

Projekt:

**BV Hochmoselübergang B 50n
Gutachten zur hydrogeologisch-wasserhaushaltlichen
Situation im West-Hang der Brückentrasse**

1. Bericht:

**Dokumentation und Bewertung der durchgeführten Untersu-
chungen zur Überprüfung der Hydrogeologischen Modell-
vorstellung und Dokumentation der Umsetzung in ein nume-
risches Grundwassermodell**

Auftraggeber:

**Landesbetrieb Mobilität
Rheinland-Pfalz (LBM)
Friedrich-Ebert-Ring 14 - 20
56068 Koblenz**

I. Inhaltsverzeichnis (Text)

	Seite
1. Auftrag	1
2. Ergebnisse der Grundlagenermittlung	2
2.1 Begriffsklärung	2
2.2 Datenbasis	3
2.3 Geologische Rahmenbedingungen	4
2.4 Hydrogeologische Rahmenbedingungen	8
2.5 Hydrologische Rahmenbedingungen / Analyse von Niederschlagsdaten	12
2.6 Bodenaufbau	17
3. Ergebnisse der eigenen Datenerhebung	21
3.1 Einrichtung zusätzlicher GwMessstellen	21
3.1.1 Beobachtungen bei Bohrung und Ausbau der GWM 1/14	21
3.1.2 Beobachtungen bei Bohrung und Ausbau der GWM 2/14	23
3.2 Pumpversuche an GwMessstellen	23
3.3 Auffüllversuche an GwMessstellen	25
3.4 Messungen der el. Leitfähigkeit / Hydrochemie	27
3.5 Optische und Geophysikalische Vermessung von GwMessstellen	29
3.6 Beobachtung des GwSpiegels	31
3.7 Abflussmessungen an Bachläufen	33
3.8 Boden- und Nutzungskartierung, Infiltrationsmessungen	34
4. Hydrogeologische Modellvorstellung	35
4.1 Bilanzraum	35
4.2 Modellgebiete – FD- und FE-Modell	35
4.3 Strukturierung der Modellgebiete	36
4.3.1 Horizontale Diskretisierung	36
4.3.2 Vertikale Diskretisierung	36
4.4 GwHydraulik und GwBilanz	39
4.5 GwQualität / GwBeschaffenheit	40
4.6 Randbedingungen	40
5. Numerisches GwModell	41
5.1 Ausarbeitung und Kalibrierung des Modells	41
5.2 Anwendung des numerischen Grundwassermodells	43
5.2.1 Szenario 01: Extremfall der GwNeubildung	43
5.2.2 Szenario 02: Reduzierte GwNeubildung durch Eingriffe in den Untergrund	43
6. Zusammenfassung	45
6.1 Beantwortung der Fragen im Anforderungsprofil MWKEL /21/	45
6.2 Fragen des Gutachters Geotechnik (Arcadis /20/)	47
6.3 Weitere relevante Erkenntnisse	48

➤ **Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 2-1:	Begriffe des unterirdischen Wassers nach E DIN 4047-3:2000-09	2
Abbildung 2-2:	Fossiles Rutschgebiet (rosa) mit Einzelschollen (braun) (aus www.lgb-rlp.de , Stand Jan. 2014) und ungefährer Lage der Brücke (rot)	3
Abbildung 2-3:	Ausschnitt der GK 50 /15/	4
Abbildung 2-4:	Faziesschema des Rotliegenden in der Wittlicher Senke (aus /15/)	5
Abbildung 2-5:	Geotechnischer Prinzipschnitt durch den Hangbereich aus /31/	6
Abbildung 2-6:	Fotodokumentation von Kernkisten der BK 8/99 aus /32/	7
Abbildung 2-7:	Mittlere Raumlage des Trennflächengefüges nach Messungen an Bohrkernen in 1999 (aus /33/)	7
Abbildung 2-8:	Auswertung der Wiederanstiegskurve für den PV an GWM 1/07	10
Abbildung 2-9:	Rechnerische Analyse der Abflussakkumulation aus den LIDAR-Daten aus /23/ (Trasse B 50n in rot)	14
Abbildung 2-10:	Ausschnitt des Wege- und Gewässerplans /24/	14
Abbildung 2-11:	Fotos des Entwässerungssystems (oben: unbefestigter, unten: befestigter Wegseitengraben mit Durchlass zur "Kaskade")	16
Abbildung 2-12:	Bodenstruktur bei GWM 2/11: Tonschiefer / Fels unter ca. 0,1 m Schieferzersatz / Hangschutt auf Brachfläche	17
Abbildung 2-13:	Bodennutzung auf Weinbergen mit und ohne Krautschicht (links / rechts)	18
Abbildung 2-14:	Einsatz von Mulcher / Grubber auf Weinberg	18
Abbildung 2-15:	Ausschnitte der Weinbergsbodenkarte Nr. 31 /9/ mit Legenden	19
Abbildung 2-16:	Ganglinie des Sickerwasseranfalls (GwNeubildung) im jahreszeitlichen Verlauf unter einem Weinberg bei Würzburg (aus /13/)	20

➤ **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 2-1:	Statistik der Niederschlags-Daten für die Messstationen Bernkastel-Kues und Zeltingen	12
Tabelle 3-1:	Ergebnisse von Pumpversuchen	24
Tabelle 3-2:	Ergebnisse von Auffüllversuchen	26
Tabelle 3-3:	In den GWM gemessene el. Leitfähigkeiten und Temperaturen	27
Tabelle 3-4:	In GwProben gemessene Inhaltsstoffe (mg/l)	29
Tabelle 3-5:	Bisher in GWM gemessener Schwankungsbereich des GwSpiegels	32
Tabelle 3-6:	Mit Doppelringinfiltrimeter bestimmte Durchlässigkeitsbeiwerte des Oberbodens	34

II. Anlagenverzeichnis

Anlage 1 Lagepläne

Anlage 1.1	Lageplan des Untersuchungsgebiets mit Trassenverlauf und Ergebnissen von Abflussmessungen	M 1:10.000
Anlage 1.2	Luftbild des Untersuchungsgebiets mit Trasse und Aufschlusspositionen	M 1:1.500
Anlage 1.3	Flurkarte mit Ergebnissen der Boden- / Nutzungskartierung	M 1:2.500

Anlage 2 Hydrogeologischer Profilschnitt (WNW-ESE) durch den relevanten Abschnitt der Trasse

MdL 1:2.000
MdH 1:1.000

Anlage 3 Dokumentation der Bohrungen / GwMessstellen

Anlage 3.1	GWM 1/14 (Fa. Stölben)
Blatt 1	Bohrprofil, Ausbauzeichnung und Kaliberdarstellung
Blatt 2	Schichtenverzeichnis
Blatt 3	Verfüllprotokoll
Blatt 4	Protokoll der GwMessungen
Blatt 5	Protokoll des Klarpumpens / PV
Anlage 3.2	GWM 2/14 (Fa. Stölben)
Blatt 1	Bohrprofil, Ausbauzeichnung und Kaliberdarstellung
Blatt 2	Schichtenverzeichnis
Blatt 3	Verfüllprotokoll
Blatt 4	Protokoll der GwMessungen
Blatt 5	Protokoll des Klarpumpens / PV
Anlage 3.3	Bohrprofil und Ausbauzeichnung GWM 1/11 (aus /27/)
Anlage 3.4	Bohrprofil und Ausbauzeichnung GWM 2/11 (aus /27/)
Anlage 3.5	Bohrprofil und Ausbauzeichnung GWM 1/07 (aus/29/)

Anlage 4 Auswertung hydraulischer Tests (Büro HG)

Anlage 4.1	Pumpversuch an GWM 1/11
Anlage 4.2	Pumpversuch an GWM 2/11
Anlage 4.3	Pumpversuch an GWM 1/14
Anlage 4.4	Pumpversuch an GWM 2/14

Anlage 5 Dokumentation der Ganglinien des GwSpiegels

Anlage 5.1	Ganglinie der GWM 2/14 + 1/14
Anlage 5.2	Ganglinie der GWM 2/11
Anlage 5.3	Ganglinie der GWM 1/11 + 1/07

Anlage 6 Dokumentation der hydrologischen Daten

- Anlage 6.1 Tabelle der Ergebnisse von Abflussmessungen an Bachläufen
- Anlage 6.2 Dokumentation der Messungen
- Anlage 6.3 Grafische Darstellung von Niederschlagsdaten der DWD-Stationen Bernkastel-Kues und Zeltingen

Anlage 7 Dokumentation der Infiltrationsversuche und Bodenprofilaufnahmen

- Anlage 7.1 Aufnahmeblätter Bodenkartierung
- Anlage 7.2 Ergebnisse der Infiltrationsversuche: Tabelle der ermittelten kf-Werte

Anlage 8 Dokumentation von Aufbau / Erstellung und Kalibrierung des numerischen GwModells

- Anlage 8.1 Regionales FD-GwModell
- Anlage 8.1.1 Lageplan des FD-Modellgebiets auf Basis der GK 25 mit Darstellung der geohydraulischen Randbedingungen
- Anlage 8.1.2 3D-Blockdarstellung des FD-GwModellraums
- Anlage 8.1.3 Längsschnitt durch das FD-Modellgebiet (NW-SE) mit Darstellung der vertikalen Diskretisierung und angenommenen Homogenbereichen der Durchlässigkeit
- Anlage 8.1.4 Vergleich berechneter und gemessener GwStände für den stationären Kalibrierungszustand des FD-GwModells
- Anlage 8.2 Kleinräumiges FE-GwModell
- Anlage 8.2.1 Lageplan des FE-Modellgebiets auf Basis der TK 25 mit Darstellung der geohydraulischen Randbedingungen
- Anlage 8.2.2 Darstellung der räumlichen Verteilung der horizontalen Durchlässigkeit (kfh)
- Anlage 8.2.3 Längsschnitt durch das FE-Modellgebiet (NW-SE) mit Darstellung der vertikalen Diskretisierung und angenommenen Homogenbereichen der Durchlässigkeit
- Anlage 8.2.4 Vergleich berechneter und gemessener GwStände für den instationären Kalibrierungszustand (Zeitschritt 05.05.2014) des FE-GwModells
- Anlage 8.2.5 Vergleich berechneter und gemessener GwGanglinien

Anlage 9	Darstellungen zur Anwendung des numerischen GwModells
Anlage 9.1	Vergleich der berechneten Ganglinien für den Kalibrierungszustand und für den Extremfall der 3-monatigen maximalen GwNeubildung
Blatt 1	Ganglinie der GWM 1/11 + 1/07
Blatt 2	Ganglinie der GWM 2/11
Blatt 3	Ganglinie der GWM 2/14 + 1/14
Anlage 9.2	Vergleich der berechneten Ganglinien für den Kalibrierungszustand und für die durch Eingriffe in den Untergrund reduzierte GwNeubildung
Blatt 1	Ganglinie der GWM 1/11 + 1/07
Blatt 2	Ganglinie der GWM 2/11
Blatt 3	Ganglinie der GWM 2/14 + 1/14
Anlage 10	Prüfberichte des Labors UEG zur Durchführung von GwAnalysen
Anlage 11	Berichte des Büros Händel zur optischen Kontrolle und geophysikalischen Messung an GwMessstellen
Anlage 11.1	GWM 1/11
Anlage 11.2	GWM 1/14
Anlage 11.3	GWM 2/14
Anlage 12	Bericht des Büros Karch zur Durchführung hydraulischer Tests an den GWM im Westhang der Brückentrasse Hochmoselbrücke B50neu

III. Verzeichnis der verwendeten Unterlagen

➤ Öffentlich zugängliche Unterlagen

- /1/ Wetterdaten DWD-Stationen Bernkastel-Kues und Zeltingen (Stand 30.03.2014).-
http://www.am.rlp.de/Internet/global/inetcntr.nsf/dlr_web_full.xsp?src=L941ES4AB8&p1=1PJCNH7DKW&p2=IB26DJ6C96&p3=9IQ84WEY3L&p4=XJPZBV4849
- /2/ Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz.-
LUWG, Mainz Juni 2012
- /3/ DIN EN ISO 22282 Geotechn. Erkundung u. Untersuchung - Geohydraul. Versuche
Teil 1: Allgemeine Regeln (ISO 22282-1:2012)
Teil 2: Wasserdurchlässigkeitsversuche im Bohrloch unter Anwendung offener Systeme (ISO 22282-2:2012)
Teil 4: Pumpversuche (ISO 22282-4:2012)
Teil 5: Infiltrationsversuche (ISO 22282-5:2012).-
Beuth Verlag, Berlin 2012
- /4/ DIN 19687 Bodenbeschaffenheit – Berechnung der Sickerwasserrate aus dem Boden.-
Beuth Verlag, Berlin 2011
- /5/ Fachsektion Hydrogeologie in der Dt. Geolog. Ges. (Hrsg.):
Hydrogeologische Modelle – Bedeutung des hydrogeolog. a priori-Wissens.-
Schriftenreihe der DGG H. 70, Hannover 2010
- /6/ Krug et.al.: Anwendung des TUB-BGR-Verfahrens zur Berechnung der Sickerwasserrate auf Basis der BÜK 200.-
BGR Hannover 2010
- /7/ Wessolek et.al.: Bodenphysikalische Kennwerte u. Berechnungsverfahren für die Praxis.-
Schriften Bodenökologie u. Bodengenese H.40, Inst. für Ökologie der TU; Berlin 2009
- /8/ Thielen: Einfluss der Bodensättigung auf die Stabilität von Hängen.-
Dissertation ETH Zürich, 2007
- /9/ Böhm / Spies: Bodenkundliche Grundlagen zur Bewertung der Bewässerungsbedürftigkeit von Weinbergsböden in Rheinland-Pfalz (Ergebnisbericht 09/2005 und
Karten M 1:10.000 mit Begleitheft).-
LGB Mainz, 2007
- /10/ Topographische Karten M 1:25.000, 6007 Wittlich und 6008 Bernkastel-Kues.-
Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz, Koblenz 2006/2007
- /11/ Hölting / Coldewey: Hydrogeologie (6. Aufl.).- Elsevier Verlag, München 2005
- /12/ Planung, Bau u. Betrieb von Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser.-
Arbeitsblatt A 138, DWA (Hrsg.), Hennef 2005
- /13/ Peternel / Schwab: Nährstoffaustrag aus Weinbergsböden.-
LWG Bayern, Veitshöchheim 2004
- /14/ Strukturkarte der Wittlicher Rotliegend-Senke, M. 1:100.000
Landesamt für Geologie und Bergbau, Mainz 2004
- /15/ Geologische Karte Wittlicher Rotliegend-Senke, M. 1:50.000 mit Erläuterungen.
Landesamt für Geologie und Bergbau, Mainz 2004

- /16/ HAD – Hydrologischer Atlas von Deutschland.-
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Freiburg 2003
- /17/ Fachsektion Hydrogeologie in der Dt. Geolog. Ges. (Hrsg.): Hydrogeolog. Modelle - Ein
Leitfaden mit Fallbeispielen.- Schriftenreihe der DGG H. 24, Hannover 2002
- /18/ Geologische Karten M 1:25.000 Bl. 6007 Wittlich und. 6008 Bernkastel-Kues.
Kgl. Preuß GLA, Berlin 1901/1901
- /19/ FEFLOW 6.2.- DHI-WASY, Berlin 2014.
- /20/ GMS 9.2 – AQUAVEO Ltd., Provo Utah, 2014

➤ **Projektspezifische Unterlagen**

- /21/ Anforderungsprofil Sickerwasseruntersuchungen.-
Arcadis Consult GmbH, Darmstadt 16.04.2014
- /22/ Schreiben des MWKEL, Dr. Weingarten an das MISI, Dr. Kaufmann.-
MWKEL Mainz, 10.01.2014
- /23/ Lage- und Höhenkontrolle GWM 1 + 2/11, 1/07, Ink 13/07.-
LBM Trier, 03.02.2014
- /24/ Ergebnisse der Fernerkundung B 50n Hochmoselübergang (Luftbilder 1964 – 2011, Reli-
eferdarstellungen, Bewegungsanalysen).-
LGB, Mainz 29.01.2014
- /25/ Wege-und Gewässerkarte für das Flurbereinigungsverfahren Rachtig-Ürzig
M 1:2.000 (digitale Version, übermittelt von LBM Koblenz).-
DLR Mosel, undatiert
- /26/ 9. Statusbericht - .Wasserstandsmessungen / Folgemessungen GWM 1/07, Moselwasser-
spiegel, Temperatur und Niederschlag, Auszug S. 1-7 (pdf); Anlage 3.6 und 3.7 (pdf), An-
hang A: aktueller Lageplan Messpunkte westlicher Moselhang (Index e) und Längsschnitt
(Index f) (pdf u. dwg), Datenreihen zu den Grundwasser- und Moselwasserstand, Tempe-
ratur (Excel).-
Arcadis Consult GmbH, Darmstadt 12.12.2013
- /27/ Bericht: Geotechnische Stellungnahme zu den Bohrerergebnissen der
Inklinometerbohrungen 2011/12 im westlichen Steilhang (pdf), Anlage 1 und 2 (pdf), mit
Bohr- und Ausbauprofilen, Bohrkernfotos GWM 1 u. 2/11, Ink 1 -3/11 der Fa. Terrasond
(pdf).-
Arcadis Consult GmbH, Darmstadt 17.04.2012
- /28/ Geotechnische Stellungnahme des Landesamtes für Geologie und Bergbau Rheinland
Pfalz: Geologisch-Geotechnische Aufnahme der Bohrungen INK 1/11 bis INK 3/11 (pdf);
Anlage 1 - 9 (pdf).-
Arcadis Consult GmbH, Darmstadt 15.03.2012
- /29/ Bericht: Inklinometermessung und Grundwassermonitoring im westlichen Moselhang -
Dokumentation GwMonitoring GWM 1/07, GWM B u. GWM A/B035; Anlage 2 (pdf).-
Arcadis Consult GmbH, Darmstadt 30.11.2011
- /30/ Bericht: Inklinometermessung und Grundwassermonitoring im westlichen Moselhang -
Dokumentation ... Grundwassermonitoring und Funktionsprüfung GWM 1/07 (pdf),
Anlage 2 (pdf), Hydraulische Auswertung Funktionsprüfung GWM 1/07 (pdf u. Excel .-
Arcadis Consult GmbH, Darmstadt 24./29.08.2011
- /31/ Bericht: Inklinometermessung und Grundwassermonitoring im westlichen Moselhang -
Dokumentation Ausbau Inklinometer- und Grundwassermessstelle GWM 1/07 (pdf),

Anlage 1 (pdf u. dwg) Anlage 2 und 4 (pdf)).-
Arcadis Consult GmbH, Darmstadt 23.04.2008

- /32/ Bericht: Standsicherheitsberechnungen im westlichen Moselhang, Auszug S. 1 - 12 (pdf),
Anlage 1 - 2.5 (pdf u. dwg), Anlage 3 u. 5.1 -5.3 (pdf)).-
Arcadis Consult GmbH, Darmstadt 02.11.2007
- /33/ 6. Bericht: Dokumentation der ergänzenden Erkundung 1999 und der Laborversuche;
Auszug S. 1 - 2 (pdf), Anlage 1 und 4.1 - 4.3 und 4.6 (pdf).-
Arcadis Consult GmbH, Darmstadt 23.02.2001
- /34/ 5. Bericht 5: Baugrundbeurteilung und Gründungsberatung; Auszug S. 1 -20 (pdf), Anlage
1 -2 (pdf u. dwg), Anlage 3 (pdf).-
Arcadis Consult GmbH, Darmstadt 23.10.2000
- /35/ 4a Bericht: Baugrundbeurteilung und Tunnelbau Straßentunnel, Bau-km 74,990-75,090,
Auszug S. 1-14 (pdf), Anlage 1-2 (pdf u. dwg), Anlage 3-4 (pdf).-
Arcadis Consult GmbH, Darmstadt 01.03.2000

IV. Verzeichnis von Abkürzungen

...	Bodenluft...
DLR	Dienstleistungszentrum ländlicher Raum
DU	Detailuntersuchung
GOK/POK	Geländeoberkante/Pegeloberkante
Gw...	Grundwasser...
GWM	Grundwasser-Messstelle
(K)PV	(Kurz-)Pumpversuch
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
LBM	Landesbetrieb Mobilität
LGB	Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland Pfalz
N, E, S, W	Himmelsrichtungen
ne´	nordöstlich
OU	Orientierende Untersuchung
RKS	Rammkernsondierungen
RLP	Rheinland-Pfalz
sw´	südwestlich
UG	Untersuchungsgebiet
WSG	Wasserschutzgebiet
WW	Wasserwerk

1. Auftrag

Das Land Rheinland-Pfalz plant bereits seit mehreren Jahrzehnten den Neubau der Bundesstraße 50 (B 50n), mit deren Bau vor mehreren Jahren begonnen worden ist. Aktuell baut der Landesbetrieb Mobilität (LBM, NL Trier) den Hochmoselübergang zwischen Ürzig und Zeltingen.

Im Rahmen dieser Teilmaßnahme wurden Bedenken hinsichtlich der Standsicherheit von Brückenpfeilern auf der „Eifel-Seite“ des Bauwerks vorgetragen /27/, die mit mutmaßlichen Defiziten der Erkundung des Prallhangs der Mosel begründet werden, der potenziell rutschgefährdet ist (vgl. Abb. 2-1). Ein Element der Kritik war dabei die Bearbeitungstiefe, mit der der Wasserhaushalts dieses Hangs untersucht und bewertet worden ist.

Vor diesem Hintergrund erteilte LBM der Büro HG GmbH im Januar 2014 den Auftrag zur vertiefenden Untersuchung des West-Hangs der Brückentrasse mit dem Ziel einer Präzisierung der bisherigen Bewertung der hydrogeologisch-wasserhaushaltlichen Situation. Ziel des Auftrags ist die Ausarbeitung eines numerischen Modells der Wasserbewegung in der ungesättigten und der gesättigten Zone der Trasse B 50n im Bereich des Westhangs der Moselschleife Ürzig, das zusätzliche Eingangsdaten für weitere geotechnische Berechnungen zur Beurteilung der Standsicherheit des W-Hangs liefern soll, insbesondere Aussagen zum Wasserhaushalt in den mächtigen Deckschichten oberhalb des GwSpiegels.

Gemäß dem Anforderungsprofil in /21/ sollen in dem Gutachten folgende Themen bearbeitet werden:

- (1) *„Von besonderer Bedeutung ist es, eine extreme Niederschlagssituation ortsgebunden zu definieren und als Grundlage des Gutachtens festzuhalten. Hierzu erwarten wir einen Vorschlag des Gutachters.“*
- (2) *In welcher Höhe und auf welche Weise das ermittelte Schichtenwasser bei den Standsicherheitsberechnungen berücksichtigt werden muss, ist im hydrogeologischen Gutachten zu bewerten.*
- (3) *Für die tatsächlichen Grundwasserstände und Schwankungsbreiten sind fehlende Daten insbesondere im Bereich des Oberhangs zu ergänzen; sie sind über die gesamte Hanglänge gutachterlich zu bewerten.*
- (4) *Die im Mittelhang auf Grund bekannter Grundwasserstände vermuteten inhomogenen Verhältnisse bzw. separate Kluftwassersysteme sind vom Gutachter zu bewerten. Fehlende Daten (nach Angaben von Arcadis vom 09.12.2013 sind die Durchlässigkeiten nicht vollständig bekannt) sind zu ermitteln.*
- (5) *In Abhängigkeit von den Ergebnissen der hydrogeologischen Untersuchungen und Standsicherheitsberechnungen sind durch den Gutachter Vorschläge für Vorsorge- und Gegenmaßnahmen, wie Drainageeinrichtungen, darzulegen.“*

Das erste Gutachten im Rahmen dieses Auftrags wird hiermit vorgelegt. Es umfasst die Dokumentation der Datenbasis sowie der darauf aufbauenden Hydrogeologischen Modellvorstellung und deren Umsetzung in ein numerisches Grundwassermodell sowie die daraus resultierenden Eingangsgrößen für die zusätzlichen geotechnischen Berechnungen zur Beurteilung der Standsicherheit des W-Hangs der Mosel.

2. Ergebnisse der Grundlagenermittlung

2.1 Begriffsklärung

In dem folgenden Diagramm ist die Bedeutung einiger im vorliegenden Zusammenhang relevanter Begriffe dargestellt. Der unterirdische Wasserhaushalt wird durch die geohydraulischen Eigenschaften der unterschiedlichen Gesteine bestimmt, die durch folgende Kennwerte beschrieben werden:

- Durchlässigkeitsbeiwert k_f in (m/s), gesteinspezifisch;
- Gebirgsdurchlässigkeit / Transmissivität T in (m²/s) als Produkt aus k_f -Wert und der Mächtigkeit H der entsprechenden Schicht;
- Porosität P (Hohlräume zwischen Feststoffen), die von Kornverteilung und Lagerungsdichte des Gesteins bestimmt wird und die maßgeblich das Speicherverhalten bestimmt. In Lockergesteinen (PorenGwLeiter) kann dabei zwischen Makro- und Mikroporen unterschieden werden, in Festgesteinen (KluftGwLeiter) zwischen Kluft- und Matrixporosität.

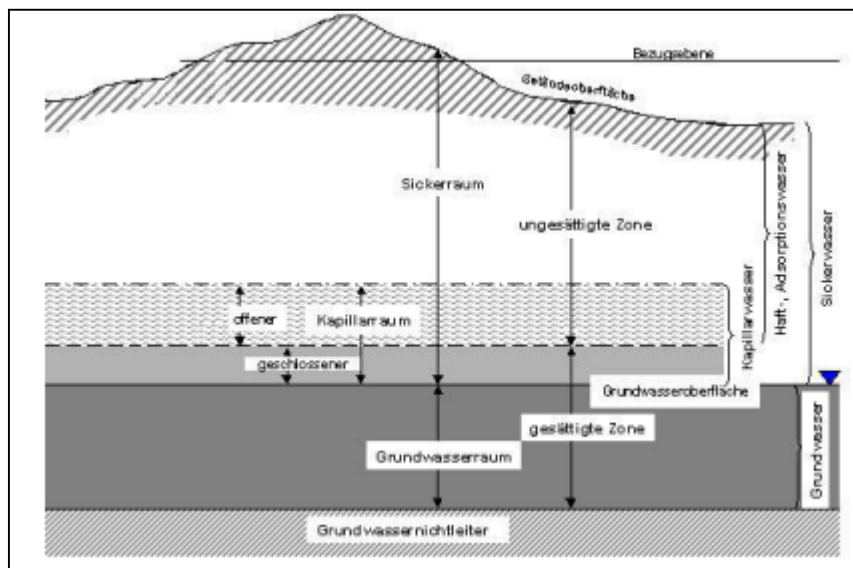


Abbildung 2-1: Begriffe des unterirdischen Wassers nach E DIN 4047-3:2000-09

Der k_f -Wert wird üblicherweise für die gesättigte Zone angegeben. Für die teil- und die ungesättigte Zone sind geringere Durchlässigkeiten anzusetzen, da der Porenraum des Gesteins dort zum Teil mit Luft erfüllt ist, so dass er dem Wasser nur teilweise zur Verfügung steht /11/. Die Veränderung der Durchlässigkeit ist eine nichtlineare Funktion der Wassersättigung des Gesteins; für praktische Anwendungen wird der für wassergesättigte Gesteine angenommene k_f -Wert halbiert, etwa bei der Bemessung von Anlagen zur Niederschlagsversickerung /12/.

2.2 Datenbasis

Allgemein verfügbare Informationen wurden den folgenden Internet-Plattformen entnommen:

- LGB Mainz, www.lgb-rlp.de (z. B. Abb. 2-1);
- Homepage Projekt, <http://www.hochmoseluebergang.rlp.de/index.php?id=79>;
- MUFV LP, www.geoportal-wasser.rlp.de;
- Klimawandel in Süddeutschland, www.kliwa.de (z. B. /2/).

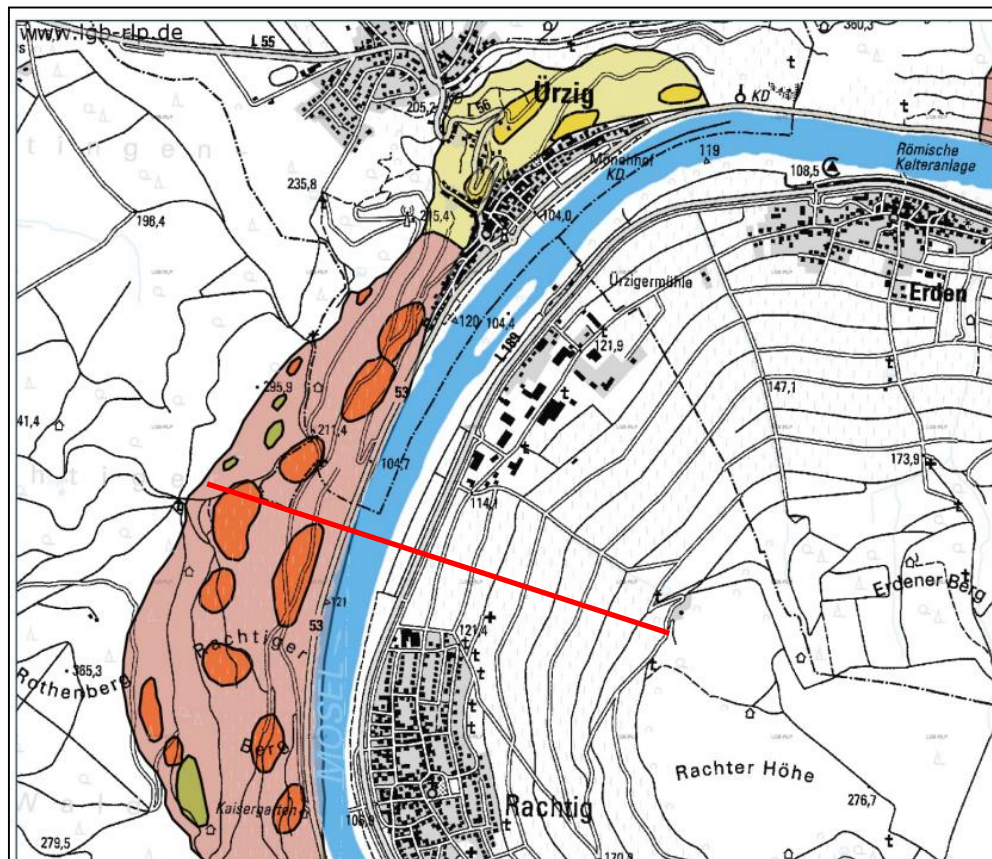


Abbildung 2-2: Fossiles Rutschgebiet (rosa) mit Einzelschollen (braun) (aus www.lgb-rlp.de, Stand Jan. 2014) und ungefährer Lage der Brücke (rot)

Darüber hinaus wurden verschiedene geologische Karten für das Untersuchungsgebiet ausgewertet /1/, /15/, /16/. Außerdem wurden Erkenntnisse eigener Gutachten berücksichtigt, die im Rahmen der GwErschließung für die Stadtwerke Wittlich ausgearbeitet worden sind.

An projektspezifischen Informationen wurden durch das Büro Arcadis verschiedene Unterlagen mit sachdienlichem Inhalt ausgewählt und in digitaler Form zur Verfügung gestellt (/26/-/35/).

2.3 Geologische Rahmenbedingungen

Die generelle geologische Situation in dem relevanten Bereich zeigt die Abbildung 2-2. Sie ist gekennzeichnet durch die diskordante Überlagerung des devonischen Grundgebirges (Hunsrück-Schiefer) durch die jüngeren Gesteine des Rotliegenden, die meist grobkörnig ausgebildet sind, wobei der Anteil an Konglomeraten und Brekzien genetisch bedingt zum Beckenrand hin zunimmt. Insbesondere an der Basis der Serie kommen auch pyroklastische Gesteine vor (sog. Ignimbrite). Die stratigrafische Abfolge im Untersuchungsgebiet zeigt Abbildung 2-4.

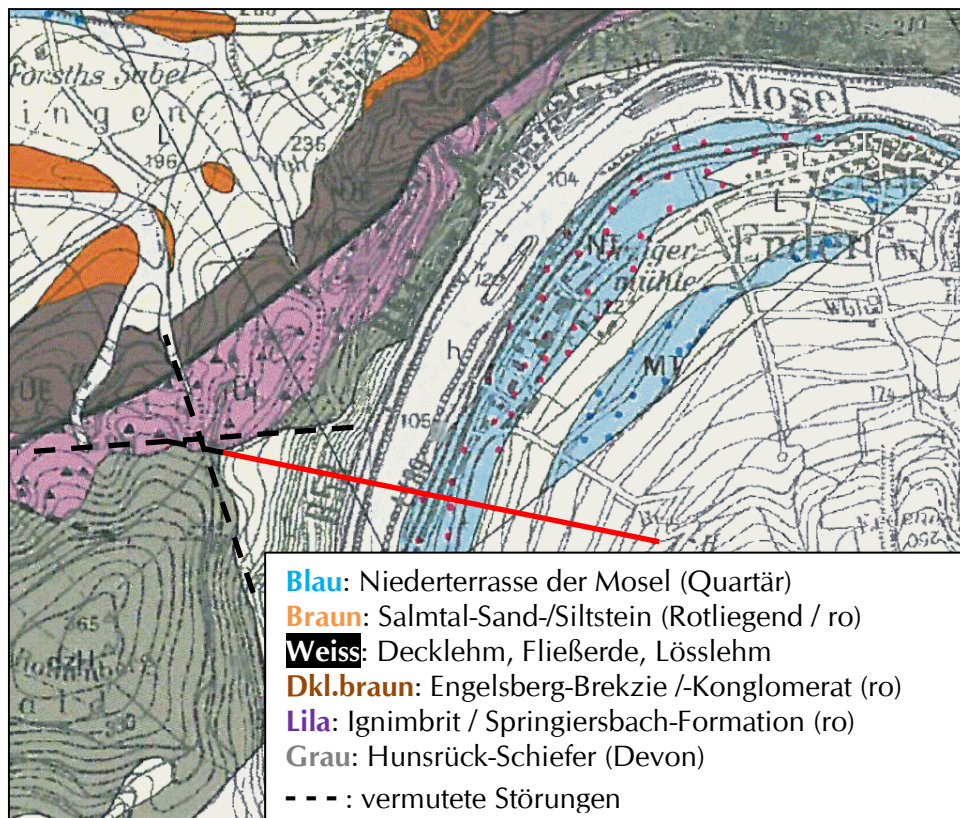


Abbildung 2-3: Ausschnitt der GK 50 /15/

Die geologische Grenze zwischen den Gesteinen des Devon und des Rotliegenden ist im Bereich des Tunnelportals aufgeschlossen. Sie fällt nach NW zum Zentrum des Beckens ein, wo die Rotliegend-Serie eine Mächtigkeit von über 500 m erreicht.

Durch den Prallhang der Mosel ist diese Grenze angeschnitten, die wegen des Einfallens der Schichten in Richtung Ürzig in morphologisch tiefere Lagen absinkt, sich also der Mosel annähert (s. Abbildung 2-3).

Im Rahmen der aktuellen Aufgabenstellung sind die Gesteine des Rotliegenden nicht von Bedeutung, da der fragliche Hang von devonischen Schiefern aufgebaut wird, die von quartären Hangschuttmassen überlagert werden.

Es muss davon ausgegangen werden, dass das Gebirge während der tertiären Hebung des Rheinischen Schiefergebirges durch tektonische Bewegungen aufgelockert ist, die es der

Mosel erlauben, sich entlang einer SSW-NNE verlaufenden Störung einzutiefen. Zu diesem tektonischen System gehören auch NW-SE streichende Querstörungen, die sich durch morphologische Hinweise (Moseltal im N und S, Seitentäler) und den Verlauf von Schichtgrenzen bemerkbar machen; hier ist auf den sprunghaften Versatz der Grenze Schiefer – Ignimbrit und die Hochlage des Hanglehms im Bereich des e´ Tunnelportals zu verweisen, die auf eine Gliederung des relevanten Hangabschnitts in mehrere Schollen schließen lassen (s. Abbildung 2-3).

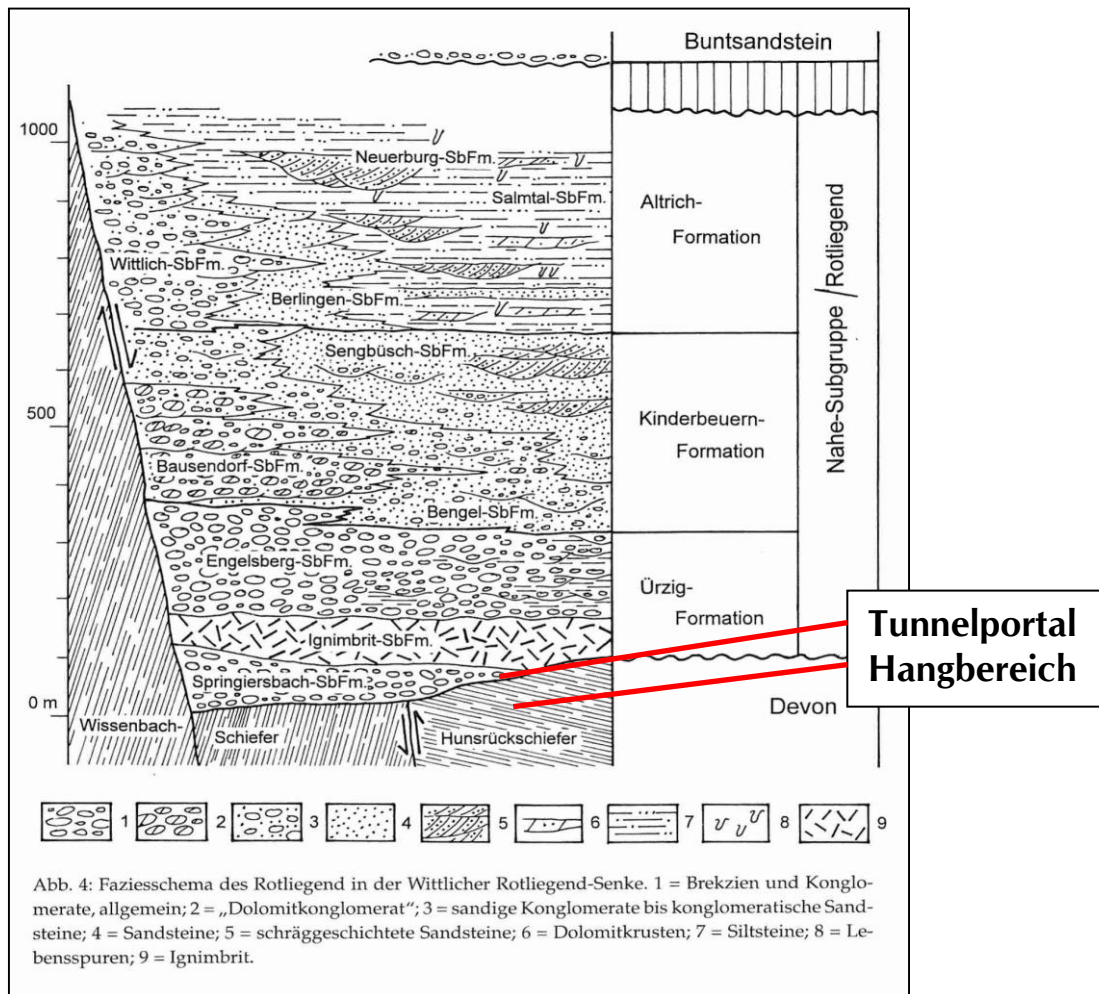


Abbildung 2-4: Faziesschema des Rotliegenden in der Wittlicher Senke (aus /15/)

Zur Bestimmung der Raumlage maßgeblicher Trennfugen der Schiefer im relevanten Bereich der Trassenachse wurden an den 1999 durchgeführten Bohrungen abschnittsweise orientierte Kerne entnommen, an denen Schicht- und Schieferungsfugen sowie Klüfte eingemessen werden konnten.

Aus allen Messwerten wurde ein Trennflächendiagramm entwickelt, das die Mittelwerte der Raumlage darstellt (vgl. Abbildung 2-7 aus /34/). Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die an den Bohrkernen eingemessenen Schichtfugen der devonischen Schiefer im Mittel (!) flach nach SW einfallen. An Klüftflächen wurden die drei dominierenden Systeme K1 (56°NE/40°), K2 (100°SSW/80°) und K3 (80°ENE/80°) ermittelt.

Die zusammenfassende Darstellung aller an orientierten Bohrkernen durchgeführten Messungen der Raumlage des Trennflächengefüges in Abbildung 2-7 weist ein Schichteinfallen von 210° nach SW aus, was mit dem Aufbau des Rheinischen Schiefergebirges nicht vereinbar ist und nicht den Erwartungen entspricht. Da die Faltenachsen im Rheinischen Schiefergebirge SW-NE verlaufen, dominiert je nach Position in der Falte ein Einfallen nach NW oder SE (vgl. auch die Eintragungen zum Streichen und Fallen in der GK 25 Blatt 6007 Wittlich /16/). Das ist hier offenbar nur noch bei einem kleineren Teil der Schollen der Fall (vorzugsweise bei denen in größerer Tiefe), die übrigen müssen gedreht, also aus dem Gebirgsverband gelöst sein.

Die tektonisch bedingte Auflockerung des Gebirges in Verbindung mit der Versteilung des Reliefs während der Eintiefung der Mosel im Quartär hatte also zur Folge, dass das Gebirge in dem Steilhang bis unter das Niveau der Mosel gestört ist. Wie den von Arcadis dokumentierten Untersuchungen zu entnehmen ist, reicht die „Felsauflockerungszone“ zumindest einige 10er Meter tief. Der im Verband („autochthon“) anstehende „unverwitterte Tonschiefer (3.2)“ wurde selbst in den bis 70 m u.GOK reichenden Bohrungen nicht sicher angetroffen. Bei dem in den Bohrungen angesprochenen „entfestigten Tonschiefer (3.1b)“ handelt es sich mutmaßlich um umgelagerte („allochthone“) Schollen, die in einer lehmigen Matrix aus „Tonschieferzersatz / Mylonit (3.1a)“ schwimmen.

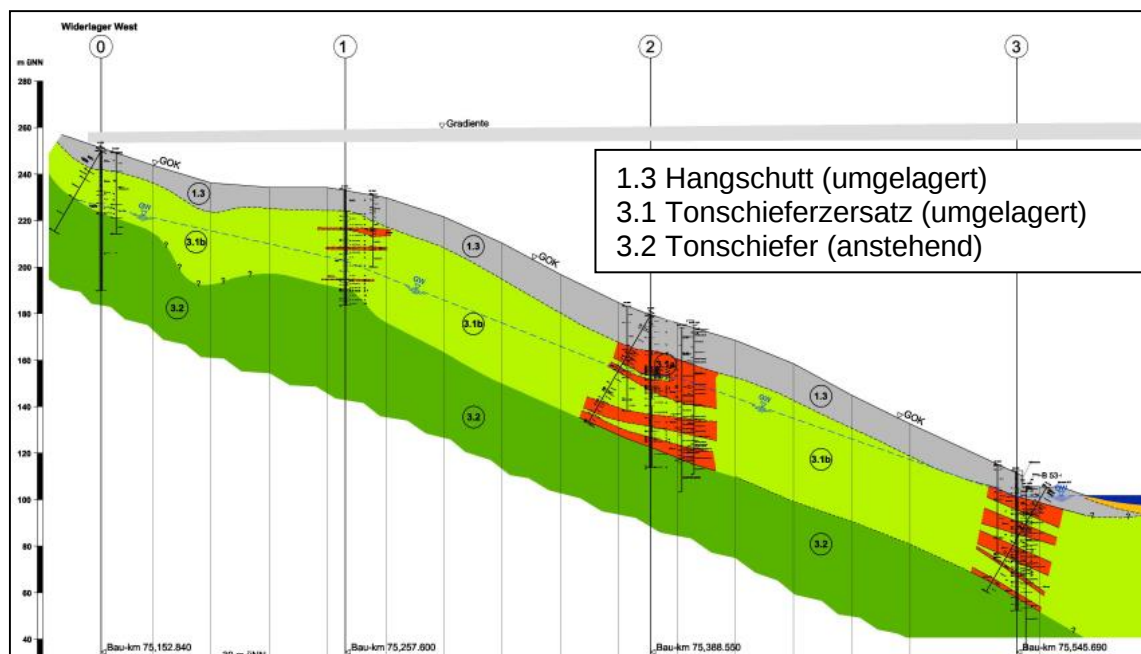


Abbildung 2-5: Geotechnischer Prinzipschnitt durch den Hangbereich aus /32/

Der Aufbau des Hangs ist in dem Schnitt Abbildung 2-5 schematisch dargestellt. Die folgende Abbildung 2-6 zeigt einen Ausschnitt der Fotodokumentation von Kernkisten der BK 8/99, die auf Achse 2 abgeteuft worden ist.

Darin ist die beschriebene Situation gut erkennbar: Während im Tiefenbereich 40,0 – 42,7 m u.GOK ein zwar tw. stark beanspruchter Tonschiefer auftritt (mit Kernverlust bei 40,7 m), wurde darunter eine relativ strukturlose lehmige Matrix mit Gesteinsbruchstücken erbohrt, was auf eine intensive mechanische Beanspruchung dieses Horizonts („My-

lonitisierung“) zwischen zwei kompetenteren Schollen / Bänken schließen lässt. Es sind in den Kernbohrungen jedoch keine Scherzonen mit plastischen Tonen beschrieben, die als potenzielle Gleitfugen auf eine verstärkte Neigung zu Bewegungen hinweisen.



Abbildung 2-6: Fotodokumentation von Kernkisten der BK 8/99 aus /33/

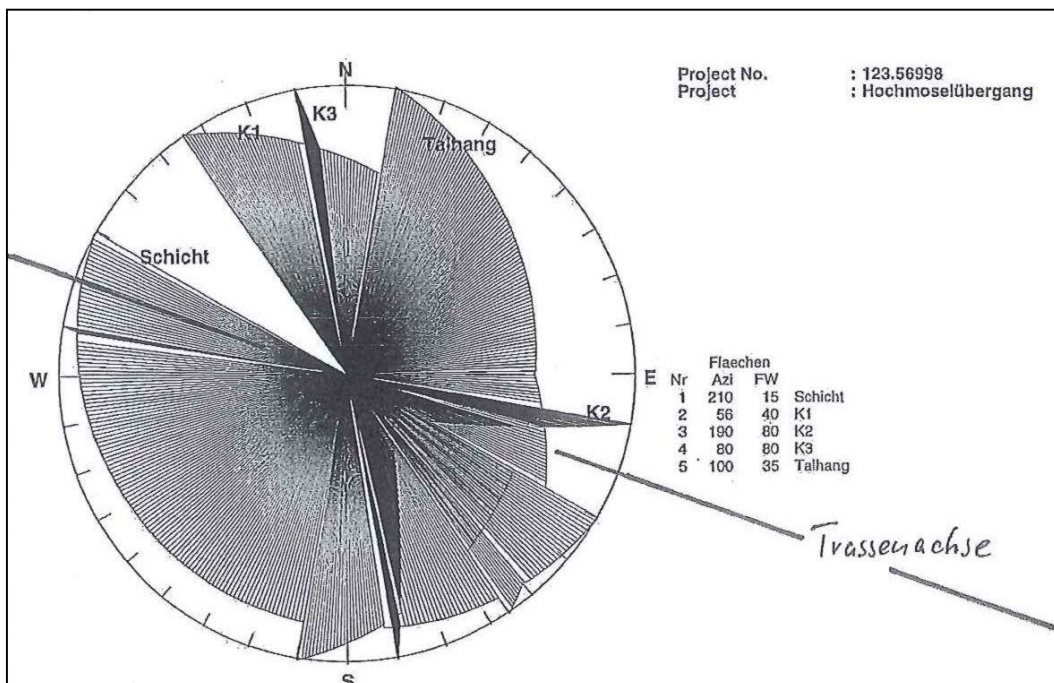


Abbildung 2-7: Mittlere Raumlage des Trennflächengefüges nach Messungen an Bohrkernen in 1999 (aus /34/)

2.4 Hydrogeologische Rahmenbedingungen

Das Rotliegende (ro) im Raum Wittlich stellt eine zusammenhängende Abfolge grobklastischer Sedimentgesteine dar, die wasserhaushaltlich als ein zusammenhängender **Rotliegend-GwLeiter** angenommen werden. Innerhalb der ro-Abfolge ist jedoch eine Variation der Durchlässigkeit zu beobachten, die durch lithologische Unterschiede und lokal unterschiedliche tektonische Beanspruchung bedingt ist, wodurch Unterschiede in der Gebirgsauflockerung / Klüftigkeit hervorgerufen werden. Insbesondere an der Basis des Gesteinspakets, die am östlichen Tunnelportal aufgeschlossen ist, treten überwiegend grobklastische Gesteine auf, denen eine für Festgesteine relativ hohe Durchlässigkeit zugewiesen werden kann, die den kf-Wert der liegenden Schiefer um 1 – 2 Größenordnungen überschreitet. Dabei spielen sowohl die Klüfte, als auch die Matrix eine Rolle.

Der GwLeiter des Rotliegenden wird unterlagert und lateral begrenzt durch die geringer durchlässigen Gesteine des Devons, bei denen es sich im relevanten Hangbereich fast nur um verwitterte **Tonschiefer** handelt. Diese Gesteine sind – insbesondere abseits der dominierenden Talstrukturen – überwiegend als **GwGeringleiter** anzusehen.

Allerdings muss davon ausgegangen werden, dass durch die Bewegungen im Hang (Hangzerreissung, Störungen vgl. Abbildung 2-3) und die damit verbundene Verwitterung / Auflockerung des Gebirges durchlässigere Horizonte / Zonen ausgebildet sind. Es ist also horizontal und vertikal mit starker Inhomogenität und einer ausgeprägten Anisotropie zu rechnen, so dass die Permeabilität kleinräumig rasch um mehrere Größenordnungen wechseln kann. In diesen Zonen ist ebenfalls von einer Sicker- / GwBewegung in Klüften und Matrix auszugehen, wohingegen frische bis wenig aufgelockerte Tonschiefer als reine KluftGwLeiter anzusprechen sind.

Aufgrund dieser starken Unterschiede in der Wasserwegsamkeit des Gebirges ist davon auszugehen, dass oberhalb der dauerhaft gesättigten Zone, zeitlich und räumlich begrenzt, schwebende GwStockwerke mit geringer Wasserführung auftreten. Dies zeigen auch die Schichtenverzeichnisse / Bohrprofile zahlreicher Bohrungen, in denen Wasserzutritte deutlich oberhalb des GwSpiegels zu verzeichnen waren.

Mittels Pumpversuchen an Brunnen im ro der Wittlicher Senke wurden **Durchlässigkeitsbeiwerte** im Bereich von $k_f = 2 - 5 \times 10^{-5}$ m/s nachgewiesen, während für die Schiefer eher Werte in der Größenordnung von $k_f < 5 \times 10^{-7}$ m/s anzusetzen sind. Dabei bestehen zwischen relativ frischen und lehmig verwitterten Tonschiefern erhebliche Unterschiede.

Bestimmungen der Gebirgsdurchlässigkeit (Transmissivität T) im Hangbereich erfolgten im Vorfeld der eigenen Untersuchungen mit einem **Pumpversuch an der GWM 1/07**, der im Juli 2011 durchgeführt worden ist, also vor Einrichtung der GWM 1 + 2/11, die demzufolge noch nicht als Beobachtungspunkte zur Verfügung standen. Durchführung und Auswertung des PV („Funktionsprüfung“) sind in /30/ dokumentiert, die Originaldaten wurden auch digital übermittelt, so dass eine eigene Auswertung möglich war.

Die relevanten Informationen dazu lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die GWM 1/07 (Bohrung Ø 178 / 146 mm, Ausbau DN 50) erschließt mit einer Tiefe von ca. 65 m eine Wassersäule von ca. 40 m, d. h. der Flurabstand lag bei ca. 25 m.
- Die zwischen 10/2007 und 12/2013 dort gemessenen GwSpiegel schwankten um ca. 0,6 m zwischen 149,8 und 150,4 m üNN.
- Bei dem PV wurde mit einer Förderleistung von ca. 0,25 l/s senkte sich der Betriebswasserspiegel um ca. 3,1 m ab und innerhalb von nur 2,75 Stunden wurde ein quasi-stationärer Zustand erreicht (gefördertes Volumen ca. 2,5 m³).
- Die aus der Wiederanstiegskurve ermittelten geohydraulischen Kennwerte werden von Arcadis mit $T = 3,9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ und $k_f = 1,0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ angegeben, was dem Ergebnis einer eigenen Auswertung entspricht (vgl. Abbildung 2-8). Dabei wird in /30/ zu Recht darauf hingewiesen, dass diese Werte nur für die unmittelbare Umgebung der GWM repräsentativ sind und dass sie Mittelwerte für die von der GWM erfasste ca. 40 m mächtige gesättigte Zone darstellen. Horizontal und vertikal muss mit Schwankungen um diesen Mittelwert bis um den Faktor > 10 gerechnet werden.
- Der vg. mittlere Durchlässigkeitsbeiwert liegt um den Faktor > 10 über dem Bereich, der für Tonschiefer als repräsentativ angenommen werden kann (s. o.). Dies bestätigt die Annahme einer deutlichen Auflockerung des Gebirges im Hangbereich.
- Von Bedeutung ist die Tatsache, dass der Ruhewasserspiegel nach der Zeit $t/t' = 1$ (Pumpdauer = Wiederanstiegszeit) noch nicht wieder erreicht ist; in der grafischen Auswertung nach Theis & Jacob ist zu diesem Zeitpunkt eine Restabsenkung von ca. 1,6 m erkennbar. Das durch den PV Drainierte Volumen des Gebirges wird also verzögert wieder aufgefüllt (Speicherentleerung), was auf die Existenz einer Staugrenze hinweist, also einer Zone mit deutlich geringerer Durchlässigkeit¹.
Hinweise auf die Wirkung doppelter (Kluft- + Matrix-) Porosität gibt die Auswertung in diesem Fall nicht. Die Reaktion des GwSpiegels bestätigt aber die Annahme eines guten hydraulischen Anschlusses der GWM an das Gebirge (geringer Brunnenverlust).
- Für die ca. 25 m mächtige ungesättigte Zone sind die vg. geohydraulischen Kennwerte nicht repräsentativ. In den hangenden Schichten ist aber ebenfalls mit starker Inhomogenität und einer ausgeprägten Anisotropie zu rechnen.

¹ Die GWM wird dadurch nicht radialsymmetrisch angeströmt und der Ausgangswasserspiegel später erreicht als nach $t/t' = 1$. Die Existenz einer Staugrenze ist aufgrund der Lage im Hangbereich bei allen GWM unter der Brücke wahrscheinlich, da die Durchlässigkeit der gesättigten Zone talwärts (abnehmende Überdeckung) in der Regel deutlich größer sein wird als hangwärts, wo der nutzbare Kluft-/Porenraum durch den zunehmenden Gebirgsdruck zwangsläufig abnehmen muss. Die anhand der Hydrochemie zu erwartenden GwAnreicherung durch die Versickerung von Oberflächenwasser wird sich wahrscheinlich nur nach Niederschlagsereignissen bemerkbar machen.

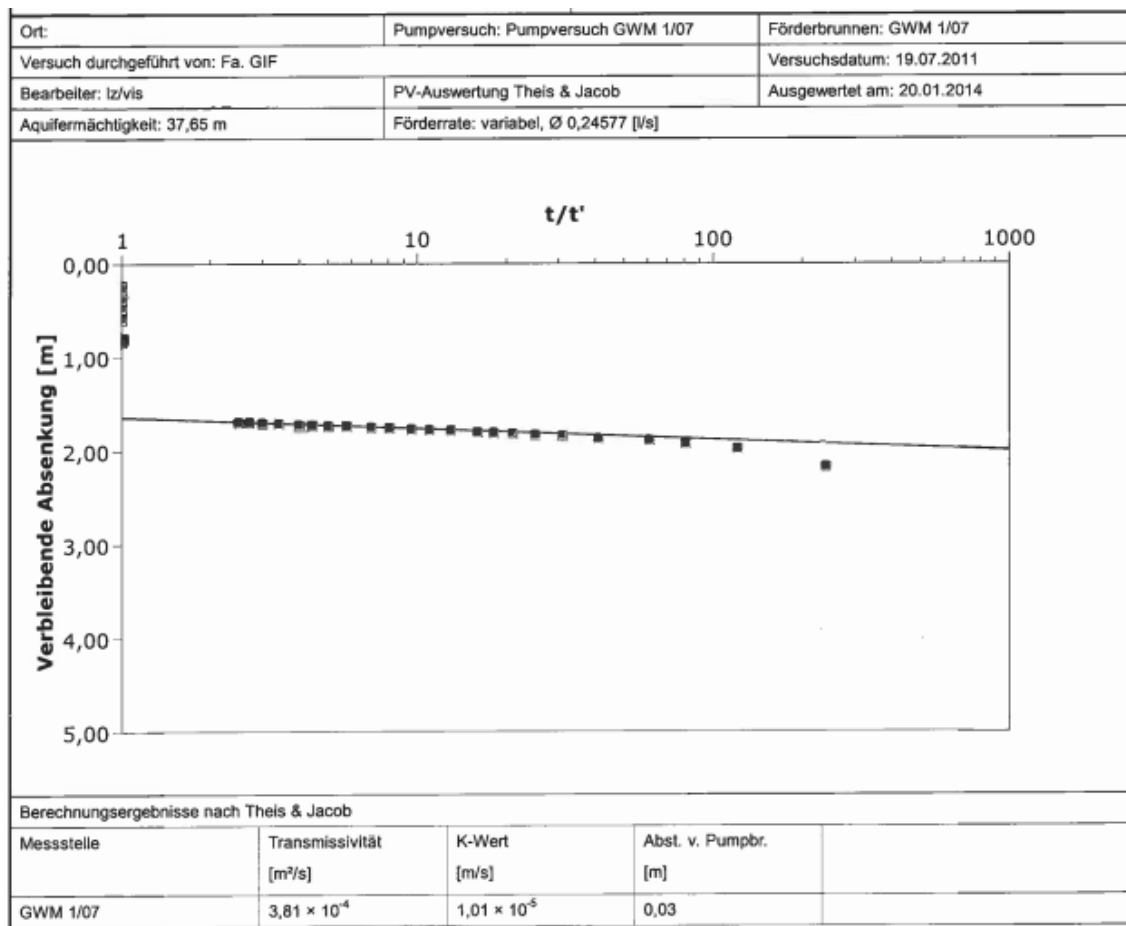


Abbildung 2-8: Auswertung der Wiederanstiegskurve für den PV an GWM 1/07

GwGleichenpläne liegen für das UG nicht vor. Aufgrund der beschriebenen geologischen Situation kann aber davon ausgegangen werden, dass die GwStrömung im Rotliegenden dem Einfallen der Schichten nach NW folgt. Für den hier diskutierten Hangbereich bedeutet das, dass das auf dem Höhenzug n´ des Tunnelportals gebildete Sicker- / Grundwasser nicht zur Mosel als maßgeblichem Vorfluter abfließt, sondern nach NW.

Abgesehen von dieser geogenen Randbedingung weicht das unterirdische vom oberirdischen Einzugsgebiet des Hangs seit einigen Jahren auch durch den Bau des Tunnels ab, der als Einschnitt in den Höhenzug gebaut worden ist. Das natürliche Relief soll zwar im Endzustand durch Aufschüttungen wieder hergestellt werden, die unterirdische Entwässerung wird aber auch dann weiter nach W verlaufen, da die Tunnelröhre mit Drainagen versehen ist, die in den zum Bieberbach verlaufenden Graben entwässern (vgl. Anlage 1).

Auf diesen Sachverhalt weisen auch folgende Beobachtungen hin:

- Im Arcadis-Bericht /30/ wird der Fund zweier GwMessstellen vor dem östlichen Tunnelportal anlässlich eines Ortstermins im Juli 2011 beschrieben. Die beiden GWM stammen aus einer früheren Phase der Untersuchungen und waren den seit 1999 dort tätigen Mitarbeitern des Büro Arcadis nicht bekannt. Informationen dazu waren nicht mehr verfügbar.

- Die zwischenzeitlich durch den Baustellenbetrieb zerstörten GWM wurden mit Tiefen von ca. 15 und 35 m gelotet, wiesen 2011 aber keine Wasserführung auf. Es ist davon auszugehen, dass diese GWM in den 1980er Jahren eingerichtet und wahrscheinlich nicht oberhalb des GwSpiegels ausgebaut worden sind, sondern schwebende GwStockwerke im Niveau bis ca. 220 mNHN erschlossen haben, die aber offenbar nur zeitweilig Grundwasser führten.

In Übereinstimmung damit ist von Bedeutung, dass 1999 in den Bohrprofilen der BK 4+5/99 (Achse 0) noch Schichtwasserzutritte oberhalb von 222 mNHN beschrieben sind /35/, die von den vg. GWM erfasst worden wären.

Im Hangbereich unterhalb des Tunnelportals muss die GwStrömung auf die Mosel, also von W nach E ausgerichtet sein. Das zeigen die vorliegenden Messreihen des GwSpiegels an den existierenden GWM 1/07 und 1+2/11, die im Bereich der Achse 2 ein Spiegelniveau um 150 m NHN dokumentieren /26/, das zur etwa 200 m entfernten Mosel auf ca. 100 m NHN abfällt. Das entspricht einem sehr steilen mittleren Gefälle von etwa 0,25 / 25 %, was nur durch einen sehr gering durchlässigen Untergrund zu erklären ist.

Aufgrund der Inhomogenität des Untergrunds kann sich die GwStrömung bei kleinräumiger Betrachtung anders darstellen. Da Sicker- und Grundwasser dem Weg des geringsten (Fließ-) Widerstands folgen, sind sowohl in der ungesättigten, als auch in der gesättigten Zone lokal auch hangparallele, also etwa N-S verlaufende Strömungskomponenten vorstellbar. Die Konstruktion eines GwGleichenplans entlang der Trasse würde insofern immer eine starke Idealisierung des Sachverhalts erfordern, da die sehr kleinräumige Struktur der Durchlässigkeitsverteilung mit vertretbarem Aufwand nicht erkundet werden kann.

Als **GwNeubildungsrate** für das Gebiet Wittlich ist im *Geoportal Wasser* des Ministeriums für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz für das Rotliegend-Gebiet ein Werte von rd. 100 mm/a angegeben, entsprechend ca. 3,2 l/s*km². Für das Verbreitungsgebiet des Devons sind Neubildungsspenden von ca. 80 mm/a anzusetzen, entsprechend ca. 2,5 l/s*km². Dieser Wert ist tendenziell eher noch zu hoch, da die klimatische Wasserbilanz für den gesamten Bereich negativ ist, d. h. die ermittelte Verdunstung übersteigt die Niederschlagshöhe.

Unabhängig von diesem langjährig maßgeblichen Mittelwert sind bei der Strömung in der ungesättigten Zone kurzfristige, instationäre Prozesse als Reaktion auf Niederschlagsereignisse zu berücksichtigen, wobei aufgrund der Lebensdauer des Bauwerks Extremwertbetrachtungen erforderlich sind, die als Auswirkungen des Klimawandels /2/ auch in geotechnischen Risikoanalysen zu beachten sind /6/.

2.5 Hydrologische Rahmenbedingungen / Analyse von Niederschlagsdaten

Durch das LBM wurden Messreihen der Wetterdaten von den DWD Wetter-Station Bernkastel-Kues für einen Zeitraum von 40 Jahren zur Verfügung gestellt, außerdem wurden Daten der Station Zeltingen aus dem Internet erhoben /1/. Diese Daten wurden ausgewertet und bei der im vorliegenden Zusammenhang relevanten Extremwertbetrachtung die Prognosen zu den Auswirkungen des Klimawandels in Mitteldeutschland berücksichtigt (/2/, /6/).

Ermittelt wurden dabei zunächst die für den Oberflächenabfluss (vgl. Abbildung 2-9) maßgeblichen maximalen Tagesniederschläge, die für die GwNeubildung in der Regel von untergeordneter Bedeutung sind. Im vorliegenden Fall ist aber nicht auszuschließen, dass auch kurzzeitige Extremniederschläge zu einer GwAnreicherung führen, da Niederschlagswasser über die nicht ausgebauten Abschnitte der Wegseitengraben im oberen Hangbereich in den Untergrund infiltrieren kann (vgl. Abbildung 2-10).

Da für die GwNeubildung üblicherweise länger andauernde Niederschläge auch von geringerer Intensität entscheidend sind, wurden aus den Tagesmesswerten außerdem die Monatswerte ermittelt und daraus wiederum die gleitenden Mittelwerte für einen Zeitraum von 3 Monaten (Summe 3 Monate / 3). Die entsprechenden Daten sind in der folgenden Tabelle 2-1 zusammengefasst und in der Anlage 6.3 grafisch aufbereitet.

An den Ganglinien ist erkennbar, dass die Niederschläge in der näher zum Projektstandort gelegenen Station Zeltingen im Vergleichszeitraum deutlich geringere Niederschläge aufweist als die etwa 7 km weiter entfernte Station Bernkastel-Kues. Letztere wird trotzdem aufgrund der längeren Messreihe und der mit Blick auf die Fragestellung größeren Sicherheit als Bemessungsgrundlage herangezogen.

Tabelle 2-1: Statistik der Niederschlags-Daten für die Messstationen Bernkastel-Kues und Zeltingen

Station Zeitraum	Zeltingen 03.08.2005 - 28.02.2014 (8,6 a)			Bernkastel-Kues 01.01.1973 - 03.12.2012 (39,9 a)		
	Tages- werte	Monats- werte	3-Monats- werte	Tages- werte	Monats- werte	3-Monats- werte
	(mm/d) ¹	(mm/Monat)	(mm/Monat)	(mm/d)	(mm/Monat)	(mm/3 M.)
Anzahl	3.131	106	104	14.581	480	478
Max.	53,0	138,8	101,3	53,7	218,6	450,0
Ar. Mittel	1,7	51,7	52,1	1,9	56,5	56,6
Min.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	14,6
Werte >50	2			4	238	
>200		0	0		1	
>450		8	0			1
Häufigkeit (n/a)	0,2	0,9	0,0	0,1	0,025	0,025

¹ Die Niederschlagsangaben beziehen sich jeweils auf eine Fläche von 1 m².

Die Datenreihen beantworten die im Anforderungsprofil /21/ benannte Frage, wonach „eine extreme Niederschlagssituation ortsgebunden zu definieren und als Grundlage des Gutachtens festzuhalten ist.“ Beide Messreihen zeigen übereinstimmend, dass ein Regeneignis mit einer Niederschlagsmenge von ca. 55 mm/d und einer jährlichen Häufigkeit von 0,1 – 0,2 als bisheriger lokaler Extremwert definiert werden kann.

Für die monatlichen und die Quartals-Maxima ergeben sich ca. 220 mm (entsprechend i. M. 7 mm/d) und ca. 450 mm (entsprechend i. M. 5,0 mm/d) mit einer jährlichen Häufigkeit von 0,025 (1 Ereignis in 40 Jahren; vgl. Anlage 6.3, Sommer 1980).

Ob und wie sich diese Extremwerte der letzten Jahrzehnte während der Lebensdauer der Brücke verändern, wird auch in dem KLIWA-Projekt B 3.3.1 /2/ nicht spezifiziert. Nach heutigem Kenntnisstand werden „verhältnismäßig geringe Änderungen des mittleren Jahresniederschlags in einer Größenordnung von max. 50 mm/a prognostiziert“, wobei „steigende Niederschläge im Winter und sinkende im Sommer“ erwartet werden, mit einer „Zunahme der Winterniederschläge in Rheinland-Pfalz (plus 35 mm, entspricht 9 %). ... Im monatlichen Vergleich kann dieses Klimaänderungssignal nochmals viel deutlicher ausfallen, mit starken Zunahmen, die in den NW-Teilen des Untersuchungsgebiets z. T. mehr als 20 % betragen können“ (a.a.O., S. 7).

Vor diesem Hintergrund wird mit Blick auf den Oberflächenabfluss eine Multiplikation des o. g. bisherigen Extremwerts mit dem Faktor 1,2 für ausreichend erachtet (Sicherheitszuschlag für Hochwässer an Bächen und Flussläufen), was einem Niederschlagsereignis von 66 mm/d entspricht. Für die Monatswerte können demzufolge 260 mm und 540 mm für das Quartalsmittel angesetzt werden.

In den mit Schreiben des LGB vom 30.01.2014 /24/ übermittelten Informationen ist auf der Grundlage eines Geländemodells unter Annahme eines (nicht beschriebenen) Regeneignisses eine Abflusssimulation vorgenommen worden, die für den Bereich des Brückenbauwerks Spitzenabflüsse berechnet (blaue Farben in Abbildung 2-9).

Dabei ist zu beachten, dass diese Darstellung nicht die Funktion des vorhandenen Entwässerungssystems berücksichtigt, sondern eine quasi natürliche Abflusssituation repräsentiert. Messwerte zur Verifizierung dieser Rechenergebnisse lagen nicht vor; d. h., es existieren keine Daten zur Abflussentwicklung in den entsprechenden Gerinnen. Es kann nur vermutet werden, dass die im Rahmen der Flurbereinigungen in den 1970er und 2000er Jahren tw. befestigten Wegseitengräben und der Bau der sog. Kaskade zur Ableitung des Oberflächenwassers (die einer Weiterentwicklung der bereits seit Jahrhunderten bestehenden Infrastruktur entspricht) eine Reaktion auf entsprechende Beobachtungen der ortsansässigen Winzer darstellte. Die mutmaßlich auf Tageswerten basierende Simulation gibt somit nicht die heutigen Verhältnisse wieder.

Anhand der vorliegenden Daten (Digitales Höhenmodell, langjährige Niederschlagsreihen) können für die jeweiligen Teilflächen Abflüsse und Sickerwasserraten berechnet werden.

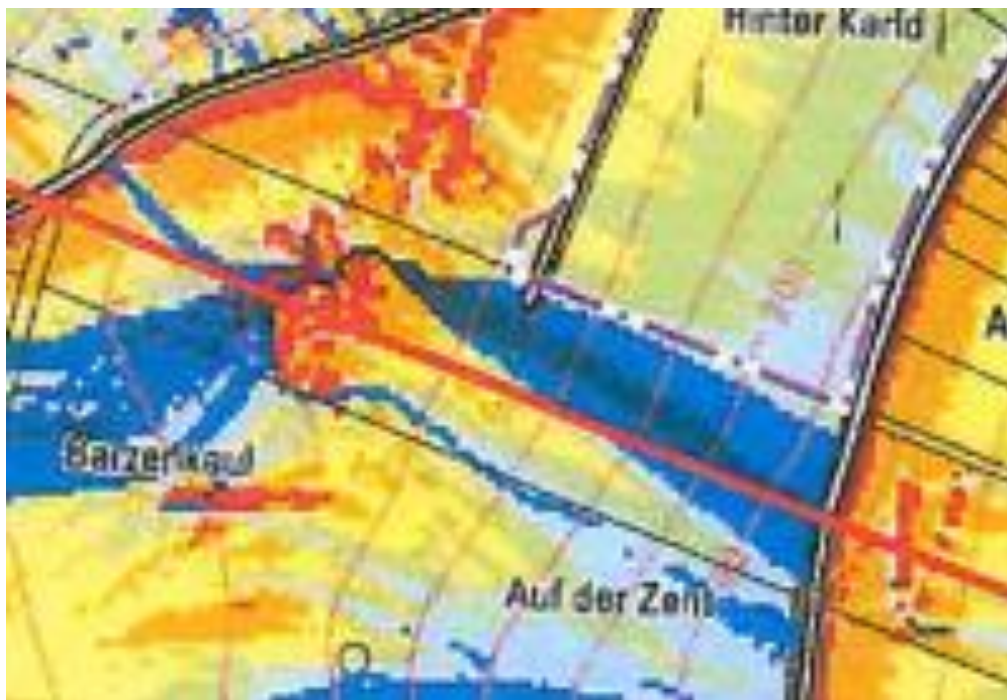


Abbildung 2-9: Rechnerische Analyse der Abflussakkumulation aus den LIDAR-Daten aus /24/ (Trasse B 50n in rot)

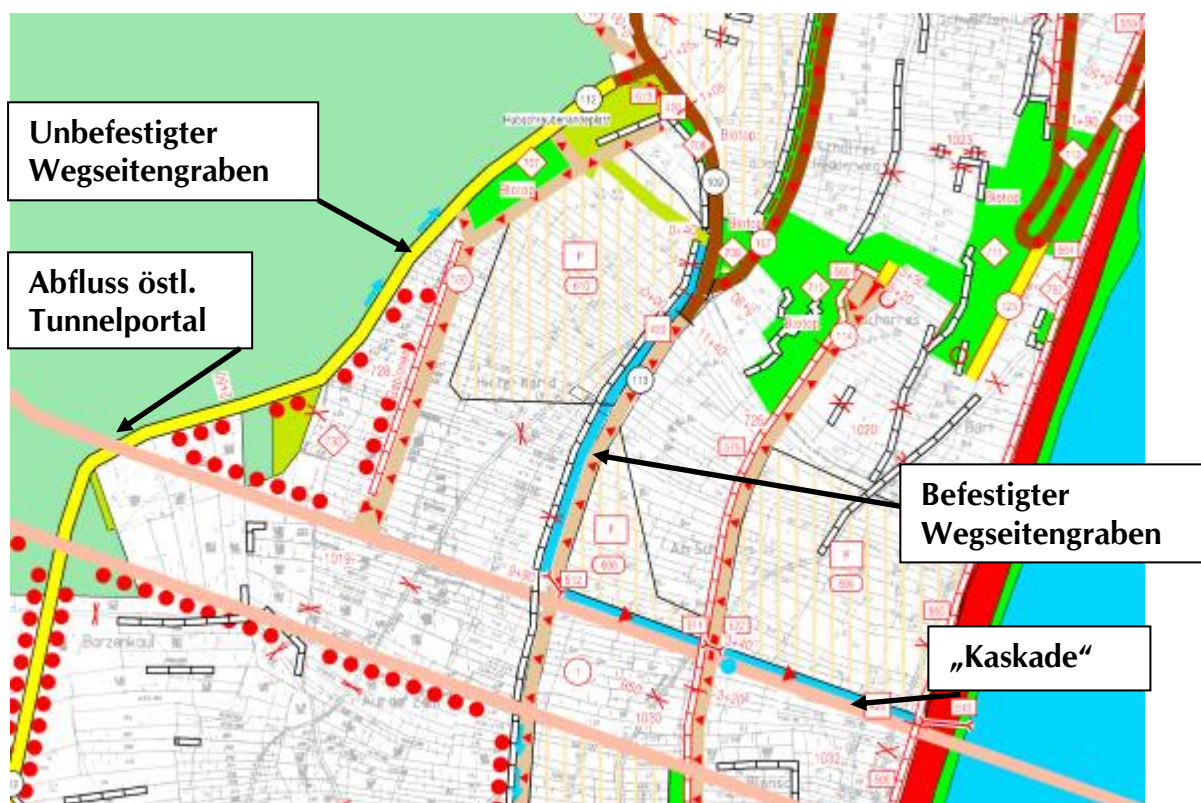


Abbildung 2-10: Ausschnitt des Wege- und Gewässerplans /25/

Trotz der mutmaßlich etwa gleichen Summen des Jahresniederschlags und des Anstiegs der Spitzenabflüsse ist durch die Verschiebung der Niederschläge vom Sommer- in das Winterhalbjahr auch mit tendenziell steigender GwNeubildung zu rechnen:

„Da die Entstehung von Sickerwasser und die damit einhergehende GwNeubildung vorwiegend im verdunstungsarmen Winterhalbjahr stattfinden, hat die Änderung des Niederschlagsregimes weitreichende Auswirkungen auf alle folgenden Bilanzgrößen. ... Die Bereiche, in denen bisher großräumig die geringsten Neubildungsraten zu verzeichnen waren (Mangelgebiete) könnten u. U. durch eine leichte Verbesserung der Situation gekennzeichnet sein“ (a.a.O., S. 57). Zu diesen Gebieten zählt das Rheinische Schiefergebirge und damit das UG, in dem sich die bislang mit ca. 2,5 l/s*km² angenommene GwNeubildung (s. o.) um ca. 5 % steigern könnte.



Abbildung 2-11: Fotos des Entwässerungssystems (oben: unbefestigter, unten: befestigter Wegseitengraben mit Durchlass zur "Kaskade")

2.6 Bodenaufbau

Der W-Hang der Mosel wird von devonischen Schiefern aufgebaut, die von quartären Hangschuttmassen überlagert werden. Es handelt sich dabei um geringmächtige Fließerden mit wechselnden Anteilen von i. Wes. Lösslehm und Schieferzersatz, bereichsweise vermischt mit umgelagerten Erdmassen (Auffüllung), die im Rahmen von Wegebaumaßnahmen und der Terrassierung von Weinbergen aus der näheren Umgebung antransportiert worden sind.

Im Rahmen der Grundlagenermittlung wurden die vorliegenden Bodenkartierungen des LGB erhoben (Weinbergsbodenkarte /9/; maßgeblicher Ausschnitt s. Abbildung 2-15), die für die Flurbereinigung durchgeführt worden sind. Ergänzend erfolgten im Bereich der Trasse eigene Kartierungen (s. u.) zur Verifizierung der Angaben. Grundsätzlich zeigt eine Begehung des Hangs, dass in weiten Bereichen keine nennenswerte Bodenbedeckung vorhanden ist (Abbildung 2-12f); d. h. A- und B-Horizont sind in weiten Bereichen nicht ausgebildet, sondern es steht vorzugsweise direkt der durch Mulchen und Grubbern aufgelockerte C- Horizont an.

Bei der Nutzung der Flächen waren bereits bei der ersten Begehung am 23.01.14 folgende Möglichkeiten zu unterscheiden:

- Ruderalvegetation auf aufgelaassenen / gerodeten Weinbergen
- Weinberge mit Krautschicht
- Weinberge ohne bodendeckende Vegetation
- Wegeparzellen.



Abbildung 2-12: Bodenstruktur bei GWM 2/11: Tonschiefer / Fels unter ca. 0,1 m Schieferzersatz / Hangschutt auf Brachfläche

Die Aufnahme der Nutzung ist in **Anlage 1.3** zusammen mit den Aufschlusspunkten dargestellt.



Abbildung 2-13: Bodennutzung auf Weinbergen mit und ohne Krautschicht (links / rechts)



Abbildung 2-14: Einsatz von Mulcher / Grubber auf Weinberg

Böden aus Verwitterungsprodukten altpaläozoischer Gesteine

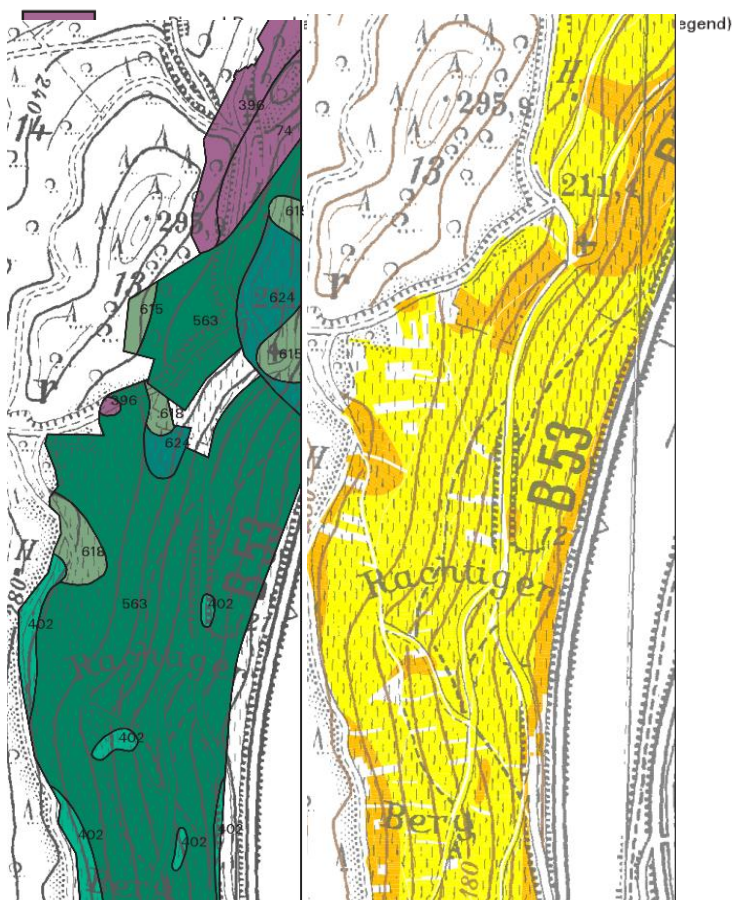
Böden aus Schiefen des Devon

618	Rigosol-Regosol aus Lehmschutt (Schiefer/Devon) über anstehendem Schiefer (Devon)
615	Rigosol-Regosol aus Lehmschutt (Schiefer/Devon) über anstehendem Schiefer mit Grauwackeeinschlungen (Devon)
402	Rigosol-Regosol aus Schuttlehm (Schiefer/Devon) über anstehendem Schiefer (Devon)
624	Rigosol-Regosol aus Lehmschutt (Schiefer/Devon)
563	Rigosol-Regosol aus Schuttlehm (Schiefer/Devon)

Böden aus Verwitterungsprodukten jungpaläozoischer Gesteine

Böden aus sauren Magmatiten des Perm (Rhyolith)

396	Rigosol-Regosol aus Schuttsand, z.T. Schuttlehm (Rhyolith/Rotliegend) über anstehendem Rhyolith (Rotliegend)
-----	--



Nutzbare Feldkapazität 1m

	>0 - 50 mm
	>50 - 90 mm
	>90 - 120 mm

Abbildung 2-15: Ausschnitte der Weinbergsbodenkarte Nr. 31 /9/ mit Legenden

Die in einer bezüglich Relief und Nutzung vergleichbaren Hanglage zu erwartende GwNeubildung (Sickerwasseranfall) ist in der folgenden Abbildung exemplarisch dargestellt. Die auf den Messungen an einem Lysimeter basierende Grafik zeigt deutlich den Jahresgang mit einem Minimum während der Sommermonate, in denen durch die Verdunstung und den Bedarf der Pflanzen fast kein Grundwasser mehr gebildet wird.

Für die Ganglinie des GwSpiegels kann ein analoger Verlauf angenommen werden, allerdings mit einer zeitlichen Verschiebung, da das aus dem Boden abfließende Sickerwasser je nach Mächtigkeit der (hier einige 10er Meter betragenden) ungesättigten Zone und deren Durchlässigkeit mehrere Wochen bis einige Monate benötigt, um den Kapillarsaum zu erreichen und so eine Aufhöhung des GwSpiegels zu bewirken.

Für die Ausarbeitung des vorliegenden Berichts stand eine Messreihe von maximal 3 Monaten während der Neubildungsperiode zur Verfügung (Februar - April).

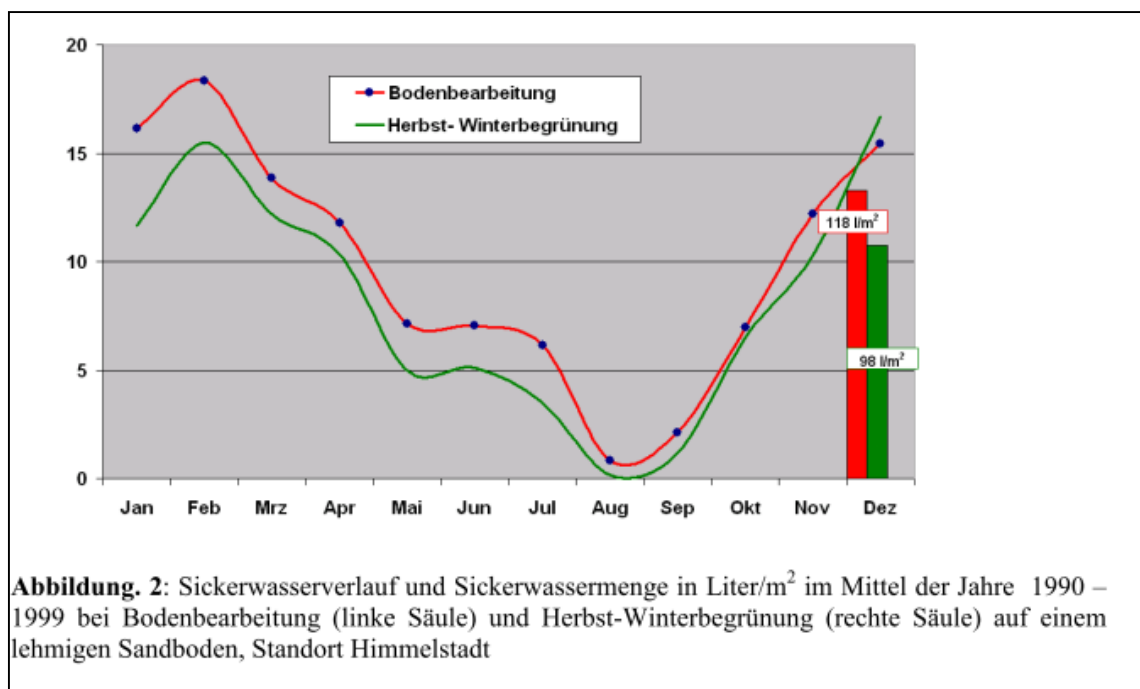


Abbildung 2-16: Ganglinie des Sickerwasseranfalls (GwNeubildung) im jahreszeitlichen Verlauf unter einem Weinberg bei Würzburg (aus /13/)

3. Ergebnisse der eigenen Datenerhebung

3.1 Einrichtung zusätzlicher GwMessstellen

Im Hangbereich standen Ende 2013 drei GWM im Bereich der Achse 2 zur Verfügung (GWM 1/07 unter-, GWM 1 + 2/11 oberhalb). Bohrprofile und Ausbauzeichnungen dieser GWM sind in Anlage 3 beigelegt. Da diese Bohrungen nicht mittels Im-Loch-Hammer ausgeführt worden sind, war eine exaktere Differenzierung zwischen Fels und Felsersatz möglich, als bei den Bohrungen in 2014.

Um entlang der Trasse zusätzliche Informationen zu erheben, wurde im Februar 2014 an der Achse 1 die GWM 1/14 eingerichtet, im Anschluss die GWM 2/14 auf der Achse 0. Diese Messstellen wurden, im Gegensatz zu den älteren GWM, mit mehreren Abdichtungsstrecken versehen, um tiefenzonierte Auffüllversuche durchführen zu können, mit denen auch Aussagen zur Durchlässigkeit des Gebirges oberhalb des GwSpiegels gewonnen werden konnten.

Die Dokumentation der ausführenden Fa. Stölben zu den Bohrungen ist als **Anlage 3** beigelegt, die Ergebnisse der eigenen Auswertung von Pumpversuchen in **Anlage 4**. Alle hydraulischen Tests sind im Bericht des Büros HydroTest Karch in der **Anlage 12** dokumentiert. Die Beobachtungen während der Bohrungen und die gemäß /3/ ausgeführten Tests werden im Folgenden beschrieben und bewertet.

3.1.1 Beobachtungen bei Bohrung und Ausbau der GWM 1/14

Folgende Beobachtungen bei der Bohrung sind hervorzuheben:

- (1) Vom Bohrmeister wurden mehrfach „**Störzonen**“ in „verwittertem Fels“ angesprochen¹. Insbesondere in diesen Bereichen war starker Nachfall zu verzeichnen, was auch auf die Beanspruchung des ohnehin aufgelockerten Gebirges durch das Bohrverfahren zurück zu führen ist. Das nicht standfeste Gebirge erforderte ein mehrmaliges Absetzen mit dem Einbau von Hilfsverrohrungen. Auf dem letzten Abschnitt von 40 – 80 m u.GOK wurde eine Verrohrung 273 mm eingebaut, allerdings erst, nachdem das Bohrloch bis über 60 m u.GOK verstürzt war.

Der Nachfall wurde vor dem Ausbau zur GWM beräumt, das Bohrloch ist dadurch aber in weiten Bereichen nicht maßhaltig. Dementsprechende Auskolkungen weist die Massenmehrung bei der Verfüllung des Ringraums nach (Anlage 3.1 Blatt 1).

Diese Beobachtungen lassen auf ein ähnlich wechselhaftes Gebirge schließen wie in den früheren Kernbohrungen.

¹ 12,0 - 13,5 / 16,5 – 17,8 / 20,3 – 21,0 und 24,0 – 28,0 m u.GOK. Darunter waren solche Zonen sicher noch vorhanden, sind in den Tagesberichten aber nicht mehr vermerkt. Bei den "Störzonen" kann es sich sowohl um eher horizontale, als auch um geneigte / vertikale Flächen handeln, was aufgrund des Bohrverfahrens nicht zu ermitteln war.

- (2) Im Bereich von ca. 20 – 40 m u.GOK (ca. 215 – 195 m NN) war ein „starker **Wasserandrang**“ zu verzeichnen, was die Standfestigkeit des Bohrlochs zusätzlich minderte und bereits beim Bohren wiederholten Nachfall bedingte. Am 11.02.14 wurde ein Wasserspiegel von 17,7 m u.GOK gemessen (ca. 217 m NN), was auch hier ein lokales schwebendes GwStockwerk nachweist, dessen Spiegellage allerdings durch die Zufuhr von Wasser aus der Bohrung aufgehöhht war¹.
Nach Einbau der (2.) Hilfsverrohrung bis 40 m u.GOK trat nur noch ein „sehr geringer Wasserandrang“ auf, von 62 – 73 m u.GOK musste *„nach jedem 2. Meter gespült werden, da zu wenig Wasserzulauf aus dem Gebirge“* auftrat. Nach Erreichen der Endteufe von 80 m u.GOK stellte sich der GwSpiegel in der Hilfsverrohrung bei ca. 65 m u.GOK ein, entsprechend ca. 170 m NN.
- (3) Nach dem (teilweisen, s. u.) Ziehen der Hilfsverrohrung konnte das schwebende GwStockwerk über das Ausbaurohr der GWM zum Hauptstockwerk Drainieren. Das hatte zur Folge, dass sich der GwSpiegel nach Fertigstellung der GWM am 26.02.14 bis auf ca. 30 m u.GOK aufhöhte, da der aus dem schwebenden GwStockwerk zutretende Volumenstrom offenbar so stark war, dass das Wasser nicht hinreichend schnell im geringer durchlässigen Hauptstockwerk abfließen konnte².
Am 04.03., also 6 Tage später, war der GwSpiegel morgens bereits wieder auf ca. 43 m u.ROK abgesunken, im Lauf des Tages sank er kontinuierlich weiter auf 49,2 m u.ROK vor Beginn des ersten Pumpversuchs um 19 Uhr.
Diese Beobachtungen werden dahingehen interpretiert, dass das Reservoir des schwebenden GwStockwerks sich innerhalb weniger Tage weitgehend leerte, so dass der Zufluss abnahm. Das lässt darauf schließen, dass es sich um ein relativ geringes Speichervolumen aus einem räumlich eng begrenzten Bereich handelt.
Eine vollständige Entwässerung dieses GwVorkommens war nicht möglich, weil beim Ausbau der Bohrung ein Teil der Hilfsverrohrung abriss und im Bohrloch verblieb. Im Tiefenbereich 26,0 – 40,0 m ist die Bohrung / GWM dadurch gegen das Gebirge abgedichtet und ein Leerlaufen des schwebenden GwStockwerks ist deswegen nur bis zum Niveau 26,0 m möglich. Über diese nicht geplante Barriere fließt nun ein, möglicherweise kontinuierlicher, GwStrom in das Hauptstockwerk, der durch das Büro Karch für die Zeit der hydraulischen Tests (25.-27.03.14) anhand des Verlaufs der Auf-füllkurven noch auf eine Größenordnung von ca. 0,2 l/s geschätzt worden ist. Der Zufluss nahm also in 3 Wochen bereits um etwa 80 % ab.

¹ Nach Angabe der Fa. Stölben lag der Wasserverbrauch während der Bohr-, Ausbau- und Klarspülarbeiten an beiden Bohrungen bei 62m³, wobei ein Teil davon oberirdisch versickert ist, weil an einem Abend *„Unbefugte die Hähne an Bassin und Wasserwagen aufgedreht haben, sodass eine nicht mehr nachvollziehbare Menge Wasser entschwunden ist“*. Bezogen auf die Dauer der Bohrarbeiten von ca. 30 Tagen (10.02.-10.03.) wurden während dieser Zeit also i. M. ca. 2 m³/d in den Untergrund eingeleitet.

² Eine überschlägige Berechnung lässt auf eine Größenordnung von anfangs bis >1 l/s schließen. Ein Volumenstrom von 1 l/s entspricht einem Volumen von ca. 86 m³/d, die Aufhöhung des GwSpiegels für 12 Tage also einer Einspeisung in der Größenordnung von 1.000 m³.

3.1.2 Beobachtungen bei Bohrung und Ausbau der GWM 2/14

Aufgrund der Erfahrungen bei 1/14 wurde den Tagesberichten der Fa. Stölben zufolge die zweite Bohrung zunächst bis 46 m mit Hilfsverrohrung ausgeführt. Dabei ist am 04.03. der Zutritt von Schichtwasser in 36 m beschrieben; auch dort ist also ein schwebendes GwStockwerk ausgebildet.

Durch das Absperren dieses Horizonts stellte sich an den folgenden Tagen bis zum Erreichen der Endteufe von 102 m ein Ruhespiegel um 62 m ein. Es war jedoch kein relevanter Wasserzutritt zu verzeichnen, so dass mit Zufuhr von Wasser gebohrt werden musste.

Nach dem Vertiefen bis auf 82 m am 06.03. kam es wiederum zum Verstürzen des Bohrlochs und Defekten des Im-Loch-Hammers, die auch am folgenden Freitag nicht behoben werden konnten. Am Montag, dem 10.03. erreichte die Bohrung dann die Endteufe von 102 m, was auf ein zur Tiefe hin standfesteres Gebirge schließen lässt. Der Wasserspiegel stellte sich bei ca. 60 m ein.

Nach dem Ausblasen des Bohrlochs wurde ein GwSpiegel bei ca. 100 m u.GOK / 146 m üNN gemessen, der erst in den folgenden Tagen wieder sukzessive um ca. 50 m auf etwa 198,5 m üNN anstieg. Dies weist auf einen sehr geringen Wasserzutritt unterhalb von 46 m u.GOK hin.

3.2 Pumpversuche an GwMessstellen

Die Gebirgsdurchlässigkeit (Transmissivität T) und der Durchlässigkeitsbeiwert k_r der gesättigten Zone im Hangbereich wurden im Vorfeld der eigenen Untersuchungen mit einem Pumpversuch an der GWM 1/07 bestimmt (s. o.).

Aufgrund der erwarteten starken Inhomogenität des Untergrunds konnte dieser punktuelle Wert aber nicht als repräsentativ für den gesamten Hang angenommen werden. Deswegen wurden auch an den GWM 1 + 2/11 und 1 + 2/14 Pumpversuche durchgeführt, um die Bandbreite der geohydraulischen Kennwerte in der gesättigten Zone entlang der Trasse zu erkunden. Außerdem wurde der Versuch an GWM 1/07 wiederholt, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nachzuweisen.

Die Ergebnisse dieser Versuche sind in **Anlage 4** dokumentiert und in der folgenden Tabelle 3-1 zusammengefasst. Die Befunde lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- (1) Es handelt sich trotz der in den Bohrprofilen dokumentierten Inhomogenität des Gebirges im Hangbereich um ein geohydraulisch relativ homogenes Kontinuum. Die mittels der Pumpversuche ermittelten k_r -Werte der gesättigten Zone schwanken etwa um den Faktor 10 im Bereich von ca. $0,1 - 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}$, was gemäß DIN 18130 einem als „durchlässig“ einzustufenden Gebirge entspricht. Lediglich in den GWM 2/11 und 2/14 sind deutlich geringere Werte nachweisbar.
- (2) Es zeichnet sich eine Abnahme der Durchlässigkeit zur Tiefe und eine Zunahme vom Hang in Richtung Tal ab, was unter Berücksichtigung der abnehmenden Auflast und der Wirkung der Hangzerreißungskräfte plausibel ist.

Das flache GwGefälle zwischen den GWM 1/07 und 2/11 erfordert allerdings eine

höhere Durchlässigkeit des Gebirges, während zum Hangfuß in Moselnähe hin wieder einer geringer durchlässige hydraulische Barriere erforderlich ist, um die Versteilung des Gefälles zu erklären.

- (3) Bei einer feiner aufgelösten Analyse (Maßstab cm bis m) oder einer Betrachtung im Maßstab 100er-Meter sind auch größere Differenzen der Durchlässigkeit nicht auszuschließen, deren möglicher Einfluss im Rahmen der numerischen Berechnungen mittels Sensitivitätsbetrachtungen geprüft werden muss.

Tabelle 3-1: Ergebnisse von Pumpversuchen

GWM	1/07 (07/2011 + 02/2014)	1/11 (02/2014)	2/11 (03/2014)	1/14 (03/2014)	2/14 (03/2014)
Ausbau (mm)	50	125	125	125	125
GOK (m üNN)	174,9	186,3	201,3	234,0	245,8
Tiefe (m u.GOK) (m üNN)	64,8 110,1	51,0 135,3	51,0 150,2	82,0 152,0	101,0 144,8
GwSpiegellage PV (m u.ROK) (m üNN)	Ca. 27 Ca. 149	Ca. 37 Ca. 148,5	Ca. 48 Ca. 154,5	Ca. 57 Ca. 178,0	Ca. 47 Ca. 195,0
Flurabstand (m u.GOK)	Ca. 26	Ca. 36	Ca. 47	Ca. 56	Ca. 51
Wassersäule (m)	40	14	3	26	50
Förderrate (l/s)	0,25	0,32	0,008	0,2	0,1
Absenkung (m)	3,1	1,9	0,7	> 4	> 30
T (m²/s) ¹ Arcadis	3,9 x 10 ⁻⁴				
HydroTec Karch	---	---	4,3 x 10 ⁻⁷	2,7 x 10 ⁻⁵	1,3 x 10 ⁻⁷
Büro HG	3,8 x 10 ⁻⁴	1,4 x 10 ⁻⁴	4,8 x 10 ⁻⁷	2,9 x 10 ⁻⁵	1,3 x 10 ⁻⁷
k_r-Wert (m/s)	1,0 x 10⁻⁵	1,0 x 10⁻⁵	1,6 x 10⁻⁷	1,2 x 10⁻⁶	2,6 x 10⁻⁹
Geohydraul. Randbedingungen	Staugrenze		Anreicherungs- grenze	Staugrenze, Doppelporosi- tät	

Bedingt durch die geringe Durchlässigkeit des Gebirges ergeben sich sehr steile Absenkungstrichter mit geringer Reichweite, so dass in nächstgelegenen GWM jeweils keine Reaktion auf die GwEntnahme erkennbar war.

¹ Die PV 2014 an den GWM 1/07 und 1/11 wurden durch Büro HG ausgeführt, die übrigen durch HydroTest Karch. Die Bestimmung der geohydraulischen Kennwerte erfolgte mittels unterschiedlicher Software (HydroTec / Aqtsolve), so dass sich die Präsentation der Daten in Anlage 4 und Anlage 12 auch bei gleichen Auswerteverfahren unterscheidet.

Die in der Tabelle erfassten T-Werte ergeben sich aus der **Auswertung der Daten des Wiederanstiegs** durch Büro HG (Anlage 4). Diese Daten sind unbeeinflusst von Schwankungen der Pumpenleistung und sie integrieren über den Einflussbereich des PV, so dass sie als Eingangsdaten der numerischen Modellierung herangezogen werden. Die Auswertung der Absenkungsdaten (vgl. exemplarisch GWM 1/14 in Anlage 2 zu Anlage 12) weist demgegenüber eine Bandbreite der Durchlässigkeit nach, was aufgrund der Anisotropie des Gebirges plausibel, für die Modellierung aber nicht praktikabel ist.

Die Ergiebigkeit der GWM und damit die Durchlässigkeit des Gebirges ist so gering, dass das Instrument des Pumpversuchs tw. an seine Grenzen stößt. Bei k_f -Werten $< 1 \cdot 10^{-6}$ m/s, also in gemäß DIN 18130 „sehr / schwach durchlässigem“ Gebirge sind Wasserdruck-Tests (WD-Test) besser geeignet, bei denen das Gebirge mit Drücken bis > 10 bar beaufschlagt werden kann. WD-Tests sind allerdings nur im offenen Bohrloch bei hinreichend standfestem Fels durchführbar, da sonst die Gefahr eines Verlusts der Ausrüstung besteht. Da diese Voraussetzung hier nur eingeschränkt erfüllt war, wurden keine WD-Tests in Betracht gezogen, zumal die Auflösung im Bereich von $k_f < 1 \cdot 10^{-6}$ m/s für die Fragestellung wenig relevant war.

Wie insbesondere der Verlauf von Absenk- und Wiederanstiegskurve in GWM 2/14 anhand der Steigungswechsel erkennen lässt, verteilt sich der minimale Zufluss auf wenige, hier etwa 4 Klüfte (s. Anlage 3 zu **Anlage 12**).

Auf den in den GWM 1+2/14 prinzipiell möglichen Versuch der Bestimmung vertikaler Durchlässigkeiten wurde aufgrund der geringen Ergiebigkeit und der absehbar geringen k_v -Werte $< 1 \cdot 10^{-7}$ m/s verzichtet. In den GWM um die Achse 2, wo aufgrund der Tieflage des GwSpiegels höhere k_v -Werte plausibel erscheinen, besteht diese Möglichkeit aufgrund des Ausbaus nicht.

Auf die abschnittsweise unterschiedliche Durchlässigkeit des Gebirges weist auch das in der Sickerlinie erkennbare unregelmäßige Gefälle des GwSpiegels hin (vgl. Profilschnitt **Anlage 2**). Die im oberen und unteren Teil des Hangs erkennbaren steilen Gradienten sind nur durch die niedrigeren k_f -Werte zu erklären, wie sie in den GWM 2/11 und 2/14 nachgewiesen und östlich von GWM 1/07 anzunehmen sind. Im Gegensatz dazu ist in Bereichen mit geringem Gefälle, hier also zwischen den GWM 1/07 und 1/11, mit deutlich größerer (vertikaler) Durchlässigkeit zu rechnen, mutmaßlich bedingt durch die Wirkung von Hangzerreissung und Talrandstörungen.

3.3 Auffüllversuche an GwMessstellen

Für die ungesättigte Zone im Hangbereich lagen im Vorfeld der eigenen Untersuchungen keine Informationen zu Gebirgsdurchlässigkeit T und Durchlässigkeitsbeiwert k_f vor, abgesehen von der grundsätzlichen Einschätzung, die anhand der Ansprache des Bohrprofils möglich war.

Bei den älteren GWM 1/07 und 1+2/11 waren auch keine Infiltrationsversuche durchführbar, weil die durchgehende Verkiesung des Ringraums ein so hohes Aufnahmevermögen der GWM bedingt, dass für eine relevante Aufhöhung des Wasserspiegels Volumenströme erforderlich gewesen wären, die vor-Ort nicht bereit gestellt werden konnten. Nach ersten Tests wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt, da mit verfügbaren Wassermengen nur eine Aufhöhung von wenigen Metern erreicht werden konnte.

Im Falle den neu errichteten GWM 1+2/14 wurde deswegen der Ausbau durch Vollrohrstrecken mit einer Abdichtung des Ringraums in Abschnitte gegliedert, so dass ein Parker eingebaut und so tiefengestaffelt in mehreren Horizonten getrennt infiltriert werden konnte (Ausbau s. **Anlage 3**). Um geohydraulische Kennwerte auch für die oberflächenna-

hen Schichten zu bestimmen, die im Fokus des vorliegenden Auftrags stehen, wurde an den 2014 installierten GWM Wasser eingespeist und der GwSpiegel bis zu dem maximal möglichen Niveau aufgefüllt (ca. 8 m Wassersäule / 0,8 bar).

Der limitierende Faktor dabei war das verfügbare Wasservolumen, das mit Tankfahrzeugen zu den Vorlagebehältern an den GWM transportiert werden musste. Dadurch war es nicht in jedem Fall möglich, in Umkehrung der Pumpversuche einen quasistationären Zustand zu erreichen, weil die dafür erforderlichen Wassermengen nicht bereit gestellt werden konnten. In der Mehrzahl der Fälle konnten aber belastbare Daten gewonnen werden, was die Funktionsfähigkeit der installierten Abdichtungen nachweist¹.

Die Dokumentation der hydraulischen Tests ist mit dem Bericht des Büros HydroTest Karch als **Anlage 12** beigelegt, die wesentlichen Ergebnisse sind in Tabelle 3-2 zusammengefasst.

Die auf diesem Weg ermittelten kf-Werte sind unterschätzt, weil die effektive Durchlässigkeit in der ungesättigten Zone durch die im Porenraum noch vorhandene Luft herabgesetzt wird, deren vollständige Verdrängung längere Versuchszeiträume erfordert hätte. Dieser Effekt wird bei den numerischen Berechnungen berücksichtigt.

Tabelle 3-2: Ergebnisse von Auffüllversuchen

GWM	1/14	1/14	1/14	
Tiefenlage Filterstrecke (m u.GOK)	Ca. 9 - 18	Ca. 21 - 30	Ca. 40 - 42	
Ergebnisse für Tiefenbereich (m üNN)	225 - 216	213 - 204	192 - 192	
Einspeisung (l/s)	3,5	5,2	0,7	
kf-Wert (m/s) ²	< 3,1 x 10⁻⁵ < 3,2 x 10⁻⁵	2,8 x 10⁻⁴ 2,3 x 10⁻⁴	2,8 x 10⁻⁵ ---	
Umläufigkeit erkennbar	Ja	Nein	Nein	
GWM	2/14	2/14	2/14	2/11
Tiefenlage Filterstrecke (m u.GOK)	10,1 - 19,1	22,1 - 26,9	40,9 - 43,9	14,6 - 51,6
Ergebnisse für Tiefenbereich (m üNN)	224,8 - 215,8	212,8 - 208,0	191,8 - 194,0	150,2 - 193,2
Einspeisung (l/s)	3,5	2,5	0,7	1,0
kf-Wert (m/s)	5,9 x 10⁻⁶	1,6 x 10⁻⁵	1,1 x 10⁻⁵	9,4 x 10⁻⁷
Umläufigkeit erkennbar	Nein	Nein	Nein	Nein

¹ Mit Ausnahme der 1. Filterstrecke in GWM 1/14 zeigten die Spiegelmessungen an der Bohrlochsohle / unterhalb der Packerstrecke, keine Reaktion; d.h. das infiltrierte Wasser sickerte nicht über den Ringraum vertikal ob, obwohl das Gamma-Log des Büros Handel (Anlage 11) nachwies, dass die Ausführung der Abdichtstrecken nicht den Erwartungen entspricht.

² Die Versuche in der 1. Und 2. Filterstrecke wurden wiederholt, um mögliche Einflüsse durch das zwischenzeitliche Entsanden der GWM erkennen zu können. Dies ist nicht der Fall, die Ergebnisse sind reproduzierbar. Beim Versuch in der 1. Filterstrecke zeigt sich aber, dass der Wasserspiegel in der gesättigten Zone unterhalb des Packers während der Infiltration ansteigt, also eine Umläufigkeit über eine unzureichende Ringraumabdichtung oder das Gebirge vorhanden sein muss. Der kf-Wert für dieses Tiefenniveau wird dadurch überschätzt.

Diese Befunde lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- (1) In Übereinstimmung mit den Erwartungen sind die oberflächennahen Schichten des Hangs aufgelockert und zeigen im Mittel höhere Durchlässigkeiten als mit den Pumpversuchen für die gesättigte Zone in > 50 m u.GOK nachweisbar waren.
Im Einzelfall treten zwar auch oberflächennah kf-Werte $< 1 \times 10^{-5}$ m/s auf (GWM 2/14, < 20 m u.GOK), überwiegend liegt die Durchlässigkeit der Auflockerungszone aber deutlich höher. In Schollen klüftigen, nicht zerscherten Schiefers sind auch kf-Werte $> 1 \times 10^{-4}$ m/s nachweisbar (GWM 1/14, ca. 20 – 30 m u.GOK).
- (2) In Übereinstimmung mit der ausgeprägten Anisotropie steht der Nachweis schwelender GwStockwerke, die allerdings nur eine geringe räumliche Ausdehnung haben, ein geringes Speichervolumen aufweisen und ggf. nur zeitlich befristet ausgebildet sind.

3.4 Messungen der el. Leitfähigkeit / Hydrochemie

Die el. Leitfähigkeit als summarischer Ausdruck für den Inhalt des Grundwassers an festen gelösten Stoffen wird im UG vorzugsweise durch das Regenwasser bestimmt, das sich durch geringen Lösungsinhalt und damit niedrige el. Leitfähigkeit auszeichnet¹. Mit dem Sickerwasser werden lösliche Bestandteile aus dem Boden (einschließlich anthropogener Anteile wie Düngemittel u. ä.) sowie dem darunter anstehenden Gestein gelöst, so dass unterschiedliche Leitfähigkeiten auf unterschiedliche GwKomponenten mit unterschiedlichen Fließwegen schließen lassen.

Um zu prüfen, ob sich diesbezügliche Hinweise ergeben, wurden an den GWM im Rahmen der Pumpversuche die el. Leitfähigkeit sowie die übrigen chem.-phys. Feldparameter des Grundwassers gemessen. Ergänzend wurden mittels einer entsprechenden Sonde Vertikalprofile in den GWM aufgenommen, um eine eventuelle Tiefenzonierung erkennen zu können. Die Ergebnisse der Messungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3-3: In den GWM gemessene el. Leitfähigkeiten und Temperaturen

GWM	1/07	1/11	2/11	1/14	2/14
Maxima					
Temp. (°C)	11,2	11,1	11,2	11,3	11,7
El. Lf. (µS/cm)	420	780	783	630	630
Minima					
Temp. (°C)	11,2	11,2	11,1	11,1	10,8
El. Lf. (µS/cm)	410	750	748	610	605

¹ Destilliertes Wasser (vollentsalzt) 1 µS/cm
Regenwasser ländliche Gebiete <50 µS/cm
Trinkwasser Durchschnittswerte 100 – 1.000 µS/cm
Trinkwasser Grenzwert 2.000 µS/cm
Meerwasser >40.000 µS/cm.

Der Lösungsinhalt der Wässer (Abdampfrückstand in mg/l) lässt sich aus diesen Messwerten durch Multiplikation mit dem Faktor 0,725 abschätzen. Bezogen auf die o. g. Werte errechnet sich so eine Summe fester gelöster Stoffe in der Größenordnung von 300 mg/l für GWM 1/07 und 560 mg/l für GWM 1/11.

Aus den Messwerten lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die el. Leitfähigkeit des Grundwassers innerhalb der einzelnen GWM lässt keine Tiefenzonierung erkennen, da die GwBeschaffenheit innerhalb des Bohrlochs durch die Zuflüsse aus den oberflächennahen Horizonten / schwebenden GwStockwerken bestimmt wird. Dieses Grundwasser fließt aufgrund des höheren Druckniveaus in der GWM nach unten, wo es in das Hauptstockwerk infiltriert.
Unterschiede $< 50 \mu\text{S}/\text{cm}$ lassen unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit, jahreszeitlicher Schwankungen etc. keine Interpretation zu.
- Zwischen den einzelnen GWM sind dagegen relevante Unterschiede der el. Leitfähigkeit festzustellen, die auf unterschiedliche Zustromkomponenten hinweisen. Dabei ist plausibel, dass der Lösungsinhalt der hangseitigen GWM 1+2/14 geringer ist als in den talseitigen GWM, weil dort die Verweilzeit im Untergrund größer ist, so dass entlang der Fließstrecke mehr Stoffe aus dem Gestein gelöst werden können.
- Unter der plausiblen Annahme, dass das Grundwasser entlang der Brückentrasse von W nach O zur Mosel abfließt, ist jedoch zwischen den GWM 1/11 und 1/07 der gegenteilige Effekt, nämlich eine deutliche Verdünnung erkennbar ($560 : 300 \text{ mg/l} = \text{ca. Faktor } 2$).
Um diese Diskrepanz zu erklären, muss dem aus dem Hang über GWM 1/11 zur GWM 1/07 abfließenden Grundwasser entlang dieser Fließstrecke größenordnungsmäßig das gleiche Volumen an niedrig mineralisiertem Niederschlagswasser zugeführt werden, was vorzugsweise durch eine Versickerung von Regenwasser entlang der Wegseitengräben zu erklären ist.
- Die GwTemperaturen sind relativ einheitlich, so dass sich daraus keine Hinweise auf Unterschiede in der GwBeschaffenheit ergeben.

Ohne chemische Laboruntersuchungen war nicht zu klären, welche Stoffe den Lösungsinhalt beeinflussen; es war aber mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass die Unterschiede der GwBeschaffenheit anthropogenen Ursprungs sind, da keine Hinweise auf geogene Einflüsse vorliegen. Hydrochemische Analysen wurden im Rahmen der früheren Untersuchungen im W-Hang nur an einer GwProbe vom 15.06.99 aus der Bohrung 7/99 auf Achse 2 zwecks Bestimmung der Betonaggressivität durchgeführt /33/.

Es wurden daher im Rahmen der Pumpversuche an mehreren GWM GwProben entnommen und daran chemische Übersichtsanalysen durchgeführt. Die entsprechenden Prüfberichte des Labors sind als **Anlage 10** beigelegt und die wesentlichen Ergebnisse in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Es zeigt sich, dass die Unterschiede in der GwBeschaffenheit der GwProbe aus GWM 1/07 nicht auf einen einzigen Stoff zurückzuführen ist. Vielmehr sind, wie im Falle einer Verdünnung zu erwarten, die Konzentrationen aller untersuchten Stoffe, mit Ausnahme von Nitrat, geringer als in den hangseitig entnommenen Proben. Der Nitrat-Befund kann darauf zurückgeführt werden, dass das in Düngemitteln enthaltene NO_3 mit dem Niederschlagswasser von den n´ gelegenen Weinbergen in Wegseitengräben abgeschwemmt wird und darüber in den Untergrund gelangt.

Tabelle 3-4: In GwProben gemessene Inhaltsstoffe (mg/l)

GWM	1/07	BK 7/99	1/11	1/14	2/14
Ca	54,0	96,3	86	75	71
Mg	25,0	26,3	41	31	25
Na	7,4	n. b.	10	11	20
K	1,9	n. b.	3,9	2,7	3,9
Cl	5,7	150,0	18	8,4	15
SO ₄	33,0	118,0	44	42,0	48
NO ₃	41,0	n. b.	92	34,0	13
HCO ₃	200,0	n. b.	295	290,0	270
Summe	368	(390) ¹	600	494	466

3.5 Optische und Geophysikalische Vermessung von GwMessstellen

Im Anschluss an die Fertigstellung der beiden neuen GWM wurden an diesen sowie an der GWM 1/11 zunächst eine optische Kontrolle (Bohrloch-TV) und im Anschluss geophysikalische Messungen zur Überprüfung der baulichen Ausführung und zur ergänzenden Erkundung des Gebirges ausgeführt. Der auf der Grundlage dieser Messungen erstellte Bericht des Büros Handel ist als **Anlage 11** beigelegt.

Die wesentlichen Erkenntnisse aus diesen Untersuchungen sind im Folgenden zusammengefasst:

1. Die **optische Kontrolle** zeigt im Falle der neuen GWM 1 + 2/14 den fachgerechten Ausbau der Bohrungen entsprechend dem Messstellen-Konzept. Einziges Defizit sind die jeweils im untersten Abschnitt der Bohrungen verbliebenen Bohrschlämme, die nicht vollständig entfernt worden sind. Dies ist vor dem Hintergrund der begrenzten Wasserzufuhr an den Bohrstellen zu sehen, die das Klarspülen erschwerte. Der Schlamm wäre mit vertretbarem Aufwand nicht zu entfernen und schränkt die Funktion der GWM im vorliegenden Fall nicht ein.
2. Es sind in beiden neuen GWM die erwarteten und beim Bohren angesprochenen schwebenden GwLeiter nachgewiesen worden. Deren Lage ist durch den Ausbau und im Falle der GWM 1/14 wegen des abgerissenen Bohrrohrs nicht eindeutig zu lokalisieren, die Wasserzutritte verteilen sich auf den Bereich von ca. 30 – 40 m u.GOK, während der Ruhewasserspiegel zum Zeitpunkt der Messung bei 56 m u.GOK lag. In der GWM 2/14 war ebenfalls im Tiefenbereich von ca. 30 – 40 m u.GOK ein allerdings deutlich schwächerer Wasserzutritt zu beobachten. Der Ruhewasserspiegel zum Zeitpunkt der Messung lag bei 50 m u.GOK.
3. Die TV-Befahrung in der GWM 2/11 wies nach, dass dort keine Beschädigung des Ausbaus vorliegt, wie aufgrund von Widerständen bei Ein- und Ausbau der Pumpe vermutet. Dies ist mutmaßlich auf die ebenfalls nicht lotrechte Bohrung zurückzuführen (vgl. GWM 2/14), durch die Pumpe und Leitungen nicht frei hängen, sondern an

¹ Der hohe Chlorid- und Sulfat-Gehalt der Probe ist wahrscheinlich auf die eingesetzte Bohrspülung zurückzuführen, die ist Probe also nicht repräsentativ für die GwBeschaffenheit.

der Wandung anliegen. Es ergaben sich in dieser GWM keine Hinweise auf oberflächennahe Wasserzutritte / ein schwebendes GwStockwerk, was allerdings darauf zurückzuführen sein kann, dass geringe Zuflüsse im hier vollständig verkiesten Ringraum absickern und daher im Ausbaurohr nicht in Erscheinung treten.

4. Die **Messung der natürlichen Gammastrahlung** in den GWM 1 + 2/14 zeigt, dass die Tonsperren sich nur näherungsweise in den angestrebten Abschnitten befinden und auch dort nicht die zu erwartende Signalstärke anzutreffen ist. Lediglich die jeweils oberflächennächsten Abdichtstrecken sind eindeutig und in der gewünschten Mächtigkeit nachweisbar.

Es kann nur vermutet werden, dass dieses Ergebnis im Zusammenhang mit dem Bohrverfahren und dem überwiegend wenig standfesten Gebirge steht. Dadurch kam es zu Auskolkungen des Bohrlochs, die trotz der gegenüber einer maßhaltigen Bohrung in den Ringraum eingebrachten deutlich größeren Massen offenbar zu einer geringeren als der angestrebten Mächtigkeit geführt haben. Außerdem kann es während des Einbringens der Massen in den Ringraum zu weiterem Nachfall von Gestein gekommen sein, das die noch nicht abgebundene Abdichtung tw. verdraingte und verdünnte.

Trotz dieses unerwünschten und bei sorgfältigerer Ausführung der Arbeiten wahrscheinlich vermeidbaren Störeffekts zeigen die Wasserzutritte über den Abdichtungen (und die Ergebnisse der Infiltrationsversuche), dass die Abdichtstrecken ihre Funktion (mit einer Ausnahme) noch erfüllen.

5. Die in der tiefsten GWM 2/14 ergänzend durchgeführte **Neigungsmessung** weist eine deutliche Auslenkung der Bohrung nach, die durch den Widerstand des Gebirges bedingt ist. Erfahrungsgemäß wird der Meißel / Hammer auf der Oberfläche maßgeblicher Trennfugen (Schicht- / Schieferungs- / Kluftflächen) gemäß deren Festigkeit unterschiedlich und in der Richtung ihres Einfallens abgelenkt, sofern dem nicht durch eine Beschwerung des Bohrgestänges begegnet wird. Zu erwarten ist am Standort eine Ablenkung auf Schichtflächen, die nach NW in den Hang fallen.

Im Falle der GWM 2/14 zeigt sich bis ca. 25 m u.GOK keine merkliche Ablenkung der Bohrung, was gemäß Bohrprofil dem Tiefenbereich der stärksten Auflockerung entspricht. Darunter folgt eine mutmaßlich aus dem Verband gelöste Scholle (Ablenkung nach N, Störungszone an der Basis angesprochen). Die erwartete Ablenkung nach NW ist erst unterhalb von 90 m zu erkennen.

In den übrigen GWM ist von ähnlichen Abweichungen auszugehen, was die beobachteten Widerstände beim Ein- und Ausbau der Pumpen erklären würde, die nicht mehr frei hängen, sondern am Ausbaurohr anliegen.

3.6 Beobachtung des GwSpiegels

Bereits bei dem ersten Ortstermin am 23.01.14 wurden in die GWM 01/07 sowie die GWM 1/11 automatisch aufzeichnende Drucksonden eingebaut und mit einer kontinuierlichen Messung des GwSpiegels begonnen. In GWM 2/11 wurde mit dem Einbau einer Sonde in die neue GWM 1/14 am 27.02.14 ebenfalls ein Drucksensor installiert, ein weiterer dann nach Fertigstellung der GWM 2/14 Ende März 2014.

Die Messreihen dieser Sonden sind in **Anlage 5** in Form von Ganglinien dargestellt. Dabei sind folgende Sachverhalte hervor zu heben:

- (1) Zu Beginn der Messungen zeichnet sich ein steigender Trend ab, was vor dem jahreszeitlichen Hintergrund plausibel ist, da die Messungen während der GwNeubildungsphase begannen.
- (2) Bis zur bislang letzten Auslesung der Datenspeicher am 07.05.2014 war ein maximaler Anstieg von 0,8 m in GWM 1/11 zu verzeichnen. Andere GWM reagieren deutlich schwächer auf die GwNeubildung. Da die Messungen die jeweilige Trendwende vor Beginn des Anstiegs und nach dessen Ende nicht erfassten, muss der GwSchwankungsbereich, auch unter Berücksichtigung mehrjähriger Unterschiede bei der GwNeubildung, immer größer sein als bislang dokumentiert.
- (3) Eine Korrelation der Spiegelschwankungen mit der Entwicklung des Niederschlags deutet sich in den Daten der noch kurzen Messreihen lediglich in GWM 1/07 an, wo der GwSpiegel fast ohne zeitliche Verzögerung auf längere und / oder stärkere Regenerenisse zu reagieren scheint, z. B. am 01. und 13.02.14.

Diese Beobachtung stützt die Annahme einer Infiltration von Oberflächenabflüssen über Wegseitengräben, die einer kleinräumigen GwAnreicherung entspricht. Außerdem muss das im oberen Hang in den GWM 1+2/14 nachgewiesene schwebende GwStockwerk oberhalb der GWM 1/07 aufgrund einer höheren vertikalen Durchlässigkeit in das Hauptstockwerk Drainieren, was dort zu der stärkeren Fluktuation des GwSpiegels führt.

- (4) Dass die GwDynamik der GWM 1/07 in den anderen GWM so nicht erkennbar ist, obwohl der Boden überwiegend so durchlässig ist, dass Niederschläge rasch und zum großen Teil versickern, wird auf die hangseitig nachgewiesenen schwebenden GwStockwerke zurückgeführt, die den Einfluss der Infiltration puffern.
- (5) Die zu Beginn der Messungen ungewöhnliche Ganglinie in GWM 2/11 wird auf den Einfluss der oberhalb durchgeführten Bohrungen 1+2/14 zurückgeführt. Das dabei in das Gebirge eingebrachte Wasser führt offenbar talseitig zu einer Aufhöhung des GwSpiegels. Nach Ende Bohrungen / der Wasserzufuhr stabilisiert sich die Spiegellage in GWM 2/11 und zeigt einen quasi natürlichen Verlauf bis zu dem Pumpversuch am 28.03, mit dem das zuvor eingespeiste Wasservolumen wieder tw. aus dem Gebirge abgepumpt wird.

Die Beobachtung, dass gleichzeitig die Spiegelschwankungen in den GWM 1/11 und 1/07 nicht in ähnlicher Weise erkennbar sind, lässt darauf schließen, dass um die GWM 2/11 ein lokaler GwSpeicher vorhanden ist, der von dem hangseitigen Zufluss gespeist wird, aber nicht ungehindert abfließen kann. Das am 10.04. beobachtete ra-

sche Absinken der Spiegellage um ca. 0,15 m könnte darauf zurückzuführen sein, dass dieser Zufluss in Trockenperioden versiegt.

- (6) Die Unterschiede in der GwDynamik entlang der Trasse, also die Amplitude der Spiegelschwankungen und auch die Reaktionszeit auf Niederschläge etc. lassen Rückschlüsse auf die geohydraulischen Eigenschaften des Gebirges zu.

Grundsätzlich sind dabei talseitig stärkere Reaktionen zu erwarten, da die größere GwNeubildungsfläche auch größere Volumenströme bedingen. Unabhängig davon beeinflussen außerdem lokale Unterschiede bei Transmissivität und Nutzporenraum des Gebirges die Reaktion des GwSpiegels auf ein Niederschlags- / GwNeubildungsereignis sowie der Ausbau der GWM selbst.

Außer den GWM wurden auch die vorhandenen Inklinometer in die Beobachtung des GwSpiegels einbezogen. Diese sind zwar für einen anderen Zweck eingerichtet worden, die manuellen Messungen fügen sich aber gut in das Bild der Sickerlinie des Hangs ein, so dass sie als aussagekräftig beurteilt werden.

Tabelle 3-5: *Bisher in GWM gemessener Schwankungsbereich des GwSpiegels*

GWM	1/07	1/11	2/11	1/14	2/14
Messzeitraum	23.10.2007 - 07.05.2014	11.07.12 - 07.05.14	11.07.12 - 07.05.14	27.02.14 - 07.05.14	24.03.14 - 07.05.14
Kontinuierliche Messung ab	23.01.2014	23.01.2014	27.02.2014	27.02.2014	24.03.2014
Dauer der kont. Messung (Monate)	3	3	2	2	1
Maximum (m üNN)	150,38	151,38	152,18	(203,57)	197,28
Minimum (m üNN)	148,86	149,17	151,28	176,27	195,06
Schwankungsbereich (m)¹	1,52	2,21	0,90	(27,30)	2,22

¹ Durch GwEntnahmen bei Pumpversuchen veränderte Daten wurden nicht berücksichtigt. Der GwSpiegel in GWM 1/14 ist durch die Einspeisung aus dem schwebenden GwStockwerk beeinflusst, der zu Beginn der Messungen am größten war und seither durch das tw. Leerlaufen dieses Stockwerks abnimmt. Der anfängliche Maximalwert ist deswegen nicht repräsentativ und der Schwankungsbereich ist damit erheblich zu groß.

3.7 Abflussmessungen an Bachläufen

Um die vorliegenden Informationen und Annahmen zur GwNeubildung, der Wirkung der Drainagen des Tunnels und der Lage der unterirdischen Wasserscheiden zu überprüfen, wurden an dem nach W einfallenden Hang die zum Bieberbach hin abfließenden Gräben untersucht, um zu klären, wo / in welcher Höhenlage diese Wasser führen und welcher Volumenstrom aus dem jeweiligen Einzugsgebiet abfließt (incl. Anteil der Drainagen des Tunnels).

Die entsprechenden Messpunkte sind in dem Lageplan **Anlage 1.1** eingetragen, die Ergebnisse der Messungen sind in **Anlage 5** dokumentiert.

Die relevanten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Da im Beobachtungszeitraum keine echten Trockenwetterbedingungen auftraten, sind die ermittelten Abflussspenden der Teileinzugsgebiete zwar höher als die zu erwartenden GwNeubildungsspenden. Im Vergleich zu den im Geoportal Wasser genannten Werten von 2,5 - 3,2 l/s*km² (s. o.) nähern sich die am 04.03. gemessenen Minima der im vorliegenden Zusammenhang relevanten Teileinzugsgebiete östlich des Bieberbachs¹ aber dem realistischen Wertebereich an.
2. Die an dem zum Rothenberg ansteigenden Hang gemessenen Abflussspenden von minimal 1,2 und 2,4 l/s*km² an den maßgeblichen Messpunkten MP 2 und 5² lassen darauf schließen, dass die unterirdischen nicht nennenswert kleiner sein können als die oberirdischen Einzugsgebiete, da ansonsten unrealistisch hohe GwNeubildungsspenden erforderlich wären.
3. Anhand der Daten kann also angenommen werden, dass das unterirdische Einzugsgebiete des zur Mosel einfallenden Hangs allenfalls südlich des Tunnels, im Bereich der devonischen Schiefer des Rothenbergs, etwas über den Höhenzug hinaus reicht. In diesem KluftGwLeiter ist dies wegen des im Vergleich zum Bieberbach um ca. 50 m tieferen Niveaus der Vorflut Mosel plausibel. Aufgrund der geringen Durchlässigkeit des Gebirges sind aber auch dort nur minimale hangseitige Zuflüsse in den Hangbereich möglich.

Davon abgesehen wird der Wasserhaushalt des Hangs allein von den entlang der Trasse fallenden Niederschlägen bestimmt, denn in den überlagernden Schichten des Rotliegenden / im N des Tunnels fließt das Grundwasser nach NW ab.

¹ Am Bieberbach wurden nur einzelne Messungen durchgeführt (MP 8 – 10), um die Größenordnung im Vergleich zu den östlichen Zuläufen beurteilen zu können. Die Messungen dokumentieren am 04.03. zwischen den MP 9 und 10 einen starken Abflusszuwachs >50 l/s, der jedoch nur zu einem untergeordneten Teil aus dem hier relevanten Bereich des zum Rothenberg ansteigenden Hangs stammt. Die Analyse dieser Daten ist daher nicht relevant.

² Auf den unterhalb gelegenen landwirtschaftlichen Nutzflächen sind, möglicherweise bedingt durch Drainagen, Abflussminderungen zu verzeichnen, die zum abschnittswisen Trockenfallen der Gräben / Bäche führen (vgl. MP 1, 6). Der Abfluss am MP 5 ist möglicherweise unterschätzt, da oberhalb eine gefasste Quelle existiert, von der möglicherweise noch Wasser über eine alte Leitung abfließt.

3.8 Boden- und Nutzungskartierung, Infiltrationsmessungen

Den verfügbaren Unterlagen zum Bodenaufbau /9/ zufolge war in dem relevanten Hang vorwiegend mit "Rigosol - Regosol aus Schuttlehm (Schiefer, Devon)" zu rechnen, dem im ersten Meter eine nutzbare Feldkapazität (nFk) von 90 - 120 mm zuzuordnen ist (s. Abbildung 2-15). Da diese Informationen für die Neubildung von Sicker- / Grundwasser von großer Bedeutung sind, erfolgte im Rahmen einer Begehung am 04.02.14 eine Aufnahme der Bodenarten für die Flurstücke entlang der Trasse.

Die Ergebnisse der Kartierung sind mit den Ansatzpunkten der Bodenkartierung und der Infiltrationsmessungen (je 7 St.) in dem Lageplan **Anlage 1.3** dokumentiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in **Anlage 7** zusammengefasst.

Sie entsprechen i. Wes. dem in der Weinbergsbodenkarte /9/ dokumentierten Kenntnisstand. Danach sind in den Weinbergen offenbar in weiten Bereichen (nicht verdichtete) Auffüllungen aufgebracht worden. Darauf lässt der tw. sehr inhomogene Bodenaufbau mit Fremdbestandteilen schließen (Traubenkerne, Rotliegend-Zersatz). Diese Auffüllungen und auch die bereichsweise originären Böden aus dem unterlagernden Tonschiefer sind durch die Bearbeitung bis in mehrere dm Tiefe aufgelockert.

In Übereinstimmung mit diesem Befund stehen die Ergebnisse der im Hangbereich durchgeführten Messungen zur Bestimmung der Durchlässigkeit in der oberflächennächsten Bodenzone mittels Doppelring-Infiltrationsmeter nach /3/ Teil 5, die als Eingangswert für das Bodenwasserhaushaltsmodell dienen.

Die Auswertung der Infiltrationsmessungen zeigt eine große Bandbreite der k-Werte an der Erdoberfläche, die im Bereich von ca. $1 \cdot 10^{-5}$ m/s (Baufeld Achse 1) bis $4 \cdot 10^{-4}$ m/s (ungestörter Waldboden) liegen und damit etwa um den Faktor 40 variieren. Die Bodenaufgabe kann damit nach DIN 18130 als „durchlässig bis stark durchlässig“ eingestuft werden, was in Verbindung mit einer nFk in der Größenordnung von 100 mm darauf schließen lässt, dass normale Niederschläge weitgehend von der Lockergesteinsauflage zwischengespeichert können.

Auf der Grundlage dieser Daten sowie der Informationen des digitalen Höhenmodells werden Homogenbereich des Trassenbereichs differenziert, ausgehend von den maßgeblichen Kriterien

- Hangneigung
- Oberflächennutzung
- Nutzbare Feldkapazität.

Tabelle 3-6: Mit Doppelringinfiltrationsmeter bestimmte Durchlässigkeitsbeiwerte des Oberbodens

Versuch Nr.	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5	V 6	V 7
Kf-Wert (m/s)	$3,0 \cdot 10^{-5}$	$9,2 \cdot 10^{-5}$	n. b.	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$6,0 \cdot 10^{-5}$	$8,6 \cdot 10^{-6}$ (Min.)	$4,0 \cdot 10^{-4}$ (Max.)

4. Hydrogeologische Modellvorstellung

Auf Grundlage der zum Ende der vertiefenden Erkundung des Standorts vorliegenden Daten wird die hydrogeologische Modellvorstellung des Standorts gemäß der beiden Leitfäden /16/ und /1/ im Folgenden beschrieben.

4.1 Bilanzraum

Anhand der beschriebenen Datenbasis kann davon ausgegangen werden, dass sich der hydrogeologisch abgrenzbare Bilanzraum von der Mosel als dominierender Vorflut im Osten etwa bis zur oberirdischen Wasserscheide auf Höhe des Tunnelportals erstreckt. Aufgrund des Einfallens der Schichten nach W und der Drainage des Tunneleinschnitts ist eine Ausdehnung des unterirdischen Einzugsgebiets nach W, über den Höhenzug hinaus, lediglich in dem kleinen Verbreitungsgebiet der devonischen Schiefer südlich des Tunnels möglich.

In N-S-Richtung ist aufgrund der Morphologie des Steilhangs auszuschließen, dass sich das auf die Brückentrasse bezogene Einzugsgebiet mehr als 100 m über die Trasse hinaus ausdehnt. In diesem Bereich ist der Verlauf der Wegseitengräben im oberen Hang als Anreicherungsgrenze zu berücksichtigen, es gibt jedoch keinen Hinweis auf laterale Sicker- / Grundwasser-Bewegungen. Das Grundwasser fließt ohne größeren Umweg zur Mosel ab, wobei die Fließwege im Detail durch die Inhomogenität des Gebirges bestimmt werden. Es ergibt sich somit ein hydrogeologisch eindeutig abgrenzbarer Bilanzraum mit einer Fläche von ca. 0,5 km * 0,2 km, entsprechend 0,1 km².

4.2 Modellgebiete – FD- und FE-Modell

Auf Grundlage der vorliegenden Daten wurde zunächst ein stationäres, mehrschichtiges GwStrömungsmodell nach der Finite-Differenzen-Methode (FD-GwModell - /20/) ausgearbeitet. Hierfür wurde der Modellraum nach W über den Bilanzraum hinaus ausgedehnt, um die westlich der oberirdischen Wasserscheide vorhandenen Oberflächengewässer (v. a. Bieberbach) als zusätzliche Randbedingungen für die stationäre Kalibrierung verwenden zu können (siehe Anlage 8.1.1 und Anlage 8.1.2). Hiermit wurde untersucht, wo sich die Lage der unterirdischen GwScheide im Vergleich zur oberirdischen Wasserscheide befindet, da aufgrund des sehr tiefen Mosel-Potentials im Vergleich zu den westlich gelegenen Vorfluter für das Haupt-GwStockwerk eine Verschiebung der unterirdischen Wasserscheide Richtung Westen zu erwarten war. Wie man der Anlage 8.1.3 entnehmen kann, wurde diese Erwartung durch die GwModellergebnisse für das tiefliegende Haupt-GwStockwerk bestätigt.

Die Berechnungsergebnisse in der Anlage 8.1.4 zeigen, dass für das stationäre FD-GwModell eine insgesamt gute Kalibrierung erreicht werden konnte. Der normalisierte Root-Mean-Square-Error (RMS) von 5,4 %, die Korrelation von 0,996 sowie die Standard-

Abweichung von 2,73 m stellen insgesamt gute statistische Werte für das stationäre FD-GwModell dar.

Die o. g. Verschiebung der unterirdischen Wasserscheide ist jedoch für die bereichsweise vorhandenen höher liegenden schwebenden GwStockwerke nicht zu erwarten. Vor diesem Hintergrund wurde für das hierauf aufbauende, zusätzlich erstellte GwStrömungsmodell nach der Finite-Elemente-Methode (FE-GwModell - /19/) der Modellraum auf den Bilanzraum bis zur oberirdischen Wasserscheide begrenzt (siehe Anlage 8.2.1). Hiermit wird sichergestellt, dass kein Niederschlag (GwNeubildung) außerhalb des Bilanzraumes in das Modellgebiet fließt, der zu unrealistischen GwNeubildungswerten im Modellgebiet führen würde. Für das Haupt-GwStockwerk wurde ein geringer GwZufluss in das GwModellgebiet angesetzt, um die o. g. geringe Verschiebung der GwScheide adäquat umsetzen zu können.

4.3 Strukturierung der Modellgebiete

4.3.1 Horizontale Diskretisierung

Anhand der Daten zur Situation an der Erdoberfläche (Hangneigung, Bodenaufbau, Bodenbewuchs / -nutzung) werden zunächst dort Homogenbereiche im Hinblick auf die Höhe der GwNeubildung differenziert.

Auf der Grundlage geologisch-hydrogeologischer Informationen, vorzugsweise der Durchlässigkeitsbeiwerte und des Nutzporenraums, können auch im Untergrund unterschiedliche Homogenbereiche ausgewiesen werden. Die horizontale und vertikale Gliederung des Modellraums ist auch aus modelltechnischen Gründen erforderlich, um numerische Probleme bei den Rechenläufen zu reduzieren. Die horizontale Diskretisierung für das FD-GwModell ist in der Anlage 8.1.1 und für das FE-GwModell in der Anlage 8.2.1 dargestellt.

4.3.2 Vertikale Diskretisierung

Die prinzipielle Modellstruktur für das FD-GwModell zeigt der Profilschnitt in Anlage 8.1.3. Wie man in dem Profilschnitt erkennen kann, wurde das FD-GwModell in insgesamt 4 Schichten vertikal diskretisiert, da hier prioritär die Lage der unterirdischen Wasserscheide für den tiefen Haupt-GwLeiter ermittelt werden sollte. Aufbauend auf der o. g. Diskretisierung wurden für das kleinräumige instationäre FE-GwModell weitere Modellschichten eingeführt, um vor allem den oberflächennahen Bereich besser umsetzen zu können. In der Endfassung war eine Gliederung in insgesamt 10 Schichten erforderlich.

Oberflächennah ist dabei die **realitätsnahe Abbildung des Bodenaufbaus im obersten Meter von zentraler Bedeutung**, da die Lockergesteinsauflage als Speicher des Niederschlagswassers fungiert. Wie bereits der Vergleich der nutzbaren Feldkapazität (ca. 100

mm, vgl. Abbildung 2-15) mit den statistischen Niederschlagsdaten ($N_{\max}$ ca. 55 mm/d, vgl. Tabelle 2-1) zeigt, ist selbst bei Niederschlägen von stärkerer Intensität und Dauer allenfalls bereichsweise ein Oberflächenabfluss zu erwarten. In weiten Bereichen wird dieses Wasser trotz der starken Hangneigung vollständig im Boden gespeichert.

Diese Zwischenspeicherung entspricht jedoch nicht der GwNeubildung, denn durch den Einfluss der Verdunstung, den Bedarf der Pflanzen und den Zwischenabfluss über dem geringer durchlässigen Unterlager sickert von den Jahresniederschlägen (Zeltingen ca. 550 - 800 mm/a) nur ein Bruchteil von im Mittel ca. 80 mm/a als GwNeubildung in größere Tiefen. Bei Annahme eines Nutzporenraums in der Größenordnung von 2,5 - 5 % entspricht dies im Gebirge einer Wassersäule $40 \times 80 \text{ mm} = 3,2 \text{ m}$ bzw. $20 \times 80 \text{ mm} = 1,6 \text{ m}$. Dieses Wasservolumen fällt während der Neubildungsperiode etwa von Oktober bis Februar an, also über ca. 5 Monate (vgl. Abbildung 2-16); unter der Annahme einer mittleren Verweilzeit von 2,5 Monaten fließen 50 % dieses Wasser bereits während der Neubildungsphase wieder zum HauptGwStockwerk ab, der Rest in den Folgemonaten März und April. Während eines großen Teils des Jahres (ca. Mai bis September) läuft dann auch das HauptGwStockwerk leer, weil aus dem schwebenden GwStockwerk kein Zufluss mehr erfolgt¹.

Den vorliegenden Informationen zufolge ist davon auszugehen, dass dieses **"schwebende GwStockwerk"** kein einheitlicher GwLeiter in einer definierten Tiefe und mit einer gleichbleibenden Mächtigkeit ist. Vielmehr ist aufgrund der Inhomogenität und kleinräumigen Gliederung des Gebirges die Modellvorstellung eines Mosaiks von Bruchschollen realistisch, in denen gering durchlässige Horizonte als GwHemmer fungieren, auf denen sich zeitweilig Sickerwasser aufstaut.

An den Rändern dieser treppenartig gegeneinander versetzten Schollen fließt dieses "Schichtwasser" vertikal entweder zum HauptGwStockwerk ab, oder auf die nächste, tiefer liegende hydraulische Barriere, so dass eher das Bild einer kaskadenartigen GwBewegung zutrifft, die kleinräumig zwischen gesättigter und ungesättigter Strömung wechselt.

Diese Plausibilitätsbetrachtung für den Wasserhaushalt zwischen der Bodenauflage und dem HauptGwStockwerk wird durch die im Folgenden nochmals zusammengefassten Beobachtungen im Rahmen der Erkundung gestützt.

Im Bereich der Achse 0 wurde in der aktuellen Bohrung 2/14 erstmals ein Wasserzutritt in ca. 36,0 m u. GOK beschrieben, entsprechend ca. 209,8 m ü. NN. Dieser Messwert ist allerdings durch die Zufuhr von Wasser beim Bohren beeinflusst.

Wie die Beobachtungen in der GWM 2/11 zeigen², führte das infiltrierte Wasser zu einer zeitweiligen Aufhöhung des GwSpiegels im oberen Hangbereich, so dass der o. g. Messwert nicht repräsentativ für den natürlichen Schwankungsbereich ist. Vielmehr ist davon auszugehen, dass sich das in der Bohrung versickerte Wasser auf einer geringdurchlässi-

¹ Die Annahme einer Verweilzeit von 2,5 Monaten ist vor dem Hintergrund der Messungen an den GWM tendenziell zu ungünstig, da die Trendwende mit Beginn der Auslaufphase zumindest im Frühjahr 2014 schon Mitte März einsetzt und nicht erst im April (vgl. Anlage 5.3). Die Aufstauhöhe auf den hydraulischen Barrieren wird damit eher überschätzt.

² Vgl. Anlage 5.2; die 4 Wochen andauernde, quasi kontinuierliche Infiltration beim Bohren hatte in der GWM 2/11 nur eine Aufhöhung von <1 m zur Folge. Ob der Zufluss noch in schwebenden Horizonten erfolgte, oder bereits im Hauptstockwerk ist aufgrund des Ausbaus der GWM 2/11 nicht klar.

gen Schicht aufstaute, über der im natürlichen Zustand keine Wasserführung zu verzeichnen ist.

Ein vergleichbarer Effekt ist bereits in der nahegelegenen Bohrung BK 4/99 dokumentiert (Seilkernbohrung von 17 - 60 m u. GOK, d. h. mit Wasserzufuhr; Verrohrung bis 16,7 m u. GOK), in der vom 20.-23.07.1999 beim Bohren Messungen des GwSpiegels zwischen ca. 224,5 und 229,7 m ü. NN dokumentiert sind /33/. Diese Werte liegen also nochmals etwa 15 bis 20 m über dem vg. Niveau in 2/14.

Wie auch die Auslaufkurven nach Durchführung der Infiltrationsversuche in den neuen GWM 1+2/14 zeigen (Anlage 12), speichert das Gebirge im Auflockerungsbereich der Bohrungen Wasser, das aufgrund der geringen Durchlässigkeit nicht ungehindert abfließen kann. Aus diesem Grund können die Messwerte beim Bohren nicht als repräsentativ für den geogenen Schwankungsbereich angenommen werden.

Die weitere Beobachtung des schwebenden GwLeiters in der Bohrung 2/14 war durch das Absperren mit einer Hilfsverrohrung bis 46 m nicht möglich, in der sich bis zum Erreichen der Endteufe von 102 m ein Ruhespiegel um 62 m einstellte, entsprechend 183 m ü. NN. In der ausgebauten GWM lag der Mischwasserspiegel vor dem Pumpversuch bei über 200 m ü. NN, da der Zufluss aus dem schwebenden GwLeiter den GwSpiegel im Hauptstockwerk aufhöhte. Mit dem sukzessiven Leerlaufen des schwebenden GwLeiters nimmt dieser Effekt aber ab und der GwSpiegel im Hauptstockwerk sinkt seither kontinuierlich.

Dieser Einfluss überlagert sich dem jahreszeitlich zu erwartenden Absinken des GwSpiegels, so dass der zukünftige Minimalwert nur geschätzt werden kann. Die bisherigen Messungen lassen aber erwarten, dass der GwSpiegel des Hauptstockwerks auf Höhe der Achse 0 im Spätsommer etwa bis auf etwa 190 m ü. NN absinken wird, so dass anhand der bislang vorliegenden Daten eine Schwankungsbreite von ca. 5 - 7 m anzunehmen ist.

Die entsprechende Abschätzung für den "schwebenden GwLeiter" ist schwieriger, weil dafür keine belastbaren Messwerte vorliegen. Anhand der beschriebenen Randbedingungen kann für den natürlichen Ausgangszustand eine Größenordnung von 1,6 m angenommen werden (s. o.). Dieser Wert ist in der heutigen, anthropogen veränderten Situation allerdings nur noch bedingt aussagekräftig, da mit den Bohrungen Vertikaldrainagen entlang der Trasse installiert worden sind, über die "Schichtwasser" aus dem schwebenden in das HauptGwStockwerk abfließen kann. Die Reichweite dieser punktuellen Eingriff ist zwar räumlich eng begrenzt, für den Bereich der Trasse aber nicht zu vernachlässigen. Dieser Eingriff in den natürlichen Wasserhaushalt des Hangs wird durch die Gründung der Pfeiler auf den Achsen 0 bis 3 verstärkt, für die bei Herstellung der Baugruben in den Hang eingegriffen werden, wodurch die hangseitigen Schichten bis auf das Niveau der Baugruben drainiert werden.

Im Bereich der Achse 1 wurde in der aktuellen Bohrung 1/14 erstmals ein Wasserzutritt in ca. 17,7 m u. GOK beschrieben, entsprechend ca. 216,5 m ü. NN. Auch dieser Messwert ist durch die Zufuhr von Wasser beim Bohren beeinflusst.

Das nach dem Ausbau der GWM beobachtete Auslaufen des schwebenden Horizonts mit einem im Verlauf von 3 Wochen von ca. 1 auf ca. 0,2 l/s abnehmenden Volumenstrom entspricht den Erwartungen, die sich aus der beschriebenen Modellvorstellung ergeben. Es

handelt sich hier um ein kleinräumiges schwebendes GwStockwerk, das als Folge der Bohrung über die GWM zum HauptGwStockwerk entwässert und in dem sich aufgrund dieses Eingriffs in die natürlichen Verhältnisse allenfalls noch ein Aufstau von wenigen dm ergeben kann. Das vollständige Leerlaufen wird durch die unabsichtlich verbliebene Hilfsverrohrung verhindert.

Für das numerische GwModell resultiert aus diesen Beobachtungen, dass im Bereich des oberen Hangs eine hydraulische Barriere integriert werden muss, die oberhalb des HauptGwStockwerks / der dauerhaft gesättigten Zone einen zumindest zeitweiligen Aufstau bewirkt. Da die Ausdehnung der Stauhazone in der Fläche messtechnisch nicht erfasst werden kann, muss vorsorglich der ungünstigste Fall eines im oberen Hangbereich flächig ausgebildeten GwHemmers als Bemessungsgrundlage angenommen werden.

Dessen Wirkung wird damit im Sinne einer zusätzlichen Sicherheit tendenziell überschätzt. Der unter dieser Voraussetzung zu erwartende Aufstau des Sickerwassers wird maßgeblich von dem verfügbaren Nutzporenraum bestimmt, der für einen verwitterten Tonschiefer mit 2,5 - 5 % angenommen wird. Mit der wiederum ungünstigsten Annahme von 2,5 % errechnet sich aus einer GwNeubildung von 80 mm ($= 80 \text{ l/m}^2 \cdot \text{a}$) die Größenordnung des Aufstaus zu 1,6 m bei einer ebenfalls ungünstig angenommenen Verweilzeit von 2,5 Monaten.

4.4 GwHydraulik und GwBilanz

Die GwHydraulik wird durch die Durchlässigkeitsbeiwerte der ungesättigten und der gesättigten Zone bestimmt sowie durch das Gefälle, das sich aus den gemessenen Höhen des GwSpiegels ergibt. Als Eingangsdaten in das numerische Modell werden die an den GWM gemessenen Werte angenommen.

Die GwBilanz errechnet sich aus der GwNeubildung und der Infiltration entlang der Wegseitengräben; der daraus gebildete GwStrom wird im Untergrund / dem Modellgebiet zwischengespeichert und fließt dann entsprechend den geohydraulischen Kennwerten und der Geometrie des Modells zur Mosel ab. Die GwBilanz kann mittels Plausibilitätsprüfungen verifiziert werden, die messtechnische Erfassung des GwStroms über den Abflusszuwachs der Vorflut, oder die GwEntnahme von Brunnen ist nicht möglich.

Auch in diesem Punkt wird mit Blick auf die Fragestellung von dem ungünstigsten Fall ohne Oberflächenabfluss ausgegangen; d. h. im GwModell wird eine tendenziell überschätzte GwNeubildung angenommen.

4.5 GwQualität / GwBeschaffenheit

Die GwQualität ist im vorliegenden Fall kein relevantes Kriterium der Modellierung, so dass darauf nicht näher eingegangen wird. Den einzigen für die Modellierung relevanten Hinweis gibt die unterschiedliche GwBeschaffenheit in der GWM 1/07, in der die vorliegenden Untersuchungsergebnisse eine starke Verdünnung des Grundwassers etwa um den Faktor 2 nachweisen.

Die GwQualität ist hier ein Indiz für einen quantitativen Prozess, nämlich eine Zufuhr von Oberflächenwasser, die wiederum auf eine höhere vertikale Durchlässigkeit im Bereich der Achse 2 schließen lässt. Dieser Sachverhalt wird im Modell berücksichtigt, wobei eine diskontinuierliche Wasserzufuhr als Folge von Niederschlagsereignissen den wahrscheinlichsten Zusammenhang darstellt.

4.6 Randbedingungen

Das FD-Modellgebiet mit den hydraulischen Randbedingungen ist in der Anlage 8.1.1 auf der Grundlage der Geologischen Karte dargestellt. Die Trasse der B 50n ist als rote Linie eingetragen, die Lage der GWM unter der Moselbrücke wird durch farbige Säulen markiert.

Aufgrund des hydrogeologisch eindeutig abgrenzbaren Bilanzraums können im S und N des Modells „No-Flow“-Randbedingungen / Trennstromlinien angenommen werden (Schwarze Linien), im W und O fungieren Bieberbach und Mosel als „Leakage“; d. h., dass die Gewässer das aus dem Gebirge abfließende Grundwasser aufnehmen und bei Hochwasser auch in den Untergrund infiltrieren können (Grün / Blau); außerdem wurden die Gewässer auf dem zum Bieberbach einfallenden Hang in das FD-Modell integriert. Randzuflüsse sind im numerischen FD-GwModell nicht zu berücksichtigen.

Aufbauend auf dem o. g. FD-Modellgebiet wurde - wie bereits zuvor beschrieben - ein kleinräumiges instationäres FE-GwModell entwickelt. Hier ist bis auf die Mosel im Osten, die als Transfer-Randbedingungen (3. Art) umgesetzt wird, an allen weiteren äußeren Modellrändern eine No-Flow-Randbedingung angesetzt. Lediglich für das HauptGwStockwerk wurde ein geringer GwZufluss (ca. $1,2 \text{ m}^3/\text{d} = \text{ca. } 0,01 \text{ l/s}$) als Zufluss-Randbedingung (2. Art) angesetzt, um die geringe Verschiebung der tiefen GwScheide in Richtung Westen adäquat umsetzen zu können.

Die Annahmen zur GwNeubildung können anhand der Reaktionen des GwSpiegels auf Niederschlagsereignisse überprüft werden, wobei als Startwert die in Kapitel 2.4 genannten 80 mm/a angenommen werden.

Im Modellgebiet erfolgt keine **GwEntnahme**. Lediglich im Rahmen des Auffahrens der Baugruben wird eine begrenzte Wasserhaltung erforderlich, die sich hangseits auf die Fassung von Niederschlags- und Schichtwasser in offener Wasserhaltung beschränken kann.

5. Numerisches GwModell

5.1 Ausarbeitung und Kalibrierung des Modells

Auf Grundlage der vorliegenden Daten wurde zunächst ein stationäres, mehrschichtiges GwStrömungsmodell nach der Finite-Differenzen-Methode ausgearbeitet und darauf aufbauend ein instationäres, mehrschichtiges GwStrömungsmodell nach der **Finiten-Element-Methode**.

Damit angesichts des kleinen FE-Modellgebiets eine hinreichend exakte Auflösung gewährleistet ist, wurde die Fläche der Modellzellen zwischen $< 2,5 * 2,5$ m im Kern und ca. $25 * 25$ m in den Randbereichen des Modells variiert (vgl. Anlage 8.2.1), vertikal war eine Diskretisierung in 10 Schichten erforderlich, um u. a. im Bereich der ungesättigten Zone eine ausreichend feine vertikale Auflösung zu ermöglichen.

Jeder daraus resultierenden Zellen wurden anhand der Ergebnisse aus der Erkundung Startwerte der Durchlässigkeit zugeordnet, deren Werte im Rahmen der Kalibrierung des Modells angepasst worden sind.

Wesentliche Kriterien der Kalibrierung waren dabei:

- Der Abgleich der an den vorhandenen GWM gemessenen und der berechneten GwGanglinien nach der Höhenlage des GwSpiegels sowie den beobachteten kurz- und langfristigen Veränderungen / Trendwenden als Folge der Witterung.
- Realistische Durchlässigkeitsverteilung, die in Einklang mit den Ergebnissen aus der Erkundung steht.

In der praktischen Durchführung der instationären Modellkalibrierung wurden die an der DWD-Station Zeltingen gemessenen Tagesniederschläge als Eingangswert verwendet. Ausgehend von der Startkonfiguration resultieren aus diesem "Input" Ganglinien des GwSpiegels an den Beobachtungspunkten, die mehr oder weniger stark von den gemessenen Ganglinien abweichen.

Die Verteilung der geohydraulischen Parameter (kf-Wert, Nutzporenraum) der einzelnen Modellzellen wurde dann im Rahmen plausibler Grenzen in zahlreichen Iterationsschritten so angepasst, dass sich berechnete und gemessene Ganglinien annäherten, wobei die Volumenströme ebenfalls weiterhin eine realistische Größenordnung aufweisen mussten. Die Güte der Anpassung wird letztlich an der Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Ganglinien des GwSpiegels beurteilt, wobei die Messungen über ein ganzes hydrologisches Jahr fortgesetzt und zur weiteren Optimierung genutzt werden müssen. Durch die Kalibrierung des numerischen GwModells werden die Annahmen der hydrogeologischen Modellvorstellung also mit Hilfe einer mathematischen Beschreibung der Systemzusammenhänge überprüft und präzisiert.

Wie man dem Vergleich der berechneten mit den gemessenen Werten für den exemplarisch aus dem instationären FE-GwModell herausgegriffenen Zeitschritt (05.05.2014) entnehmen kann, ist hier eine insgesamt gute Kalibrierung festzustellen. Der normalisierte Root-Mean-Square-Error (RMS) von 4,0 %, die Korrelation von 0,996 sowie die Standard-

Abweichung von 2,02 m stellen insgesamt gute statistische Werte für diesen exemplarischen Zeitschritt des instationären FE-GwModells dar.

Wie aus dem Vergleich der GwGanglinien in der Anlage 8.2.5 erkennbar ist, konnte auch instationär – vor dem Hintergrund der nachgewiesenen sehr großen Durchlässigkeitskontraste und großen Potentialunterschiede - insgesamt eine gute Anpassung der berechneten an die gemessenen GwGanglinien erreicht werden. Vor allem für die GwMessstellen GWM 1/11 und 2/11 konnten sowohl das GwPotential, als auch der zeitliche Verlauf des GwPotentials, gut nachvollzogen werden.

Auch für die GwMessstelle GWM 1/07 wird der zeitliche Verlauf des GwPotentials gut nachvollzogen, während das berechnete GwPotential um ca. 1 m zu hoch berechnet wird. Vor dem Hintergrund der großen GwPotentialunterschiede im Untersuchungsgebiet wird diese Differenz jedoch als nicht relevant eingestuft.

Aufgrund der bisher nur über einen sehr kurzen Zeitraum gemessenen GwPotentiale in den GwMessstellen GWM 1/14 und 2/14 lässt sich hier noch keine endgültige Aussage über die Kalibrierungsgüte für diese zwei GwMessstellen treffen. Es ist jedoch feststellen, dass das berechnete verhältnismäßig gut mit dem gemessenen GwPotential übereinstimmt.

Wie man aus den Darstellung der räumlichen Verteilung der horizontalen Durchlässigkeit in der Anlage 8.2.2 erkennen kann, wurde das Modellgebiet in diverse Durchlässigkeitszonen unterteilt, die sich i. W. parallel zur Mosel bzw. zum Höhenverlauf des Moselhanges erstrecken. Lediglich im Bereich des im NW oberflächlich anstehenden Rotliegenden (Modellschicht 3) sowie für den Trennhorizont im Bereich der GwMessstellen 1/14 und 2/14 wurde von dieser Strukturierung abgewichen. Diese Strukturierung der Durchlässigkeitszonen wurde vor dem Hintergrund der talparallel zu erwartenden Durchlässigkeitsstruktur und der nur entlang der Brückentrasse erkundeten Untergrundverhältnisse angesetzt. Festzustellen ist die Tatsache, dass im Bereich der jeweiligen GwMessstellen die im GwModell ermittelten Durchlässigkeiten mit den in den hydraulischen Versuchen ermittelten Durchlässigkeitsbeiwerten übereinstimmen.

Weiterhin ist festzustellen, dass die ermittelten Durchlässigkeiten auch außerhalb der vorhandenen GwMessstellen in den bekannten / nachgewiesenen Größenordnungen für die hydraulische Durchlässigkeit liegen. Die einzige Ausnahme hiervon stellt der Trennhorizont im Bereich der GwMessstellen 1/14 und 2/14 dar, in dem im GwModell eine deutlich geringere Durchlässigkeit angesetzt werden musste, als in hydraulischen Versuchen ermittelt wurde, um den schwebenden GwHorizont im GwModell umsetzen zu können. Dies ist jedoch im Sinne der Aufgabenstellung (konservativer Ansatz) als positiv zu bewerten, da hierdurch für tendenziell zu große Flächen ein schwebender Horizont berechnet wird bzw. zu große GwAufstauhöhen berechnet werden.

Insgesamt ist somit festzustellen, dass das vorliegende instationäre FE-GwModell die vorhandenen Daten zum Untergrund im Sinne der Aufgabenstellung bestmöglich umsetzt und dass eine gute instationäre Kalibrierung erreicht werden konnte.

5.2 Anwendung des numerischen Grundwassermodells

Die Anwendung des numerischen Grundwassermodells erfolgt anhand der Berechnung für zuvor definierte maßgebliche Szenarien. Hier wird zunächst ein Ausgangszustand vor der Baumaßnahme berechnet, der mit den aktuellen Messdaten nicht exakt übereinstimmen kann, weil diese ja bereits durch die bestehenden Eingriffe in das natürliche System des Hangs verändert worden sind (Erdbewegungen, Ableitung von Oberflächenwasser, Vertikaldrainagen der GwMessstellen etc.).

Ausgehend von diesem Ausgangszustand können anschließend in weiteren Szenarien die Folgen der bereits erfolgten und der noch geplanten anthropogenen Eingriffe in den Hang simuliert und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt quantitativ berechnet werden bis hin zum Endzustand nach Abschluss der Baumaßnahme.

5.2.1 Szenario 01: Extremfall der GwNeubildung

Wie im Kapitel 2.5 erläutert, wurde als ungünstigster Fall der GwNeubildung ein über 3 Monate währender, quasi kontinuierlicher Niederschlag mit einer Summe von 450 mm ermittelt, entsprechend einem Mittelwert von 5 mm/d. Dieser bisher nur einmal in 40 Jahren aufgetretene Extremfall wird im Hinblick auf die absehbaren Folgen des Klimawandels mit einem Sicherheitszuschlag von 1,2 beaufschlagt ($540 \text{ mm} / 90 \text{ d} = 6 \text{ mm/d}$), außerdem wird er in der GwNeubildungsperiode angenommen, also während der Wintermonate, in denen der GwSpiegel ohnehin steigt.

Die Ergebnisse dieser Extremwertbetrachtung sind in Anlage 9.1 dokumentiert. Darin sind die berechneten Ganglinien für den Kalibrierungszustand (blau) den berechneten Ganglinien des GwSpiegels für die vg. Extremsituation (grün) gegenübergestellt.

In den hangseitigen GWM 1+2/14 liegen die beiden Ganglinien aufeinander, d. h. es zeigt sich kein Einfluss des Extremfalls. Grund dafür ist i. Wes. die Tatsache, dass die GwNeubildung zunächst das hier ausgebildete schwebende GwStockwerk speist, dessen Wasser erst weiter talwärts, im Bereich der Zone erhöhter vertikaler Durchlässigkeit, in das HauptGwStockwerk abfließt. Demzufolge errechnet sich in den GWM 1+2/11 und 1/07 ein markanter Anstieg des GwSpiegels von ca. 4,5 - 6,0 m.

5.2.2 Szenario 02: Reduzierte GwNeubildung durch Eingriffe in den Untergrund

In diesem Szenario ist die Wirkung reduzierter GwNeubildung auf der Brückenfläche, der Abdichtung von Wegseitengräben, der Vertikaldrainage der schwebenden GwStockwerke durch die GWM und die Hangeinschnitte für die Pfeiler der Brücke berücksichtigt. Diese punktuellen Eingriffe in den Untergrund haben jeweils nur relativ kleinräumige Auswirkungen auf den Wasserhaushalt des Hangs, die aber in der Summe für den Bereich der Brückentrasse nicht zu vernachlässigen sind.

Die Ergebnisse dieser Berechnung sind in Anlage 9.2 dokumentiert. Auch darin sind die berechneten Ganglinien des GwSpiegels jeweils für den Kalibrierungszustand (blau) denen für den Endzustand (grün) gegenübergestellt.

In den hangseitigen GWM 1 + 2/14 liegen die beiden Ganglinien erneut aufeinander, d. h. es zeigt sich im oberen Hang fast kein Einfluss der Maßnahmen. Grund dafür ist wiederum das schwebende GwStockwerk, dessen Wasser erst hangabwärts in das HauptGwStockwerk abfließt, wo der GwHemmer in der ungesättigten Zone nicht mehr ausgebildet ist. Demzufolge errechnet sich in den GWM 1 + 2/11 und 1/07 eine deutliche Absenkung des GwSpiegels von ca. 2 - 3 m, weil die GwNeubildung reduziert bzw. die Versickerung von Niederschlagswasser aus den Wegseitengräben unterbunden worden ist, also in der Summe weniger Wasser in den Hang infiltriert.

6. Zusammenfassung

6.1 Beantwortung der Fragen im Anforderungsprofil MWKEL /22/

In dem Anforderungsprofil /22/ sollen in dem vorliegenden Gutachten die folgenden Fragen beantwortet bzw. die genannten Themen bearbeitet werden.

1. *„Von besonderer Bedeutung ist es, eine extreme Niederschlagssituation ortsgebunden zu definieren und als Grundlage des Gutachtens festzuhalten. Hierzu erwarten wir einen Vorschlag des Gutachters.“*

Wie im Kapitel 2.5 erläutert, zeigen langjährige Messreihen an den Stationen Bernkastel-Kues und Zeltingen übereinstimmend, dass ein Regenereignis mit einer Niederschlagsmenge von 50 - 55 mm/d und einer jährlichen Häufigkeit von 0,1 – 0,2 als bisheriger lokaler Extremwert definiert werden kann.

Da sich die Extremwerte der letzten Jahrzehnte während der Lebensdauer der Brücke durch den Klimawandel verändern können /2/ wird für den Oberflächenabfluss eine Multiplikation des o. g. Extremwerts mit dem Faktor 1,2 angenommen, was einem ungünstigsten **Niederschlagsereignis von 66 mm/d** entspricht. Vor dem Hintergrund einer GwAnreicherung des schwebenden GwStockwerks durch die Versickerung von Niederschlagswasser über die nicht ausgebauten Wegseitengräben ist dieser Wert ebenso relevant wie die ansonsten für die GwNeubildung wichtigeren längerfristigen Niederschlagsmengen.

Dafür können auf der Grundlage der langjährigen Messreihen für den ungünstigsten Fall analog als Monatswert **200 (240) mm/Monat und 450 (540) mm als Wert für das Quartalsmittel** angesetzt werden. Umgerechnet auf einen hypothetischen Dauerregen entspricht dies Tageswerten von 6,7 (8,0) mm/d und 5,0 (6,0) mm/d.

2. *„In welcher Höhe und auf welche Weise das ermittelte Schichtenwasser bei den Standsicherheitsberechnungen berücksichtigt werden muss, ist im hydrogeologischen Gutachten zu bewerten.“*

Ein Teil des Niederschlagswassers infiltriert in den Untergrund und strebt in ungesättigter (i. wes. vertikaler) Strömung der gesättigten Zone des zur Mosel entwässernden Hauptstockwerks zu. Während die vertikale Durchlässigkeit den vorliegenden Daten zufolge im Bereich der Achse 2 so hoch ist, dass sich kein "Schichtenwasser" ausbildet, konnte mit den Untersuchungen nachgewiesen werden, dass auf Bruchschollen im Hang entlang der Trasse oberhalb der GWM 2/11 gering durchlässige Horizonte vorhanden sind, auf denen bereichsweise ein "schwebendes GwStockwerk" ausgebildet ist.

Nach den Ergebnissen aus der vertiefenden hydrogeologischen Erkundung des Hangs wird davon ausgegangen, dass die Aufstauhöhe auf diesen hydraulischen Barrieren im natürlichen Zustand bis 1,6 m betragen hat. Mit den GwMessstellen sind entlang der Trasse vertikale Drainagen installiert worden, über die dieses Grundwasser zum HauptGwStockwerk abgeleitet wird, so dass der vg. Wert als zukünftig nicht mehr repräsentatives Maximum zu bewerten ist. Da die räumliche Wirkung dieser Vertikal-Drainagen, ebenso wie die Wirkung der baubedingten Eingriffe in den Untergrund im

Bereich der Pfeiler (Hangeinschnitte) zwar rechnerisch nachvollzogen, messtechnisch aber nicht erfasst werden kann, wird empfohlen, im Rahmen der geotechnischen Berechnungen im Bereich des oberen Hangs (Achse 0 - 2) trotzdem von dem ungünstigen Fall einer Einstauhöhe von 1,6 m in der ungesättigten Zone auszugehen, während das "schwebende GwStockwerk" im Bereich der Achse 2 auskeilt und die Einstauhöhen daher im unteren Hang gegen 0 gehen.

3. *„Für die tatsächlichen Grundwasserstände und Schwankungsbreiten sind fehlende Daten insbesondere im Bereich des Oberhangs zu ergänzen; sie sind über die gesamte Hanglänge gutachterlich zu bewerten.“*

Die Höhenlage des GwSpiegels im Oberhang wurde durch die zusätzlichen GwMessstellen GWM 1 + 2/14 ermittelt (Achsen 0 und 1; vgl. Schnitt **Anlage 2**, Bohrprofile **Anlage 3**). Eine Überprüfung auf dem Niveau der Mosel (Achse 3) war nicht erforderlich, da der GwSpiegel dort mit dem Pegelstand der Vorflut korrelieren muss. In der **Anlage 5** und in Tabelle 3-5 sind die im Beobachtungszeitraum gemessenen Schwankungsbreiten des GwSpiegels im HauptGwStockwerk dokumentiert.

Für eine abschließende Beurteilung der GwDynamik ist eine weitere Überwachung des GwSpiegels an den vorhandenen GWM erforderlich, die bereits vorliegenden Daten erlauben aber fundierte Schätzungen, die sich vom Endergebnis aller Voraussicht nach weder qualitativ, noch quantitativ maßgeblich unterscheiden werden. Danach ist im Bereich der Achsen 0 und 1 mit Spiegelschwankungen von maximal 5 - 7 m zu rechnen, während in dem Bereich erhöhter Durchlässigkeit um die Achse 2 geringere Schwankungen von maximal 2 - 4 m zu erwarten sind.

Auf der Grundlage der jetzt vorliegenden Daten, insbesondere der Durchlässigkeitsbeiwerte in der ungesättigten und der gesättigten Zone, sind unter Berücksichtigung der ebenfalls erhobenen Randbedingungen (Hangneigung, Bodenaufbau / -durchlässigkeit, Bewuchs) Berechnungen zum Wasserhaushalt des Moselhangs im Bereich der Brückentrasse durchgeführt worden, mit denen diese Angaben konkretisiert und Sensitivitätsbetrachtungen zur Überprüfung kritischer Lastfälle (Extremniederschläge, Feuchtperioden u. ä.) durchgeführt werden können.

4. *„Die im Mittelhang auf Grund bekannter Grundwasserstände vermuteten inhomogenen Verhältnisse bzw. separate Kluftwassersysteme sind vom Gutachter zu bewerten. Fehlende Daten (nach Angaben von Arcadis vom 09.12.2013 sind die Durchlässigkeiten nicht vollständig bekannt) sind zu ermitteln.“*

Im Rahmen der hydrogeologischen Untersuchungen wurden Durchlässigkeitsbeiwerte in der ungesättigten und der gesättigten Zone bestimmt sowie mit kontinuierlichen Messungen des GwSpiegels zur Erfassung der GwDynamik begonnen. Die Existenz lokal vorhandener schwebender GwStockwerke und das wechselnde Gefälle im Hauptstockwerk beweisen die erwartete Anisotropie des Hangs, dessen geohydraulische Eigenschaften sich jetzt quantifizieren und räumlich differenzierter beschreiben lassen. Mit dem auf dieser Grundlage ausgearbeiteten numerischen GwModell sind quantitative Aussagen zum Wasserhaushalt des Hangs möglich, die eine Überprüfung der bisherigen geologisch-geotechnischen Modellvorstellung zum Aufbau des Moselhangs ermöglichen.

5. *„In Abhängigkeit von den Ergebnissen der hydrogeologischen Untersuchungen und Standsicherheitsberechnungen sind durch den Gutachter Vorschläge für Vorsorge- und Gegenmaßnahmen, wie Drainageeinrichtungen, darzulegen.“*

Die Ergebnisse der vom Büro HG vorgelegten Messungen und Berechnungen werden vom Gutachter Geotechnik (Büro ARCADIS) hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf das Gründungskonzept überprüft.

Aus hydrogeologischer Sicht sind alle Maßnahmen vorteilhaft, die eine Versickerung von Niederschlagswasser im Umfeld der Trasse verhindern. Hier ist insbesondere die Möglichkeit der Infiltration von Niederschlagswasser über die bislang nicht ausgebauten Wegseitengräben nördlich der Trasse zu nennen. Insbesondere die Beobachtungen an der GWM 1/07 (Verdünnung, stärkere kurzfristige Spiegelschwankungen) weisen darauf hin, dass diese GwAnreicherung eine nicht zu vernachlässigende Größenordnung erreicht.

Vor diesem Hintergrund wird empfohlen, die Wegseitengräben vom Bereich des Tunnelportals bis zu dem bereits ausgebauten Abschnitt oberhalb der Kaskade mit einer vergleichbaren Abdichtung zu versehen, um die Infiltration von Niederschlagswasser auf diesem Weg zu verhindern. Die Wirkung der Maßnahme kann im Rahmen des zukünftigen GwMonitorings kontrolliert werden.

Dies gilt auch für die mit den bereits installierten GwMessstellen vorhandenen Vertikaldrainagen, die Grundwasser aus dem "schwebenden GwLeiter" zum Haupt-GwStockwerk ableiten und damit ein Leerlaufen der lokal aufgestauten Sickerwasserhorizonte ermöglichen.

Darüber hinaus ist eine dauerhafte Begrünung des Bereichs der Brückentrasse sinnvoll, um die Verdunstung auf der relevanten Fläche zu steigern und die Bildung von Sickerwasser damit zu mindern sowie oberflächennahe Abschwemmungen durch Starkniederschläge zu verhindern.

6.2 Fragen des Gutachters Geotechnik (Arcadis /21/)

Die **GwLinie entlang der Trassenachse** ist auf der Grundlage der vorliegenden Daten in dem **Profilschnitt Anlage 2** eingetragen. Daraus ist der wechselnde Aufbau des Gebirges in dem Wechsel des GwGefälles erkennbar, das gegenüber dem mittleren GwGefälle von ca. 0,2 / 20 % (201 - 101 m ü.NN = 100 m / 500 m) deutlich variiert. Während im Bereich der Achse 2 ein deutlich geringerer Gradient nachweisbar ist (ca. 152 - 150 m ü.NN = 2 m / 80 m = 0,025 / 2,5 %), tritt östlich von GWM 1/07 und westlich von GWM 2/11 ein merklich steileres Gefälle auf (zwischen den GWM 2/11 und 1/14 ca. 180 - 152 m ü.NN = 28 m / 90 m = 0,3 / 30 %).

Die bisherigen Messungen lassen für das Hauptstockwerk im oberen Hang eine Schwankebreite von maximal 5 - 7 m erwarten, in dem durchlässigeren Bereich um die Achse 2 sind geringere Schwankungen von max. 2 - 4 m plausibel.

Da das "schwebende GwStockwerk" nach heutigem Kenntnisstand keinen einheitlichen GwLeiter in einer definierten Tiefe und mit einer gleichbleibenden Mächtigkeit darstellt, kann für die **Sickerwasserströmung oberhalb der GwLinie** lediglich ein "worst case" defi-

niert werden. Diesbezüglich wird für den (bereits jetzt nicht mehr existierenden) Fall natürlicher Verhältnisse eine Aufstauhöhe von 1,6 m angenommen.

Angesichts der geringen räumlichen Ausdehnung und des dadurch geringen Speichervermögens dieses schwebenden GwStockwerks stellen die beiden Bohrungen eine Vertikaldrainage dar, durch die im Bereich des Bauwerks eine dauerhafte Druckentlastung erfolgt, die durch die Baumaßnahmen verstärkt wird. Da die räumliche Wirkung der Eingriffe messtechnisch nicht erfasst werden kann, sollte vorsorglich der o. g. ungünstigste Fall als Bemessungsgrundlage dienen.

In der folgenden Tabelle sind die maßgeblichen Größen zusammengestellt. Die große Bandbreite der jeweiligen Werte kann nur punktuell anhand konkreter Untersuchungen eingegrenzt werden, wobei die vorliegenden Aufschlussdaten entlang der Trasse eine räumliche Extrapolation für diesen engen Bereich und damit die Ausweisung von Homogenbereichen erlauben.

Aussagen abseits der erkundeten Trasse sind dagegen mit größeren Unsicherheiten behaftet, obwohl für den gesamten Hang ähnliche Verhältnisse anzunehmen sind.

6.3 Weitere relevante Erkenntnisse

Anhand der Informationen zur Tiefenlage des GwSpiegels ist zweifelsfrei davon auszugehen, dass die Wasserversorgung der Vegetation im Hangbereich allein auf das Speichervermögen der oberflächennahen Bodenschichten angewiesen ist (sog. Nutzbare Feldkapazität). Bei einem Flurabstand von >5 bis >20 m ist selbst für das "schwebende GwStockwerk" im oberen Hangbereich ein relevanter Beitrag zur Versorgung von Weinreben und anderen Pflanzen zweifelsfrei auszuschließen.

Für eine abschließende Beurteilung der GwDynamik ist eine weitere Überwachung des GwSpiegels an den vorhandenen GWM erforderlich. Die bereits vorliegenden Daten erlauben aber fundierte Schätzungen, die sich vom Endergebnis aller Voraussicht nach weder qualitativ, noch quantitativ maßgeblich unterscheiden werden.

Zur besseren Absicherung der Ergebnisse aus den vertiefenden hydrogeologischen Untersuchungen wird eine Fortführung der begonnenen Messungen an den jetzt vorhandenen GwMessstellen empfohlen, die zumindest über ein vollständiges hydrologisches Jahr andauern sollten.

Büro HG GmbH

Gießen, den 20.06.2014

Dipl.-Geol. Dr. Christoph Möbus

Dipl.-Geol. Dr. Walter Lenz