiefenabschnitte untergliedert. Im Anschluss erfolgte eine Zuordnung der erbohrten Schichten zu den einzelnen Tiefenlagen. Im Ergebnis resultiert für jeden Tiefenschnitt die durch Verwerfungen gegliederte Schichtverteilung. In Bereichen, in denen die Quartär-, Pliozän oder Basalt-Basis tiefer liegt als die jeweilige Ebenen-UK, ist diese nicht ausgebildet und wird für die Modelleinrichtung rechnerisch eliminiert bzw. beschnitten (in den Plänen ohne Flächenfarbe). In den unteren Ebenen beruht die dargestellte Verteilung teils auf Annahmen auf der Grundlage der mittleren erwarteten Mächtigkeiten des Schichtpakets.

Die Schichtverteilung der für die Modellierung relevanten Tiefenlagen 75 - 110 mNHN geht aus den Plänen Blatt 31 - Blatt 38 hervor.

5.9 Grundlagen des Grundwassereinflusses auf Grünflächen und Bäume

Grundlegend wird die Wasserverfügbarkeit für die Pflanzen neben der Wasserspeicherung im Boden maßgeblich durch den kapillaren Aufstieg aus dem Grundwasser sowie Nieder-

schlagsverteilung und Verdunstung in der Vegetationsperiode beeinflusst, /11/. Für die Bemessung der von einer Grundwasserabsenkung ausgehenden Wirkung auf landwirtschaftliche Nutzflächen ist der Einfluss des Grundwasserflurabstands maßgeblich, vgl. Abb. 5.

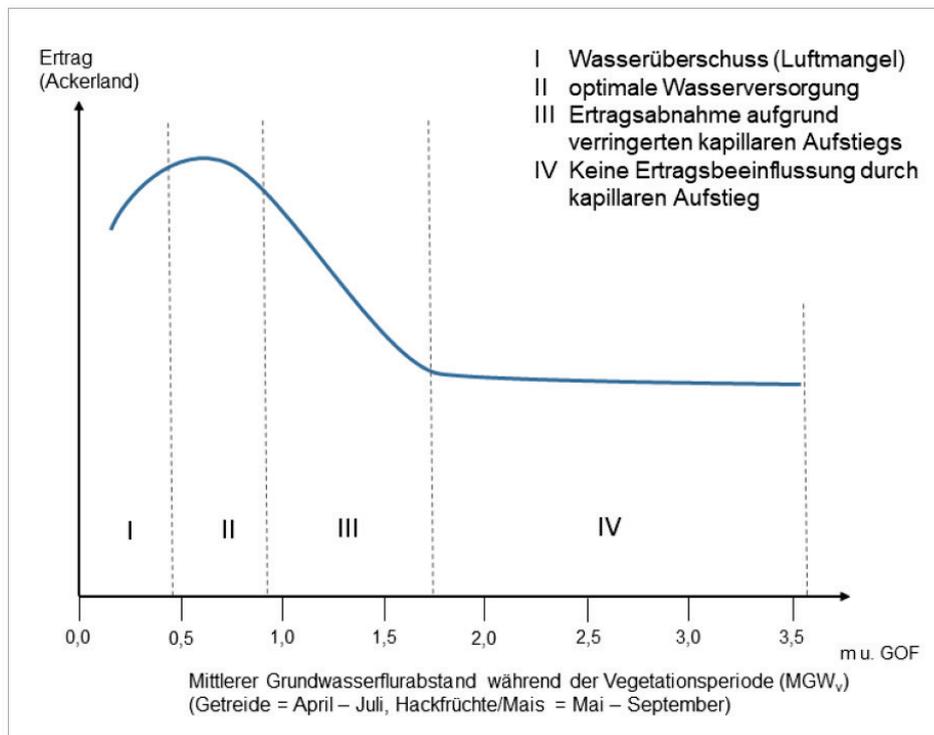


Abb. 4: Abhängigkeit des landwirtschaftlichen Ertrags vom Grundwasserflurabstand (aus /11/)

Der kapillare Aufstieg ist dabei maßgeblich von den Bodeneigenschaften abhängig. So nimmt bei Sandböden der Ertrag bereits ab einer Tiefe von 10 dm wieder ab, während bei einem Lehm/Ton eine höhere Wasserspeicherfähigkeit und ein höherer kapillarer Aufstieg besteht. somit ist bei bindigen Böden eine Ertragsbeeinflussung bis zu einer Tiefe von >2 m möglich, /11/.

Maßgeblich für die Bewertung ist der mittlere Grundwasserflurabstand der Vegetationsperiode. Eine durch die geplanten Baumaßnahmen hervorgerufene Grundwasserabsenkung kann zu einer Vergrößerung des Flurabstands führen, sodass sich in den grundwasserstandsabhängigen Bereichen der kapillare Aufstieg vermindert.

Böden, in denen bereits zum Ist-Zustand kein Anschluss an das Grundwasser besteht, sind hingegen von Einflüssen auf die Vegetation infolge einer Grundwasserabsenkung nicht betroffen. Maßgeblich hierfür ist der ertragswirksame Grenzflurabstand⁵, also diejenige Tiefe, bis zu der der Grundwasserspiegel, bedingt durch kapillaren Aufstieg, Einfluss auf die Verdunstung und die Vegetation hat, /11/.

Angaben des HLNUG zum ertragswirksamen Grenzflurabstand für landwirtschaftlichen Nutzungen sind für die gegenständlichen Grünflächen nicht verfügbar. Da auf den Flächen insbesondere die Baumbestände als besonders schützenswert gelten, werden nachfolgend die für Forststandorte maßgeblichen Grenzflurabstände näher betrachtet.

Die effektive Durchwurzelungstiefe⁶ von Forststandorten hängt sowohl von der Bodenart als auch der Baumart und dem Baumalter ab. Für Altbestände (>45 Jahre) aus Tiefwurzlern auf Böden aus Lockergestein wird seitens des Deutschen Verbands für Wasserwirtschaft und Kulturbau DVWK (1996), zitiert aus /7/, eine effektive Durchwurzelungstiefe von 20 - 25 dm angegeben. Als maximale Tiefe der vegetationsbedingten Bodenwasserentzüge konnte nach GELDMACHER (1993) für Altbestände ein Betrag von 26 dm ermittelt werden, /7/. Für 80-jährige Kiefern, Buchen und Stieleichen auf Böden mit tieferen Grundwasserständen wurde nach LENHARDT & BRECHTEL (1980) eine mittlere effektive Durchwurzelungstiefe von 12 – 30 dm festgestellt.

Die maximale Durchwurzelungstiefe von Altbäumen (>100 Jahre) wird nach RIEK (1989) auf schluffig lehmigen Schichten, welche für den Untersuchungsbereich maßgeblich sind, mit maximal 30 dm angegeben. Auf zerklüftetem Kalkgestein konnte nach GERKE (1987) für einen Buchenbestand eine Wasseraufnahme der Bäume bis zu einer Tiefe von 30 dm nachgewiesen werden, /7/.

Gemäß den GEOFAKTEN 9 des LBEG wird für schluffige Böden und ein hohes Baumalter (80 Jahre) eine maximale effektive Durchwurzelungstiefe von 25 dm zugrunde gelegt, /7/. Für die vorliegende Betrachtung wird im Sinne eines konservativen Ansatzes vorsorglich eine Tiefe von 3,0 m zum Ansatz gebracht.

Für die Bemessung des kapillaren Aufstiegs von der Grundwasseroberfläche bis zur Untergrenze des effektiven Wurzelraums wird für den Untersuchungsbereich ein schluffiger Lehm (Lu) zugrunde gelegt. Für diesen ist gemäß der Bodenkundlichen Kartieranleitung der Ad-

⁵ Der **Grenzflurabstand** ist als der maximale Abstand zwischen effektivem Wurzelraum und Grundwasseroberfläche definiert, bei dem grundwasserbeeinflusste Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung in Trockenperioden noch eine für das Pflanzenwachstum hinreichende Wassermenge von 0,3 mm pro Tag in den effektiven Wurzelraum nachliefern.

⁶ Die **effektive Durchwurzelungstiefe** ist die rechnerisch bestimmte Mächtigkeit einer von Bodenart und Trockenrohdichte abhängigen Bodenzone (effektiver Wurzelraum), in der die nutzbare Feldkapazität von den Pflanzenwurzeln in niederschlagsarmen Jahren vollständig ausgeschöpft werden kann. Primär hängt die effektive Durchwurzelungstiefe von der Bodenart (Körnung) ab; Festgestein und Grundwasser wirken gegebenenfalls begrenzend. Die Berechnung erfolgt unter Annahme einer mittleren Lagerungsdichte.

hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005) bis zu einer Tiefe von 13 dm ein kapillarer Aufstieg von mindestens 0,3 mm/d gegeben, /5/.

Es resultiert ein für die Bewertung der Baumbestände maßgeblicher Flurabstand von

3,0 m (effektive Durchwurzelungstiefe von Altbäumen)

+ 1,3 m (kapillarer Aufstieg von der Grundwasseroberfläche zur Untergrenze des effektiven Wurzelraums, Grenzflurabstand)

= 4,3 m

Tatsächlich dürfte der Grenzflurabstand in Bereichen mit oberflächennah anstehendem Festgestein geringer sein. So ist der kapillare Aufstieg in Tonen (der Niederrad-Formation) eher mit 7 dm anzugeben. In schluffigen Feinsanden der Staden-Formation ist sowohl die effektive Durchwurzelungstiefe auf weniger als 20 dm begrenzt und auch der kapillare Aufstieg fällt mit <10 dm geringer aus, /5/. Zudem ist bei jüngeren Baumbeständen (<80 a) die effektive Durchwurzelungstiefe stets geringer als bei Altbeständen. Insofern stellt der vorstehende Wert einen konservativen Ansatz dar.

5.10 Bodenverhältnisse und maßgebliche Flurabstände der Grünflächen

Die Bodenverhältnisse der unbebauten Flächen gehen aus der Bodenübersichtskarte 1:50.000 des HLNUG hervor, Blatt 24 - Blatt 26. Seitens des HLNUG wurde ergänzend darauf hingewiesen, dass die Bodenverhältnisse in den Parkanlagen durch frühere Gestaltungsmaßnahmen und gärtnerische Eingriffe deutlich überprägt und gestört sein können. Gemäß der Übersichtskartierung werden die Grünflächen des Palmengartens, des Grüneburgparks und der Miquelanlage durch Böden aus äolischen Sedimenten dominiert. Da in den Bohrungen vielfach Lösslehme nachgewiesen werden konnten, lässt sich die Kartierung im Wesentlichen bestätigen. Im Bereich des Campus sowie dem nördlichen Grüneburgpark sind zudem Böden aus solifluidalen Sedimenten zu erwarten, welche während der Eiszeiten oberflächennah umgelagert worden sind. Die nutzbare Feldkapazität⁷ wird aufgrund der anstehenden Lösslehme mit mittel bis hoch (150 – 260 mm) angegeben, Blatt 25.

⁷ Die **Feldkapazität** ist die Wassermenge, die ein Boden entgegen der Schwerkraft zu speichern vermag. In diesem Wasser können Stoffe gelöst sein, die nicht adsorptiv festhalten und nicht mikrobiell umgesetzt werden. Daher ist die Feldkapazität ein Maß für die Fähigkeit des Bodens, die Verlagerung solcher Stoffe in den Untergrund zu verhindern. Sie bestimmt sein Rückhaltevermögen für wasserlösliche, nicht (mit der Bodenmatrix) wechselwirkende Stoffe wie beispielsweise Nitrat.

Die **nutzbare Feldkapazität** ist der Teil der Feldkapazität, der für die Vegetation nutzbar ist und im Boden in den Mittelporen mit Saugspannungen zwischen den pF-Werten 1,8 und 4,2 gespeichert wird. Sie ist bei grundwasser- und staunässefreien Böden das wesentliche Maß für die pflanzenverfügbare Bodenwassermenge und macht einen großen Anteil der Bodenfruchtbarkeit und damit der Ertragssicherheit aus. Grund-

Dementsprechend finden sich in den Grünflächen vorwiegend Standorte mit hohem Wasserspeichervermögen und schlechtem bis mittlerem natürlichen Basenhaushalt, Blatt 26.

Der für die Baumbestände zugrunde gelegte Grenzflurabstand von 4,3 m bildet die Grundlage für die Darstellung in Blatt 29. In dem Plan wurden die Flurabstände der jeweils obersten grundwasserführenden Schicht dargestellt. Die Grenzen der Verbreitungsgebiete der Grundwasserleiter gehen ebenfalls aus der Darstellung hervor. Danach zeigen sich für die Bäume relevante Flurabstände (gelbe Färbung) in den quartären Deckschichten des zentralen Palmengartens und des südlichen Grüneburgparks. Im Norden des Grüneburgparks kommen allein in den randlich auskeilenden Sanden der Staden-Formation vegetationsrelevante Flurabstände vor, während in größerer Entfernung zur Verbreitungsgrenze sowie auch im Campus Westend in der Regel Flurabstände >5 m vorherrschen und somit kein Grundwasseranschluss der Vegetation besteht (hellgrüne Färbung). In der Miquelanlage können im Nahbereich des Teiches relevante Flurabstände vorkommen, während außerhalb dieser Senke die Flurabstände >5 m verbleiben. Die Baumbestände entlang der Miquelallee westlich des Grüneburgparks verfügen in der Regel über keinen Grundwasseranschluss.

Im zentralen Grüneburgpark sind keine wasserführenden quartären Deckschichten vorhanden, doch wurde an den Messstellen VGF_F05/22 und VGF_F12/22 eine schwankende Wasserführung im Verwitterungshorizont der Niederrad-Formation nachgewiesen. Da dieses oberflächennahe Grundwasser ausschließlich von Niederschlägen abhängig ist, eine große Höhendifferenz zum Potenzial des Kluftgrundwasserleiters aufweist und durch die geplanten Bauwerke nicht beeinflusst wird, bleiben diese schwebenden Grundwässer außer Betracht.

5.11 Grundwasserneubildung

Seitens des HLNUG wurden die mittleren Grundwasserneubildungsraten der Referenzperiode 1981 - 2010 zur Verfügung gestellt, vgl. Blatt 27. Bei dem verwendeten Bodenwasserhaushaltsmodell handelt es sich um das Verfahren GWN-BW der Fa. GIT Hydros Consult (Freiburg)⁸, welches auch in Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz für die landesweite Wasserhaushaltsmodellierung eingesetzt wird. GWN-BW ist ein deterministisches flächendifferenziertes Modell zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration, zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes sowie zur Bestimmung der unterhalb der durchwurzelter Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge, die letztlich der Grundwasserneubildung an-

wasser beeinflusste Böden stellen zusätzlich den kapillaren Aufstieg von Grundwasser (Aufstiegsrate, kapillare) als pflanzenverfügbares Wasser bereit. Staunasse Böden stellen zeitweilig mehr Wasser als die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraumes bereit.

⁸ <https://www.hydrosconsult.com/hydrologie/bodenwasserhaushalt/modelldoku-gwn-bw/> (letzter Zugriff 23.02.2024)

heimfällt. In den einzelnen Teilmodulen kommen sowohl physikalisch basierte als auch konzeptionelle Ansätze zur Beschreibung der an den Vorgängen von Verdunstung, Sickerwasserbildung und Grundwasserneubildung beteiligten Prozesse zur Anwendung.

Das Modell rechnet in Tagesschritten. Als meteorologische Eingangsdaten gehen Tageswerte für Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Sonnenscheindauer und Windstärke ein. Für nicht-reliefierte Lockergesteinsgebiete (Porengrundwasserleiter) entspricht der mit GWN-BW ermittelte Gesamtabfluss der Grundwasserneubildung. In Festgesteinsgebieten mit ausgeprägtem Relief wird der Gesamtabfluss in einem nachgeschalteten Verfahrensschritt auf der Grundlage regionalisierter Baseflow-Indizes in die Abflusskomponenten Direktabfluss und Grundwasserneubildung separiert. Da für die Landnutzung CORINE⁹-Daten verwendet wurden und auf Grundlage dieser Daten keine detaillierte Differenzierung der Versiegelungsgrade möglich ist, stellen die Modellergebnisse für den Bereich von versiegelten Flächen nur eine grobe Abschätzung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag dar¹⁰.

Für das Modellgebiet resultiert eine Streuung der mittleren Neubildungsraten von etwa 45 mm/a in den Siedlungsgebieten bis zu rd. 80 mm/a in den unversiegelten Grünflächen. Der westlichen Talau der Nidda wird mit -15 bis -300 mm/a eine negative Neubildung zugeordnet, d. h. es erfolgt gemäß der Modellberechnung eine Zehrung des Grundwassers infolge einer verstärkten Evapotranspiration bei einem geringen Flurabstand. Eine Zehrung ist in Bereichen mit geringem Flurabstand durchaus möglich, doch stellte sich im Zuge der Modellkalibrierung heraus, dass in Bereichen solch intensiver Grundwasserzehrung unrealistisch tiefe Grundwasserstände simuliert werden. Abweichend von der Datengrundlage wurde für die Grundwasserneubildung daher ein Mindestwert von 0 mm/a vorgegeben.

Eine zusätzliche Grundwasseranreicherung kann aus Leckagen der Trinkwasserleitungsnetze erwachsen. So ist für großstädtische Trinkwasserversorgungsnetze gemäß DVGW W392 ein Verlust¹¹ von $0,15 \text{ m}^3/(\text{km Leitung} \cdot \text{Stunde})$ charakteristisch. Da im Untersuchungsgebiet eine teils dichte Wohnbebauung mit einem vorwiegend älteren Gebäudebestand vorhanden ist, sind entsprechende Verluste anzunehmen. Gemäß einer Abschätzung für eine charakteristische Siedlungsfläche des Untersuchungsgebietes kann eine mittlere Rohrnetzlänge von 20 km je Quadratkilometer Fläche angenommen werden. Es resultiert eine Verlustrate von rd. 26.000 m^3 je km^2 und Jahr. Da eine Aussickerung in das Grundwasser angenommen werden kann, folgt aus dem Verlust eine Grundwasserneubildungsrate von rd. 26 mm/a. Diese Rate wird den rd. $6,4 \text{ km}^2$ umfassenden Siedlungsflächen des Modellgebietes zugeschlagen.

⁹ Coordination of Information on the Environment („Koordinierung von Informationen über die Umwelt“)

¹⁰ HLNUG, Hr. Hergesell, Mail vom 18.12.2013

¹¹ Richtwert für spezifische reale Wasserverluste, DVGW, Technische Regel Arbeitsblatt W 392, Mai 2003, Wasserverlust Großstadt $0,1 - 0,2 \text{ m}^3$ je $(\text{km} \cdot \text{h})$

6 Hydrochemische Situation

6.1 Altablagerungen, Altstandorte und Grundwasserverunreinigungen

Eine Übersicht der Standorte wurde seitens des Regierungspräsidiums Darmstadt zur Verfügung gestellt, Blatt 30. Im unmittelbaren Trassenbereich sind mit Ausnahme früherer Kleingewerbe in Wohngebäuden keine Flächen bekannt, welche mit einer Boden- oder Grundwasserverunreinigung einhergehen könnten. Örtlich wurden allenfalls in den künstlichen Auffüllungen Verunreinigungen nachgewiesen, vgl. geotechnisches Gutachten. Allein in einiger Entfernung zu den Trassen wurden folgende Flächen identifiziert:

- Variante 3i: Altlast 412.000.050.001.039 – Verdachtsfläche ehem. US-„Dachsbau“. Dieser befindet sich nördlich des geplanten Notausstiegs in der August-Siebert-Straße. Eine Untersuchung liegt nicht vor. Unmittelbar südlich des Notausstiegs wurde im Rahmen der Errichtung eines Reihenhauses eine lokale Verunreinigung durch Bodenaushub saniert.
- Variante 3i: Altlast 412.000.050.001.006 – Altlastenverdächtige Fläche IG-Farbenhochhaus. Das Gebäude diente vor dem Zweiten Weltkrieg als Verwaltungsgebäude, später als Sitz der amerikanischen Militärverwaltung¹². Die umliegenden Flächen stellten einst einen Park dar. Nähere Angaben zu potenziellen Untergrundverunreinigungen sind nicht verfügbar.

Generell ist das Umfeld der Trassen überwiegend durch Wohnbebauung geprägt, größere Produktionsanlagen kommen nicht vor. Potenziale für Untergrundverunreinigungen können aus der Verbringung von Kriegsschutt in früheren Bombentrichtern und Senken erwachsen. Insofern ist den oberirdischen Bauwerken bzw. den Tunneln oB, welche im Bereich künstlicher Auffüllungen errichtet werden, ein erhöhtes Gefährdungspotenzial zuzuordnen. Generell ist nach Datenlage das Altlastenpotenzial der Trassen jedoch als vergleichsweise gering einzuschätzen.

¹² https://de.wikipedia.org/wiki/I.G._Farben-Geb%C3%A4ude, abgerufen 21.06.2024

6.2 Ergebnisse der hydrochemischen Erkundung

Das Grundwasser des Untersuchungsgebietes ist bei einer elektrischen Leitfähigkeit von bis zu 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ meist durch eine geringe Mineralisation gekennzeichnet. Etwas höhere Werte finden sich vereinzelt in oberflächennah ausgebauten Messstellen, welche einen Einfluss aus künstlichen Auffüllungen aufweisen können. Ein Einfluss von Tiefenwasser mit erhöhter Natriumchlorid-Konzentration war an keiner Messstelle nachweisbar. In den tieferen Messstellen ist häufig ein Geruch nach Schwefelwasserstoff (H_2S) festzustellen, welcher für die Hydrobienschichten charakteristisch ist.

Für die drei untersuchten Trassenvarianten erfolgt nachfolgend eine separate Bewertung:

Variante 1a

Im Vorhabensbereich wurden die Grundwassermessstellen VGF_T01/22, VGF_T01/22, VBG_T28/22, VGF_T29/22 und VGF_T32/22 sowie VGF_T18/22 (Untertunnelung BAB66) hydrochemisch untersucht. Dabei ergaben sich keine Hinweise auf eine erhöhte Mineralisation des Grundwassers. Im Wasser ist geogenes Sulfid (leicht freisetzbar) nicht oder nur in Spuren (0,2 mg/L) nachweisbar.

Folgende anthropogenen Verunreinigungen wurden registriert:

- Geringe Spuren von LCKW (0,1 $\mu\text{g}/\text{L}$, VGF_T01/22, 1,0 $\mu\text{g}/\text{L}$, VGF_T02/22). Die gemessenen Konzentrationen sind für das städtische Umfeld als ubiquitär zu bewerten.

Im Zustrom der Baugruben sind keine Grundwasserverunreinigungen bekannt. Es entsteht voraussichtlich kein erhöhter Aufwand für die Grundwasserreinigung.

Variante 1d

Im Trassenbereich wurden die Grundwassermessstellen VGF_T31/22, VGF_T32/22 sowie VGF_T18/22 (Untertunnelung BAB66) hydrochemisch untersucht. Dabei ergaben sich keine Hinweise auf eine erhöhte Mineralisation des Grundwassers. Im Wasser ist geogenes Sulfid (l. fr.) nicht nachweisbar.

Folgende anthropogenen Verunreinigungen wurden registriert:

- Geringe Spuren von LCKW (0,1 $\mu\text{g}/\text{L}$, VGF_T32/22). Diese sind als unauffällig zu charakterisieren.
- Chrom mit 7 $\mu\text{g}/\text{L}$ (VGF_T03/22) und 5 $\mu\text{g}/\text{L}$ (VGF_T31/22) geringfügig oberhalb des Grenzwerts der GWS-VwV (2021) von 3,4 $\mu\text{g}/\text{L}$.

Im Zustrom der Baugruben sind keine Grundwasserverunreinigungen bekannt. Es entsteht voraussichtlich kein erhöhter Aufwand für die Grundwasserreinigung.

Variante 3i

Im Vorhabensbereich wurden die Grundwassermessstellen VGF_T19/22, VGF_T18/22 (Rampe Miquelanlage) sowie VGF_T10/22 und VGF_T26/22 (Station Campus) hydrochemisch untersucht. Dabei ergaben sich keine Hinweise auf eine erhöhte Mineralisation des Grundwassers. Im Wasser ist geogenes Sulfid (l. fr.) nicht nachweisbar. An VGF_F09/22 wurde mit 711 mg/L eine erhöhte Sulfat-Konzentration und mit 2.930 µS/cm auch erhöhte Leitfähigkeit gemessen, was auf eine Elution aus künstlichen Auffüllungen hinweist.

Folgende anthropogenen Verunreinigungen wurden registriert:

- Geringe Spuren von LCKW (0,1 µg/L, VGF_T19/22). Diese sind als unauffällig zu bewerten.
- Chrom mit 4 µg/L (VGF_T19/22) bzw. 8 µg/L (VGB_T26/22) oberhalb des Grenzwerts der GWS-VwV (2021) von 3,4 µg/L,
- Arsen mit 18 µg/L (VGF_T26/22) oberhalb des Grenzwerts der GWS-VwV (2021) von 3,2 µg/L,
- Blei mit 9 µg/L (VGF_T26/22) oberhalb des Grenzwerts der GWS-VwV (2021) von 1,2 µg/L,
- Nickel mit 19 µg/L (VGF_F09/22) und 9 µg/L (VGF_F+T26/22) oberhalb des Grenzwerts der GWS-VwV (2021) von 7 µg/L.

Im Zustrom der Baugruben sind keine Grundwasserverunreinigungen bekannt.

Die erhöhten Schwermetallkonzentrationen im Bereich der Station Campus beruhen vermutlich auf der Verbringung von Bauschutt auf die Flächen im Zuge früherer Baumaßnahmen oder Kriegseinwirkungen. Sie bedürfen voraussichtlich einer geeigneten Reinigungsstufe. Aufgrund der erwarteten geringen Förderraten ist der Aufwand jedoch begrenzt.

Generell bestätigen die Befunde jedoch ein geringes Risiko relevanter Grundwasserverunreinigungen im Einzugsgebiet der potenziellen Baumaßnahmen.

7 Grundwassermodell

7.1 Abgrenzung des Modellgebietes und Randbedingungen

7.1.1 Modellgebiet und Randbedingungen

Die Modellgrenzen einer aussagekräftigen Strömungssimulation sollten stets durch möglichst klar definierte Randbedingungen – bekannte Piezometerhöhen (Randbedingung 1. Art) oder bekannte Randzuflüsse oder -abflüsse (Randbedingung 2. Art) bzw. eine Kombination aus 1. und 2. (Randbedingung 3. Art) gekennzeichnet sein. Da die Aussagekraft eines Grundwassermodells maßgeblich von der Wahl der Randbedingungen abhängt, wurde der hier zu untersuchende Bereich weit über das eigentliche Untersuchungsareal ausdehnt.

Das Modellgebiet hat eine Gesamtgröße von 11,0 km² und umfasst im Norden noch die vollständige oberirdische U-Bahntrasse bis zum Anschluss an die Bestandsstrecke in Ginnheim, Blatt 39. Die Modellgrenzen orientieren sich in der Regel an den Wasserscheiden bzw. Trennstromlinien der für die Betrachtung maßgeblichen Grundwasserleiter. So folgt die nördliche Modellgrenze der Wasserscheide zwischen Main im Südwesten und der nordwestlich verlaufenden Nidda. Im Osten reicht das Modell bis zu einem hydraulischen Hochpunkt, welcher mit einem vermuteten Potenzial des Festgesteinsaquifers von rd. 135 mNHN im nördlichen Teil des Hauptfriedhofs zu verorten ist. Jenseits dieser Höhe sind im Bereich Bornheim südöstliche Fließrichtungen zum Riedgraben zu erwarten. Die östliche Berandung des Modells folgt wiederum einer Trennstromlinie, welche vom Hauptfriedhof nach Südsüdwesten bis zur Altstadt verläuft. Über die genannten Trennstromlinien erfolgt kein Zu- oder Abfluss in das bzw. aus dem Modellgebiet. Der gesamte Südrand hingegen stellt einen Abstromrand dar. Die Grenzlinie folgt dabei größtenteils den größeren Kanälen, welche bei einer Lage unterhalb des Grundwasserstands Grundwasser aufnehmen können. Der Westrand folgt im Ortsteil Hausen wiederum einer Trennstromlinie der nach Süden gerichteten Grundwasserströmung. Ein Zustromrand wurde nicht erforderlich, sodass das Grundwasserangebot allein aus der Grundwasserneubildung aus versickerndem, Niederschlagswasser sowie Verlustmengen des Trinkwassernetzes gespeist wird.

Unabhängig davon kann über die Modellbasis, insbesondere im Bereich tief reichender Verwerfungen, ein Tiefenwasserzufluss aus morphologisch höher liegenden Gebieten (Taunus) gegeben sein. Diese Aufstiege können eine Grundwasseranreicherung der tertiären Festgesteinsschichten hervorrufen. Da die Potenziale der Niederrad-Formation jedoch in der Regel unter den Wasserständen der oberflächennahen Porengrundwasserleiter verblieben und im Rahmen der Kalibrierung zur Erreichung eines plausiblen Kalibrierergebnisses kein

zusätzlicher Tiefenwasserzufluss erforderlich war, wurde auf eine entsprechende Anreicherung über die Modellbasis verzichtet.

7.1.2 Formationsparameter

Das hydrogeologische Modell bildet die Grundlage des numerischen Grundwasserströmungsmodells. Die Modellerstellung orientiert sich dabei an dem einschlägigen Leitfaden¹³. Demzufolge wird zunächst ein hydrogeologisches Modell entwickelt, in das alle relevanten hydrogeologischen Elemente integriert werden und so ein detailgetreues digitales Modell entsteht, aus dem die Verbreitung, Höhenlage und Mächtigkeit der für die Modellierung maßgeblichen geohydraulischen Einheiten zu entnehmen ist.

7.1.3 Vorfluter und Gewässer

Im Modellgebiet sind keine für die hydrologische Situation relevanten natürlichen Vorfluter vorhanden. Auf die Implementierung eines kurzen Abschnittes des Ochsengrabens am Ost- rand der Nidda-Talaue wurde aufgrund der geringen hydraulischen Wirkung und der Position am Gebietsrand verzichtet. Die Teiche im Palmengarten sowie der Miquelanlage wurden bei der Netzgenerierung berücksichtigt, auch wenn deren Wasserstände teils oberhalb des Grundwasserpotenzials liegen und somit über keine oder allenfalls eine begrenzte An- bindung an den Grundwasserleiter verfügen.

7.1.4 Kanalnetz

Ältere Kanäle des Entwässerungssystems wirken aufgrund von Schadstellen drainierend, sofern sie unterhalb des Grundwasserstandes liegen. Erfahrungsgemäß steigt der Grund- wasserstand im Bereich von älteren Entwässerungsnetzen zumeist nicht mehr als 1 - 2 m über deren Sohlniveau an. In diesen Fällen wächst der hydraulische Druck auf die Schad- stellen und der Zustrom wächst entsprechend an. Aus diesem Grunde wurden die größeren Kanäle (>800 mm) mit geringen Leakage-Knotenfaktoren von 10 in das Modell integriert. Eine Aussickerung aus Kanalabschnitten, welche über dem Grundwasserniveau liegen, wurde aufgrund der zu erwartenden Selbstabdichtung von Trennrissen sowie der Einbettung der Abwasserrohre modelltechnisch komplett unterdrückt. Das Kanalnetz geht aus Blatt 39 hervor.

¹³ Fachsektion Hydrogeologie (2002): Hydrogeologische Modelle – Ein Leitfaden mit Fallbeispielen.- Schrif- tenreihe der Deutschen Geologischen Gesellschaft

7.1.5 Bestandstunnel

Um die hydraulische Wirkung der Bestandstunnel simulieren zu können, wurde deren Geometrie in das Strukturmodell übertragen. Als Sohle wurde jeweils die Unterkante des Fundamentes zum Ansatz gebracht. Da die Bauabschnitte teils ein Gefälle oder eine anderweitige bauliche Differenzierung aufweisen, wurde das arithmetische Mittel aus höchster und tiefster Sohlage des Abschnittes zugrunde gelegt. Hinsichtlich der Tunnel ist teilweise eine Überströmung durch Grundwasser möglich, so dass in einigen Fällen auch die Oberkanten der Tunnelbauwerke zu berücksichtigen waren. Die Transmissivität der von den Bauwerken durchschnittenen Modellschichten wurde im Verhältnis der vertikalen Erstreckung des Bauwerks zur Gesamtmächtigkeit der Modellschicht reduziert. Im Falle einer vollständigen Durchschneidung einer Schicht wurde jedoch eine Mindestdurchlässigkeit von 1 % des Ausgangswertes belassen, um möglichen lokalen Umläufigkeiten (z.B. durch die Einbettung in Sauberkeitsschichten) gerecht zu werden.

Im engeren Untersuchungsgebiet ist vorrangig das Stationsbauwerk der Bockenheimer Warte von Belang, an das in allen betrachteten Varianten angebunden werden soll. Die östlich verlaufende Grundstrecke A in der Eschersheimer Landstraße ist aufgrund der Entfernung von mindestens 500 m zur Trassenvariante 3i nur von untergeordneter Bedeutung; ebenso die im Süden des Gebietes in Ost-West-Richtung querende Grundstrecke C.

7.1.6 Weitere Randbedingungen

Es bleibt zu berücksichtigen, dass instationäre Effekte, die sich in Nassphasen oder Trockenjahren einstellen können, mittels der durchgeführten stationären Modellbetrachtung nur über eine Kalibrierung der Neubildungsraten nachbilden lassen. Für die vorliegende Betrachtung wurden die mittleren Neubildungsraten des HLNUG weitestgehend berücksichtigt. In der Niddaaue wurde die Neubildung allerdings auf Null gesetzt und in den dichten Siedlungsräumen wegen der mutmaßlichen Trinkwassernetzverluste um 26 mm/a erhöht.

7.1.7 Modellnetz

Grundlage der Netzgenerierung ist das hydrogeologische Strukturmodell, in dem sämtliche modellrelevanten Geometrielemente zusammengefasst werden. Bei der Wahl der Maschendichte wird den steileren Gradienten im Einflussbereich der Trassen, Brunnen und der Kanäle Rechnung getragen. Während in den Randbereichen des Modells eine maximale Elementseitenlänge von rd. 40 m ausreichte, wurde im Bereich der grundwasserrelevanten Bauwerke ein maximaler Knotenabstand von 5 m gewählt, Blatt 40.

In die Tiefe wurde das Modell durch 22 Knotenlagen, die ihrerseits 21 räumliche Elementlagen aufspannen, diskretisiert, Tab. 7. Zum Einsatz kam ein Modell der Finite Elemente Methode, SPRING®¹⁴.

Tab. 7: Übersicht der Modellschichten und Knotenlagen

Knotenlage	Modellschicht	Modellschicht
1		Geländeoberfläche DGM1
2	1	UK Quartär oder Pliozän
3	2	UK Basalt
4	3	Ebene UK mNN 135
5	4	Ebene UK mNN 130
6	5	Ebene UK mNN 125
7	6	Ebene UK mNN 120
8	7	Ebene UK mNN 115
9	8	Ebene UK mNN 110
10	9	Ebene UK mNN 105
11	10	Ebene UK mNN 100
12	11	Ebene UK mNN 95
13	12	Ebene UK mNN 90
14	13	Ebene UK mNN 85
15	14	Ebene UK mNN 80
16	15	Ebene UK mNN 75
17	16	Ebene UK mNN 70
18	17	Ebene UK mNN 65
19	18	Ebene UK mNN 60
20	19	Ebene UK mNN 55
21	20	Ebene UK mNN 50
22	21	Ebene UK mNN 45

Es ist zu berücksichtigen, dass aufgrund der nach Süden und Westen einfallenden Geländemorphologie die höheren Modellebenen lediglich im östlichen Modellgebiet ausgebildet sind. Die jeweilige Schichtverbreitung für die Tiefenlagen 75 - 110 mNHN ist exemplarisch in Blatt 31 - Blatt 38 dargestellt.

¹⁴ delta-h, Benutzerhandbuch SPRING, https://delta-h.eu/de/SPRING6_Webhilfe/Getting_started1.htm, letzter Zugriff 21.06.2024

7.2 Durchführung und Ergebnis der Kalibrierung

Die Kalibrierung eines Grundwassermodells stellt die Grundanpassung des Modellsystems an den in der Natur gemessenen Zustand (Stichtagsmessung) dar. Man unterscheidet eine stationäre Kalibrierung, bei der primär der Durchlässigkeitsbeiwert als Kalibriergröße variiert wird, von einer instationären, bei der man im Wesentlichen den Speicherkoeffizienten anpasst. Da hier lediglich das sich unter quasistationären Bedingungen einstellende Strömungsbild zu simulieren war, konnte die instationäre Anpassung entfallen.

Die Kalibrierung erfolgte auf der Grundlage der zum Ist-Zustand im November 2023 geltenden Randbedingungen. Nach der Zusammenstellung der Eingabedaten wurde das Modell ausschließlich durch Variation der Durchlässigkeitsbeiwerte der Modellschichten und der Leakage-Faktoren der Kanäle kalibriert. Bei der Anpassung der k_f -Werte wurde nach jedem Kalibrierlauf das Simulationsergebnis mit den gemessenen Wasserständen der jeweils betrachteten Grundwasserleiter bzw. Tiefenlagen verglichen. Die Variation erfolgte solange, bis eine möglichst geringe Soll-Ist-Differenz des Grundwasserstandes unter Beachtung einer plausiblen Verteilung der k_f -Werte erreicht war.

Für den Soll-Ist-Vergleich wurden die Wasserstände der Grundwassermessstellen gemäß den Tiefenlagen der Filterstrecken und erschlossenen geologischen Schichten der jeweiligen Modellschicht zugeordnet.

Als erschwerend für die Modellierung erwies sich die geringe grundwassererfüllte Mächtigkeit der quartären Deckschichten, welche in den trockenen Bereichen teils zu recht steilen Gradienten der simulierten Grundwasseroberfläche führt. Die an den Verwerfungen auftretenden Schichtwechsel führen nur dann zu Potenzialsprüngen, wenn ein relevanter Unterschied der aufeinandertreffenden k_f -Werte der Schichten vorliegt. Die örtlich beobachtete Sperrwirkung der Verwerfungen konnte daher aufgrund der teils ähnlichen k_f -Werte der Schichten nicht im vollen Umfang erreicht werden. Die vertikale Aussickerung in Schichten mit tieferem Grundwasserpotenzial und damit die erheblichen beobachteten Potenzialunterschiede zwischen den Grundwasserstockwerken wurde durch eine deutliche Verringerung der vertikalen Durchlässigkeitsbeiwerte (Reduktion der horizontalen k_f -Werte um Faktor 0,001) erreicht. Im Hinblick auf die trennenden Tonschichten der Praunheim- und Niederrad-Formation ist dies jedoch durchaus als plausibel zu werten.

Schwerpunkt der Kalibrierung war neben einer möglichst genauen Abbildung der Grundwasserpotenziale eine nachvollziehbare und belastbare Wasserbilanz des Gesamtmodells. Die nachfolgend beschriebenen Kalibrierergebnisse zeigen eine belastbare Simulation, mittels derer die nachfolgend behandelten Fragestellungen eingeschätzt werden können. Eine

Bewertung des Hydrogeologischen Modells nach den Kriterien der Fachsektion Hydrogeologie e.V.¹⁵ geht aus Anhang 8 hervor.

Für eine genauere Bemessung der bauzeitigen Grundwasserentnahmen sowie der hydraulischen Wirkung der Bauwerke bedarf es im Rahmen der Ausführungsplanung ergänzender Detailuntersuchungen in den Vorhabensbereichen. Für den vorliegenden Variantenvergleich bildet das vorliegende Modell allerdings eine geeignete, orientierende Bemessungsgrundlage.

7.2.1 Darstellung der Kalibrierergebnisse – Quartär

Der Gleichenplan in Blatt 41 zeigt die berechnete Strömungssituation in den Bereichen mit ausreichender grundwassererfüllter Mächtigkeit. In der westlichen Talaue der Nidda zeigt sich ein relevanter Einfluss des dort in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Kanals, welcher aufgrund der angesetzten Fremdwasseraufnahme deutlich in die Grundwasseroberfläche einschneidet. Ebenso ist der in der Ost-West verlaufenden Miquelallee liegende Kanal effluent, erkennbar an den nach Osten umbiegenden Isolinien. Im südlichen Modellgebiet zeigt sich eine nach Süden bis Südwesten gerichtete Strömung, welche auch den gemessenen Verhältnissen entspricht, vgl. Blatt 14.

Die Plandarstellungen zeigen ergänzend die berechneten Isolinien der trockenen Bereiche, farblich hinterlegte Flächen in Blatt 42. Die berechneten Potenziale liegen hier häufig unterhalb der Quartärbasis und sind damit eher für die liegenden Schichten relevant. Generell ist auf der Oberfläche des darunter folgenden Grundwasserstauers zumindest zeitweilig eine Grundwasserführung möglich. Auch lokale Rinnensysteme können oberflächennah Grundwasser abführen. Im Falle einer hydraulischen Barriere, wie sie die untersuchten Tunnel oB darstellen, ist auch für diese oberflächennahen Vorkommen eine Stauwirkung möglich. Daher werden in den nachfolgenden Betrachtungen auch die Isolinien der „trockenen“ Bereiche dargestellt und bewertet.

Der Soll-Ist-Vergleich erfolgt für die Quartärmessstellen, welche vorrangig im südlichen Umfeld der Trassen vorhanden sind. Danach resultiert im südlichen Abschnitt ein Grundwasserstand, welcher um mehr als 1 m höher liegt als im November 2023 gemessen. Die stärkere Differenz zum Wasserstand der Messstelle 1506 (Nordseite Bestandstunnel Station Bockenheim) beruht teils auf einer kurzzeitigen Schwankung des gemessenen Grundwasserstands, vgl. Anhang 5. Etwas höhere Wasserstände stellen für die Bemessung der hydraulischen Auswirkungen einen konservativen Ansatz dar, da die erforderliche Grundwasserabsenkung etwas stärker ausfällt als zur gemessenen Situation.

¹⁵ <https://fh-dggv.de/kalpro-gw-modelle> letzter Zugriff am 12.07.2024

Die flache Messstelle am Rampenbauwerk der Variante 1d zeigt eine gute Übereinstimmung, ebenso die in der Talaue der Nidda gemessenen Werte. Die flachen Messstellen im Palmengarten zeigen im Nordosten eine gute Übereinstimmung, im nordwestlichen Bereich (ehem. Leonhardsbrunnen) ein etwas tieferes Niveau der Simulation.

7.2.2 Darstellung der Kalibrierergebnisse – Tiefenlage 110 mNHN

Der in Blatt 43 dargestellte Soll-Ist-Vergleich ist für die Tiefenlage der Staden-Formation in den nordöstlichen Untersuchungsbereichen repräsentativ. Für die westlichen Tunnelabschnitte der Varianten 1a und 1d ist diese Tiefenlage nicht relevant. Eine bauzeitige Grundwasserentnahme ist aus diesen Schichten nicht vorgesehen, doch ist hier eine mögliche Barrierewirkung der Bauwerke zu bewerten. An der Startbaugrube und Rampe der Variante 3i im Bereich der Miquelanlage zeigt sich mit einem berechneten Niveau von rd. 112 mNHN eine gute Übereinstimmung mit dem gemessenen Niveau von etwa 111 mNHN der Staden-Schichten, vgl. Blatt 17. An der Station Campus Westend wird das gemessene Potenzial von 116 - 117 mNHN nicht ganz erreicht. So zeigt die Modellrechnung ein Niveau von 112,5 - 113 mNHN. Jener Bereich ist durch einen vielfältigen Fazieswechsel sowie eine intensive Tektonik geprägt, welche eine genaue Nachbildung der Grundwasserverhältnisse erschwert. Jedoch konnte im östlichen Einzugsgebiet bzw. Zustrom eine ausreichende Übereinstimmung erzielt werden. Da das Einzugsgebiet in der aus Basalt und Staden-Schichten aufgebauten Kuppenlage des Campus-Areals nur über eine geringe Ausdehnung verfügt und an der Station eine ausreichende grundwassererfüllte Mächtigkeit von rd. 7 - 10 m vorhanden ist, lassen sich die permanenten Potenzialänderungen dieses Grundwasserleiters auch bei einem etwas tieferen Wasserstandsniveau der Kalibrierung hinreichend genau prognostizieren.

7.2.3 Darstellung der Kalibrierergebnisse – Tiefenlage 95 - 100 mNHN

Diese Tiefenlage repräsentiert den voraussichtlichen Förderhorizont der Niederrad-Formation für die Bauwerke der Variante 3i sowie von zentralen Tunnelabschnitten der Variante 1a und der Rampe Variante 1d. Auch die Grundwassermessstellen des Botanischen Gartens und Grüneburgparks erschließen häufig Schichten dieses Tiefenniveaus, Blatt 44 und Blatt 45.

Die gemessenen Potenzialsprünge, welche an den Verwerfungen in Erscheinung treten (vgl. Blatt 20), sind in der Simulation schwerlich nachzubilden. Daher ergeben sich im zentralen Untersuchungsbereich Abweichungen der berechneten Potentiale sowohl nach oben als auch nach unten. Die hydraulisch wirksamen Verwerfungen gehen mit einer Begrenzung von mehr oder weniger isolierten Grundwasservorkommen einher. Durch die Modellierung entstehen hingegen größere Zusammenhänge, welche in den Modellläufen eine größere

Reichweite von Potenzialänderungen zulassen. Somit stellt das Kalibrierergebnis einen eher konservativen Ansatz dar. An den für die Wasserhaltung relevanten Bauwerken lassen sich exemplarisch folgende Werte vergleichen, Tab. 8:

Tab. 8: Soll-Ist-Vergleich Niederrad-Formation (95 – 100 mNHN) an Bauwerken

Bauwerk	Variante	GW-Potenzial gemessen / interpoliert (11/2023) in mNHN	GW-Potenzial berechnet in mNHN
Kurztunnel BAB 66	1a	106,5 – 107	107,5 – 108,5
Notausstieg Ditmarstraße	1a	101,5	103
Rampe	1d	101 - 102	103,5 – 104,5
Notausstieg Palmengarten	1d	97,5 - 98	101
Rampe/ Startbaugrube	3i	108 - 109	108,5 - 109
Station Campus Westend	3i	105 - 108	108 - 109
Notausstieg August-Siebert-Straße	3i	102 - 103	103 - 104

Es resultieren überwiegend etwas höhere Potenziale der Simulation, sodass prinzipiell die die höheren Grundwasserstände des Frühjahr 2024 wiedergespiegelt werden. Dadurch fallen berechneten Entnahmeraten etwas höher aus als bei dem im November 2023 gemessenen Niveau zu erwarten wäre (konservativer Ansatz).

7.2.4 Darstellung der Kalibrierergebnisse – Tiefenlage 80 mNHN

Die etwas tieferen Niveaus sind für den südlichen Anschluss der drei Varianten an den Bestandstunnel Bockenheimer Warte sowie in den tieferen Tunnelabschnitten der Variante 3i von Interesse. Der Soll-Ist-Vergleich lässt im Anschlussbereich ein etwas höheres Potenzial der Kalibrierung erkennen, welches mit rd. 98,5 - 99 mNHN das an den Messstellen gemessene Niveau von rd. 96 - 98 mNHN übersteigt. Die vergleichsweise großen Unterschiede der gemessenen Grundwasserstände dieses Bereichs lassen jedoch auf unterschiedliche Druckpotenziale der jeweils angeschlossenen Filterstrecken schließen. Mit einem etwas höheren Grundwasserniveau der Simulation ist man daher auf der sicheren Seite. Dies trifft auch auf die tiefen Tunnelabschnitte der Variante 3i im Bereich des Grüneburgparks zu, bei denen steilere Gradienten eine stärkere Barrierewirkung erwarten lassen. Im westlichen Untersuchungsgebiet (Bockenheim) sowie an der Westseite des Botanischen Garten zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

8 Simulation der hydraulischen Auswirkungen

8.1 Übersicht der Simulationsläufe und der betrachteten Differenzen

Basierend auf dem vorliegenden Planungsstand werden die hydraulischen Veränderungen bei Anwendung unterschiedlicher Randbedingungen mittels des Grundwassermodells simuliert. Die Berechnung der Auswirkungen erfolgt stationär, d.h. es wird eine zeitlich unbefristete Änderung bei stabiler Grundwasserneubildung zugrunde gelegt. Die Ergebnisse der Simulationen werden als Strömungssimulation (Grundwassergleichenplan) sowie als Differenzenplan zum Ausgangszustand (Variante A00) dargestellt.

Eine Grundwasserentnahme erfolgt nach Fertigstellung der Bauwerke nicht. Zur Visualisierung des permanenten Eingriffs wurde aufgrund der hohen Übereinstimmung mit dem Nullzustand in der Regel auf die Darstellung von GW-Gleichenplänen verzichtet und lediglich die sich ergebende Wasserstandsdifferenz dargestellt.

Folgende Modellläufe wurden für die Betrachtung bauzeitlicher und permanenter Zustände simuliert:

Tab. 9: Übersicht der Modellläufe

Modelllauf	Trassenvariante	Aktive Bereiche der Wasserhaltung und Bauwerke	Darstellung Isolinien	Darstellung Differenz zum Ausgangszustand
A00	Ausgangszustand	Ist-Zustand der Kalibriersituation, Grundwasserstände 11/2023	x	
A01	1a Bauzeit	Tunnel oB mit Verbauwänden, Wasserhaltung 1 m unter Baugrubensohle, Wasserhaltung an Brückenfundamenten	x	x
A02	1a Endzustand	Tunnel oB mit Verbauwänden		x
A03	1d Bauzeit	Rampe/ Startbaugrube mit Verbauwänden, Wasserhaltung 1 m unter Baugrubensohle, Wasserhaltung an Brückenfundamenten	x	x
A04	1d Endzustand	Rampe/ Startbaugrube mit Verbauwänden, Tunnelröhren und Notausstieg		x
A05	3i Bauzeit	Station Campus Westend/ Rampe/ Startbaugrube mit Verbauwänden, Wasserhaltung 1 m unter Baugrubensohle	x	x
A06	3i Endzustand	Station Campus Westend/ Rampe/ Startbaugrube mit Verbauwänden, Tunnelröhren und Notausstiege		x

Bauphasen_Varianten_20240627.xlsx

In den Grundwassergleichenplänen wird jeweils der Modelllauf der betrachteten Variante (blau) sowie der Nullzustand (A00, grün) dargestellt. Dadurch sind Veränderungen der Grundwasserfließrichtungen besser zu ersehen.

Die Grundwasserstandsänderungen wurden jeweils aus der Differenz zwischen hydraulischem Eingriff und Nullzustand (A00) berechnet. Die Plandarstellung erfolgt jeweils für folgende Modellknotenschichten:

- Modellknotenschicht 2 – Quartär/ Pliozän
- Modellknotenschicht 8 - Tiefenlage 115 mNHN (nur Variante 3i)
- Modellknotenschicht 11 – Tiefenlage 100 mNHN
- Modellknotenschicht 14 – Tiefenlage 85 mNHN

Die Modellknotenschichten 11 und 14 sind für den größten Teil der unterirdischen Bauwerke maßgeblich und veranschaulichen die stärksten Grundwasserstandsänderungen. Die Modellknotenschicht 2 ist für die Beschreibung der Auswirkungen auf die Vegetation relevant. In trockenen Bereichen wird das Potenzial der nächsttieferen Modellschicht dargestellt. Für die Variante 3i wurde aufgrund der höheren morphologischen Position im Bereich der Station Campus Westend zusätzlich die Tiefenlage 115 mNHN (Modellknotenschicht 8) dargestellt.

8.2 Nullzustand, Modelllauf A00

Da für den Ausgangszustand keine von der gemessenen Situation abweichenden Randbedingungen zu berücksichtigen waren, stellt der Kalibrierzustand zugleich den Nullzustand der Betrachtung dar (A00), vgl. Kap. 7.2.1.

8.3 Bauzeitiger und permanenter hydraulischer Eingriff

Die Ergebnisse der Simulationen des Einflusses in der Bauzeit werden als Strömungssituation (Grundwassergleichenplan) sowie als Differenz zum Ausgangszustand (Nullzustand Modelllauf A00) dargestellt.

Aufgrund der teils geringen Veränderungen der permanenten Zustände gegenüber dem Nullzustand und des großen Umfangs der Planunterlagen beschränkt sich die Darstellung hier auf die Grundwasserstandsdifferenzen, Tab. 9.

8.4 Randbedingungen der Baumaßnahmen und Bauwerke

8.4.1 Bauzeitige hydraulische Eingriffe

Folgende Faktoren sind für die Bauzeit zu berücksichtigen:

- In der Bauphase ist in einzelnen Bauabschnitten eine Restwasserhaltung sowie eine Grundwasserentspannung der Baugrubensohle und teilweise auch der Baugrubenwänden erforderlich, die zu einer Grundwasserabsenkung im Umfeld der Maßnahme führt.
- Im Zuge der Bauplanung wird zu prüfen sein, ob eine Wiederversickerung des in der Bauphase entnommenen Grundwassers möglich ist. In Grünanlagen kann dies bei einem ungeeigneten Chemismus des Wassers zu Versalzungs- bzw. Vernässungsschäden der Vegetation führen. Bei ausreichender Eignung des Wassers wäre allerdings auch eine Versickerung eines Teilstroms möglich, durch welchen potenzielle negative Auswirkungen auf die Vegetation vermieden werden können. Vorsorglich wird in der vorliegenden Variantenuntersuchung zunächst auf eine Wiederversickerung verzichtet.
- Mit der bauzeitigen Entnahme können Veränderungen der Grundwasserfließrichtungen einhergehen. Diese können vorhandene Schadstoffverunreinigungen des Grundwassers verlagern und laufende Sanierungsmaßnahmen beeinflussen. Nach aktuellem Kenntnisstand sind diesbezüglich keine Gefahrenpotenziale erkennbar.
- Durch die Einbringung von Baustoffen und Hilfsmitteln bzw. einen potenziellen Eintrag von löslichen Substanzen / Schadstoffen in der Bauphase in den Untergrund kann es zu hydrochemischen Veränderungen im unmittelbaren Grundwasserabstrom der Bauwerke kommen.

Die einzelnen Bauwerke sowie die Lage der Entspannungsbrunnen der drei Varianten gehen aus den Plänen Blatt 48 - Blatt 50 hervor. Die Absenkziele der Brunnen wurden jeweils mit 1 m unter der Baugrubensohle angesetzt. Da für die Baumaßnahme lediglich eine Absenkung von 0,5 m unter Sohle erforderlich ist, liegt der Ansatz auf der sicheren Seite und deckt auch höhere Druckpotenziale mit ab. Die Entnahme erfolgt über die Entspannungsbrunnen jeweils aus den Modellschichten unterhalb der Baugrubensohle. Die endgültigen Abmessungen der Bauwerke und Brunnen ergeben sich aus statischen, konstruktiven und wirtschaftlichen Erfordernissen und können von den genannten Planungsständen abweichen.

8.4.2 Permanente hydraulische Eingriffe

Eine langfristige Grundwasserentnahme bzw. Drainierung, die über die Bauphase hinausgeht, ist bei keiner Trassenvariante geplant. Die möglichen Auswirkungen auf die hydraulische Situation des künftigen Ausbauzustandes betreffen somit nur den Eingriff in den Grundwasserleiter, der hinsichtlich folgender Komponenten zu bewerten ist:

- Die Minderung der Transmissivität des Grundwasserleiters resultiert aus der Verringerung des Durchflussquerschnittes der betroffenen Aquiferabschnitte. Daraus folgen ein oberstromiger Aufstau und eine unterstromige Absenkung, welche modelltechnisch zu quantifizieren sind.
- Aus einer Versiegelung von Baubereichen kann die Verringerung der Grundwasserneubildung resultieren. Aufgrund der überwiegenden städtischen Bebauung bzw. der bereits bestehenden Versiegelungen im Bereich der oberirdischen Bauwerke bzw. Tunnel oB ist gegenüber dem Ist-Zustand jedoch nicht mit einer relevanten Veränderung der Grundwasserneubildung zu rechnen. Für die maschinell errichteten Tunnel ergeben sich ebenfalls keine Veränderungen der Grundwasserneubildung. Auf eine Anpassung der Grundwasserneubildungsrate wurde daher verzichtet.

In das Modell wurden die unterirdischen Bauteile entsprechend ihrer Tiefenlage den betroffenen Modellelementlagen zugeordnet. Sofern nur ein Teil einer Modellelementlage betroffen ist, wurde ein Faktor der Restdurchlässigkeit angesetzt. Für die Bauwerke wurden folgende Randbedingungen zugrunde gelegt:

- Geometrie der Tunnelbauwerke siehe Kap. 2.2 - 2.4
- Für die Unterkante der geschlossenen bzw. vollständig dichten Verbauwände der Tunnel oB sowie der Stations- und Rampenbauwerke wurde eine Tiefe von 3 m unter Baugrubensohle (BG) angesetzt, was den Erfahrungen aus vergleichbaren Bauprojekten entspricht. Zusätzlich erfolgt für eine Gewährleistung der Standsicherheit der Verbauwände eine Vertiefung einzelner Wandelemente bis zu einer Tiefe von

$$\text{Tiefe der Baugrube BG} + (0,7 * \text{Tiefe BG}) \text{ in m}$$

Gemäß den Erfahrungen vergleichbarer Bauprojekte wird eine Restdurchlässigkeit der unterbrochenen Verbauwand von 50 % zum Ansatz gebracht.

Die Modelllagen wurden durch den Einbau der Verbauwände entsprechend der gewählten Einbautiefen eingengt. Bis zur Unterkante der vollständig ausgebildeten Wände wird der Grundwasserdurchfluss praktisch vollständig unterbunden, wobei in der Modellierung eine geringe Restdurchlässigkeit von $k_f = 10^{-10}$ m/s angesetzt worden ist.

Die Tunnelröhren ermöglichen in Abhängigkeit der Tiefenlage in der Regel auch eine Überströmung in den darüber liegenden Schichten. Für die Tunnel oB wurde aufgrund der bewerteten Verbauwände keine Überströmung vorgesehen¹⁶.

8.5 Prognose der Grundwasserstandsänderungen Variante 1a

8.5.1 Modelllauf A01 – Situation in der Bauzeit

Durch die dichten Verbauwände des Tunnels oB wird im Gegensatz zu früheren Tunnelbaumaßnahmen eine Grundwasserentnahme aus dem Quartär vermieden. Es zeigt sich jedoch bereits in der Bauzeit eine Barrierewirkung der Verbauwände, welche an der Nordwestseite einen Aufstau und im Südosten eine Absenkung hervorrufen, Blatt 52. In den grundwasserführenden Bereichen des Palmengartens wird der oberflächennahe Zustrom von Norden unterbunden und es resultiert eine Grundwasserabsenkung von bis zu 0,5 m in den nördlichen Randlagen, welche somit zusätzlich trockenfallen. Am Westrand des Palmengartens hingegen zeigt sich ein moderater Anstieg von etwa 0,1 m am Nordufer des Weihers bis zu rd. 1 m am Tunnel oB. Am Botanischen Garten und dem Grüneburgpark sind die Veränderungen in den oberflächennahen Schichten eher gering.

Infolge der geringen Vertikaldurchlässigkeit der Niederrad-Formation ist im Grundwasser der Deckschichten auch bei geringer Wasserführung ein Aufstau entlang der Verbauwände möglich. So zeigt sich an der Nordwestseite des Tunnels oB ein Grundwasseranstieg gegenüber dem Ist-Zustand von bis zu rd. 2 - 3 m im Abschnitt der Frauenlob- und Ditmarstraße. Die Stauwirkung geht zudem mit einer verstärkten Aussickerung in tiefere Stockwerke einher.

Eine geringe Barrierewirkung ist für den kurzen Tunnelabschnitt unter der BAB 66 zu erwarten. Aufgrund der geringen Eindringtiefe und Länge erreicht Änderung nur einen Betrag von rd. 0,1 m.

Die Grundwasserströmungsrichtung wird im Quartär an der Nordwestseite des Tunnels oB deutlich nach Süden verschwenkt, erkennbar an einer geänderten Ausrichtung der blauen Isolinien in Blatt 51. In den grundwasserführenden Bereichen des südlichen Modellgebietes ist die Veränderung der Strömungsrichtung hingegen nicht relevant.

In der Tiefenlage 100 mNHN wirkt das Bauwerk wiederum als hydraulische Barriere, sodass am nordwestlichen Zustrom ein Aufstau und im Südosten eine Absenkung resultiert, Blatt

¹⁶ Hinweis: Erfahrungsgemäß erfolgt an den stahlbewerten Verbauwänden nur in Abschnitten ein Rückbau bis zu einer Tiefe von etwa 2 m. Dieser ist für die Grundwasserverhältnisse aufgrund der größeren Flurabstände jedoch nicht relevant.

54. Im Norden des Palmengartens erreicht die Absenkung mit rd. 1,0 m die stärkste Intensität und ist damit auch für die ehemaligen Quellbereiche des früheren Leonhardsbrunnens relevant. Auch der Botanische Garten ist mit bis zu rd. 0,5 m Absenkung betroffen. Der nordwestliche Aufstau erreicht an der Miquelallee auf Höhe der Ditmarstraße einen Betrag von bis zu 1,0 m.

In der Tiefenlage der Grundwasserentspannung bewirken die tieferen Brunnen eine konzentrische Absenkung des Druckniveaus in den Schichten der Niederrad-Formation, Blatt 56. Die Entspannung ist nicht mit einer Absenkung der Grundwasseroberfläche gleichzusetzen, wirkt jedoch über ein vergleichsweise großes Gebiet. So ist eine Potenzialänderung von 0,25 m noch in einer Entfernung von bis zu 600 m zu erwarten. Im berechneten Absenkungsbereich liegen die Brunnen des Palmengartens (-0,75 m) sowie der Notbrunnen VII (-0,4 m). In den tieferen Schichten ist zudem eine relevante Änderung der Strömungsrichtung zu den Brunnen möglich, Blatt 55.

Die Förderleistung der Gesamttrasse beläuft sich auf rd. 55 m³/d mit einem Schwerpunkt auf dem südlichen Tunnelabschnitt.

Im Norden kann je nach Tiefe der Brückenfundamente der Station Botanischer Garten eine Wasserhaltung erforderlich werden. Bei den angesetzten Randbedingungen mit einer Tiefe von etwa 3 m u. GOK wird keine Entnahme erforderlich. Auch der kurze Tunnelabschnitt zur Unterquerung der BAB 66 verbleibt oberhalb des Druckpotenzials des Kluffgrundwasserleiters.

Der kurze Tunnelabschnitt zur Unterquerung der BAB 66 greift nicht in das Grundwasser ein.

8.5.2 Modellauf A02 – Permanente Situation nach Fertigstellung

Die Differenzen zum Ausgangszustand (A00) im Quartär (GWL1) bestätigen einen nördlichen Aufstau in der Größenordnung von bis zu rd. 2 m an der Nordwestseite des Tunnels oB, Blatt 58. Im nördlichen Palmengarten wird der oberflächennahe Zustrom aus Norden abgeschnitten und es resultiert wie in der Bauzeit eine Absenkung von bis zu rd. 1 m, wodurch größere Bereiche der Deckschichten trockenfallen. Lediglich am Westrand des Palmengartens verbleibt am Tunnel oB ein lokaler Anstieg von bis zu 1 m. Am Botanischen Garten sind die Veränderungen mit bis zu -0,1 m eher gering.

In der Niederrad-Formation der Tiefenlage 100 mNHN ist im Palmengarten ebenfalls eine Absenkung zu ersehen, welche aufgrund der fehlenden Entnahme mit rd. 0,5 m etwas geringer ausfällt als in der Bauzeit. Im nördlichen Botanischen Garten ist ein geringer Anstieg der Potenziale um bis zu 0,25 m zu erwarten, Blatt 59. Ein weitläufiger Anstieg zeigt sich im

nordwestlichen Umfeld des Tunnels oB mit einem Schwerpunkt im Bereich der Ditmarstraße (+1,0 m).

Mit zunehmender Tiefe nimmt die Barrierewirkung der Bauwerke allmählich ab, Blatt 60. Am Brunnen des Palmengartens sowie dem Notbrunnen sind nach Beendigung der Wasserhaltung keine Auswirkungen zu erwarten.

8.6 Prognose der Grundwasserstandsänderungen Variante 1d

8.6.1 Modelllauf A03 – Situation in der Bauzeit

Durch die Errichtung geschlossener Tunnelröhren beschränkt sich die Wasserhaltung auf das Rampenbauwerk an der Westseite des Botanischen Gartens mit einer berechneten Förderate von rd. 18 m³/d. In den Deckschichten des Quartärs bleibt die Entnahme aufgrund der geringen Vertikaldurchlässigkeit ohne Auswirkung, jedoch zeigt sich eine schwache Barrierewirkung an den tieferen Einschnitten der Verbauwände, Blatt 62. In der Tiefenlage 100 mNHN nimmt die Absenkung infolge der Wasserhaltung zu, wird jedoch an der Ostseite durch den Aufstau an der Verbauwand kompensiert, Blatt 64. Im nördlichen Palmengarten ist die Grundwasserentspannung in den Schichten der Niederrad-Formation auf 0,1 – 0,25 m begrenzt.

Unterhalb der dichten Verbauwände wirken die Entspannungsbrunnen schließlich in alle Richtungen und erreichen auch im Botanischen Garten eine Potenzialänderung von bis zu -0,25 m nahe dem Rampenbauwerk, Blatt 66. Der maschinell errichtete Tunnel wirkt in der Tiefenlage 85 mNHN zudem als Barriere mit einem Aufstau auf der Ostseite und einer moderaten Absenkung im Westen.

Im Nahbereich der Notausstiege zeigen sich nur geringe Veränderungen bei einer geringen Reichweite von wenigen Metern. In den nördlichen Abschnitten der Trasse entspricht das Modellergebnis erwartungsgemäß der Variante 1a.

8.6.2 Modellauf A04 – Permanente Situation nach Fertigstellung

In den Deckschichten unterscheidet sich die permanente hydraulische Wirkung der Bauwerke kaum von der Bauphase, Blatt 67. In der Tiefenlage 100 mNHN ist die Wirkung auf einen Aufstau im Osten von bis zu rd. 0,5 m und eine Absenkung auf der Westseite der Rampe in etwa gleicher Größenordnung geprägt, Blatt 68. Für den Botanischen Garten ist damit keine nachteilige Veränderung erkennbar.

In größerer Tiefe zeigt sich wie in der Bauzeit eine Barrierewirkung der südlichen, tiefen Tunnelabschnitte. Wiederum ist für den westlichen Palmengarten ein moderater Aufstau von etwa 0,1 - 0,3 m zu ersehen, Blatt 69.

8.7 Prognose der Grundwasserstandsänderungen Variante 3i

8.7.1 Modelllauf A05 – Situation in der Bauzeit

In den oberflächennahen Deckschichten zeigt sich eine schwache Barrierewirkung an der Station Campus Westend mit Differenzen von bis zu 0,25 m, Blatt 71. Auch an der Startbaugrube an der Miquelanlage ist die Änderung mit rd. 0,25 m eher gering. Im Grüneburgpark sind kleine Flächen mit Änderungen von bis zu 0,1 m zu ersehen, welche teils aus den Veränderungen in tieferen Schichten herrühren.

Im nördlichen Untersuchungsgebiet zeigt sich in der Staden-Formation (Tiefenlage 115 mNHN) eine moderate Absenkung im Bereich der Deutschen Bundesbank-Zentrale. Der Aufstau an der Ostseite der Verbauwand wird durch die Wirkung der Grundwasserentnahme kompensiert. Am Bauwerk der Station sind die Veränderungen unwesentlich, Blatt 72.

In der Niederrad-Formation (Tiefenlage 100 mNHN) resultiert eine weitreichende Entspannung, welche nahe der Station 0,5 m übersteigen kann. Der Brunnen der Goethe-Universität liegt mit rd. 0,2 m am Rande des Absenkungsbereichs. Auch im Westen der Startbaugrube ist eine relevante Entspannung von >0,5 m zu ersehen, Blatt 74. Die Veränderungen der Strömungsrichtungen sind hingegen kaum relevant, Blatt 73.

Auch mit zunehmender Tiefe deckt die Potenzialänderung ein weites Gebiet ab, Blatt 76. Wiederum ist darauf hinzuweisen, dass dies lediglich einer Entspannung des Potenzialdrucks in den Klüften des Festgesteinsaquifers entspricht und keine Absenkung der Grundwasseroberfläche gleichkommt. So ist mit der Entspannung in dieser Tiefenlage keine Speicherentleerung verbunden.

In der Bauzeit erfolgt eine Wasserhaltung an der Station Campus Westend mit vergleichsweise geringen Förderrate von etwa 8 m³/d. Die geringe Rate beruht auf dem recht großen Flurabstand dieses Bereiches und der damit verbundenen geringen bauzeitigen Grundwasserabsenkung.

An der Startbaugrube sowie der Rampe in der Miquelanlage erfolgt eine Wasserhaltung von etwa 13,5 m³/d. Wie in Kap. 8.4 dargelegt, soll an den Notausstiegen aufgrund der erheblichen Einbautiefen auf eine Wasserhaltung verzichtet werden.

8.7.2 Modellauf A06 – Permanente Situation nach Fertigstellung

Die Barrierewirkung der Bauwerke in den jeweils betroffenen Tiefenlagen geht aus Blatt 77 - Blatt 80 hervor. Wie in der Bauzeit zeigt sich eine schwache Barrierewirkung der Station und der Startbaugrube in den oberflächennahen Deckschichten, Blatt 77, sowie der Staden-

und Basalt-Formation (Tiefenlage 115 mNHN, Blatt 78). In den Grünanlagen des Grüneburgparks betragen die Wasserstandsänderungen $<0,1$ m. An den Notausstiegen ist die Barrierewirkung auf eine Reichweite von wenigen Metern begrenzt.

In den Schichten der Niederrad-Formation ist eine geringe Stauwirkung der Notausstiege sowie des in der jeweiligen Tiefenlage verlaufenden Tunnelröhren erkennbar. Bei 100 mNHN zeigt sich ein Aufstau nordwestlich der Tunnel an der Miquelanlage sowie eine Absenkung von rd. $0,1$ m am Nordrand des Grüneburgparks, Blatt 79. Diese pausen sich jedoch nicht in die darüber folgenden Staden-Schichten durch, vgl. Blatt 78.

Die von den Röhren ausgehende Wirkung wandert mit zunehmender Tiefe in den zentralen, tiefsten Abschnitt unterhalb des Grüneburgparks, bleibt jedoch auf weniger als $0,25$ m begrenzt, Blatt 80. Die Reichweite einer von den Tunnelröhren ausgehenden Potenzialänderung von $0,1$ m liegt bei $40 - 75$ m.

8.8 Permanente Einwirkung von Wärme auf den Untergrund

Aus dem späteren Fahrbetrieb und der damit einhergehenden Energieumsetzung in Wärme sowie der Wärmefreisetzung aus Bremsvorgängen kann eine Erwärmung der Tunnelröhren resultieren. Allerdings wird durch die Absenkung der Gleisgradienten der Trassen 1d und 3i zwischen den Stationen der Energieverbrauch bei der Beschleunigung und Abbremsung minimiert. Gemäß den Betriebserfahrungen der VGF kann für die Bestandstunnel von einer mittleren Temperatur von $13 - 15$ °C ausgegangen werden. Dieser steht eine Grundwassertemperatur unterhalb der atmosphärisch beeinflussten Deckschichten von $12,6$ bis etwa 16 °C entgegen, vgl. Anhang 6. Aufgrund der geringen zu erwartenden Temperaturdifferenz sind keine Wärmeeinwirkungen im Umfeld der Tunnel und damit auch keine vegetationsrelevanten Veränderungen des Wasserhaushalts im effektiven Wurzelraum zu erwarten. Auf eine Modelluntersuchung einer Wärmeausbreitung in das Tunnelumfeld konnte daher verzichtet werden.

9 Potenzielle Auswirkungen der bauzeitigen Grundwasserentnahmen und permanenten Wirkungen der Bauwerke

9.1 Auswirkungen auf das Schutzgut Grundwasser

Für die Frankfurter Innenstadt sind Mineral- und Thermalwasservorkommen überliefert, u. a. im Bereich des Grindbrunnens¹⁷, dessen eigentliche Quellen man im Bereich des Erweiterungsbaus der ehemaligen Dresdner Bank / Galileo Turm vermutet. Diese dort austretenden Wässer waren stark natron-schwefelwasserstoffhaltig, was zu einem Geruch nach faulen Eiern führte. Im Grundwasser der miozänen Schichtenfolge ist im Verbreitungsgebiet der Hydrobienschichten Schwefelwasserstoff enthalten, bei einem von oben nach unten abnehmenden H₂S-Gehalt. Der erhaltene Grindbrunnen ist südlich des Hauptbahnhofs verortet und wird mittels eines Monitoringprogramms hinsichtlich der Wasserstands- und der hydrochemischen Entwicklung überwacht.

Die im Raum Bad Vilbel genutzten Mineralwässer sind vorwiegend einem Tiefenwasser-Aufstieg aus dem Rotliegend-Untergrund zuzuordnen. Das Mineralwasser und auch Kohlendioxid steigen hier auf tiefgreifenden Störungen, die die gesamte tertiäre Schichtenfolge durchschlagen, auf und können in Talauenbereichen oberflächlich austreten, /2/.

Die hydrochemische Charakteristik des im Untersuchungsgebiet gewonnenen Grundwassers lieferte hingegen keine Hinweise auf einen Tiefenwassereinfluss. Eine aktuelle Nutzung von Heil- bzw. Mineralwasservorkommen ist für das Untersuchungsgebiet nicht gegeben. Aufgrund der großen Entfernung und der morphologisch deutlich höheren Position der geplanten Bauwerke sind hydraulische und hydrochemische Auswirkungen auf die Vorkommen auszuschließen.

Hinweise auf artesisch gespanntes Grundwasser liegen für das Untersuchungsgebiet nicht vor.

Infolge der bauzeitigen Grundwasserentnahmen aus den Schichten der Niederrad-Formation kann eine befristete Intensivierung von Tiefenwasseraufstiegen der miozänen Aquifere hervorgerufen werden. Diese kann mit einer Veränderung der hydrochemischen Bedingungen bzw. einem Anstieg der Mineralisation sowie einer ansteigenden Temperatur einhergehen.

¹⁷ https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Brunnen_in_Frankfurt_am_Main (abgerufen 28.06.2024)

Aufgrund der höheren Gesamtentnahmen und der morphologisch tiefen Position des Tunnels oB ist der Trassenvariante 1a das höchste Risiko einer Einwirkung auf das Tiefenwasser zuzuordnen. Generell ist die Wahrscheinlichkeit einer hydrochemischen Grundwasseränderung jedoch gering. Zudem ist nach Einstellung der Entnahme stets eine Wiedereinstellung des früheren Zustands zu erwarten.

Permanente Auswirkungen nach Bauende auf das Schutzgut Grundwasser sind aufgrund der geringen zu erwartenden Wasserstandsänderung für alle Trassenvarianten auszuschließen.

9.2 Bemessung der voraussichtlichen Grundwasserentnahmen

Generell führen die beim Bau zu entnehmenden Grundwassermengen zu einer Grundwasserabsenkung in den umliegenden Gebieten und sind daher bewertungsrelevant. Zudem gehen größere Mengen mit einem erhöhten technischen Aufwand der Wasserhaltung (Energieverbrauch, Aufwand für die Reinigung) einher.

In Abhängigkeit der unterschiedlichen Bauzeiten sowie der mittels des Grundwassermodells berechneten Förderraten lassen sich die voraussichtlichen Gesamtentnahmen beim Bau der Trassenvarianten abschätzen, Tab. 10.

Tab. 10: Bemessung der Gesamtentnahmen der Trassenvarianten

Trassenvariante			Tunnel offene Bauweise unter BAB 66	Brückenfundamente Station Botanischer Garten	Tunnel offene Bauweise, Notausstiege und Rampe Zeppelinallee/ Miquelallee	Rampe/ Startbaugrube westlich Botanischer Garten	Station Campus Westend	Rampe/ Startbaugrube Miquelanlage	Summe Fördermengen
1a	Förderrate gemäß Modell	[m³/d]	0	0	54,7				
	Dauer der Wasserhaltung	[d]	365	365	1.825				
	Gesamtmenge Wasserhaltung (gerundet)	[m³]	0	0	99.800				99.800
1d	Förderrate gemäß Modell	[m³/d]	0	0		17,7			
	Dauer der Wasserhaltung	[d]	365	365		1.095			
	Gesamtmenge Wasserhaltung (gerundet)	[m³]	0	0		19.400			19.400
3i	Förderrate gemäß Modell	[m³/d]					8,1	13,5	
	Dauer der Wasserhaltung	[d]					1.460	1.825	
	Gesamtmenge Wasserhaltung (gerundet)	[m³]					11.800	24.600	36.400

Es zeigt sich eine größere Entnahme beim Bau des in offener Bauweise errichteten Tunnels der Variante 1a, während durch die Bauweise der Variante 1d eine deutliche Minderung

erzielt werden kann. Bei der Variante 3i liegt der Schwerpunkt der Entnahme auf der Startbaugrube, während an der Station Campus Westend aufgrund des großen Flurabstands eine vergleichsweise geringe Menge erwartet wird.

Generell sind die aufgeführten Mengen aufgrund der räumlich begrenzten Einzugsgebiete und der grundwasserschonenden Bauweisen deutlich kleiner als die bei früheren Wasserhaltungen gemessenen Mengen. So wurde beim Bau der bislang errichteten Grundstrecke D im Zeitraum 1990 - 1998 – hier erfolgte die Wasserhaltung noch durch außerhalb der Baugruben liegende Brunnen – eine Gesamtentnahme von 8,8 Mio. m³ verzeichnet, /6/.

9.3 Hydrochemische Auswirkungen auf das Grundwasser durch Baustoffe

Hydrochemisch wirksam können lösliche Bestandteile der Oberflächen von vertikalen Verbauwänden oder der Baugrubensohlen sein. Eine hydrochemische Beeinflussung ist im Abstrom der Tunnel in Form einer Veränderung des pH-Wertes und der Karbonathärte zu erwarten. Im Zuge des Einbaus der Verbauwände an den in offener Bauweise errichteten Tunneln sind zudem Trübungen des Grundwassers sowie eine Erwärmung (Hydratationswärme) im Abstrom zu erwarten. Betroffen sind bei der Variante 1a vorrangig die Schichten der Niederrad-Formation südlich der Miquelallee und westlich der Zeppelinallee. Im südlichen Tunnelabschnitt ist ein Bereich mit größerer Quartärmächtigkeit bei einer südlichen Fließrichtung betroffen. Die potenzielle Veränderung betrifft somit das oberflächennahe Grundwasservorkommen des nördlichen Palmengartens. Aufgrund der großen durchteuften Mächtigkeit der vertikalen Umschließungen und der großen Länge der Baugrube ist die Wirkung größer als bei den übrigen Varianten.

Im Abstrom der maschinell errichteten Tunnel ist gleichfalls eine hydrochemische Beeinflussung möglich. Da die Tübbinge bereits als Betonfertigteile eingebaut werden, ist die Wirkung jedoch geringer als bei dem (flüssig) eingebauten Beton der Dicht-/Bohrpfahlwände der Tunnel oB. In den geschlossenen Tunnelabschnitten kann es beim Auffahren der Tunnel allerdings zur Freisetzung von Spülmittelzusätzen kommen. In den Abschnitten mit tiefer Gleisgradienten der Variante 3i sind vorrangig die tieferen Festgesteinsschichten betroffen, ein Aufstieg in oberflächennahe Deckschichten ist nicht zu erwarten.

In den Baufeldern außerhalb der umschlossenen Baugruben ist von einem Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (Kraftstoffe, Schmierstoffe, Baustoffe) auszugehen, sodass ein Risiko von Handhabungsverlusten und Leckagen zu berücksichtigen ist. Eine unterschiedliche Gewichtung der Varianten kann bei dem bisherigen Planungsstand noch nicht erfolgen. Es wird ein hydrochemisches Monitoring im unmittelbaren Grundwasserabstrom der Baufelder empfohlen. Üblicherweise geht die Wirkung einige Monate nach der Einbringung wieder zurück.

9.4 Bauzeitige Auswirkungen auf oberflächennahe Grundwasservorkommen

Wie aus Blatt 16 zu ersehen ist, sind die oberflächennahen quartären Deckschichten des GWL1 in weiten Bereichen des Modellgebietes bereits zum Ist-Zustand weitestgehend trocken. Das Risiko einer Zustandsverschlechterung infolge der Grundwasserentnahme ist für diese Gebiete daher gering. Allerdings kann auch bei einer geringen Wasserführung der Deckschichten eine Barrierewirkung der Bauwerke durchaus relevant sein. Gemäß den Ausführungen in Kap. 8.5.2 ist im Abstrom des Tunnels der Variante 1a eine dauerhafte Unterbrechung des Zustroms aus Norden und ein zusätzliches Trockenfallen der Deckschichten im nördlichen Palmengarten zu erwarten.

Die von der Rampe der Variante 1d ausgehende Absenkung ist im Vergleich dazu eher gering, da die Ausrichtung des Bauwerks im Wesentlichen der nach Süden orientierten Strömungsrichtung folgt.

In der Variante 3i sind die Wasserstandsänderungen in den Deckschichten auf weniger als rd. 0,3 m begrenzt und erlangen nur eine geringe Reichweite.

9.5 Auswirkungen auf Oberflächengewässer

Innerhalb des von einer relevanten Absenkung der Trassenvarianten betroffenen Gebietes sind folgende Oberflächengewässer vorhanden:

- Weiher im Palmengarten: Das Teichniveau von rd. 99 mNHN liegt oberhalb des Grundwasserstands in den umliegenden quartären Deckschichten bzw. der Nieder-rad-Formation. Der Teichwasserstand wird durch eine Zuleitung von Dachwasser des Palmenhauses und der Anzuchtgärtnerei sowie aus Wasser des Betriebsbrunnens des Palmengartens gestützt¹⁸. Zur Verhinderung einer Aussickerung wurde die Teichsohle zudem bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts betoniert, /3/. Ein Grundwasseranschluss ist danach nicht zu erwarten. Dementsprechend sind infolge der bauzeitigen Veränderungen auf den Grundwasserstand keine Auswirkungen auf den Teich zu erwarten.
- Teich im Botanischen Garten: In der Mitte des wissenschaftlich geführten Parks der Johann Wolfgang Goethe-Universität befindet sich ein Teich, der von zwei Bächen gespeist wird¹⁹. Der Teichwasserstand liegt mit rd. 106 mNHN knapp oberhalb des Grundwasserstands des darunterliegenden Verwitterungshorizonts. Aufgrund der zu

¹⁸ <https://frankfurt.de/themen/umwelt-und-gruen/orte/stadtgewaesser/teiche-seen-tuempel/teiche-im-palmen-garten>, abgerufen 28.06.2024

¹⁹ <https://frankfurt.de/themen/umwelt-und-gruen/orte/stadtgewaesser/teiche-seen-tuempel/teich-im-botani-schen-garten>, abgerufen 28.06.2024

erwartenden Aussickerung kann von einer Kolmatierung (Selbstabdichtung) der Teichsohle ausgegangen werden, welche die Aussickerung in den Untergrund reduziert. Allerdings verfügt der Teich über einen Grabenzulauf auf der Nordseite, welcher zumindest teilweise aus dem oberflächennahen Grundwasserstockwerk gespeist wird.

- Der künstlich angelegte Teich in der Miquelanlage südlich der Bundesbank hat einen Wasserstand von rd. 116 mNHN und übersteigt damit deutlich das in den Sanden der Staden-Formation gemessene Niveau von etwa 111 m NHN, vgl. Blatt 17. Ein Grundwasseranschluss ist somit nicht gegeben.

Eine vergleichende Betrachtung der Auswirkungen der Trassenvarianten betreffen damit vorrangig den Teich des Botanischen Gartens. Dieser bzw. dessen nördliches Einzugsgebiet wird durch den Tunnel der Variante 1a geringfügig (-0,1 m) tangiert, sodass der Zustrom etwas gemindert werden könnte. In den übrigen Trassenvarianten zeigen sich keine relevanten Auswirkungen.

9.6 Auswirkungen auf Biotop und Naturschutzgebiete

Innerhalb oder in der Nähe der von einer Grundwasserabsenkung potenziell betroffenen Bereiche der Varianten sind keine Biotop der hessischen Biotopkartierung, gesetzliche geschützte Biotop oder Naturschutzgebiete verzeichnet²⁰. Eine Betroffenheit liegt somit nicht vor.

9.7 Auswirkungen auf Gehölze und Baumbestände

Potenziell negative Wirkungen können in den Bereichen mit vegetationsrelevanten Flurständen von bis zu 4,3 m entstehen, vgl. Blatt 29. Auswirkungen sind nach den Ergebnissen der Modellierung in folgenden Bereichen zu erwarten:

- Der Tunnel der Variante 1a bewirkt eine dauerhafte Abschnürung des Zuflusses in den nördlichen Palmengarten, sodass dort zusätzliche Bereiche des oberflächennahen Aquifers trockenfallen. Zudem zeigt sich im Zustrom des Teiches des Botanischen Gartens eine schwache Grundwasserabsenkung, welche für die Vegetation der Uferzonen relevant sein kann.
- Die Baumaßnahmen der Variante 1d führen zu keinen Veränderungen in vegetationsrelevanten Bereichen der Deckschichten. Allein im Abschnitt unmittelbar südlich

²⁰ Abfrage gemäß Natureg Viewer, HLNUG, <https://natureg.hessen.de/mapapps/resources/apps/natureg/index.html?lang=de>, abgerufen 28.06.2024

des Startbauwerks der TBM tangiert die Tunneloberfläche (Firste) den für die Wasserversorgung des Wurzelraums relevanten Tiefenabschnitt auf einer Länge von bis zu 50 m, vgl. Schnittdarstellung in Anhang 2.

- Auf der Ostseite der Startbaugrube und Rampe der Variante 3i ist während der bauzeitigen Wasserhaltung eine Grundwasserabsenkung in der Staden-Formation von etwa 0,25 m zu erwarten. Diese ist auch für die Uferbereiche mit geringeren Flurabständen rings um den Teich der Miquelanlage relevant.
- Auf der Westseite der Startbaugrube und Rampe der Variante 3i ist infolge der Barrierewirkung eine Grundwasserabsenkung von bis zu 0,25 m zu erwarten. Diese ist jedoch lediglich für einen tieferen künstlichen Geländeeinschnitt der Unterfahung der L 3004 relevant. Eine zu erwartende Absenkung im westlichen Umfeld der Station Campus Westend von bis zu 0,25 m sind hingegen keine vegetationsrelevanten Flurabstände gegeben. Die Tunnelröhren tangieren unmittelbar südlich der Startbaugrube den effektiven Wurzelraum auf einer Länge von weniger als 50 m. In den übrigen Abschnitten verbleibt die Tunneloberfläche stets unterhalb des vegetationsrelevanten Flurabstands von 4,3 m.

In den Bereichen, in denen die Tunnel-OK unterhalb des vegetationsrelevanten Flurabstands von 4,3 m verbleibt, ist bereits zum Ist-Zustand kein Grundwassereinfluss auf die Vegetation gegeben. Bei einer Position der Firste unterhalb der Grundwasseroberfläche ist durch den seitlichen Grundwasserzustrom eine ausreichende Wasserversorgung des Kapillarsaums gewährleistet, sodass sich keine Auswirkungen auf die Vegetation ergeben.

In den „trockenen“ Bereichen der quartären Deckschichten bzw. kann zwar lokal eine Grundwasserführung in Form eines dünnen Saums nach stärkeren Niederschlägen gegeben sein, welche auch für die Vegetation verfügbar ist. Diese wird jedoch durch eine Grundwasserabsenkung in den tieferen Grundwasserstockwerken in der Regel nicht tangiert. Hingegen kann sich in diesen Bereichen eine Verschlechterung der Wasserversorgung des Wurzelraums ergeben, wenn der oberflächennahe Grundwasserzustrom durch ein Bauwerk unterbrochen wird und dadurch zusätzliche Bereiche trockenfallen. Dies ist in folgenden Bereichen möglich:

- Der Tunnel der Variante 1a verhindert eine Unterströmung der Miquelallee, sodass den nördlichen Randlagen des Palmengartens oberflächennahes Grundwasser entzogen wird.
- Im unmittelbaren südlichen Abstrom des Startbauwerks der TBM bzw. der Rampe kann oberflächennah eine Unterbrechung der Grundwasserströmung im gegeben

sein. Diese ist im anstehenden, bis zu rd. 4 m mächtigen Lösslehm allerdings quantitativ gering. Zudem entspricht die Nord-Süd-Ausrichtung des Bauwerks der nach Süden gerichteten Fließrichtung.

Im westlichen Abstrom der oberirdischen Bauwerke der Variante 3i sind im obersten Grundwasserstockwerk (Staden-Formation) keine vegetationsrelevanten Flurabstände gegeben.

9.8 Auswirkungen auf externe Grundwassernutzungen

Der **Palmengarten** verfügt über einen zentral gelegenen Betriebsbrunnen mit einem Wasserrecht von 20.000 m³/a. Dieser wird zur Bewässerung der Grünanlagen sowie zur Stützung des Weihers genutzt. Der „Tiefbrunnen“ besteht aus einem gemauerten Brunnenschacht mit einer Tiefe von rd. 11,6 m. In einer Tiefe von etwa 7,5 m führt ein gemauerter runder Stollen mit einem Durchmesser von bis zu 1,05 m über eine Länge von 9 m in das umgebende Festgestein der Niederrad-Formation. Der Verlauf des Stollens ist nicht erkundet. An der Sohle des Schachtes befand sich vormals eine Tiefbohrung, welche nach der vorliegenden Ausbauezeichnung jedoch durch einen Holzstopfen (\varnothing 15 cm) abgedichtet wurde. Der Betriebswasserstand lag 2021 auf einem Niveau von 6,4 - 7,8 m unter der Schacht-OK (97,2 - 95,8 mNHN). Die Förderung betrug 19.640 m³, sodass das Wasserrecht näherungsweise ausgeschöpft wurde. Die Lage des Brunnenschachtes sowie der nachfolgend beschriebenen Brunnen geht aus Abb. 6 hervor.

Der Brunnen wird durch die bauzeitige Grundwasserentnahme der Variante 1a mit einer Grundwasserabsenkung von bis zu 0,75 m betroffen sein, vgl. Blatt 56. Da sich der Grundwasserstand bereits zum Ist-Zustand in der Tiefenlage des zuführenden Stollens bewegt, kann dadurch eine relevante Einschränkung der Wasserversorgung des Palmengartens gegeben sein.

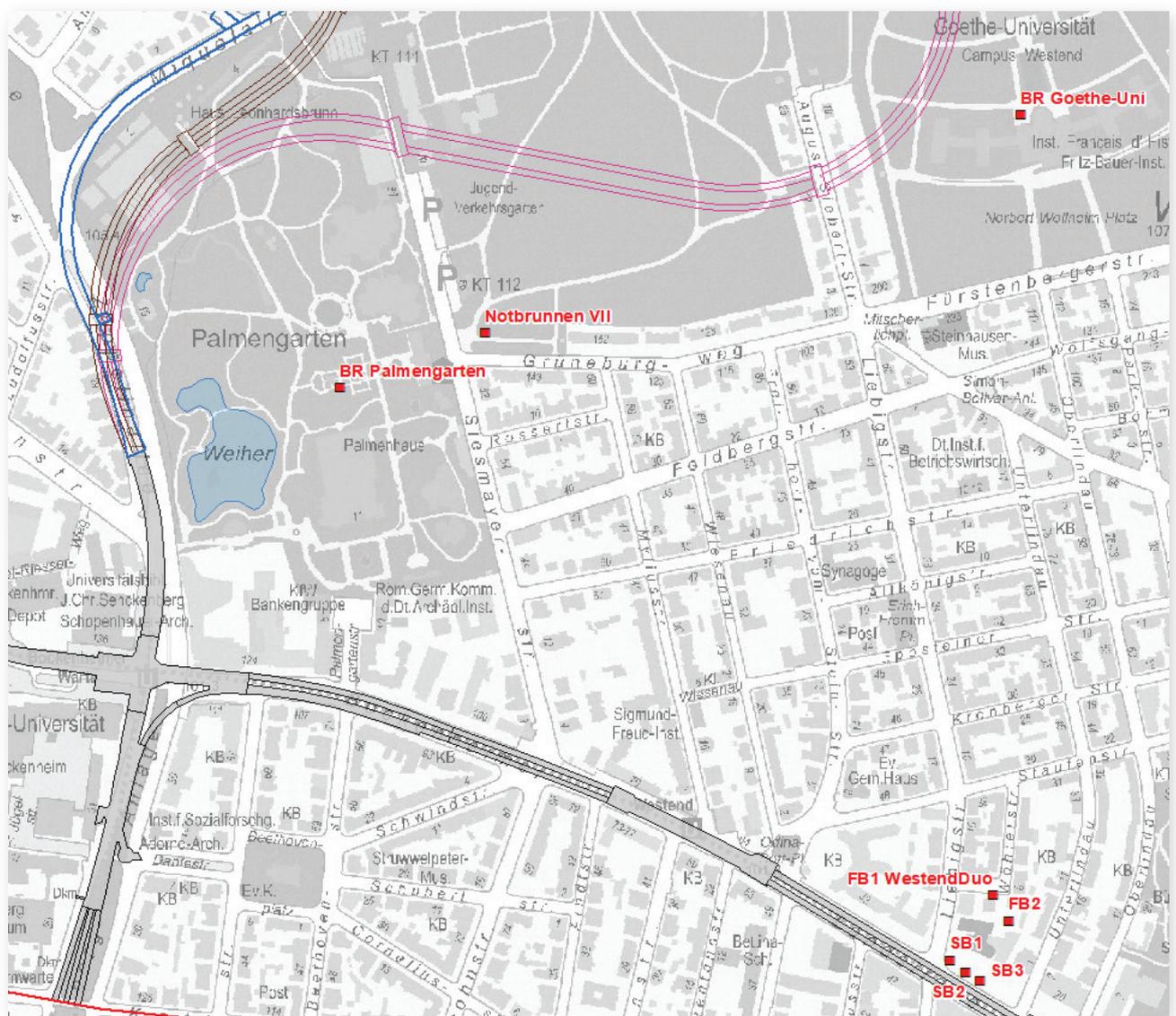


Abb. 5: Betriebsbrunnen im Untersuchungsgebiet

Die Stadt Frankfurt a. M. verfügt über einige zumeist 1969 errichtete Notbrunnen, die im Falle eines Ausfalls der öffentlichen Wasserversorgung die Versorgung mit Trinkwasser übernehmen sollen. Im Untersuchungsbereich bis am Südende des Grüneburgparks liegt gemäß dem HLNUG-Bohrarchiv, ergänzt durch Angaben des für die Brunnen zuständigen Amtes des Oberbürgermeisters der Stadt Frankfurt a. M.²¹, der **Notbrunnen VII**. Dieser ist im Ausbaudurchmesser DN 300 bis zu einer Tiefe von 24 m in den Schichten der Niederrad-Formation bzw. den Hydrobien-Schichten ausgebaut. Die Funktion des Brunnen sowie die Grundwasserqualität wird jährlich durch Hessenwasser überprüft. Der Ruhewasserstand wurde am 18.09.2018 mit 7,2 m u. Brunnen-OK gelotet.

²¹ Mail vom 15.06.2015, Amt des Oberbürgermeisters, Zentrale Verwaltungsangelegenheiten/ IT-Management – 02.61.2

In der Bauzeit der Variante 1a ist der Notbrunnen von einer Absenkung des Grundwasserstands von bis zu rd. 0,4 m betroffen, vgl. Blatt 56. Aufgrund der größeren Tiefe des Brunnens gehen damit voraussichtlich keine relevanten Leistungseinbußen einher.

Da der Brunnen im Bedarfsfall zu Trinkwasserzwecken genutzt wird, ist eine potenzielle hydrochemische Wirkung zu bewerten. Die Tunnelröhren der Variante 3i liegen in einer Entfernung von rd. 180 m im nördlichen Zustrom des Brunnens. Aufgrund der vergleichsweise geringen Transmissivität des Kluftgrundwasserleiters und einer mäßigen Abstandsgeschwindigkeit ist das Risiko einer hydrochemischen Veränderung infolge der Einbringung des Betons sowie des Einsatzes von Spülmittelzusätzen sehr gering. Nach Aushärtung des Betons ist keine nachhaltige hydrochemische Veränderung des Grundwassers zu erwarten. Somit ist keine Gefährdung des Versorgungszwecks des Notbrunnens erkennbar.

An der Nordseite des **Poelzig Gebäudes (ehemals I.G. Farben)** des Campus Westend befindet sich ein Betriebsbrunnen, der zuletzt zur Grauwasserversorgung (Sanitäreinrichtungen) des Gebäudes genutzt worden war. Ab dem 01.07.2024 soll der Brunnen nach Angaben des Betreibers, der Goethe-Universität Frankfurt, Bereich Immobilienmanagement, nur noch zur Gartenbewässerung mit einer Jahresmenge von bis zu 3.500 m³ verwendet werden. Bereits in 2022 wurde lediglich eine Entnahme von 3.550 m³ verzeichnet. Der im Untergeschoss liegende Brunnen wies 2021/2022 einen Ruhewasserstand von 8,2 - 8,5 m u. Brunnen-OK auf. Der Brunnen verfügt über eine Ausbautiefe von 40 m mit einer PVC-Ausbauverrohrung DN 150 mm. Die Entnahme erfolgt aus den Schichten der Niederrad-Formation.

Der Brunnen liegt im Bereich einer zu erwartenden Potenzialänderung von bis zu rd. 0,25 m in der Bauzeit der Station (Variante 3i). Aufgrund der großen Ausbautiefe geht für den Brunnen dadurch voraussichtlich keine Nutzungseinschränkung einher.

Die Förderbrunnen der **Geothermieanlage WestendDuo** an der Bockenheimer Landstraße sind derzeit außer Betrieb genommen. Die Brunnen liegen deutlich außerhalb der bauzeitigen Wasserstandsänderungen der betrachteten Varianten.

9.9 Auswirkungen auf Gebäude

Setzungen des Untergrunds können infolge einer Entwässerung eventuell vorhandener setzungsempfindlicher Schichten vorkommen. Als potenziell setzungsempfindlich sind organische oder wenig verfestigte Schichten wie die Schluffe der Staden-Formation oder Braunkohleflöze der Praunheim-Formation zu werten.

Zur Bewertung des Risikos von Setzungsschäden an Gebäuden infolge der bauzeitigen Grundwasserabsenkung erfolgen detaillierte Betrachtungen, sofern erforderlich im Zuge der

Bauausführungsplanung. Zudem ist stets eine umfangreiche Beweissicherung vor, während und nach den Bauarbeiten vorgesehen.

Tendenziell ist in der Bauzeit eine verstärkte Grundwasserabsenkung an der Trasse 1a zu erwarten, welche an den umliegenden Gebäuden Beweissicherungsmaßnahmen nach sich ziehen kann. Aufgrund der erwarteten Barrierewirkung ist an der bebauten Westseite der Trasse jedoch oberflächennah allerdings mit einem Aufstau zu rechnen. Dieser übersteigt an der Miquelallee einen Betrag von 2 m, sodass das Risiko einer Vernässung von Untergeschossen zu prüfen ist.

Im Umfeld der Startbaugrube und Station der Variante 3i wird eine bauzeitige Grundwasserabsenkung in den oberflächennahen Schichten von bis zu rd. 0,25 m erwartet. Das Risiko einer relevanten Setzung an den umliegenden Gebäuden ist als sehr gering einzuschätzen.

9.10 Auswirkungen auf die Grundwassersituation von Altlasten

Die bekannten Grundwasserverunreinigungen können in unterschiedlicher Weise von den bauzeitigen hydraulischen Veränderungen betroffen sein. Die Auswirkungen umfassen:

- Änderung der Grundwasserfließrichtung. Diese hat Einfluss auf die Güte der hydraulischen Sicherung. So kann eine Schadstofffahne soweit abgelenkt werden, dass sie von Sanierungsbrunnen nicht mehr erfasst wird. Ebenso können ggf. als Zu- oder Abstrommessstellen deklarierte Messstellen ggf. ihrer Aufgabe nicht mehr entsprechen.
- Infolge einer geänderten Fließrichtung kann es zu Verfrachtungen von Schadstoffen in bislang unbeeinflusste Bereiche kommen.
- Innerhalb des Einzugsgebietes der bauzeitigen Wasserhaltung gelegene Schäden können in Abhängigkeit der Entfernung und Strömungsgeschwindigkeit bzw. der Dauer der bauzeitigen Wasserhaltung bis in den Baustellenbereich gelangen. Dadurch können diese eine Veränderung der hydrochemischen Situation des geförderten Wassers mit sich bringen.

Da gemäß den Ausführungen in Kap. 6.1 keine Hinweise auf relevante Grundwasserverunreinigungen im Zustrom auf die optionalen Baugruben vorhanden sind, sind nach derzeitigem Kenntnisstand keine nachteiligen Auswirkungen auf die Grundwasserqualität zu erwarten.

9.11 Verbleib und Behandlung des geförderten Grundwassers

Für den Verbleib des geförderten Grundwassers stehen prinzipiell drei Optionen zur Auswahl:

- Die Wiederzuführung des geförderten Grundwassers in den Grundwasserleiter durch Versickerungsflächen oder Schluckbrunnen,
- Die Zuführung des geförderten Grundwassers in oberirdische Gewässer (z. B. Vorfluter),
- die Ableitung des geförderten Grundwassers in die öffentliche Kanalisation.

Nach § 28 Abs. 5 HWG ist das entnommene Grundwasser soweit zumutbar und wasserwirtschaftlich geboten, dem Grundwasserleiter (z. B. über Versickerungsflächen) wieder zuzuführen. Für eine solche Versickerung bedarf es einer ergänzenden geotechnischen Untersuchung der infrage kommenden Bereiche. Im Umfeld der südlichen Trasse Variante 1a sind keine unversiegelten Flächen vorhanden, welche für eine solche Maßnahme genutzt werden könnten.

Eine Einleitung in Oberflächengewässer bedarf einer Sicherstellung einer ausreichenden Wasserqualität. Aufgrund der begrenzten Aufnahmekapazität der im Gebiet vorhandenen Teiche scheidet diese Option aus. Allenfalls wäre bei den Varianten 1a und 1d ein Teilstrom für die Bewässerung des Palmengartens incl. des Weihers oder der Parkanlagen einsetzbar. Dabei sind Einschränkungen der Erholungsfunktion durch die Verlegung von Rohrleitungen zu betrachten.

Eine punktuelle Grundwasseranreicherung über Schluckbrunnen ist im Einzelfall zu bewerten. Als problematisch kann sich dabei die zumeist geringe Durchlässigkeit der anstehenden tertiären Schichten erweisen. Ergänzend ist zu berücksichtigen, dass ein Grundwasseranstieg im Nahbereich eines Schluckbrunnens zu Vegetationsschäden (Wurzelfäule) oder Näserschäden an Gebäuden führen kann und einer genauen Überwachung bedarf.

Generell sind die mit der Grundwasserentnahme verbundenen Aufwendungen bei der Variante 1a allein aufgrund der größeren Förderraten sowie der damit einhergehenden zu erwartenden Mehrkosten als ungünstig zu bewerten.

10 Vergleichende Bewertung der Varianten (Hydrogeologie)

Ein Vergleich der Trassenvarianten erfolgt nachfolgend auf Basis der jeweiligen Schutzgüter, Tab. 11.

Tab. 11: Zusammenfassende Bewertung der Trassenvarianten

Kriterium	Variante 1a	Variante 1d	Variante 3i
Grundwasserentnahme in der Bauzeit (Fördermengen)	<p>Der Bau erfolgt auf einer Länge von rd. 1.000 m als in offener Bauweise errichteter Tunnel. Bei diesem wird ein seitlicher Grundwasserzuström durch dichte Verbauwände unterbunden. Zur Verringerung des Auftriebs erfolgt eine Sohllentspannung mittels Entspannungsbrunnen. Diese bewirken eine Absenkung des GW-Druckpotenzials in den Schichten unterhalb der vertikalen Verbauwände. Bei dem nach Süden einfallenden Tunnel nimmt die Potenzialabsenkung von der Rampe mit 0 m über die Einmündung Ditmarstraße (4 m) bis zum Bestandstunnel an der Bockenheimer Warte auf rd. 12 m zu. Folglich wird im südlichen Abschnitt die stärkste Grundwasserförderung aus den Festgesteinsschichten der Niederrad-Formation erwartet.</p> <p>Für die Unterquerung der BAB66 wird auf einer Länge von rd. 70 m eine Einschnürung des oberflächennahen Grundwasserleiters, jedoch voraussichtlich keine relevante Sohllentspannung erforderlich.</p> <p>An den Brückenfundamenten im Bereich der Station Botanischer Garten wird allenfalls in den tieferen Geländeinschnitten eine geringe Wasserhaltung aus den Sandschichten der Staden-Formation erforderlich.</p> <p>Folgende Fördermengen wurden gemäß Grundwassermodell berechnet: Tunnel offene Bauweise (oB): 54,7 m³/d - 99.800 m³ gesamt Unterquerung BAB66 und Brückenfundamente: keine Entnahme</p>	<p>Der Bau erfolgt auf einer Länge von rd. 200 m als in offener Bauweise errichteter Tunnel. Bei diesem wird ein seitlicher Grundwasserzuström durch dichte Verbauwände unterbunden. Zur Verringerung des Auftriebs erfolgt eine Sohllentspannung mittels Entspannungsbrunnen. Diese bewirken eine Absenkung des GW-Druckpotenzials in den Schichten unterhalb der vertikalen Verbauwände. Bei dem nach Süden einfallenden Tunnel nimmt die Potenzialabsenkung von der Rampe mit 0 m bis zur Einmündung des bergmännisch errichteten Tunnels auf rd. 8 m zu. Folglich wird im südlichen Abschnitt des offenen Tunnels die stärkste Grundwasserförderung aus den Festgesteinsschichten der Niederrad-Formation erwartet.</p> <p>Für die Unterquerung der BAB66 wird auf einer Länge von rd. 70 m eine Einschnürung des oberflächennahen Grundwasserleiters, jedoch voraussichtlich keine relevante Sohllentspannung erforderlich.</p> <p>An den Brückenfundamenten im Bereich der Station Botanischer Garten wird allenfalls in den tieferen Geländeinschnitten eine geringe Wasserhaltung aus den Sandschichten der Staden-Formation erforderlich.</p> <p>Im Bereich der in bergmännischer Bauweise errichteten Tunnelröhren wird abgesehen vom Lenzwasser keine Grundwasserentnahme erforderlich.</p> <p>Die Notausstiege schneiden deutlich in den Grundwasserkörper ein, sodass eine grundwasserschonende Bauweise ohne Grundwasserentnahme vorzusehen ist (z.B. Vereisung, Unterwasserbetonsohle, Druckluftinsatz).</p> <p>Fördermengen gemäß Grundwassermodell: Tunnel oB/Rampe: 17,7 m³/d - 19.400 m³ gesamt Unterquerung BAB66 und Brückenfundamente: keine Entnahme</p>	<p>Die Startbaugrube im Nordwesten der Miquelanlage wird auf einer Länge von rd. 100 m als in offener Bauweise errichteter Tunnel gebaut. Bei diesem wird ein seitlicher Grundwasserzuström durch dichte Verbauwände unterbunden. Die anstehenden Sande der Staden-Formation müssen vollständig abgedichtet werden. Zur Verringerung des Auftriebs erfolgt eine Sohllentspannung mittels Entspannungsbrunnen. Diese bewirken eine Absenkung des GW-Druckpotenzials in den Schichten unterhalb der vertikalen Verbauwände. Bei dem nach Süden einfallenden Tunnel nimmt die Potenzialabsenkung von der Rampe mit 0 m bis zur Einmündung des bergmännisch errichteten Tunnels auf rd. 2-3 m zu. Folglich wird im südlichen Abschnitt des offenen Tunnels die stärkste Grundwasserförderung aus den Festgesteinsschichten der Niederrad-Formation erwartet.</p> <p>An der geplanten Station Campus ist die erforderliche Grundwasserabsenkung in der Niederrad-Formation mit rd. 0,5 - 2 m ebenfalls nur sehr gering, sodass nur eine geringe Fördermenge zu erwarten ist. Im Bereich der in bergmännischer Bauweise errichteten Tunnelröhren wird abgesehen vom Lenzwasser keine Grundwasserentnahme erforderlich.</p> <p>Die Notausstiege schneiden deutlich in den Grundwasserkörper ein, sodass eine grundwasserschonende Bauweise ohne Grundwasserentnahme vorzusehen ist (z.B. Vereisung, Unterwasserbetonsohle, Druckluftinsatz)..</p> <p>Fördermengen gemäß Grundwassermodell: Tunnel oB/Rampe: 13,5 m³/d - 24.600 m³ gesamt Station Campus: 8,1 m³/d - 11.800 m³ gesamt</p>
Auswirkungen auf oberflächennahe GW-Vorkommen in der Bauzeit	<p>Infolge der Barrierewirkung des Tunnels oB ist in den geringmächtigen quartären Deckschichten südöstlich der Trasse im Bereich des Palmengartens eine Abschnürung des Grundwasserzuflusses zu erwarten. Infolge einer Grundwasserabsenkung in den tieferen Festgesteinsschichten in der Bauzeit kann zudem eine Wiederergänzung aus den quartären Deckschichten über Verwerfungen und Klüfte nicht ausgeschlossen werden. Ein partielles Trockenfallen der oberflächennahen Grundwasservorkommen des nördlichen Palmengartens ist möglich. Die Flurabstände sind in den Senken des Palmengartens teilweise vegetationsrelevant.</p>	<p>Infolge der Barrierewirkung der Bauwerke sind zwar geringfügige Grundwasserstandsänderungen zu erwarten, doch erreichen diese nur eine geringe Intensität und sind nicht vegetationsrelevant. Infolge der bauzeitigen Potenzialabsenkung im Bereich des Tunnels oB bzw. der Rampe ist im Umfeld eine Wiederergänzung des geförderten Grundwassers aus oberflächennahen Grundwasservorkommen nicht auszuschließen. Allerdings sind in den betroffenen Bereichen keine vegetationsrelevanten Flurabstände vorhanden und die potenzielle Wirkung ist aufgrund der geringen Fördermenge sehr gering.</p>	<p>Infolge der Barrierewirkung der Bauwerke sind zwar geringfügige Grundwasserstandsänderungen zu erwarten, doch erreichen diese nur eine geringe Intensität und sind nicht vegetationsrelevant. Infolge der bauzeitigen Potenzialabsenkung im Bereich der Startbaugrube bzw. der Rampe ist im Umfeld eine Wiederergänzung des geförderten Grundwassers aus oberflächennahen Grundwasservorkommen - hier aus den Sanden der Staden-Formation zu erwarten. Aufgrund der erwarteten geringen Potenzialabsenkung und Fördermenge ist die Wirkung auf das Umfeld in Bereichen mit einem vegetationsrelevanten Flurabstand mit bis zu rd. 0,25 m allerdings gering.</p> <p>An der Baugrube der Station Campus Westend ist aufgrund der geringen erwarteten Potenzialabsenkung bzw. Fördermenge kaum eine hydraulische Wirkung für oberflächennahe Grundwasservorkommen zu erwarten. Die Grundwasserflurabstände in der Basalt- und Staden-Formation sind im näheren Umfeld mit >4,3 m nicht vegetationsrelevant. Grundwasser der quartären Deckschichten ist nicht betroffen.</p>
Veränderungen der Strömungssituation (Fließrichtungen) durch bauzeitige Grundwasserentnahmen	<p>Infolge der bauzeitigen Potenzialabsenkung im Bereich des Tunnels oB und der vergleichsweise großen Fördermengen ist im weiteren Umfeld eine Veränderung der Fließrichtungen zur Baugrube zu erwarten. Die Veränderung betrifft im Wesentlichen den Kluftgrundwasserleiter der Niederrad-Formation. Im südlichen Abschnitt des Tunnels oB nimmt die Reichweite der Fließrichtungsänderung zu.</p> <p>Die Grundwasservorkommen des Quartärs sowie der Basalt- und Staden-Formation sind mittels der Verbauwände gegen die Baugruben abgedichtet. Eine Veränderung der Fließrichtungen erfolgt durch eine Verschwenkung der oberflächennahen Strömung nach Süden oder indirekt im Falle einer verstärkten Aussickerung in das tiefere Grundwasserstockwerk (Niederrad-Formation).</p>	<p>Infolge der bauzeitigen Potenzialabsenkung im Bereich des Tunnels oB bzw. der Rampe ist im weiteren Umfeld eine Veränderung der Fließrichtungen zur Baugrube zu erwarten. Die Veränderung betrifft im Wesentlichen die Niederrad-Formation. Aufgrund der geringen Fördermenge ist die Änderung in der Bauzeit nur gering.</p> <p>Eine Beeinflussung von Grundwassernutzungen im Grundwasserleiter der Niederrad-Formation ist nicht gegeben.</p>	<p>Veränderungen der Strömungsrichtungen infolge der bauzeitigen Wasserhaltung beschränken sich aufgrund der geringen Absenkungsbeträge auf die unmittelbaren Nahbereiche des Tunnels oB bzw. der Rampe sowie der Station. Betroffen ist jeweils die Niederrad-Formation. Die höheren Grundwasserleiter der Basalt- und Staden-Formation sind durch die Entnahmen mit einer Absenkung von etwa 0,25 m nur geringfügig betroffen. Eine Beeinflussung von Grundwassernutzungen im Grundwasserleiter der Niederrad-Formation ist nicht gegeben.</p>

Kriterium	Variante 1a	Variante 1d	Variante 3i
Barrierewirkung und Veränderungen der Strömungssituation durch Bauwerke (permanente Wirkung)	Die vertikalen Verbauwände verbleiben wie das Tunnelbauwerk im Untergrund und bilden eine hydraulische Barriere. Betroffen von der Stauwirkung ist vor allem die Niederrad-Formation im südlichen Abschnitt der Miquelallee, da das Bauwerk hier auf einer Länge von etwa 350 m quer zur Strömungsrichtung angeordnet ist. Im südöstlichen Abstrom und damit im Bereich des Palmengartens resultiert eine Abschnürung des oberflächennahen Grundwasserzustroms und damit ein zusätzliches Trockenfallen. Auf der nordöstlichen Zustromseite ist ein erheblicher Aufstau von bis zu 3 m zu erwarten.	Die vertikalen Verbauwände des Tunnels oB bzw. der Rampe verbleiben im Untergrund und bilden eine hydraulische Barriere. Betroffen von der Stauwirkung ist allein die Niederrad-Formation. Da vorwiegend eine südliche Strömungsrichtung vorherrscht, ist die Barrierewirkung eher gering. So erreicht die Absenkung auf der Westseite einen Betrag von bis zu 0,5 m und der Anstieg am Botanischen Garten eine vergleichbare Intensität. Für die bergmännisch errichteten Tunnelröhren ist ebenfalls eine Barrierewirkung zu erwarten, jedoch ist diese aufgrund der Unter- und Überströmung auf den Nahbereich der Röhren beschränkt. Relevante permanente Veränderungen in den oberflächennahen Schichten der Niederrad-Formation sind infolge der Überströmung nicht zu erwarten.	Die vertikalen Verbauwände der Startbaugrube bzw. der Rampe verbleiben wie das Tunnelbauwerk im Untergrund und bilden eine hydraulische Barriere. Betroffen von der Stauwirkung ist vor allem die Staden-Formation, da das Bauwerk hier auf einer Länge von etwa 100 m quer zur Strömungsrichtung angeordnet ist. Die Wasserstandsänderung ist mit <0,25 m jedoch nur gering. Der Grundwasserflurabstand in der Staden-Formation beträgt etwa 9 - 11 m, sodass keine Betroffenheit von Gebäuden oder der Vegetation zu erwarten ist. Bei einer grundwassererfüllten Mächtigkeit von 5 - 6 m wird das Bauwerk im Norden und Süden umströmt. An der Station Campus wird die nach Westen gerichtete Strömung in der Basalt- und Staden-Formation auf einer Länge von rd. 110 m vollständig unterbunden. Die Stauwirkung ist dabei auf <0,5 m begrenzt. Bei einer grundwassererfüllten Mächtigkeit von 6 - 8 m wird das Bauwerk im Norden und Süden umströmt. Der Grundwasserflurabstand beträgt etwa 5 m, sodass keine Betroffenheit von Gebäuden oder der Vegetation zu erwarten ist. Für die bergmännisch errichteten Tunnelröhren ist ebenfalls eine Barrierewirkung zu erwarten, jedoch ist diese aufgrund der Unter- und Überströmung auf den Nahbereich der Röhren beschränkt. Relevante permanente Veränderungen in den oberflächennahen Schichten der Niederrad-Formation sind infolge der erwarteten Überströmung nicht zu erwarten.
permanente Auswirkungen auf die Vegetation	Der Grundwasserflurabstand im Abstrom des Tunnels oB beträgt in den anstehenden Schichten der Niederrad-Formation >5 m (Ausgangszustand). Die erwartete Grundwasserabsenkung ist somit nicht vegetationsrelevant. Hingegen führt die Abschnürung des Zustroms in den oberflächennahen Schichten zu einem zusätzlichen Trockenfallen der Deckschichten im nördlichen Palmengarten, welches für die Vegetation relevant sein kann.	Der Grundwasserflurabstand im Abstrom des Tunnels oB beträgt in den anstehenden Schichten der Niederrad-Formation >5 m (Ausgangszustand). Die erwartete Grundwasserstandsänderung ist somit nicht vegetationsrelevant. Allein in der Uferzone des Teiches im Botanischen Garten kann ein Anstieg und damit eine Verbesserung der Wasserversorgung gegeben sein.	Im östlichen Zustrom auf die Startbaugrube bzw. Rampe entsteht eine geringe Aufspiegelung. Aufgrund der großen Flurabstände (>5 m) der Staden-Formation ist diese nicht vegetationsrelevant. Im unmittelbaren Abstrom liegen keine Grünflächen. Der Grundwasserflurabstand im Abstrom der Station Campus beträgt in den anstehenden Schichten der Staden-Formation >5 m (Ausgangszustand). Die erwartete Grundwasserabsenkung ist somit nicht vegetationsrelevant.
permanente Auswirkungen auf die effektiven Wurzelzonen von Bäumen durch Tunnelbauwerke	Bäume bzw. Neuanpflanzungen sind oberhalb der Tunnelbauwerke voraussichtlich nicht gegeben	Die Oberkanten (Firste) der bergmännisch errichteten Tunnel liegen unmittelbar südlich des Startbauwerks auf einer Länge von bis zu 50 m in einer Tiefe von weniger als 4,3 m. Dadurch kann der kapillare Aufstieg in die effektive Wurzelzone gemindert sein. Der Bereich wird durch Gewächshäuser genutzt, Grünflächen bzw. Bäume sind nicht vorhanden. Der Bereich weist einen Flurabstand >5 m auf, sodass keine Verschlechterung des Bodenwasserhaushalts zu erwarten ist. Im weiteren Tunnelverlauf liegen die Firste stets deutlich unterhalb der effektiven Wurzelzone.	Die Oberkanten (Firste) der bergmännisch errichteten Tunnel liegen unmittelbar südlich des Startbauwerks auf einer Länge von bis zu etwa 30 m in einer Tiefe von weniger als 4,3 m. Dadurch kann der kapillare Aufstieg in die effektive Wurzelzone gemindert sein. Der Bereich an der Westseite der Miquelanlage ist heute von Bäumen bestanden, weist jedoch einen Flurabstand >5 m auf, sodass keine Verschlechterung des Bodenwasserhaushalts zu erwarten ist. Im weiteren Tunnelverlauf liegen die Firste stets deutlich unterhalb der effektiven Wurzelzone.
zusätzliche Auswirkungen der Wasserhaltung auf die Vegetation	Aufgrund der geringen Vertikaldurchlässigkeit sind die oberflächennahen Schichten vorrangig von der Barrierewirkung des Tunnels oB betroffen. Dennoch führt die verstärkte Wiederergänzung aus den Deckschichten zu einer leichten Ausweitung der Grundwasserabsenkung im nördlichen Palmengarten. Der Bereich ist durch vegetationsrelevante Flurabstände gekennzeichnet, sodass zusätzliche Auswirkungen in der Bauzeit möglich sind.	Die hydraulische Wirkung resultiert in den oberflächennahen Schichten im Wesentlichen aus der Barrierewirkung der Bauwerke. Zusätzliche Auswirkungen der Grundwasserentnahme sind vernachlässigbar gering. Bereiche mit vegetationsrelevanten Flurabständen sind nicht durch eine Grundwasserabsenkung betroffen.	Die bauzeitige GW-Entnahme führt im Umfeld der Startbaugrube zu einer moderaten Aufweitung der Grundwasserabsenkung im oberflächennahen Grundwasserleiter der Staden-Formation. Diese bleibt mit einem Gesamtbetrag von bis zu rd. 0,3 m jedoch gering. Bereiche mit vegetationsrelevanten Flurabständen sind im Umfeld des Teiches der Miquelanlage mit bis zu 0,25 m betroffen. Im Umfeld des Stationsbauwerks erfolgt eine lediglich schwache Ausweitung der Grundwasserabsenkung, welche einen Gesamtbetrag von 0,25 m nicht übersteigt. Bereichen mit vegetationsrelevanten Flurabständen sind nicht betroffen.

Kriterium	Variante 1a	Variante 1d	Variante 3i
Hydrochemische Beeinflussung der Grundwasserqualität durch eingebrachte Baustoffe	Eine hydrochemische Beeinflussung ist im Abstrom des Tunnels oB in Form einer Veränderung des pH-Wertes und der Karbonathärte zu erwarten. Im Zuge des Einbaus von Bohrpfählen oder einer Schlitzwand sind zudem Trübungen des Grundwassers sowie eine Erwärmung (Hydratationswärme) im Abstrom zu erwarten. Betroffen sind vorrangig die oberflächennahen Schichten der Niederrad-Formation südlich der Miquelallee und westlich der Zeppelinallee. Im südlichen Abschnitt ist ein Bereich mit größerer Quartärmächtigkeit bei einer südlichen Fließrichtung betroffen. Die potenzielle Veränderung betrifft somit das oberflächennahe Grundwasservorkommen des nördlichen Palmengartens. Aufgrund der großen durchteuften Mächtigkeit der vertikalen Umschließungen und der großen Länge der Baugrube ist die Wirkung größer als bei den übrigen Varianten. Üblicherweise geht die Wirkung einige Monate nach der Einbringung wieder zurück.	Eine hydrochemische Beeinflussung ist im Abstrom des Tunnels oB bzw. der Rampe in Form einer Veränderung des pH-Wertes und der Karbonathärte zu erwarten. Im Zuge des Einbaus von Bohrpfählen oder der Schlitzwand sind zudem Trübungen des Grundwassers sowie eine Erwärmung (Hydratationswärme) im Abstrom zu erwarten. Betroffen sind vorrangig die oberflächennahen Schichten der Niederrad-Formation im Bereich des nördlichen Palmengartens sowie in den westlichen Randlagen des Botanischen Gartens. Eine zusätzliche hydrochemische Wirkung geht von den Betonoberflächen der Tunnelröhren aus. Da die Tübbinge bereits als Betonfertigteile eingebaut werden, ist die Wirkung jedoch geringer als bei dem (flüssig) eingebauten Beton der Dicht-/Bohrpfahlwände. Zudem sind gemäß der tieferen Gradienten nur die tieferen Festgesteinsschichten unterhalb des Palmengartens betroffen. Üblicherweise geht die Wirkung einige Monate nach der Einbringung wieder zurück. Da vorrangig die kalkhaltigen Schichten des Festgesteins betroffen sind, ist die Wirkung der pH-Wert-Veränderung gering.	Eine hydrochemische Beeinflussung ist im Abstrom der Startbaugrube bzw. der Rampe sowie der Station Campus in Form einer Veränderung des pH-Wertes und der Karbonathärte zu erwarten. Im Zuge des Einbaus von Bohrpfählen oder der Schlitzwand sind zudem Trübungen des Grundwassers sowie eine Erwärmung (Hydratationswärme) im Abstrom zu erwarten. Betroffen sind vorrangig die oberflächennahen Schichten der Station-Formation westlich der Rampe und westlich der Station. Eine zusätzliche hydrochemische Wirkung geht von den Betonoberflächen der Tunnelröhren aus. Da die Tübbinge bereits als Betonfertigteile eingebaut werden, ist die Wirkung jedoch geringer als bei dem (flüssig) eingebauten Beton der Dicht-/Bohrpfahlwände. Zudem sind gemäß der tieferen Gradienten vor allem die tieferen Festgesteinsschichten betroffen. Üblicherweise geht die Wirkung einige Monate nach der Einbringung wieder zurück.
Risiken einer Grundwasser-Verunreinigung im Abstrom der Baufelder	In den Baufeldern außerhalb der umschlossenen Baugruben ist von einem Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (Kraftstoffe, Schmierstoffe, Baustoffe) auszugehen, sodass ein Risiko von Handhabungsverlusten und Leckagen zu berücksichtigen ist. Eine unterschiedliche Gewichtung der Varianten kann bei dem bisherigen Planungsstand noch nicht erfolgen. Es wird ein hydrochemisches Monitoring im unmittelbaren Grundwasserabstrom der Baufelder empfohlen.		
Aufwand der Grundwasserreinigung vor Einleitung (geogene Beschaffenheit, anthropogene Verunreinigungen)	Bei der Untersuchung der Im Vorhabensbereich vorhandenen Grundwassermessstellen ergaben sich keine Hinweise auf eine erhöhte Mineralisation des Grundwassers. Im Wasser ist geogenes Sulfid (l. fr.) nicht oder nur in Spuren (0,2 mg/L) nachweisbar. Anthropogene Verunreinigungen beschränken sich auf geringe Spuren von LCKW. Im Zustrom der Baugruben sind keine Grundwasserverunreinigungen bekannt. Ein Einfluss von Tiefenwasser mit erhöhter Natriumchlorid-Konzentration war an keiner Messstelle nachweisbar. Es entsteht voraussichtlich kein erhöhter Aufwand für die Grundwasserreinigung.	Bei der Untersuchung der Im Vorhabensbereich vorhandenen Grundwassermessstellen ergaben sich keine Hinweise auf eine erhöhte Mineralisation des Grundwassers. Im Wasser ist geogenes Sulfid (l. fr.) nicht nachweisbar. Anthropogene Verunreinigungen beschränken sich auf geringe Spuren von LCKW sowie Chrom. Im Zustrom der Baugruben sind keine Grundwasserverunreinigungen bekannt. Ein Einfluss von Tiefenwasser mit erhöhter Natriumchlorid-Konzentration war an keiner Messstelle nachweisbar. Es entsteht voraussichtlich kein erhöhter Aufwand für die Grundwasserreinigung.	Bei der Untersuchung der Im Vorhabensbereich vorhandenen Grundwassermessstellen ergaben sich keine Hinweise auf eine erhöhte Mineralisation des Grundwassers. Im Wasser ist geogenes Sulfid (l. fr.) nicht nachweisbar. Anthropogene Verunreinigungen beschränken sich auf geringe Spuren von LCKW und Chrom, daneben Arsen, Blei und Nickel oberhalb der geltenden Grenzwerte. Im Zustrom der Baugruben sind keine Grundwasserverunreinigungen bekannt. Ein Einfluss von Tiefenwasser mit erhöhter Natriumchlorid-Konzentration war an keiner Messstelle nachweisbar. Die erhöhten Schwermetallkonzentrationen im Bereich der Station Campus Westend bedürfen voraussichtlich einer geeigneten Reinigungsstufe. Aufgrund der erwarteten geringen Förderraten ist der Aufwand jedoch begrenzt.
Auswirkungen auf Oberflächengewässer	Da der Weiher im Palmengarten über keinen Grundwasseranschluss verfügt, sind keine Auswirkungen zu erwarten. In der Bauzeit erfolgt mit bis zu 0,5 m eine relevante Grundwasserabsenkung in den Schichten der Niederrad-Formation im nördlichen Zustrom auf den Teich im Botanischen Garten. Soweit über oberflächennahe Schichten ein zeitweiliger Zulauf erfolgt, kann dadurch eine Minderung des Zulaufs eintreten.	In der Bauzeit erfolgt eine Grundwasserabsenkung von bis zu rd. 0,25 m in den Schichten der Niederrad-Formation im nördlichen Zustrom auf den Teich im Botanischen Garten. Soweit über oberflächennahe Schichten ein zeitweiliger Zulauf erfolgt, kann damit eine Minderung des Wasseraustauschs eintreten.	Da der Teich in der Miquelanlage über keinen Grundwasseranschluss verfügt, sind keine Auswirkungen zu erwarten. Weitere Teiche sind nicht betroffen.
Auswirkungen auf gesetzlich geschützte Biotope und Naturschutzgebiete	In den von einer Grundwasserstandsänderung betroffenen Bereichen sind keine gesetzlich geschützten Biotope und Naturschutzgebiete vorhanden.		
Einfluss des Wärmeeintrages über die Tunnelröhren auf den Wasserhaushalt der durchwurzelten Bodenzone	Bei einer mittleren Temperatur der Tunnel von 13 - 15 °C ist keine relevante Differenz zur Grundwassertemperatur (12,6 - 16 °C) gegeben. Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt sind nicht zu erwarten.		
Auswirkungen auf externe Grundwassernutzungen (Trinkwassergewinnung, Betriebsbrunnen, Notbrunnen, Geothermie)	In der Bauzeit ist mit einer relevanten Grundwasserabsenkung am Betriebsbrunnen des Palmengartens von rd. 0,75 zu rechnen, welcher mit Nutzungseinschränkungen einher gehen kann. Der Notbrunnen VII ist nur in geringem Maße (-0,4 m) betroffen. Das Risiko einer potenziellen hydrochemischen Beeinflussung der Brunnen ist aufgrund der Entfernung von rd. 300 zum Bauwerk voraussichtlich gering.	In der Bauzeit ist mit keiner messbaren Grundwasserabsenkung am Betriebsbrunnen des Palmengartens oder dem Notbrunnen VII zu rechnen Die potenzielle hydrochemische Beeinflussung ist aufgrund der Entfernung von rd. 200 zum bergmännischen Tunnel voraussichtlich gering.	In der Bauzeit ist mit einer geringen Grundwasserabsenkung von bis zu 0,25 m am Betriebsbrunnen der Goethe-Universität zu rechnen, welcher voraussichtlich nicht zu Nutzungseinschränkungen führen wird. Eine hydrochemische Beeinflussung des Brunnens ist aufgrund der Entfernung von rd. 200 zum bergmännischen Tunnel voraussichtlich nicht gegeben. Da der Brunnen zukünftig lediglich zu Bewässerungszwecken eingesetzt wird, sind die potenziellen Veränderungen auch nicht relevant.

Kriterium	Variante 1a	Variante 1d	Variante 3i
Auswirkungen auf Gebäude infolge der bauzeitigen Grundwasserentnahme	Eine Schädigung von Bestandsgebäuden kann bei einer Grundwasserabsenkung in setzungsempfindlichen Schichten entstehen. Auf der bebauten Westseite der Trasse ist vorrangig ein Aufstau von bis zu 3 m zu erwarten, sodass auf eine Vernässung von Kellergeschossen zu prüfen ist.	Aufgrund der geringen Potenzialänderungen von bis zu 0,5 m sind keine relevanten Auswirkungen auf Gebäude zu erwarten.	Aufgrund der geringen Potenzialänderungen von bis zu 0,5 m sind keine relevanten Auswirkungen auf Gebäude zu erwarten.

Erläuterung:

keine nachteiligen Einflüsse
geringe Beeinträchtigung / geringer Nachteil
deutliche Beeinträchtigung / deutlicher Nachteil

Unter den Gesichtspunkten der hydrogeologischen Auswirkungen sind die Varianten 1d und 3i näherungsweise gleichwertig und führen allenfalls zu geringen Veränderungen des Bodenwasserhaushalts im näheren Umfeld der Bauwerke. Der in offener Bauweise errichtete Tunnel der Variante 1a hingegen ist aufgrund der vollständigen Abriegelung der oberflächennahen Schichten insbesondere für den Bodenwasserhaushalt des nördlichen Palmengartens als problematisch zu bewerten.

Bielefeld, den 12. Juli 2024

(Dr. D. Brehm, Dipl.-Geol.) (Th. Grünz, Dipl.-Geol.) (F. Carstensen, Dipl.-Geol.)

**BGU - Büro für Geohydrologie
und Umweltinformationssysteme**

Dr. Brehm & Grünz GbR
Technologiezentrum Bielefeld
Meisenstraße 96
DE- 33 607 Bielefeld

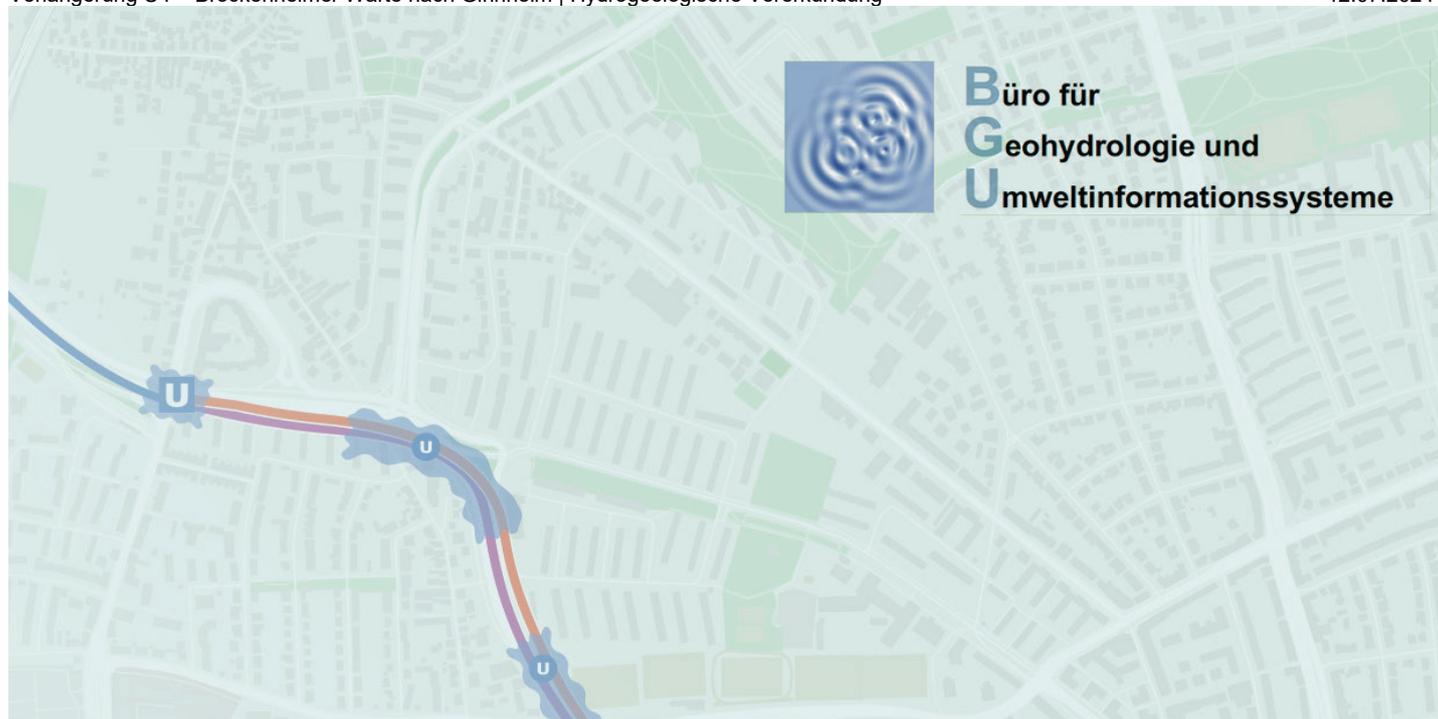
11 Quellenverzeichnis

- /1/ Prof. Dipl.-Ing. H. Breth - W. Romberg & Partner (1978): Stadtbahn Frankfurt/Main Grundstrecke C Bockenheimer Warte bis Industriehof, Beschreibung des Baugrunds längs der geplanten U-Bahn-Trasse. - Gutachten im Auftrag Stadtbahnbauamt Frankfurt/Main
- /2/ Hessisches Landesamt für Bodenforschung (1993): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25.000, Blatt 5818 Frankfurt a. M. Ost. - 3. Aufl., 308 S., 31 Abb., 36 Tab., 3 Beibl., Wiesbaden
- /3/ Schoser, G. (1995): Eine Welt der Pflanzen, Palmengarten Frankfurt. – 312 S., ISBN 3-00-000417-3, Frankfurt am. M.
- /4/ QM Geo Dipl.-Ing W. Romberg (2001): 9905 - Stadtbahn Frankfurt am Main Grundstrecke D – Teilabschnitt II Zeppelinallee – Ginnheim, Geotechnisches Gutachten, Bericht Nr. 2: Hydrogeologisches Gutachten Rev. A: - Gutachten zur Planfeststellung im Auftrag der Stadt Frankfurt am Main, Stadtbahnbauamt; Darmstadt
- /5/ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 5. Aufl., 41 Abb., 103 Tab., 31 Listen, Hannover
- /6/ Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2009): Erläuterungen zur Geologischen Karte von Hessen 1:25.000, Blatt 5817 Frankfurt/Main-West - 3. Aufl., 308 S., 43 Abb., 33 Tab., 3 Beibl., Wiesbaden
- /7/ Raissi, F., Weustink, A., Müller, U. & Meesenburg, H. (2009): Ermittlung der effektiven Durchwurzelungstiefe von Forststandorten. – Geofakten 9, 4. Aufl., LBEG, Hannover, https://nibis.lbeg.de/DOI/dateien/Geofakten_9_Text_4_Aufl_1_doi.pdf, abgerufen 21.06.2024
- /8/ BGU Dr. Brehm & Grünz GbR (04.04.2016): Erläuterungsbericht zum Antrag auf wasserrechtliche Erlaubnis mit Modelluntersuchung zur Bemessung der hydraulischen und hydrochemischen Auswirkungen des Baus der Grundstrecke B, Teilabschnitt 3 Europaviertel in Frankfurt am Main. Fassung vom 26.06.2015, überarbeitet am 04.04.2016 – Gutachten im Auftrag der Verkehrsgesellschaft Frankfurt am Main, Bielefeld
- /9/ BGU Dr. Brehm & Grünz GbR (05.12.2017): Erläuterungsbericht zum Antrag auf wasserrechtliche Erlaubnis mit Modelluntersuchung zur Bemessung der bauzeitigen und permanenten hydraulischen Wirkungen der unterirdischen Bauwerke der S-Bahn Rhein-Main/Nordmainische S-Bahn in Frankfurt am Main – Gutachten im Auftrag der DB Netz AG; Bielefeld
- /10/ BGU Dr. Brehm & Grünz GbR (06.03.2018): Bau der Grundstrecke B, Teilabschnitt 3 Europaviertel in Frankfurt am Main. Hydrogeologische Bewertung einer optimierten Bauausführung durch einen vorgezogenen Aushub im Bereich offener Tunnel und einer Anpassung der Bauphasen des Projektes, Planungsstand August 2017, 2. Bericht zur Änderung der Ausführungsplanung – Gutachten im Auftrag der SBEV Stadtbahn Europaviertel Projektbaugesellschaft mbH, Frankfurt am Main; Bielefeld

- /11/ Renger, M.; Bug, J.; Heumann, S. & Müller, U. (2020): Ermittlung der Auswirkungen von Grundwasserabsenkungen auf den Ertrag landwirtschaftlich genutzter Flächen. – Geofakten 35, 1. Aufl., LBEG, Hannover,
https://nibis.lbeg.de/doi/DOI.aspx?doi=10.48476/geofakt_35_1_2020, abgerufen 21.06.2024
- /12/ BGU Dr. Brehm & Grünz GbR (30.01.2024): Monitoring zu den hydraulischen und hydrochemischen Auswirkungen des Baus der Grundstrecke B, Teilabschnitt 3 Europaviertel in Frankfurt am Main, Quartalsbericht 4. Quartal 2023 und Jahresbericht 2023 – Gutachten im Auftrag der SBEV Stadtbahn Europaviertel Projektbaugesellschaft mbH, Frankfurt am Main; Bielefeld



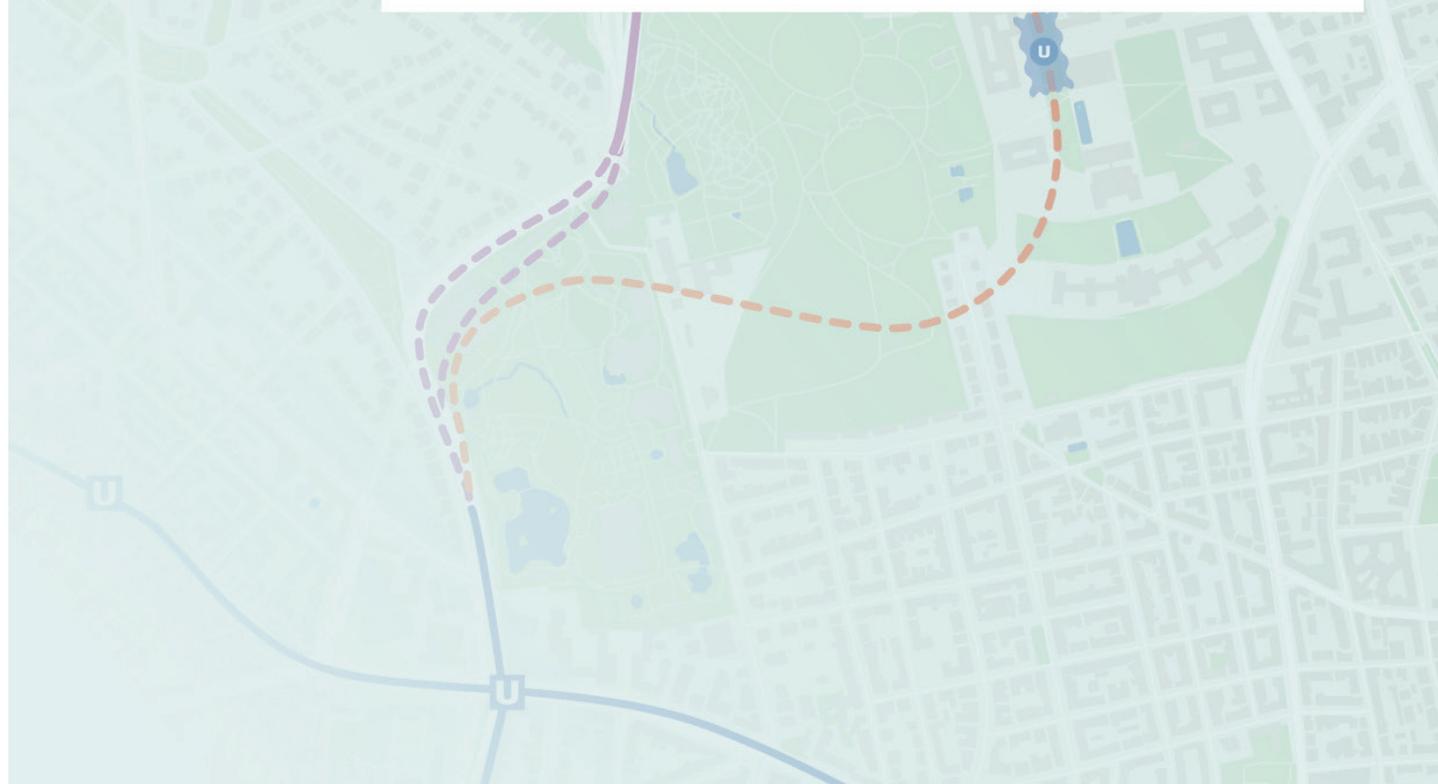
Büro für
Geohydrologie und
Umweltinformationssysteme



Verlängerung U4 – Brockenheimer Warte nach Ginnheim
(Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2) in Frankfurt am Main

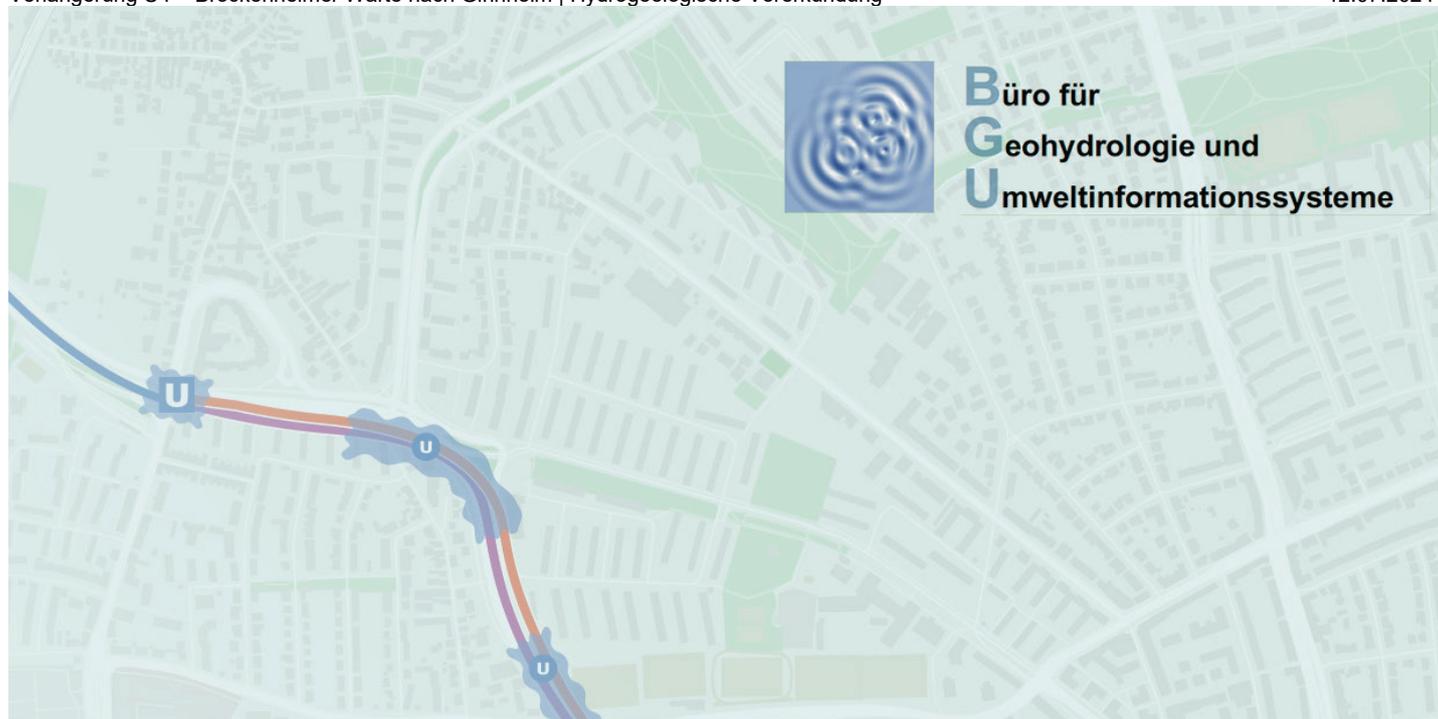
—
Hydrogeologische Vorerkundung

Anhang 1 **Pläne**





Büro für
Geohydrologie und
Umweltinformationssysteme

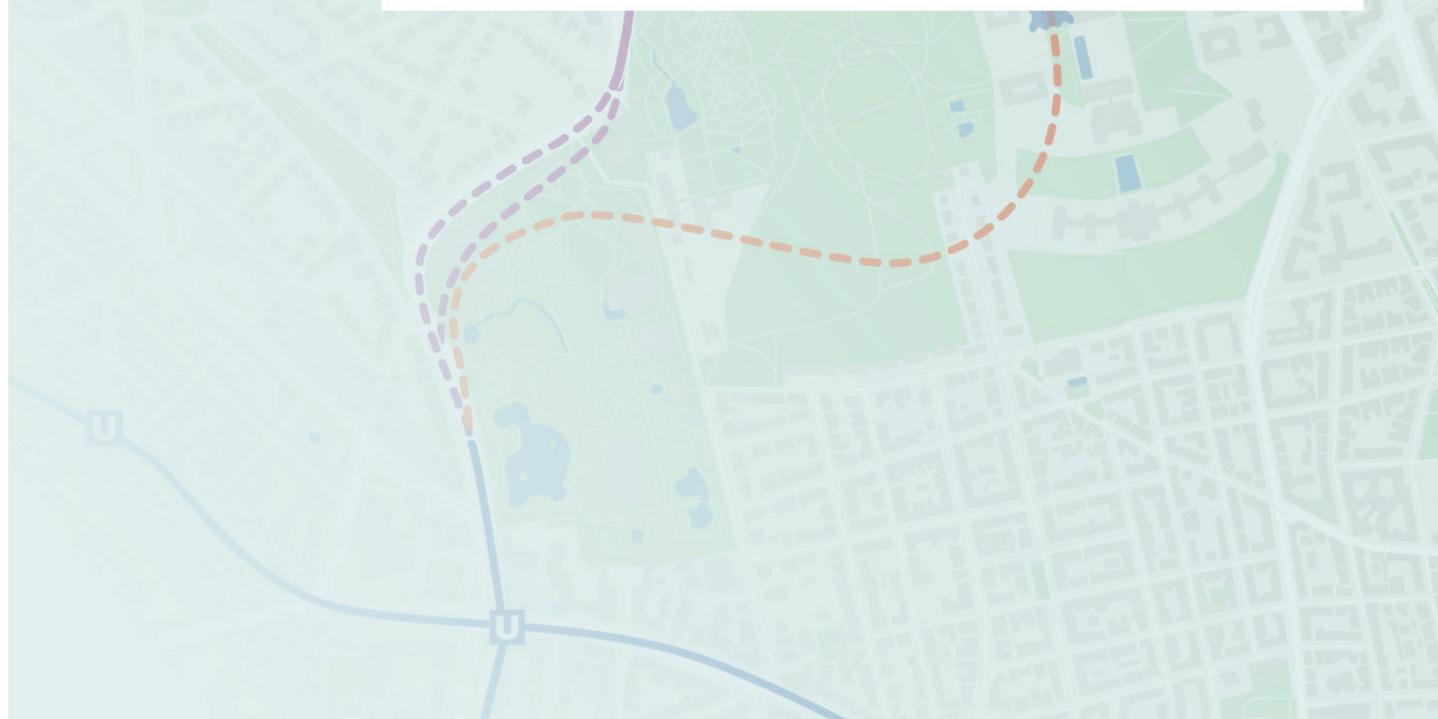


Verlängerung U4 – Brockenheimer Warte nach Ginnheim
(Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2) in Frankfurt am Main

—
Hydrogeologische Vorerkundung

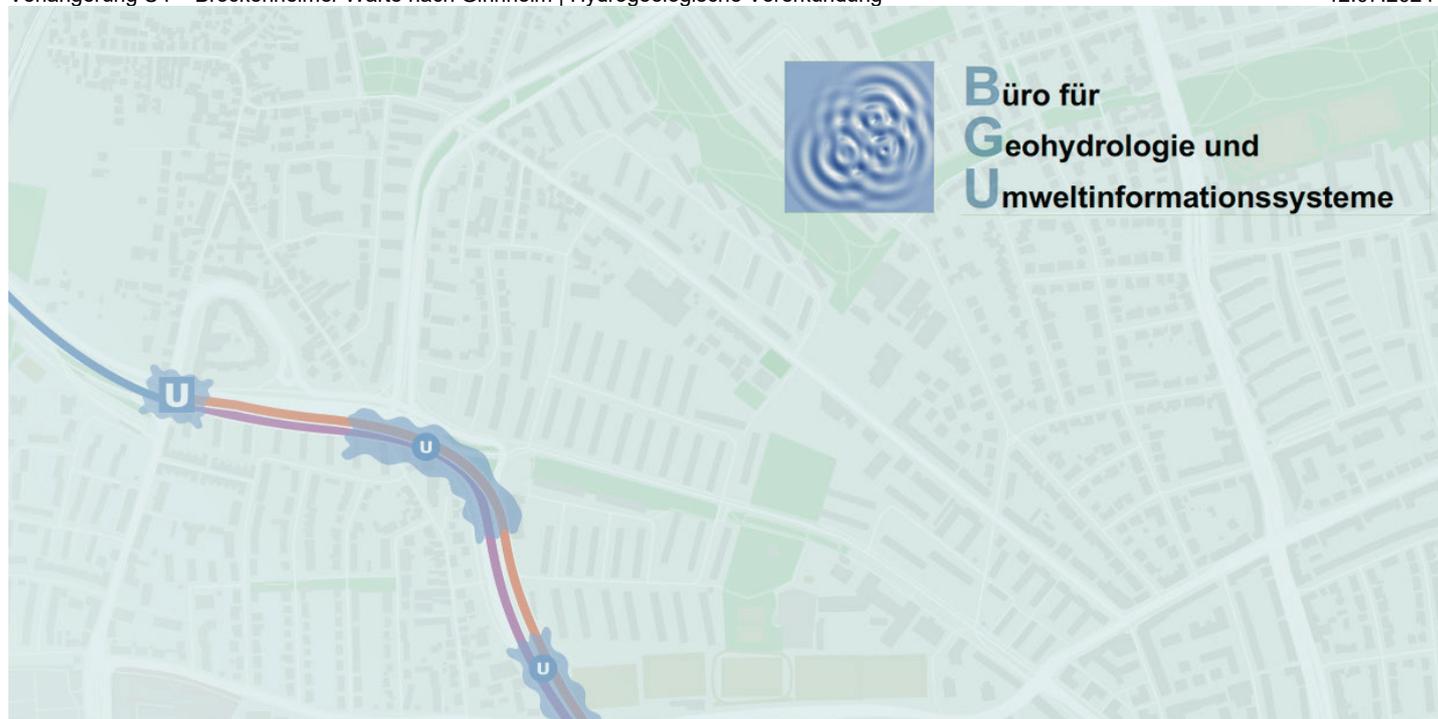
Anhang 2

Übersichtslagepläne der Varianten,
Planungsstand 12.03.2024
(VGF / Schüßler Plan)





Büro für
Geohydrologie und
Umweltinformationssysteme

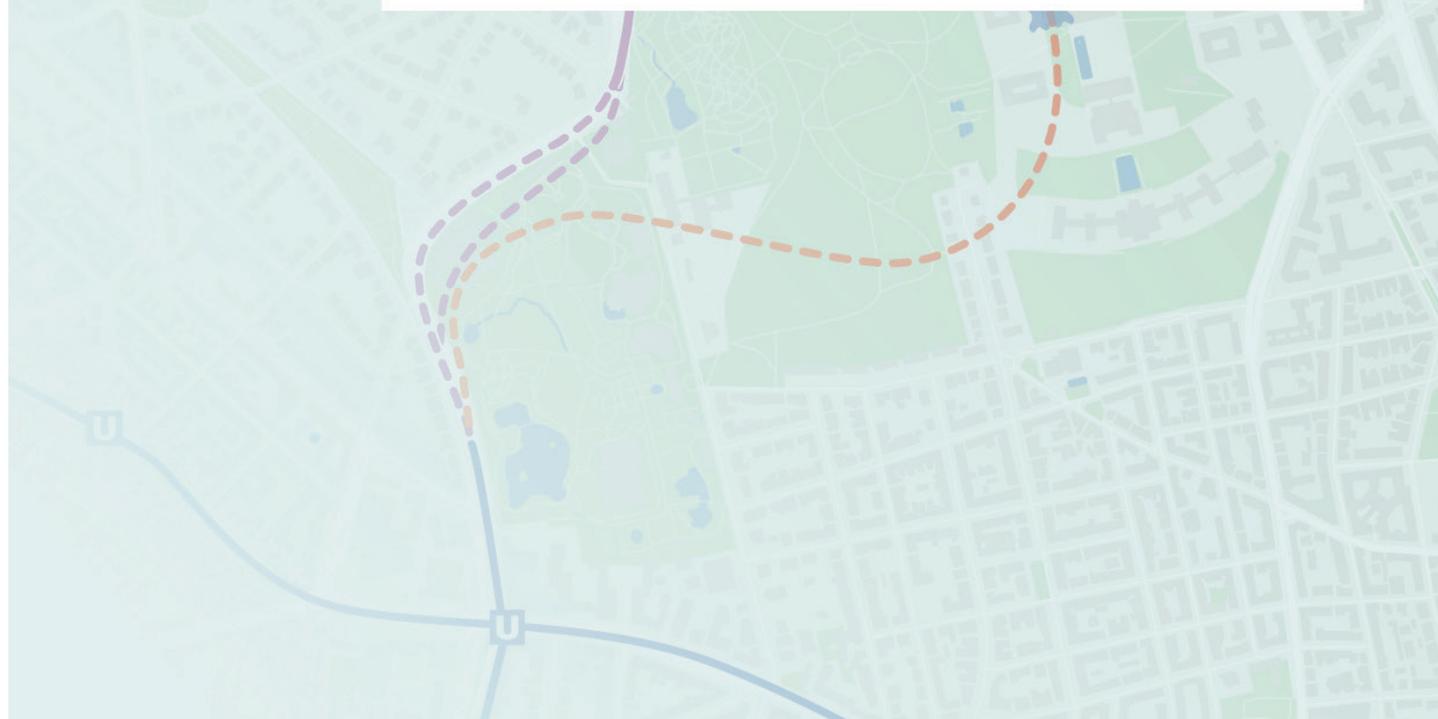


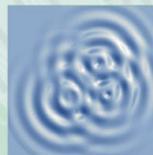
Verlängerung U4 – Bockenheimer Warte nach Ginnheim
(Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2) in Frankfurt am Main

—
Hydrogeologische Vorerkundung

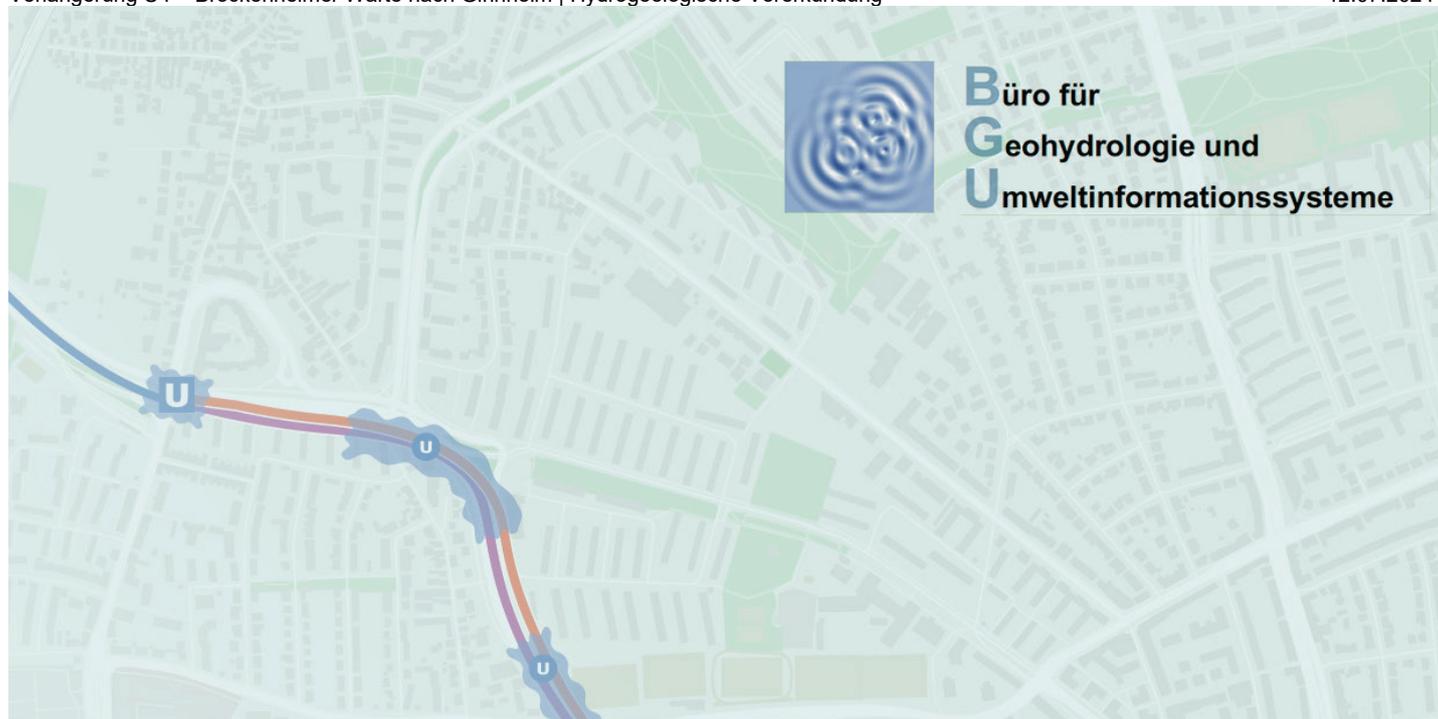
Anhang 3

Stammdaten der Grundwasser-
messstellen im Modellgebiet





Büro für
Geohydrologie und
Umweltinformationssysteme

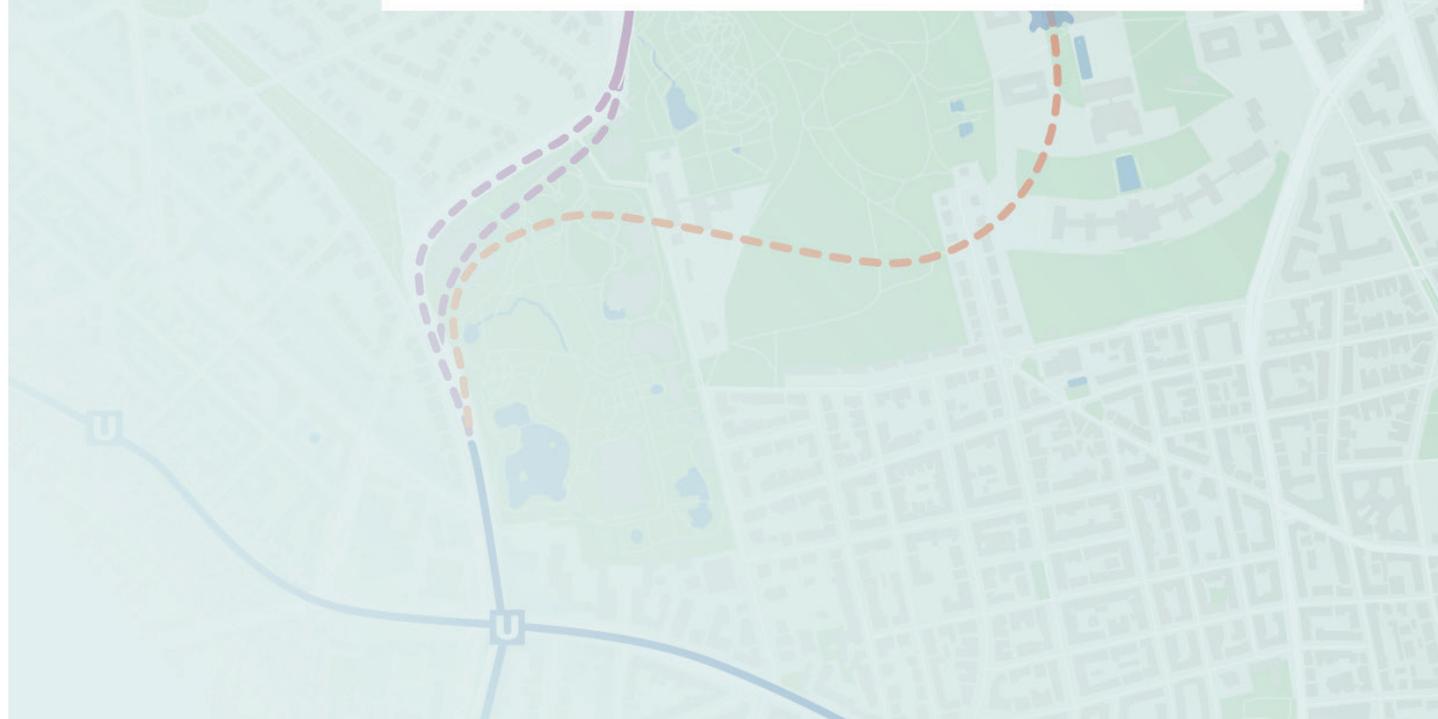


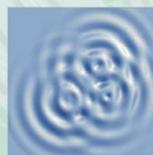
Verlängerung U4 – Brockenheimer Warte nach Ginnheim
(Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2) in Frankfurt am Main

—
Hydrogeologische Vorerkundung

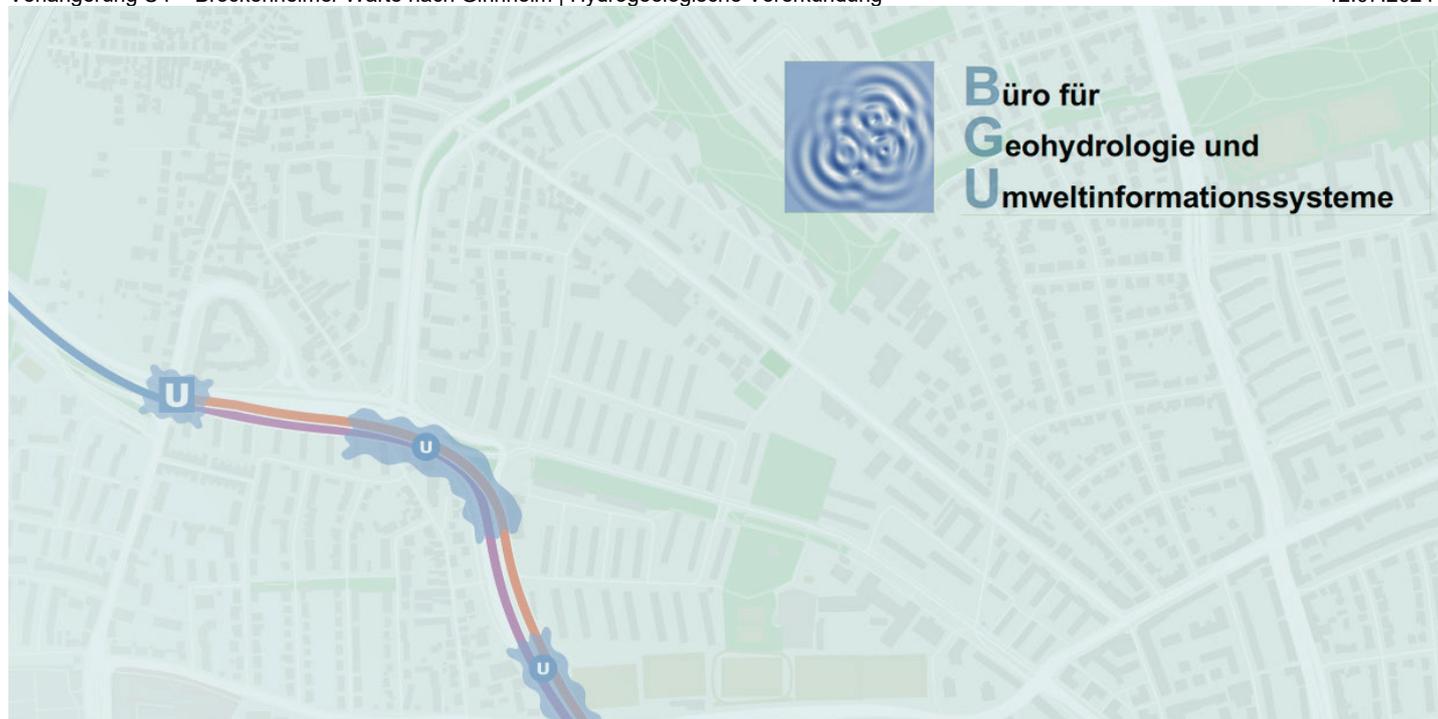
Anhang 4

Schichtprofile und Ausbau-
zeichnungen der neu errichteten
GW-Messstellen (BGU)





Büro für
Geohydrologie und
Umweltinformationssysteme

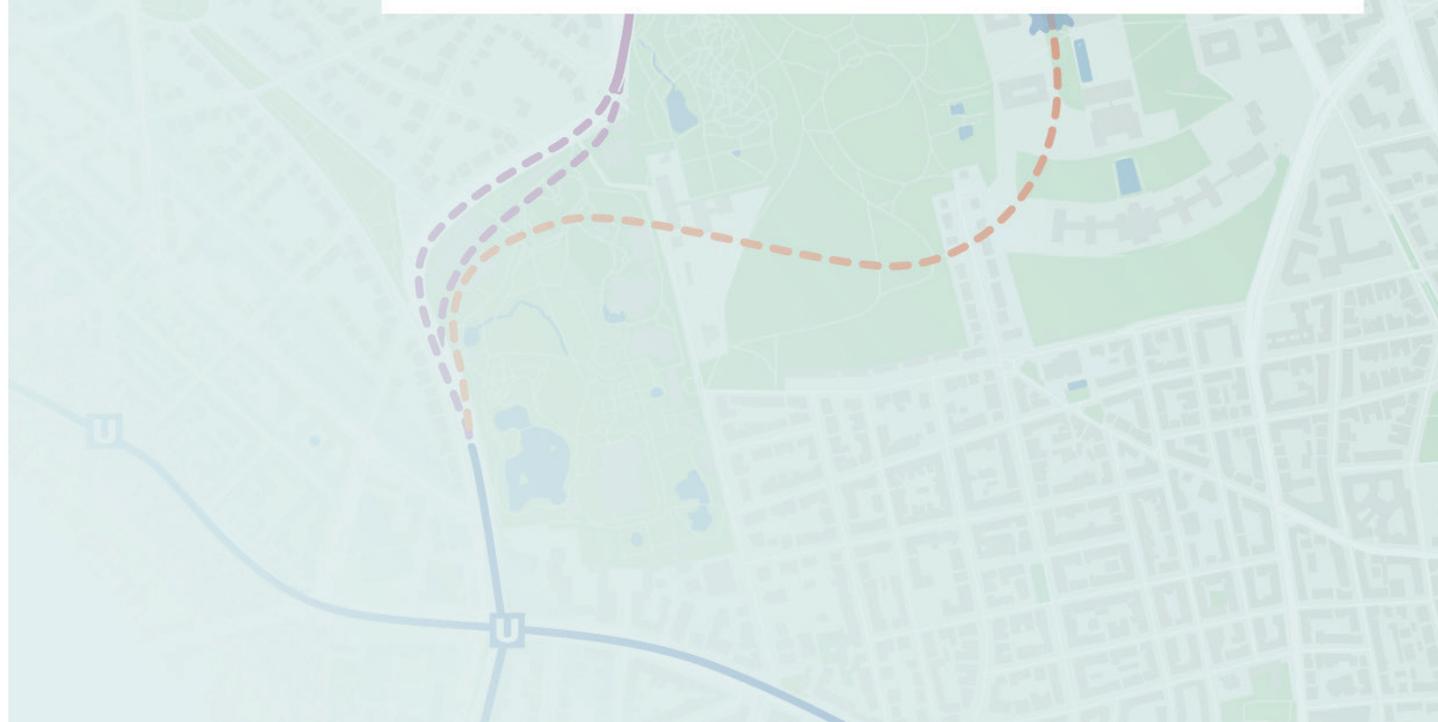


Verlängerung U4 – Bockenheimer Warte nach Ginnheim
(Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2) in Frankfurt am Main

—
Hydrogeologische Vorerkundung

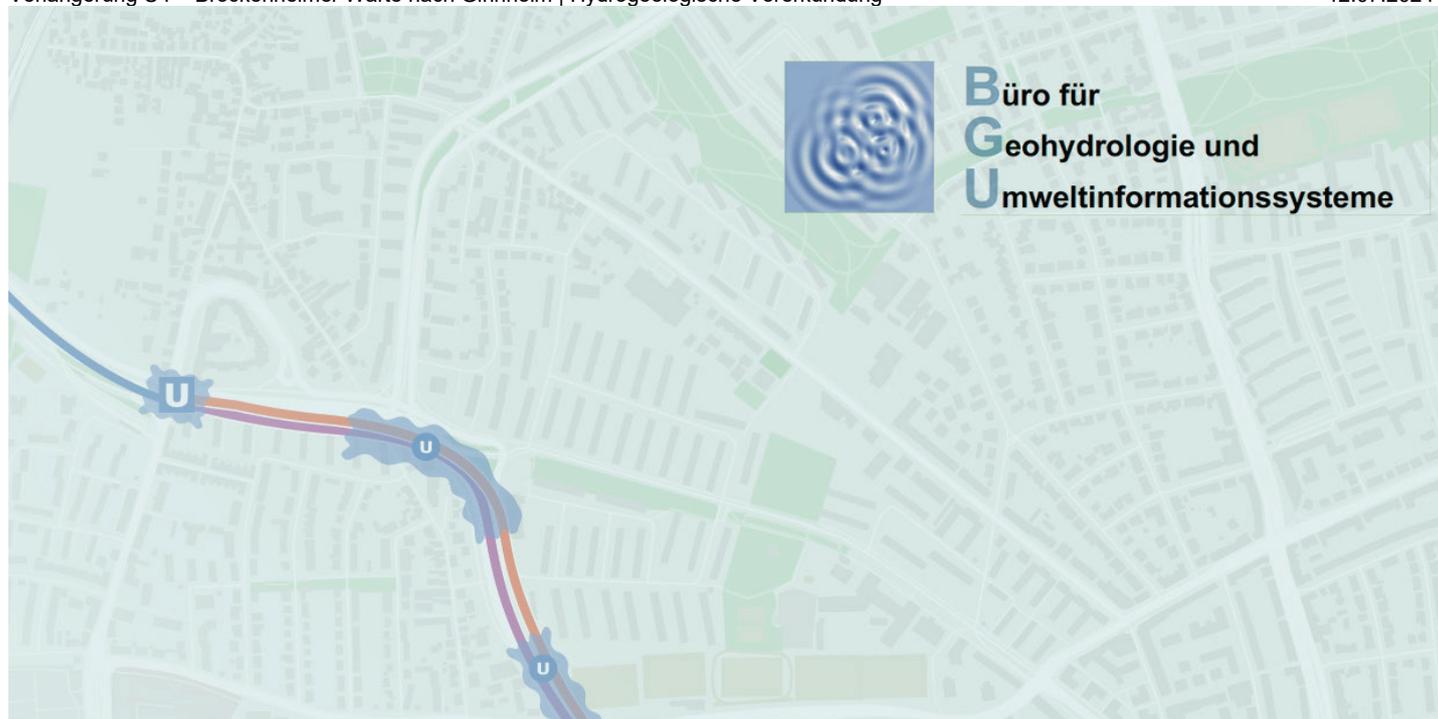
Anhang 5

Grundwasserganglinien





Büro für
Geohydrologie und
Umweltinformationssysteme

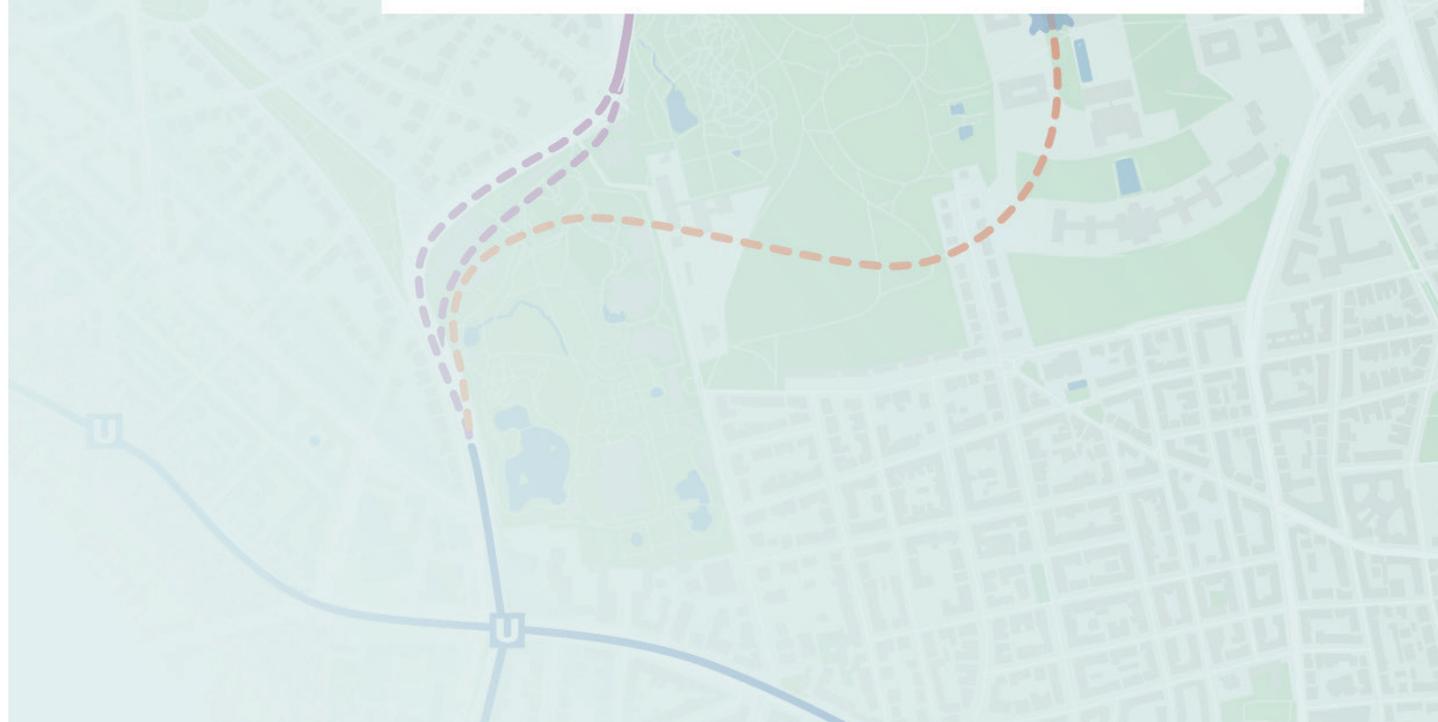


Verlängerung U4 – Bockenheimer Warte nach Ginnheim
(Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2) in Frankfurt am Main

—
Hydrogeologische Vorerkundung

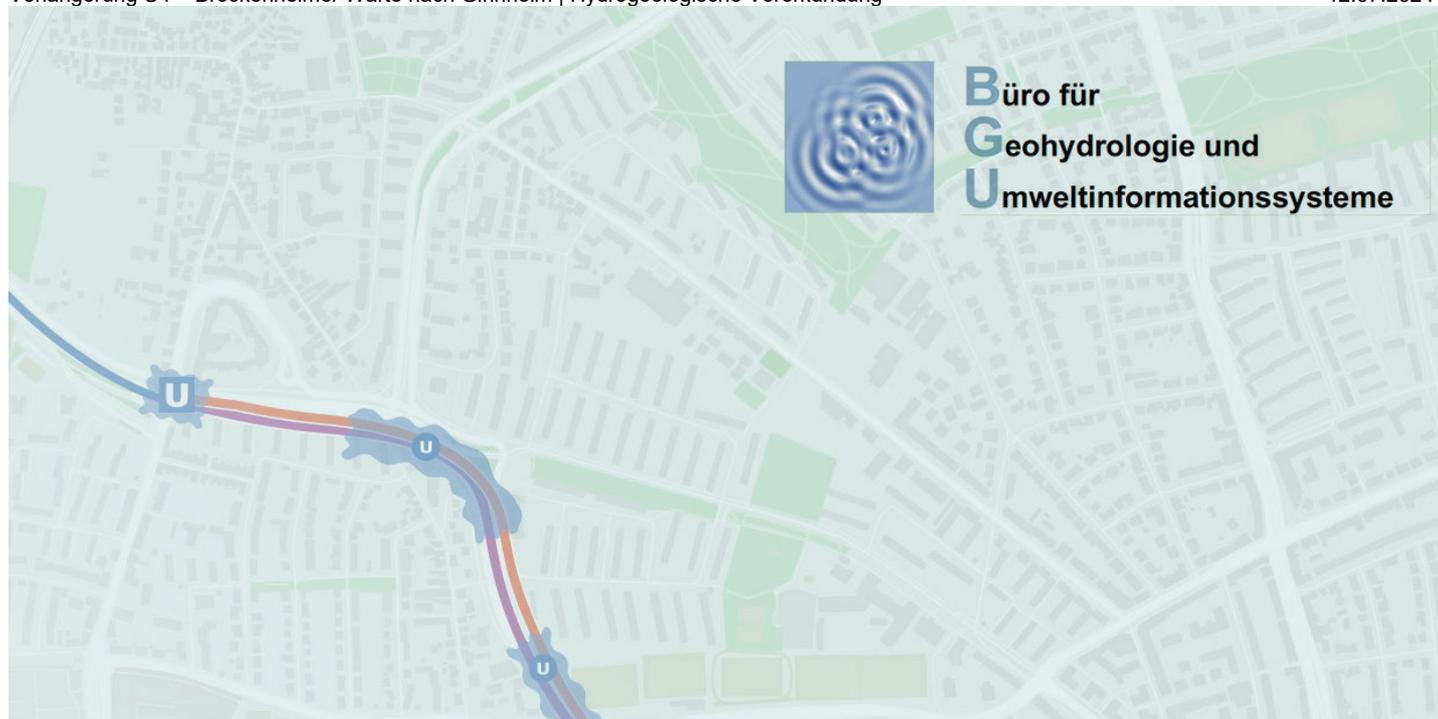
Anhang 6

Hydrochemische Untersuchungen, Tabelle





Büro für
Geohydrologie und
Umweltinformationssysteme

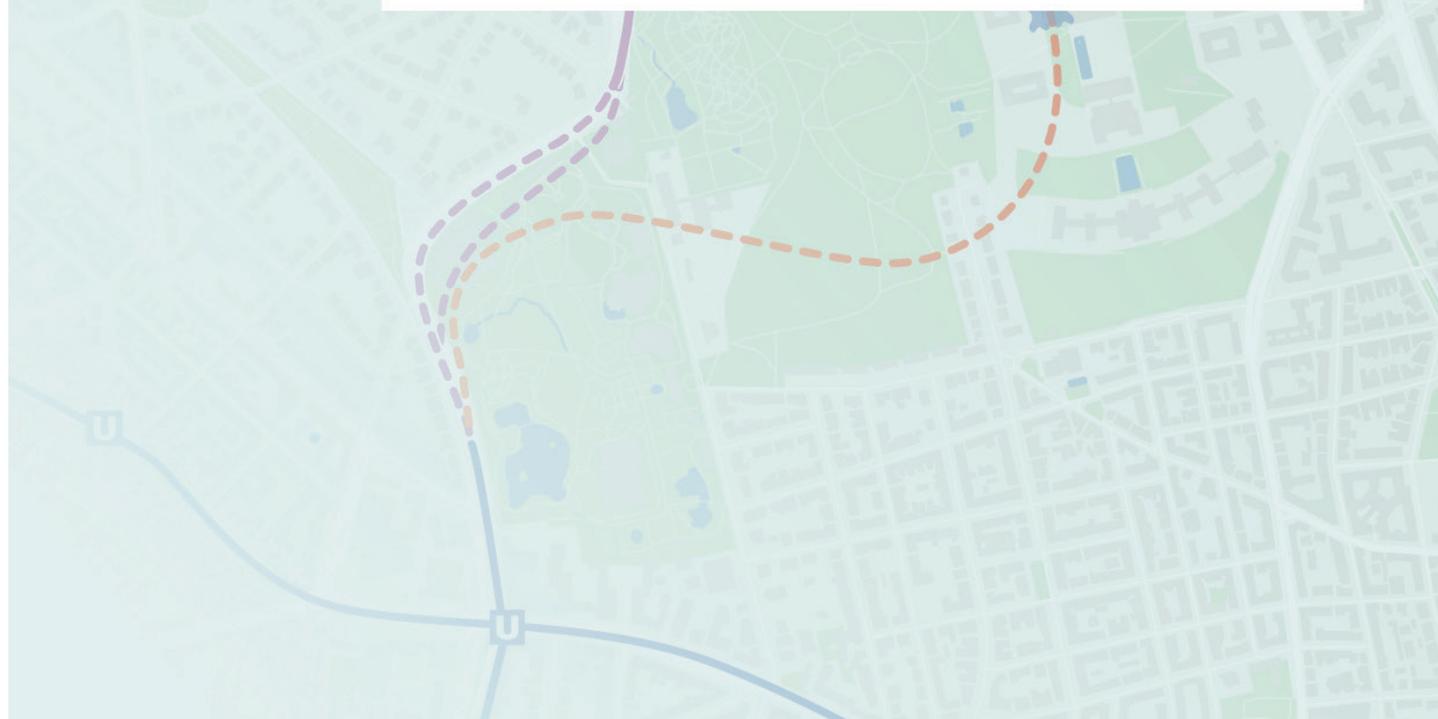


Verlängerung U4 – Brockenheimer Warte nach Ginnheim
(Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2) in Frankfurt am Main

—
Hydrogeologische Vorerkundung

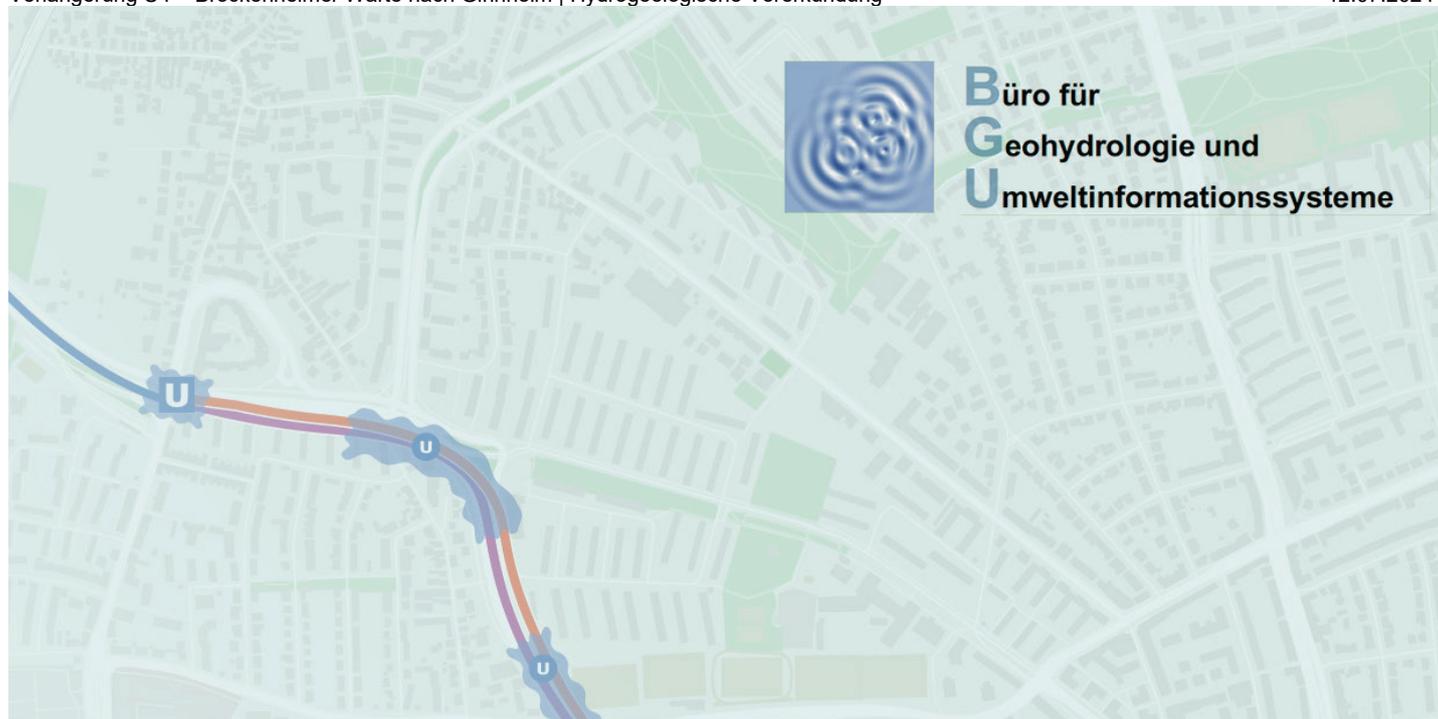
Anhang 7

Auswertung der Pumpversuche an GW-Messstellen, Geotechnik Lehr





Büro für
Geohydrologie und
Umweltinformationssysteme

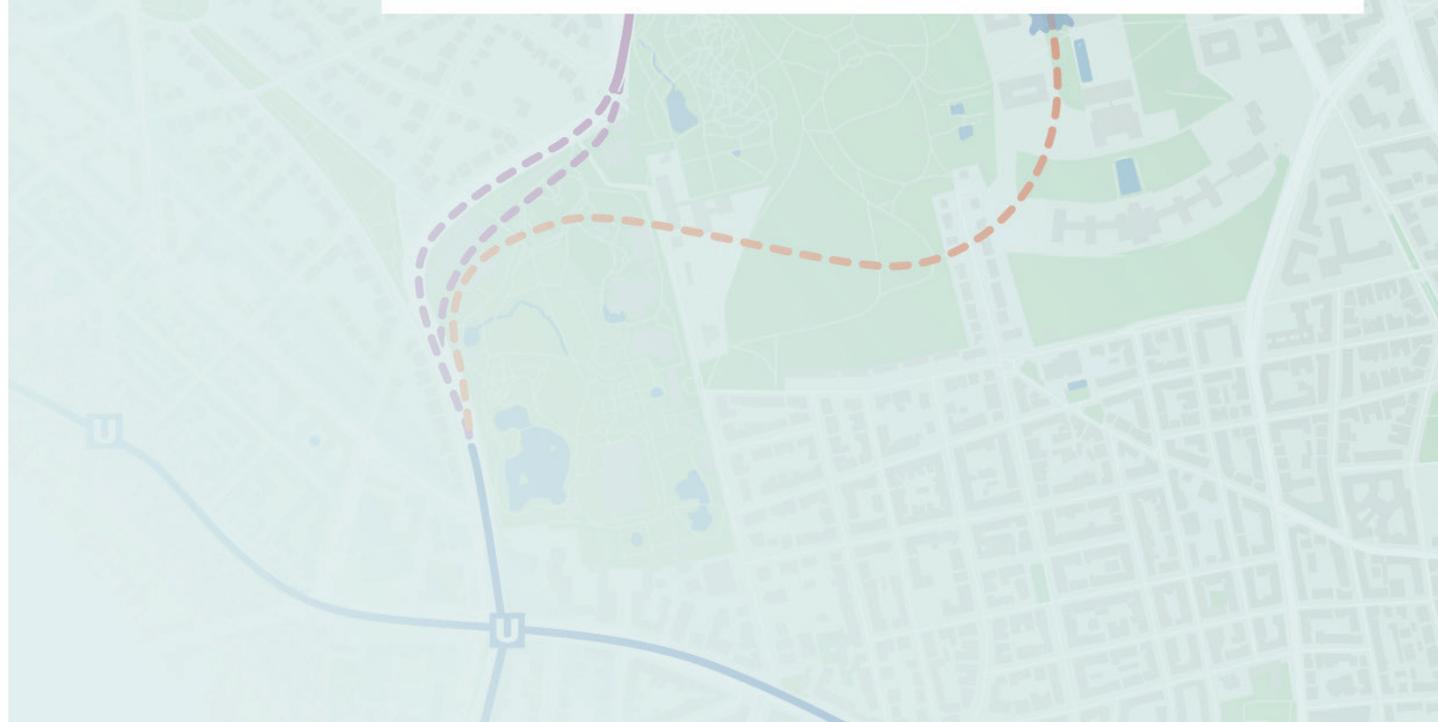


Verlängerung U4 – Bockenheimer Warte nach Ginnheim
(Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2) in Frankfurt am Main

—
Hydrogeologische Vorerkundung

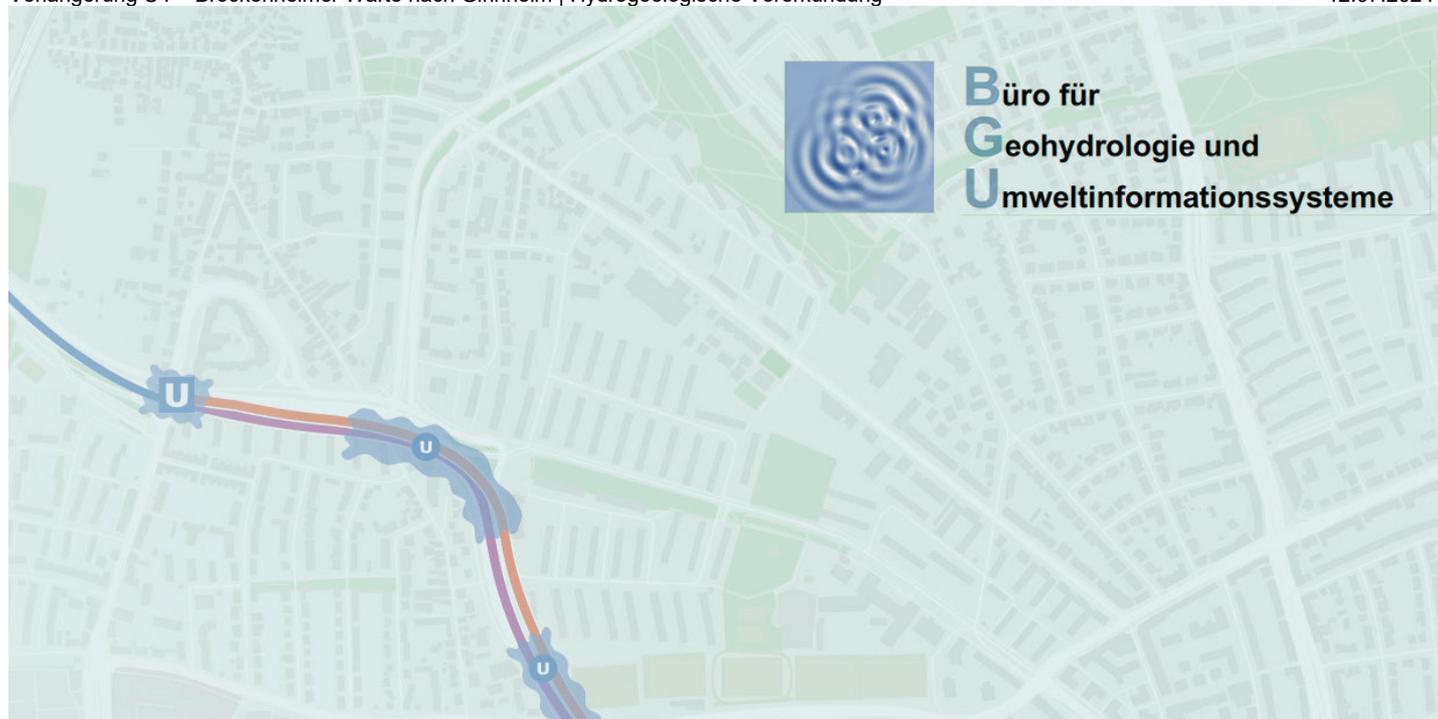
Anhang 8

Modellbewertung gemäß Fachsektion Hydrogeologie e.V.





Büro für
Geohydrologie und
Umweltinformationssysteme

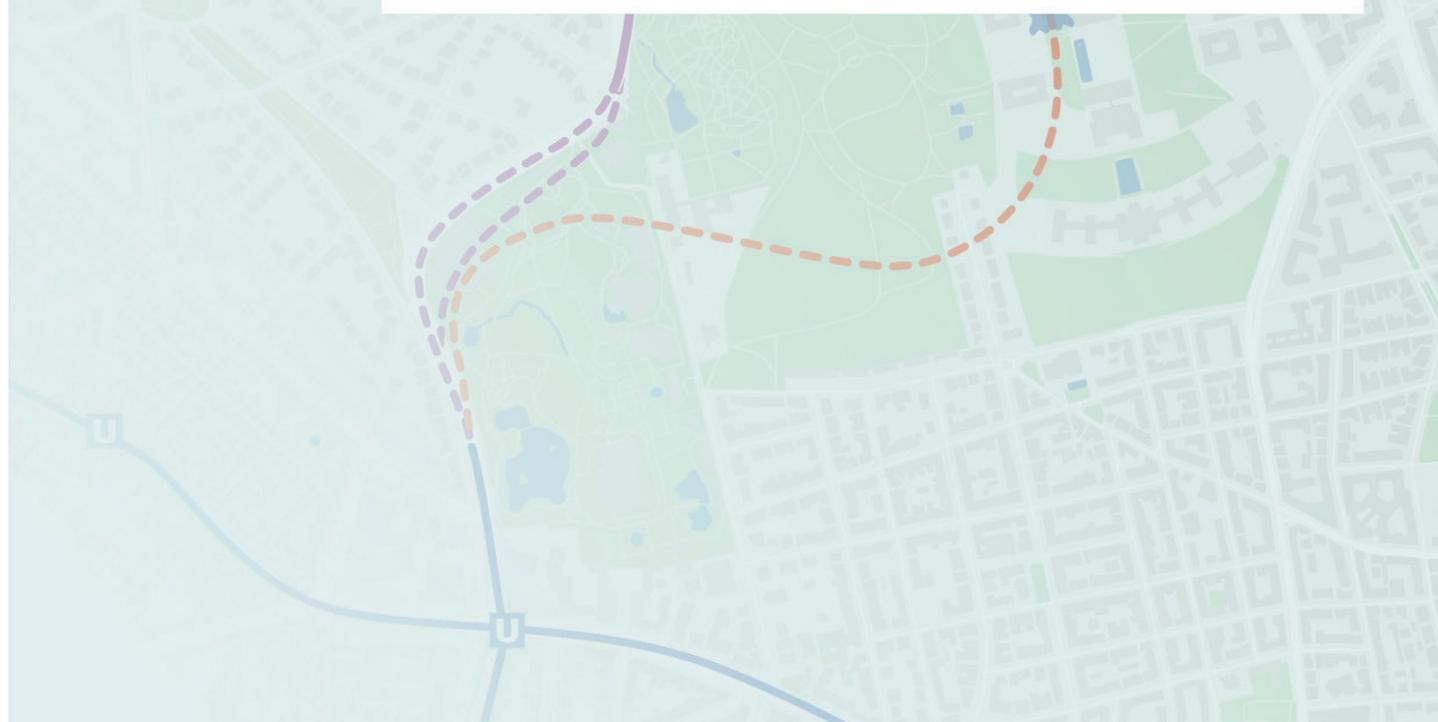


Verlängerung U4 – Bockenheimer Warte nach Ginnheim
(Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2) in Frankfurt am Main

—
Hydrogeologische Vorerkundung

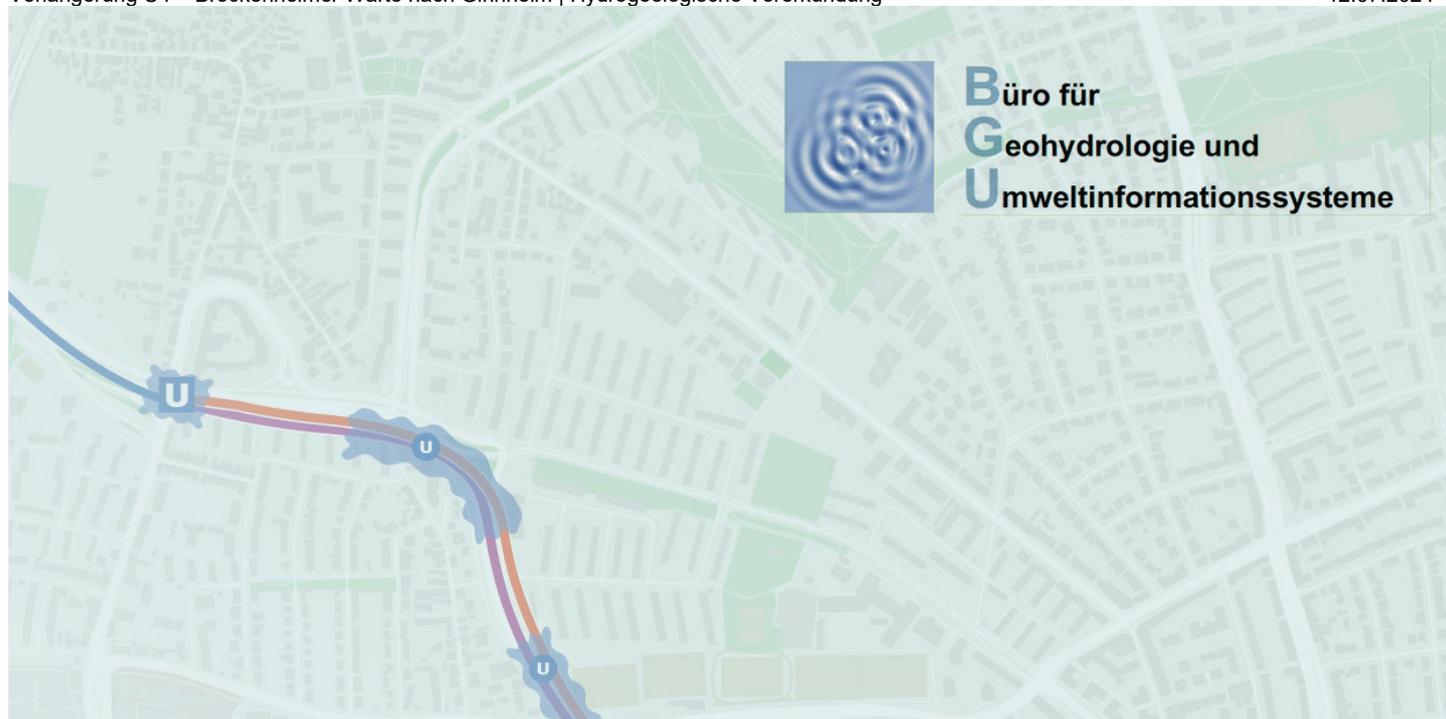
Anhang 10

Klarpumpprotokolle, Terrasond GmbH, mit Ergebnistabelle





Büro für
Geohydrologie und
Umweltinformationssysteme

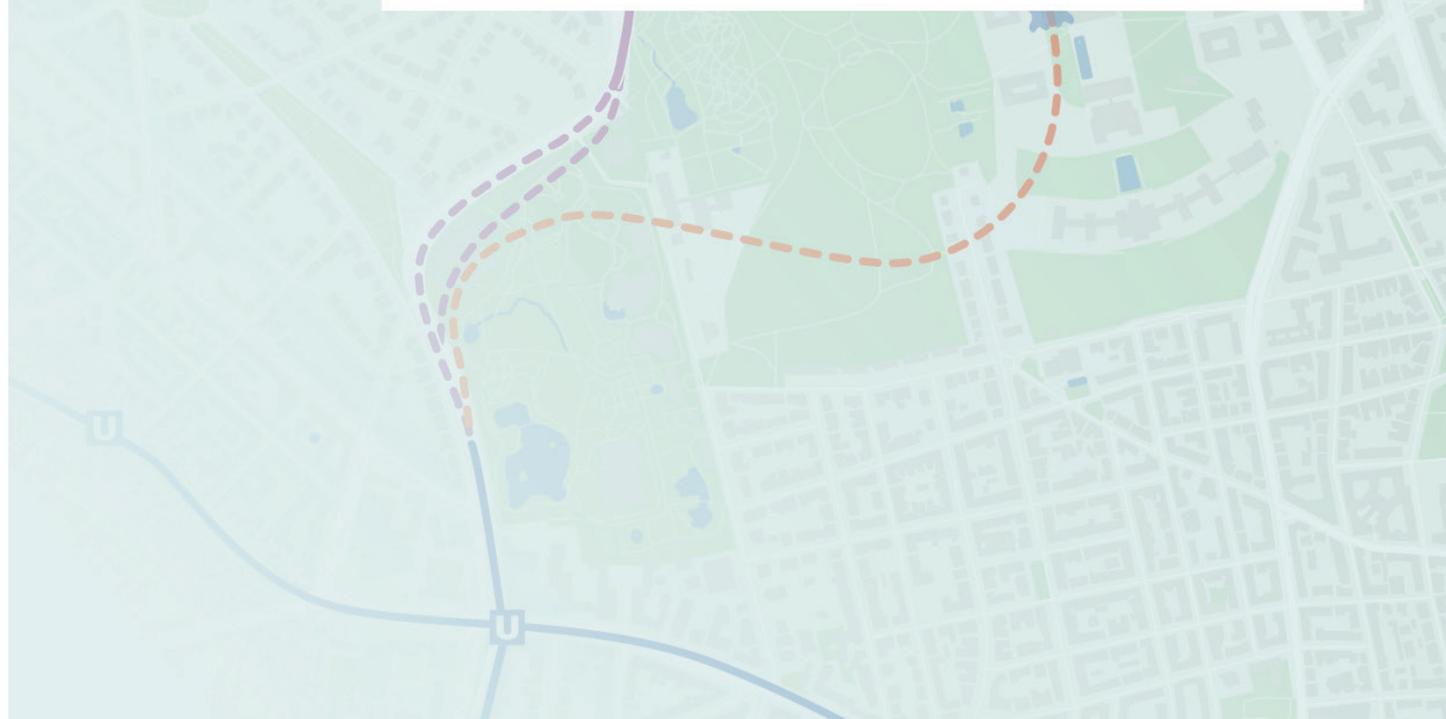


Verlängerung U4 – Brockenheimer Warte nach Ginnheim
(Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2) in Frankfurt am Main

—
Hydrogeologische Vorerkundung

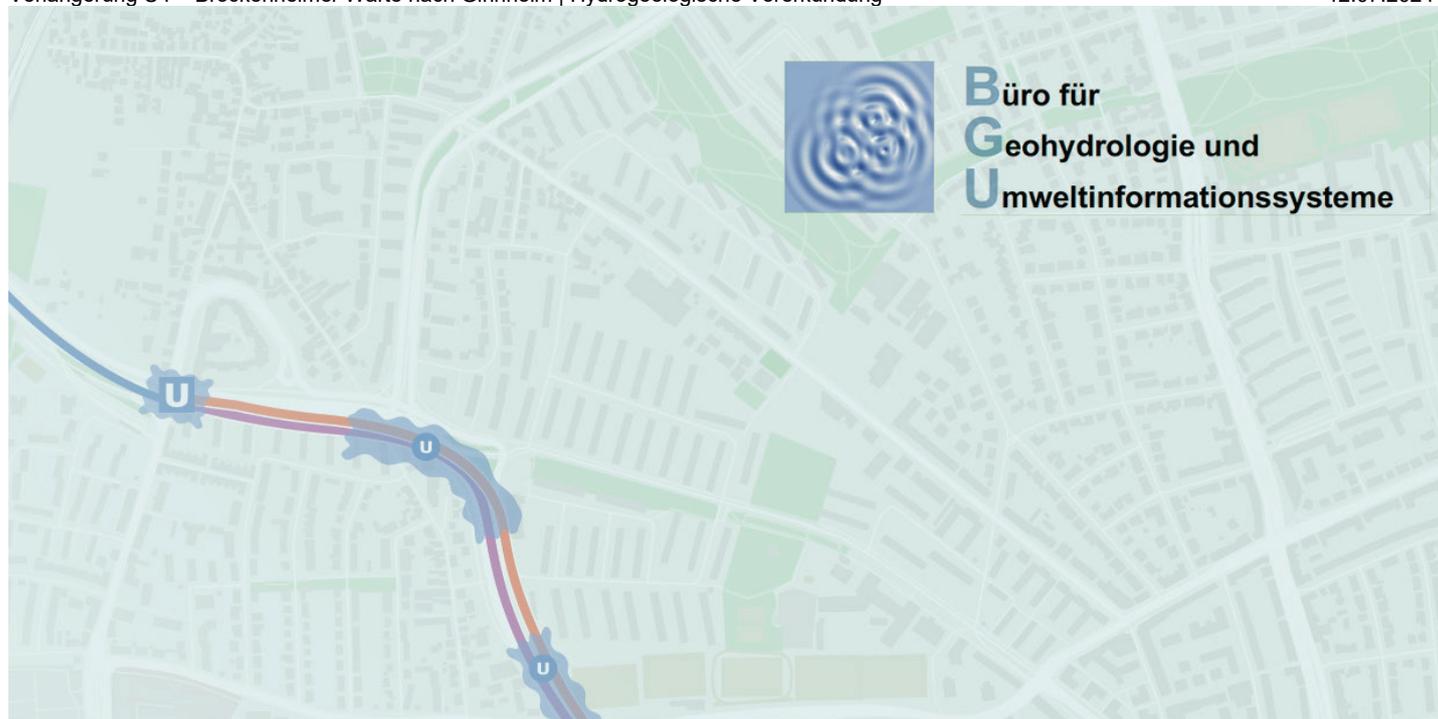
Anhang 11

Probenahmeprotokolle (Dr. Hug Geoconsult) und Laborberichte (Chemlab GmbH)





Büro für
Geohydrologie und
Umweltinformationssysteme



Verlängerung U4 – Bockenheimer Warte nach Ginnheim
(Stadtbahnstrecke D, Teilabschnitt 2) in Frankfurt am Main

—
Hydrogeologische Vorerkundung

Anhang 12

Dokumentation Grundwasser- messnetz (Altbestand)

